



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

INYECCIÓN DE SUELO POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE *JET* *GROUTING*

Héctor Andrés Ovando Pineda

Asesorado por la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Guatemala, julio de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INYECCIÓN DE SUELO POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE *JET*
*GROUTING***

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA
POR

HÉCTOR ANDRÉS OVANDO PINEDA

ASESORADO POR LA INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, JULIO DE 2011.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

INYECCIÓN DE SUELO POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE *JET* *GROUTING*

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil con fecha 19 de julio de 2010.


Héctor Andrés Ovando Pineda



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Héctor Andrés Ovando Pineda, titulado INYECCIÓN DE SUELO POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE JET GROUTING, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, julio de 2011.

/bbdeb.



Guatemala, 4 de Marzo de 2 011

Ingeniero José Gabriel Ordoñez Morales
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil
Área de Materiales y Construcciones Civiles
Coordinador

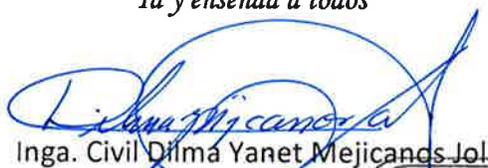
Ingeniero Ordoñez

Me dirijo a usted para informarle, que he revisado el trabajo de graduación **"INYECCIÓN DE SUELO POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE JET GROUTING"** elaborado con el estudiante universitario Héctor Andrés Ovando Pineda, quien conto con la asesoría de la suscrita.

Considerando que el trabajo desarrollado por el estudiante universitario Ovando Pineda satisface los requisitos exigidos en el reglamento de graduación, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,

"Id y enseñad a todos"



Inga. Civil Dilma Yanet Mejicanos Jol

Col. 5947
ASESORA

Dilma Y. Mejicanos Jol
Ingeniera Civil
Col. 5947



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
11 de mayo de 2011

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos
Guatemala

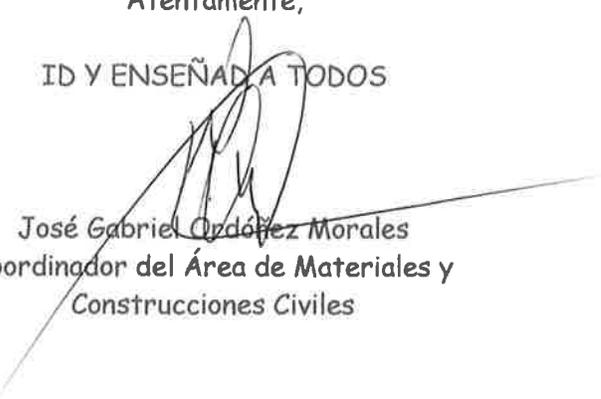
Estimado Ing. Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación INYECCIÓN DE SUELO POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE JET GROUTING, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Héctor Andrés Ovando Pineda, quien contó con la asesoría de la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante Ovando Pineda, satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

ID Y ENSEÑADA TODOS


José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **INYECCIÓN DE SUELO POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE JET GROUTING**, presentado por el estudiante universitario **Héctor Andrés Ovando Pineda**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, 22 de julio de 2011

/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por darme la vida, sabiduría e inteligencia para culminar mi carrera con éxito.
Mis padres	Por confiar en mí y apoyarme durante todos estos años, siendo ésta una recompensa a sus sacrificios.
Mi hermano	Por su aprecio y cariño.
Mi novia	Por estar a mi lado todo el tiempo y apoyarme.
Inga. Dilma Mejicanos	Por su valiosa colaboración en este trabajo de graduación.
Ing. Carlos Gordillo	Por la confianza y el apoyo brindado durante la carrera.
Mis amigos	Por los momentos compartidos y el apoyo brindado.
La Facultad de Ingeniería	Por brindarme la formación para culminar mi carrera.
La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudio que me permitió formarme como profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. INYECCIÓN DE SUELO	
1.1. Definición.....	1
1.2. Tipos de <i>Jet Grouting</i>	2
1.2.1. <i>Jet Grouting</i>	2
1.2.1.1. Aplicaciones.....	3
1.2.2. Inyección por fractura hidráulica.....	3
1.2.2.1. Procedimiento.....	3
1.2.2.2. Mejoramiento en la resistencia.....	4
1.2.3. Inyección por consolidación.....	4
1.2.3.1. Ventajas.....	5
1.2.4. Elementos que componen el suelo enclavado.....	6
1.3. Criterios de inyectabilidad.....	8
1.4. Resistencia al corte.....	10
2. DETERMINACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS DE PERFORACIÓN	
2.1. Equipo de perforación de cielo abierto.....	11
2.1.1. Perforadora <i>Track Drill</i>	11
2.1.2. Perforadora a roto percusión.....	12
2.1.3. Perforadora de piso y pierna.....	12

2.2.	Equipo de perforación subterránea	12
3.	PRESIÓN DE INYECTADO	
3.1.	Contrapresión.....	15
3.2.	Presión de inyección de las lechadas inestables	16
4.	PROPORCIÓN DE LA MEZCLA DE INYECTADO	
4.1.	Medida de la rigidez	19
4.2.	Medida del agua rezumada.....	20
4.3.	Morteros inestables	21
4.3.1.	Morteros de cemento	21
4.4.	Morteros estables.....	23
4.4.1.	Mortero de cemento-bentonita	23
4.4.2.	Mortero de cemento-silicato 1:1, 1,5:1, 2:1	25
4.4.3.	Mortero de cemento-bentonita-silicato	26
4.4.4.	Mortero de cemento activo 2:1, 2,3:1	26
4.4.5.	Mortero de fraguado rápido.....	28
4.4.6.	Mortero de cemento-cenizas volátiles.....	29
4.4.7.	Mortero de cemento-arcilla.....	30
4.4.8.	Mortero de cemento-arcilla-arena	31
5.	DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL <i>JET GROUTING</i>	
5.1.	Definición	33
5.2.	Clasificación.....	36
5.2.1.	Inyección por intrusión	36
5.2.2.	Inyección por desplazamiento.....	36
5.2.3.	Inyección por fracturación	37
6.	PROCESO CONSTRUCTIVO, EQUIPO Y TIPOS DE <i>JET GROUTING</i>	
6.1.	Proceso constructivo.....	39
6.1.1.	Instalación de maquinaria	39

6.1.2.	Ejecución de la perforación	39
6.1.3.	Inyección del chorro a alta velocidad.....	41
6.1.4.	<i>Pre-Jet</i>	42
6.2.	Equipo utilizado en la ejecución del <i>Jet Grouting</i>	43
6.2.1.	Máquina perforadora	44
6.2.2.	Tubería de perforación	45
6.2.3.	Herramienta de corte.....	46
6.2.4.	Toberas de inyección.....	48
6.2.5.	Bombas para fluidos.....	49
6.2.6.	Planta de fabricación de fluidos.....	50
6.3.	Tipos de <i>Jet Grouting</i>	51
6.3.1.	<i>Jet Grouting</i> simple.....	55
6.3.2.	<i>Jet Grouting</i> doble fluido.....	56
6.3.3.	<i>Jet Grouting</i> triple fluido.....	57
6.4.	Ejemplos de aplicación del <i>Jet Grouting</i> en Guatemala	59
6.4.1.	Muro Banco Empresarial, Z.9, Guatemala.....	59
6.4.2.	Muro anclado para la estabilización de talud en Cuesta Villalobos, km 12 salida al Pacífico, Guatemala	61
6.4.3.	Estabilización de muros para sótanos de edificio, avenida Hincapié, Z.13, Guatemala	64
7.	PARÁMETROS DEL <i>JET GROUTING</i> Y SU INSIDENCIA EN EL PRODUCTO FINAL	
7.1.	Los parámetros y su influencia.....	67
7.1.1.	La presión de inyección	68
7.1.2.	Caudal de agente cementante y/o fluido de erosión.....	71
7.1.3.	Velocidad de ascenso de la tubería.....	73
7.2.	Producto y resultado que se puede obtener del <i>Jet Grouting</i>	74

8.	CONTROL DE CALIDAD Y ESPECIFICACIONES ASTM APLICABLES AL <i>JET GROUTING</i>	
8.1.	Control de calidad durante la ejecución	79
8.1.1.	Instrumentación y monitoreo para la fase de perforación	81
8.1.2.	Monitoreo de la fase de inyección o <i>Jet Grouting</i>	82
8.2.	Control de calidad post-ejecución	83
8.3.	Especificaciones ASTM aplicables al <i>Jet Grouting</i>	84
9.	RESULTADOS OBTENIDOS	85
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	89
	CONCLUSIONES.....	93
	RECOMENDACIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	97
	APÉNDICES.....	99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Criterio granulométrico mediante ensayos de penetración de morteros en suelos con diferentes granulometrías	9
2.	Permeabilidades de morteros de inyección.....	10
3.	Ascensión de agua debido a la sedimentación de las partículas de un mortero.....	21
4.	Influencia del porcentaje de bentonita en la viscosidad de morteros.....	24
5.	Influencia del porcentaje de bentonita en el límite de resistencia al corte de morteros	24
6.	Rangos de granulometría para la aplicación de inyección de cemento.....	34
7.	Rango de granulometrías para la aplicación de inyecciones químicas.....	35
8.	Rangos de granulometrías para la aplicación del <i>Jet Grouting</i>	35
9.	Tipos de inyección para mejoramiento de suelo	37
10.	Perforación hasta la cota deseada.....	40
11.	Inyección con chorro de lechada a alta velocidad.....	42
12.	Erosión de suelos compactos	43
13.	Equipo utilizado en el <i>Jet Grouting</i>	44
14.	Máquina perforadora.....	45
15.	Trialetas cortantes.....	47
16.	Triconos de perforación.....	47
17.	Detalle de tobera.....	48
18.	Bomba de inyección.....	49
19.	Relación de caudal-presión para distintas bombas de inyección	50

20.	Mezcladora y tanque de almacenamiento	51
21.	<i>Jet Grouting</i> monofluido.....	56
22.	<i>Jet Grouting</i> doble fluido con chorros independientes	57
23.	<i>Jet Grouting</i> triple fluido.....	58
24.	Vista de la perforación de los anclajes del muro del Banco Empresarial.....	60
25.	Vista aérea del muro terminado del Banco Empresarial	61
26.	Vista durante la estabilización de talud en Cuesta Villalobos	62
27.	Vistas del muro de la Cuesta Villalobos terminado con una extensión de 100 metros de longitud	63
28.	Vista de muro con <i>Soil Nailing</i>	65
29.	Detalle de anclajes activos, donde se aplica el <i>Jet Grouting</i>	65
30.	Detalle de muro terminado (aplicación de <i>Jet Grouting</i>)	66
31.	Relación de energía específica de <i>Jet Grouting</i> con diámetros de columnas de suelo tratado.....	68
32.	Relación de presión de inyección versus diámetro de columnas de suelo-cemento	69
33.	Disminución de la presión del fluido de erosión.....	70
34.	Relación de consumo de cemento y densidad de la lechada con el diámetro y resistencia de columnas de suelo-cemento	72
35.	Variación de la resistencia del suelo-cemento con respecto a su edad y según distintos tipos de suelo.....	77
36.	Sistemas de monitoreo en las fases de perforación y de inyección a chorro.....	80
37.	Inclinómetro electrónico.....	82
38.	Testigos de una columna de <i>Jet Grouting</i>	84
39.	Gráfica de resultados de ensayos a compresión	90
40.	Gráfica de resultados de ensayos a tensión.....	91

TABLAS

I.	Variación de la viscosidad según los porcentajes de cemento y ceniza	30
II.	Parámetros comunes en proyectos de <i>Jet Grouting</i>	54
III.	Rangos de resistencia a la compresión no confiada de la masa de suelo-cemento obtenida con el <i>Jet Grouting</i>	77
IV.	Variación de la resistencia a la compresión no confinada según el tipo de <i>Jet Grouting</i> y suelo	76
V.	Diámetros de columnas de suelo-cemento producidos por los tipos de <i>Jet Grouting</i> según el material del terreno	78
VI.	Resistencia en mortero cemento activo 2:1	85
VII.	Resistencia en mortero agua-cemento	85
VIII.	Resistencia en mortero cemento activo 2,3:1	86
IX.	Resistencia en mortero cemento-arcilla-arena	86
X.	Resistencia en mortero cemento-arcilla	86
XI.	Resistencia en mortero cemento-silicato 2:1	87
XII.	Resistencia en mortero cemento-ceniza	87
XIII.	Resistencia en mortero cemento-silicato 1:1	87
XIV.	Resistencia en mortero cemento-silicato 1,5:1	88
XV.	Resistencia en mortero cemento-bentonita-silicato	88

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Φ	Diámetro de tubería
c'	Cohesión aparente
E	Coefficiente de elasticidad
e_1	Índice de poros
F	Fuerza
g_w	Peso específico del agua
h_w	Diferencia de cotas entre el nivel freático y el punto de ubicación del manguito
l/m	Coefficiente de Poisson
ρ	Peso específico
p	Presión
p_e	Presión estática
Q	Caudal
r	Radio
s'_v	Presión efectiva vertical
ν	Coefficiente de viscosidad
W	Hundimiento

GLOSARIO

Bentonita	Es un tipo de arcilla, de límite líquido muy alto, utilizada para que la mezcla no pierda estabilidad o consistencia debido al exceso de agua.
Consolidación	Es un proceso de reducción de volumen de los suelos finos cohesivos (arcillas y limos plásticos), provocado por la actuación de solicitaciones (cargas) sobre su masa y que ocurre en el transcurso de un tiempo generalmente largo.
Desagregación	Es causada por el movimiento intenso del suelo.
Energía de erosión	Es la energía que permite la introducción de la lechada de inyección en el suelo.
Estabilización	Es el proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar cargas y las condiciones de clima más severas.

Estructura del suelo	Es el estado del mismo, que resulta de la granulometría de los elementos que lo componen y del modo como se hallan éstos.
Inyección	Es un procedimientos que se aplica al subsuelo, mediante el cual se introduce en los poros o fisuras del medio a tratar un producto líquido (lechada), que se solidifica adquiriendo una resistencia determinada a través del tiempo.
Lechada	Mortero que contiene una gran cantidad de agua que le da la consistencia de un líquido viscoso y permite ser utilizado para rellenar cavidades y juntas entre materiales adyacentes.
Permeabilidad	Es la capacidad que tiene el suelo para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna.
Presión de inyección	Es la fuerza que tiende a abrir una fisura en el suelo, por medio de la inyección de una lechada.
Recalce	Es la acción y efecto de reparar los cimientos de una edificación existente.

Resistencia al corte	Propiedad de un terreno que le permite resistir el desplazamiento entre las partículas del mismo al ser sometido a una fuerza externa.
Suelo	Es un medio poroso, biológicamente activo y estructurado, desarrollado en la superficie emergida de la Tierra.
Tricono	Dispositivo que se utiliza para perforación, su función es romper, cortar y moler las formaciones rocosas durante la perforación.
Viscosidad	Es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales.

RESUMEN

La técnica del *Jet Grouting* como un método de mejoramiento de las propiedades del terreno fue creada y desarrollada en Japón alrededor de los años 70 y actualmente se encuentra bajo constante innovación. Esta técnica se clasifica como un método de inyección de una lechada de agente cementante que mejora las características del suelo, y que no depende de la granulometría del terreno para su aplicación. La diferencia, entre el *Jet Grouting* y los otros métodos de inyección, es que utiliza un chorro de alta velocidad como energía de erosión para romper la estructura del suelo, al mismo tiempo que inyecta y mezcla una lechada con el suelo, a fin de crear una nueva masa con mejores propiedades físicas.

Actualmente existen tres tipos de *Jet Grouting*, agrupados en: un sistema de fluido único, en el que se utiliza únicamente un líquido para corte y relleno del suelo y cuando involucra más de un fluido en su proceso, están el doble fluido y el triple fluido.

Para su ejecución, independientemente de los tipos de *Jet Grouting*, se requiere de una máquina perforadora, tubería de perforación especial, equipada en su punta con toberas de inyección y bombas de alta presión que deben ser suministradas constantemente con grandes volúmenes de lechada de agente cementante.

El resultado que se obtiene de la aplicación del *Jet Grouting* es un mejoramiento de la capacidad del suelo para soportar carga, así mismo, disminuye o elimina problemas de asentamiento por consolidación del terreno. También se utiliza para transferir las cargas de la cimentación de una edificación a estratos de suelo más profundos o competentes.

Todas éstas y otras ventajas que conlleva el *Jet Grouting*, hacen que su aplicación sea indicada para solucionar muchos problemas de recalce.

El desarrollo tecnológico de distintas ciencias ha propiciado el desarrollo de sistemas de control de calidad que registran y evalúan las construcciones del *Jet Grouting* antes, durante y después de la ejecución de la inyección del suelo, a fin de asegurar el éxito de su aplicación.

OBJETIVOS

General

Considerar los aspectos de inyección de suelo por medio de la técnica de *Jet Grouting*, a efecto de formular una propuesta que se puede adaptar a las condiciones y realidad de Guatemala.

Específicos

1. Establecer por qué se produce la inestabilidad en los taludes.
2. Conocer el procedimiento de inyección de suelo.
3. Proponer los beneficios de la técnica del *Jet Grouting*, como una buena técnica para la inyección de suelos.
4. Describir los tipos de *Jet Grouting* que existen.
5. Presentar el proceso constructivo y mostrar las respectivas aplicaciones, ventajas y desventajas de las técnicas de construcción expuestas.
6. Fomentar el conocimiento y utilización de estas nuevas técnicas de construcción en las obras civiles realizadas dentro del territorio nacional.

INTRODUCCIÓN

El *Jet Grouting* se ha venido desarrollando para mejorar propiedades del suelo que son de interés en la Ingeniería Civil. Esta técnica utiliza un chorro de alta velocidad como fuente de energía de erosión para romper la estructura del suelo y para rellenar los vacíos creados con una mezcla de suelo y agente cementante.

Pero, ¿De qué se trata este método? ¿Cómo funciona, qué beneficios o ventajas supone esta nueva técnica frente a los métodos clásicos de mejoramiento del terreno? ¿Tiene alguna limitante el *Jet Grouting* o bajo qué condiciones de suelo y/o situaciones se puede aplicar? ¿Cuáles son los resultados que se obtienen con el *Jet Grouting*?

La finalidad del presente trabajo es dar respuesta a cada una de esta interrogantes y explicar la técnica para llegar así a concluir si la afirmación de que el *Jet Grouting* es aplicable como una solución de casos de recalce en estructuras es verdadera o no. Un objetivo secundario de este trabajo es dar a conocer la técnica del *Jet Grouting* en el medio de la Ingeniería Civil de Guatemala como una solución geotécnica y un método de recalce de estructuras.

El *Jet Grouting* depende tanto del tipo y propiedades del suelo que se trata, como de la energía que se le imprime al sistema. Por esta razón es que los suelos arcillosos y cohesivos sean los que menor respuesta al tratamiento tienen y los suelos que requieren de mayor energía de *jet*, son más propensos a la erosión y poseen bajas propiedades de resistencia de carga.

Mientras que los suelos granulares, tipo arena y grava, son los suelos más adecuados a ser tratados mediante el *Jet Grouting* por sus excelentes propiedades. Esto quiere decir, que puede aplicarse a prácticamente casi todo tipo de suelo, lo que hace este método una solución técnica muy atractiva, además de brindar muchas otras ventajas.

1. INYECCIÓN DE SUELOS

1.1. Definición

Las inyecciones son procedimientos que se aplican al subsuelo, mediante los cuales se introduce en los poros o fisuras del medio a tratar un producto líquido (mortero o lechada), que se solidifica adquiriendo una resistencia determinada a través del tiempo.

El objetivo principal de este tratamiento es el de impermeabilizar o fortificar los macizos porosos, rocas fisuradas o fundaciones defectuosas, incrementando de este modo las propiedades mecánicas de los mismos.

Debido a la heterogeneidad y comportamiento del terreno, existen diferentes métodos de inyección:

- Inyección por reemplazo (*Jet Grouting*)
- Inyección por impregnación y fractura (*Fracture Grouting*)
- Inyección por consolidación (*Compaction Grouting*)
- Inyección de lechadas de cemento-bentonita y/o aditivos plastificantes y aceleradores de fraguado. (*Chemical / Cement Grouting*)

Cada método se diferencia principalmente en la presión con la que se inyecta el material (métodos de alta o baja presión).

1.2. Tipos de inyección

1.2.1. *Jet Grouting*

El *Jet Grouting*, es un proceso que consiste en la desagregación del suelo (o roca poco compacta), mezclándolo, y parcialmente sustituyéndolo, por un agente cementante (normalmente cemento). La desagregación se consigue mediante un fluido con alta energía, que puede incluir el propio agente cementante.

En la inyección por *Jet Grouting* se pueden aplicar los siguientes sistemas:

- Sistema de fluido único: Cuando la desagregación y cementación del suelo se consigue con un chorro de un único fluido a alta presión que, en general, es una lechada de cemento.
- Sistema de doble fluido (aire): Cuando la desagregación y cementación del suelo se realiza por un fluido, normalmente lechada de cemento, asistido por un chorro de aire a presión que actúa como segundo fluido.
- Sistema de doble fluido (agua): Cuando la desagregación del suelo se obtiene por un chorro de agua a alta presión, utilizando como segundo fluido una lechada para conseguir la cementación del suelo.
- Sistema de triple fluido: Con este sistema la desagregación del suelo se consigue por un chorro de agua a alta presión, asistido por un chorro de aire a presión, utilizando como tercer fluido una lechada para conseguir la cementación del suelo.

1.2.1.1. Aplicaciones

- Consolidaciones de terrenos para excavación de túneles, pozos, ejecución de taludes, etc
- Recimentación de edificios y estructuras en general
- Muros de contención
- Pantallas impermeables
- Tapones de fondo en recintos estancos

1.2.2. Inyección por fracturación hidráulica

Consiste en la inyección del terreno mediante su fracturación por lechada, con una presión por encima de su resistencia a tracción y de su presión de confinamiento.

Esta técnica puede aplicarse a cualquier tipo de suelo y roca blanda (desde suelos granulares, gruesos a arcillas de alta plasticidad y desde rocas ígneas descompuestas hasta margas arcillosas).

1.2.2.1. Procedimiento

Se inyecta lechada en las fisuras naturales del suelo, o produce una serie de fracturas hidráulicas que se rellenan con mortero y rodean a los fragmentos (clastos); o simplemente se extienden como venas cementicias que al fraguar producen un conjunto suelo-fractura muy resistente.

Puede utilizarse la teoría de Estado Crítico, para estimar las mejoras que experimentan la cohesión aparente c' del terreno y su resistencia al esfuerzo cortante sin drenaje.

1.2.2.2. Mejoramiento en la resistencia

La inyección por fracturación hidráulica produce un efecto de sobreconsolidación sobre un punto del terreno.

Este inicialmente tiene un índice de poros e_1 , y una presión efectiva vertical s'_v , la inyección por fracturación reduce el índice de poros, hasta un valor e_2 y en el manguito se alcanza una presión de cierre p_e (presión estática con el manguito abierto y caudal de inyección casi nulo).

La presión p , en la boca del taladro correspondiente a dicho valor de cierre en el manguito será:

$$p = p_e + g_w h_w$$

Siendo:

p_e = presión estática

g_w = peso específico del agua

h_w = diferencia de cotas entre el nivel freático y el punto de ubicación del manguito.

1.2.3. Inyección por consolidación

Es una inyección por desplazamiento del suelo, sin penetración en absoluto. Una mezcla muy firme expande una cavidad originada por un taladro y a su vez densifica el suelo circundante. Se aplica a la restauración de la capacidad de carga en suelos sueltos o compresibles.

La inyección por compactación ha sido utilizada en numerosos proyectos, para remediar la densificación de los suelos de la fundación antes de la construcción y para prevenir asentamientos en la ejecución de túneles, a través de suelos blandos, mediante la inyección de un mortero de suelo-cemento muy firme para desplazar y compactar el suelo. El control de la consistencia de la lechada es esencial para el éxito de las operaciones.

Una mezcla de inyecciones por compactación puede asimilarse en su viscosidad a una pasta dentífrica, lo que requiere de bombas de baja velocidad y alta presión de inyección.

1.2.3.1. Ventajas

- Controlada y precisa colocación
- Previsible grado de mejora
- Altas tasas de producción
- Programa de Lechadas secuenciados a las operaciones en el sitio
- Análisis coste-efectiva; puede ser implementadas cuando monitorea por encima de una solución pre - valor determinado
- Re-compactación de los suelos dentro de cercanías del problema en lugar de la espera de llegar a un arreglo estructura de bases adyacentes
- Todas las tuberías de lechadas pueden generalmente instaladas fuera de la construcción
- No a las vibraciones perjudiciales a estructuras vecinas / utilidades
- Mínima perturbación

1.2.4. Elementos que componen el suelo enclavado

a) Inclusiones

Las inclusiones, son elementos cortos o largos que se incrustan o colocan en el suelo formando retículas, estabilizando y reforzando el suelo. Las inclusiones en el suelo enclavado trabajan como refuerzo y la carga es transmitida a todo lo largo de la inclusión.

Las inclusiones de acero reforzado se pueden clasificar como:

- Inclusiones clavadas
- Inclusiones llenadas con lechada
- *Jet gróate nails*
- Inclusiones encápsuladas protegidas contra la corrosión.

b) Cubierta o revestimiento

La función del revestimiento, es asegurar la estabilidad local del suelo entre los refuerzos, limitar la descompresión inmediata, después de la excavación y proteger el suelo retenido en su superficie de la erosión y los efectos del intemperismo. El tipo de cubierta que se utiliza, depende en mayor parte de los requerimientos estéticos de la estructura ya que esta será la única parte de la estructura que quedará visible.

Dependiendo de la aplicación las siguientes cubiertas han sido utilizadas:

- Malla de alambre soldado
- Concreto lanzado
- Paneles prefabricados

c) Cabeza del *Nailing*

La cabeza del *Soil Nailing*, la integran tres componentes principales, la platina, la tuerca y la roldana. La platina es fabricada de acero grado 36 (ASTM A 36) y es generalmente cuadrada de 200 a 250 mm de largo por 19 mm de grosor. La función de la platina, es la de distribuir la fuerza al final del *Nailing* durante el procedimiento del concreto lanzado y contrarrestar las fuerzas del talud.

La platina contiene un agujero central en donde se coloca la barra de acero. La roldana es luego insertada en la barra de acero la cual es asegurada por medio de una tuerca hexagonal. La roldana y la tuerca son fabricadas con acero consistente con la de la barra de acero por lo tanto, generalmente es grado 60. Las tuercas son ajustadas por medio de una llave de calibración.

d) Inyección

La inyección para *Soil Nailing*, es comúnmente una mezcla de cemento con agua, la cual llena el espacio anular entre la barra del *Nailing* y el suelo que lo rodea. Los tipos de cementos que se puede utilizar son el tipo I, II, III o V de acuerdo a la norma ASTM C 150.

La relación entre agua/cemento para la inyección en el *Soil Nailing*, varía entre 0,4 y 0,5, en algunos casos se pueden utilizar una mezcla más densa con un slump de 30 mm debido a que el *Nailing* se encuentra en un suelo altamente permeable o roca altamente fracturada. Ocasionalmente una mezcla muy densa puede ocasionar dificultades con la instalación de los centralizadores y en estos casos la mezcla por si sola puede proveer suficiente soporte para centralizar la barra de acero.

Las características de la mezcla para la inyección suele ser de alta influencia para un buen *Soil Nailing*. Se debe de utilizar una mezcla que logre alcanzar como mínimo a los 28 días una resistencia a la compresión de 3 000 psi. La mezcla es bombeada poco después de ser colocada la barra de acero para reducir el riesgo de derrumbes internos en el agujero.

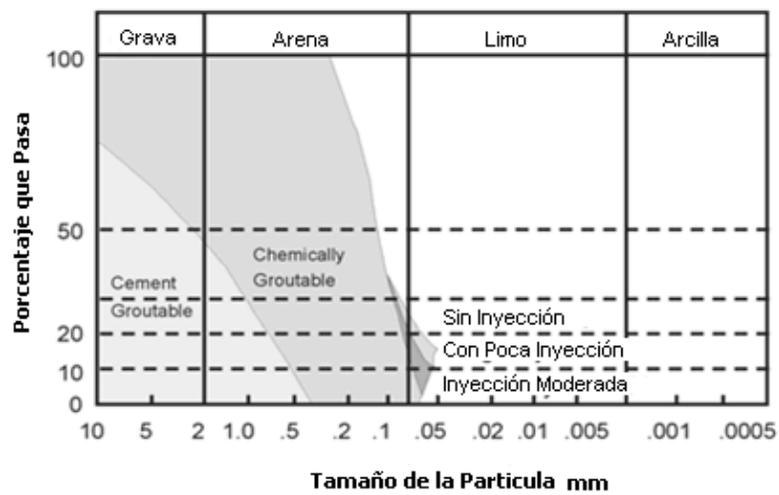
1.3. Criterios de inyectabilidad

Para precisar el tipo de lechada a inyectar, es necesario determinar la relación existente entre las dimensiones de los granos del mortero de inyección y del esqueleto del suelo. Esto queda definido por parámetros geotécnicos del suelo tales como:

- Permeabilidad
- Estratigrafía del suelo
- Existencia de napa freática
- Porosidad del suelo
- Granulometría

Criterio granulométrico: mediante ensayos de penetración de morteros en suelos con diferentes granulometrías se han obtenido los siguientes resultados:

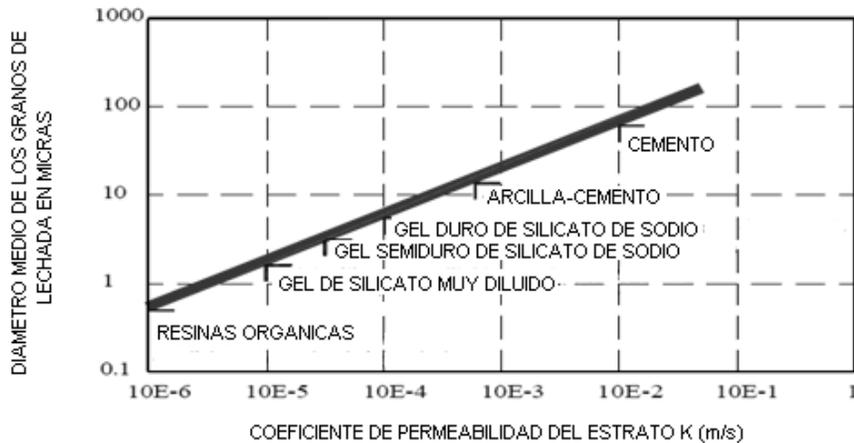
Figura 1. **Criterio granulométrico mediante ensayos de penetración de morteros en suelos con diferentes granulometrías**



Fuente: Raymond W. Henn, Guía práctica del *Jet Grouting*, p. 174.

Criterio de permeabilidad: consiste en comparar las permeabilidades del mortero de inyección y del esqueleto de suelo.

Figura 2. **Permeabilidades de morteros de inyección**



Fuente: Raymond W. Henn, Guía práctica del *Jet Grouting*, p. 180.

1.4. Resistencia al corte

Todos los tipos de *grout* mostrados anteriormente, presentan baja resistencia al corte por sí solos. Sin embargo, al combinarlos con los granos de suelo es posible incrementar la resistencia al corte de un suelo estabilizado.

Esto se debe a que una vez que el *grout* comienza a solidificarse, se generan fuerzas capilares a nivel de los granos, densificando el suelo y disminuyendo la cantidad de vacíos.

Es por este motivo es que suelos bien graduados, tienen mayor resistencia al corte que los suelos pobremente graduados. Por lo que las inyecciones se utilizan principalmente en suelos granulares, ya que el material de relleno agrega cohesión al suelo. Esto hace que la resistencia al corte de un suelo estabilizado aumente y a la vez se gane impermeabilidad.

2. DETERMINACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS DE PERFORACIÓN

2.1. Equipo de perforación a cielo abierto

Cuando la perforación se realiza a cielo abierto, en donde las características de acceso y topografía lo permiten, por lo regular el equipo que se utiliza puede ser el que se describe a continuación (haciendo la salvedad de que pueda existir otro equipo más sofisticado, para trabajos especiales).

2.1.1. Perforadora *Track Drill*

Este es un equipo de perforación que viene montado sobre orugas y autopropulsado, lo cual le permite facilidad de emplazamiento y firmeza, aspectos básicos para el rendimiento de una perforación. Se usa básicamente para perforaciones a cielo abierto, aunque cuando una galería o excavación subterránea lo permite, también es común su uso.

Este equipo es accionado por aire comprimido, por lo que para su funcionamiento se necesita de un compresor. Con este tipo de perforaciones no es posible la extracción de muestras inalteradas.

2.1.2. Perforadora a roto percusión

Este es el tipo de equipo de perforación más comúnmente usado, tanto en excavaciones a cielo abierto como subterráneas, ya que existe en variedad de tamaños y viene con mecanismos accionados por diesel, por lo cual su funcionamiento es bastante económico y puede obtenerse muestras inalteradas del terreno cuando se necesita; aparte de tener cabeza pivotal que permite obtener perforaciones en distintas inclinaciones.

2.1.3. Perforadora de piso y pierna

Este equipo se utiliza básicamente en túneles y cuando la perforación es muy profunda y viene accionado con aire comprimido.

2.2. Equipo de perforación subterránea

Dependiendo de la amplitud de la excavación o conducto subterráneo podrá adoptarse, para hacer las perforaciones, el mismo equipo mencionado anteriormente o buscar uno que se acomode al tamaño de la sección del conducto o galería subterránea.

Por lo regular, este tipo de perforaciones se realiza como etapa previa a la impermeabilización; de un tanque subterráneo de gran capacidad, una casa de máquinas de una hidroeléctrica, en los metros que se construyen en varias ciudades de Latinoamérica, etc.

Sin embargo, aparte del equipo antes mencionado, puede enumerarse otra clase de máquinas perforadoras que existen en variedad de tamaños y que ejecutan el mismo trabajo.

Es importante por lo tanto estudiar cuidadosamente las condiciones del trabajo, para adoptar un equipo que permita hacer las perforaciones adecuadamente.

Por ejemplo, en un túnel, el equipo tradicional que se usa para perforaciones de inyección puede ser: perforadoras neumáticas de pierna o bien una máquina a rotopercusión que se adapte a la sección.

3. PRESIÓN DE INYECTADO

3.1. Contrapresión

La fuerza tiende a abrir una fisura, se obtiene suponiendo que la presión medida en el taladro a la altura de la fisura, se ejerce sobre un círculo cuyo radio es tres o cuatro veces más pequeño que el radio de acción de la inyección. Esto es cierto si hay circulación en la fisura; salvo casos especiales, esto tiene lugar siempre durante la inyección de morteros.

Esto es importante conocer las contrapresiones o presiones de levantamiento a distintas profundidades y de acuerdo a las características del medio inyectable, ya que esto puede evitar una fracturación del terreno que se inyecta.

$$W = \frac{2F}{\pi} \frac{l - \left(\frac{l}{m}\right)^2}{rE}$$

Donde:

W = hundimiento

F = fuerza

l/m = coeficiente de Poisson

r = radio de acción de la inyección

E = coeficiente de elasticidad

3.2. Presión de inyección de las lechadas inestables

Se considera una fisura de abertura única e inyección, con un caudal Q y una presión P ; siendo prácticamente un fluido newtoniano, el movimiento o circulación del mortero en la fisura está determinado por la relación:

$$P = \frac{6\nu Q}{e^3} \ln \frac{R}{r_0}$$

Donde:

R = distancia a P (cm)

e = abertura de la fisura (mm)

r_0 = radio del taladro (mm)

Q = caudal (l/s)

ν = coeficiente de viscosidad de un fluido newtoniano (poises).

La fórmula anterior solo dice lo que sucede al inicio mismo de la inyección, pero también es importante conocer lo que realmente pasa durante la inyección, cuando las grietas están casi totalmente rellenas de mortero y que no exista por encima de éste más que un ligero paso de abertura e_0 ; la fórmula anterior se transforma en:

$$P = \frac{6\nu Q}{e_0^3} * \frac{R}{r_0}$$

Donde:

R = distancia a P (cm)

e_0 = abertura de la fisura (mm)

r_0 = radio del taladro (mm)

Q = caudal (l/s)

ν = coeficiente de viscosidad de un fluido newtoniano (poises)

P = presión

4. PROPORCIONAMIENTO DE LA MEZCLA DE INYECTADO

4.1. Medida de la rigidez

Aparte de los viscosímetros de cilindros coaxiales y el viscosímetro de *Stormer* que permite determinar la rigidez de un mortero en el laboratorio también está el rigidímetro de Boucart-Florentin-Romanosky, que es un aparato bastante sencillo que utiliza un cuerpo cilíndrico, hueco, tarado, en el que puede medirse la profundidad de asiento o hundimiento del mortero.

El resultado, hace intervenir la densidad del mortero que debe conocerse con precisión. También se ha comprobado que utilizando morteros para los que la probeta se hunde entre 7 y 9 centímetros la pérdida de carga es de alrededor de 5 kg/cm^2 durante la circulación en un tubo de $\Phi 1''$ y de 100 m de longitud.

La medida de la rigidez después del fraguado de la lechada hace de dos maneras diferentes:

- Para grandes rigideces obtenidas con la mezcla del cemento-arcilla se confeccionan probetas cúbicas o cilíndricas que luego se rompen con una prensa en el laboratorio, y el valor de la resistencia a compresión simple constituye una medida de la rigidez.

- Cuando la rigidez es muy pequeña, como sucede en los geles, se utiliza una pequeña caja de corte análogo a la de Casagrande o, más sencillamente un medidor de la hendidura que se produce al comienzo de la rotación rápida de la manivela y que se toma como valor de la rigidez.

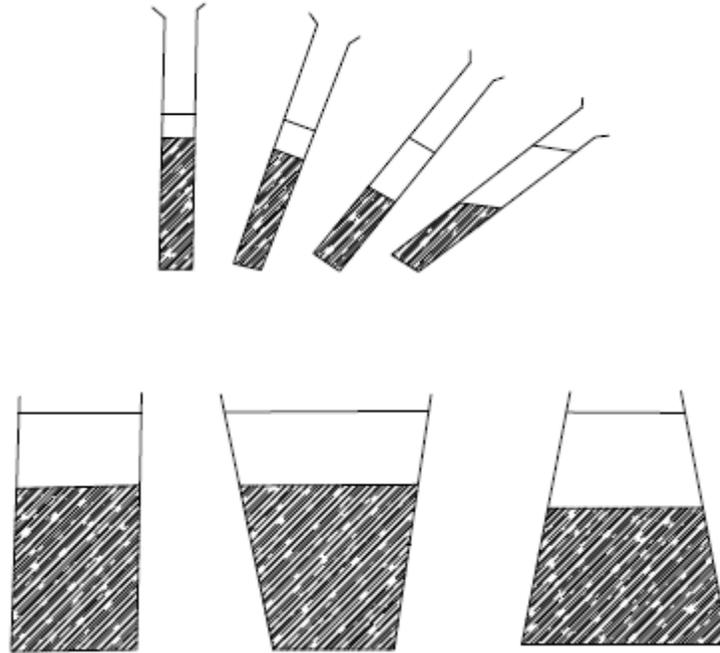
4.2. Medida del agua rezumada

Se designa por rezumo a la ascensión de agua que se produce en la superficie de una suspensión, después de la sedimentación de sus partículas.

Con morteros espesos o muy viscosos puede hacerse el ensayo llenando un recipiente cualquiera de este mortero. De vez en cuando se inclina el recipiente para eliminar el agua que excola y se pesa.

Con morteros fluidos, no conviene este procedimiento, porque existe el riesgo de eliminar parte del mortero con el agua. En este caso se llena una probeta de un litro, por ejemplo, y se anota la altura del agua decantada en un tiempo determinado. La superficie de separación agua mortero es generalmente muy elevada.

Figura 3. **Ascensión de agua debido a la sedimentación de las partículas de un mortero**



Fuente: Ana M. Sagastume, Inyección de Suelos, p. 28.

4.3. Morteros inestables

4.3.1. Morteros de cemento

El mortero habitual de cemento, es el prototipo de mortero inestable, con la condición de que el cemento este suficientemente diluido.

Si el cemento utilizado, es una suspensión de fraguado rápido y tiene un molido fino éste detendrá la sedimentación. El residuo sólido será de una

densidad débil y por consiguiente, de baja resistencia, ya que, para un cemento dado, ésta es proporcional a la densidad.

Son muchos los factores que intervienen en la calidad y trabajabilidad de un mortero y debe prestarse atención a todos, como componentes íntegros de la suspensión.

La edad del cemento que se utiliza en la preparación de la lechada, es significativamente importante, porque los componentes del cemento con la edad del mismo se van volviendo más lentas sus reacciones y por consiguiente las mezclas tienen un comportamiento distinto. Cuando se han utilizado cementos que tienen un tiempo de almacenamiento mayor al especificado, en la elaboración de lechadas, se han observado una decantación mucho mayor y una característica arenosa de la mezcla.

La relación agua-cemento, es otro factor muy importante ya que como hemos visto, cuando la viscosidad de la mezcla es mayor las decantaciones son menores. Aunque la relación agua-cemento, para inyecciones tradicionales se mantiene dentro de límites muy poco variables, algunas veces es necesario ensayar con mezclas fluidas, debido a la penetración requerida en los medio inyectados.

Cuando las absorciones son grandes, puede reducirse el gasto correspondiente a los productos inyectados, agregando a las mezclas un polvo inerte de arena fina.

Esta modificación no altera la inestabilidad del mortero si la granulometría del producto inerte es comparable con la del cemento. A estos tipos de morteros se les denomina “morteros rebajados” y su inyección se efectúa bajo el mismo procedimiento de los morteros con cementos puros.

4.4. Morteros estables

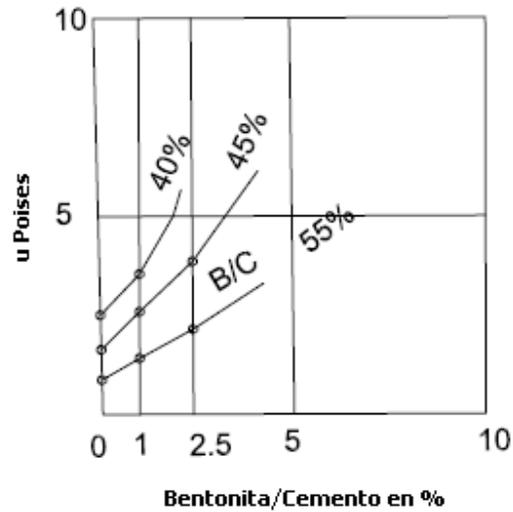
4.4.1. Mortero de cemento-bentonita

Se ha comprobado, como se verá en las figuras 4 y 5, que la adición de bentonita aumenta la viscosidad y el límite de resistencia al corte de los cementos en los que la relación cemento-agua sea constante. Este aumento es tanto más sensible cuanto más densos son los morteros iniciales.

De las figuras 4 y 5, se obtienen dos conclusiones importantes: una es que el aumento de dosificación de bentonita disminuye la viscosidad del mortero; mientras que por otra parte, el límite de resistencia al corte pasa por un mínimo. Esto se interpreta fácilmente porque las dispersiones de bentonita, aunque muy diluidas, presentan una aceptable rigidez y a la vez indica que son suficientes dosificaciones de bentonita relativamente débiles para estabilizar los morteros de cemento, ya que el aumento de rigidez es rápido.

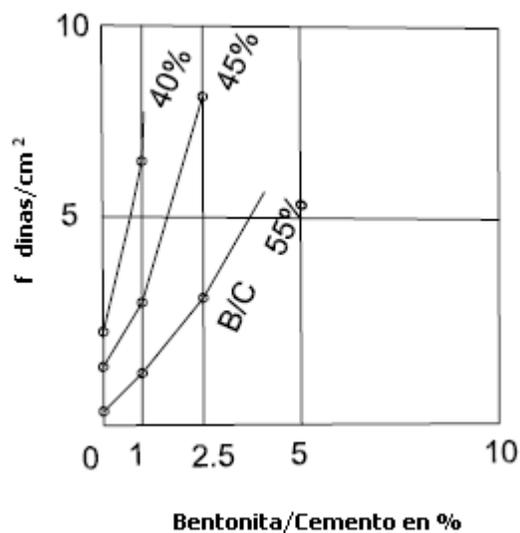
Un aspecto importante en el uso de activadores es que, por ejemplo, la dosificación de bentonita depende de la calidad de ésta. Se dice que el 4% de bentonita cuyo límite líquido sea del orden 300% es poco más o menos equivalente al 2% de una bentonita cuyo límite líquido sea de 550%.

Figura 4. **Influencia del porcentaje de bentonita en la viscosidad de morteros**



Fuente: Ana M. Sagastume, Inyección de Suelos, p. 32.

Figura 5. **Influencia del porcentaje de bentonita en el límite de resistencia al corte de morteros**



Fuente: Ana M. Sagastume, Inyección de Suelos, p. 32.

4.4.2. Mortero de cemento-silicato 1:1, 1,5:1, 2:1

El silicato de sodio se utiliza para mejorar la rigidez de un mortero, y hasta cierto límite ésta aumenta con la adición de silicato y se ha comprobado que si el mortero permanece en reposo, la rigidez va creciendo con el tiempo.

Esto se explica a la hora de agregado el silicato, ya que acelera el fraguado del cemento.

En un cemento Portland normal, las cantidades de silicato a utilizar, tratándose de silicato de sodio técnico Baumé son las siguientes:

- a. 10 a 20 cm³ por litro de mortero 1:1
- b. 5 a 10 cm³ por litro de mortero 1,5:1
- c. 2 a 5 cm³ por litro de mortero 2:1

La acción de estas dosificaciones no tiene acción nociva en la resistencia final del mortero. Si se aumenta más allá de los límites normales si puede disminuir la resistencia pero los morteros dejan de ser económicos.

Como el silicato es un químico que al contacto con el cemento acelera el fraguado de éste, los morteros preparados con dosis de silicato no son homogéneos ya que tienden a formar granos debido a la acción del químico.

Es por eso que estos morteros suelen utilizarse únicamente cuando se tiene una agitación constante, incompatible muchas veces con la necesidad del trabajo. Estos morteros casi no se utilizan y únicamente se ha hecho mención de ellos porque muchas veces la primera intención de las personas dedicadas a la inyección es la de añadir silicato a un mortero que no conviene.

4.4.3. Mortero de cemento-bentonita-silicato

La adición de bentonita a un mortero de cemento retarda su fraguado y disminuye su resistencia mecánica, pero proporciona un mortero homogéneo.

El silicato acelera el fraguado, pero produce un mortero grumoso, entonces se ha ensayado la combinación de estos productos con excelentes resultados.

La experiencia demuestra que el mortero obtenido es homogéneo y tiene una rigidez inicial más importantes que únicamente con la bentonita y las resistencias mecánicas son más elevadas. Con una proporción de 93% de cemento, 2% de bentonita y 5% de silicato.

4.4.4. Mortero de cemento activo 2:1, 2,3:1

El objeto de la activación es permitir la obtención de morteros inyectables de elevada dosis de cemento, que tengan una ligera sedimentación o, incluso, ninguna. Además, esta activación hace el mortero menos deslavable y prácticamente no miscible en el agua, lo que constituye una propiedad extremadamente interesante.

Un mortero con proporciones entre 2:1 y 2,3:1 aproximadamente, según la naturaleza del cemento, está en el límite de la inyectabilidad. Para conservar ésta totalmente aumentando la dosificación, es necesario utilizar procedimientos que permita una mejor dispersión del cemento. Puede lograrse la dispersión por vía química, por vía física y por vía mecánica.

La dispersión por vía química permite obtener morteros de dosificación relativamente pequeña y sedimentación nula, mediante el empleo de productos que proporcionan plasticidad, fluidez y aumento de volumen a estos morteros. Este es el principio de los morteros fluidos y es la mejor solución a un mortero, mientras no modifiquen éstos productos químicos, peligrosamente la resistencia final.

Para obtener la dispersión de cemento vía química, se le añaden algunas centésimas de su peso, de uno o varios productos auxiliares convenientemente escogidos, tales como plastificantes, expansivos, etc.

Es importante, antes de escoger un producto químico, como solución a un determinado problema de inyección realizar ensayos que permitan conocer los distintos comportamientos de los morteros preseleccionados.

La dispersión del cemento por vía física tiene un gran interés teórico, pero normalmente no se aplica en las obras.

Este procedimiento de dispersión fue descubierto y planteado con el nombre de Thermocol y consiste simplemente en recalentar el mortero de cemento. Se puede recalentar únicamente el agua y asegurar una simple mezcla de agua-cemento. Una temperatura entre 25 °C y 35 °C es suficiente para un mortero de cemento Portland, dosificando en la proporción 2:1 a 2,2:1, cuanto más fuerte sea la dosificación del mortero menos elevadas serán las temperaturas que haya que alcanzar.

Según los investigadores, la velocidad de hidratación del cemento anhidro aumenta con el calentamiento. Los hidratos insolubles que se forman se destacan fácilmente de los granos de cemento con una pequeña agitación y se

precipitan en estado de coloides. Son estos últimos los que dan al mortero sus propiedades particulares. Debido a lo anterior se obtienen de esta forma, morteros que casi no causan sedimentación.

Finalmente, la dispersión por vía mecánica se obtiene haciendo pasar un mortero convenientemente dosificado por un mezclador especial. Estos mezcladores provocan una agitación o, mejor dicho un laminado extremadamente violento. Esta agitación provoca el desprendimiento de los granos de cemento adheridos a la superficie, por lo que la película de hidratos es eliminada, precipitando al estado coloidal, de donde provienen las propiedades del mortero.

Con un tiempo de agitación relativamente corto, se obtiene una baja en la viscosidad y aumento en la rigidez. El tiempo que invierte un mortero de dosificación 2:1 en pasar por un periodo corto de fluidez, cambia de 24 segundos para el mortero inicial a 12 segundos después del tratamiento.

4.4.5. Mortero de fraguado rápido

En algunos casos, cuando se necesita evitar fugas muy grandes de mortero, es necesaria la utilización de un mortero que ofrezca a la vez una resistencia mecánica y un fraguado relativamente rápido, de un cuarto a media hora, añadiendo un 0,05% del volumen del mortero.

En estas mezclas que necesariamente utilizan cemento, la aceleración del fraguado se obtiene de tres maneras diferentes; primero, dosificando convenientemente un acelerador de fraguado o mezclando cemento aluminoso y cemento siderúrgico; segundo, utilizando productos aceleradores de fraguado de cemento. Debe tenerse especial cuidado en la dosificación de dichos

acelerantes ya que pueden presentarse tapones en los conductores de la mezcla de inyección; tercero, añadiendo una cantidad de aserrín de madera al mortero se obtiene un aumento de la viscosidad.

Los mejores resultados se obtienen con un aserrín completamente seco y cuyos granos tengan un diámetro inferior a los 2 mm. Este fenómeno es fácil de entender ya que la mezcla con aserrín de madera se vuelve más pastosa e incluso inyectada al poco tiempo de ser colocada detiene su circulación.

4.4.6. Mortero de cemento-cenizas volátiles

El reemplazamiento de una parte de cemento por polvo de granulometría comparable proporciona morteros económicos.

En la actualidad es muy utilizado el hollín de ciertas centrales térmicas, llamado también cenizas volátiles que constituyen un residuo barato abundante y de fácil incorporación a los morteros de inyección. Estas cenizas tienen entre otros componentes puzolanas, que sustituyen en forma ventajosa a los cementos tradicionales en el proporcionamiento de morteros.

La viscosidad se modifica poco con una adición de hollín relativamente importante, aunque no excesiva, en un mortero de dosificación:

$$\frac{(cemento + ceniza)}{agua\ constante}$$

En el siguiente cuadro veremos cómo varía la viscosidad según los porcentajes utilizando la formula anterior:

Tabla I. Variación de la viscosidad según los porcentajes de cemento y ceniza

% Cemento	% Ceniza	Tiempo de circulación en el viscosímetro (s)
100	0	9,4
90	10	9,4
80	20	9,6
70	30	10,1
60	40	13,1

Fuente: Ana M. Sagastume, Inyección de Suelos, p. 37.

La viscosidad de un mortero con un 40% de cenizas puede ser transformada añadiendo un fluidificante. Otra ventaja es que el pequeño peso específico de un hollín (-0,2 a 2,5) mejora la sedimentación de los morteros.

4.4.7. Mortero de arcilla-cemento

Este tipo de mortero estable, se ha observado que la adición de 60% de cemento permitiría realizar suspensiones estables, dotadas de más o menos rigidez, con arcillas no muy finas y difíciles de poner en suspensión en estado puro. El cemento proporciona los coloides necesarios para alcanzar este resultado.

Por otra parte, la adición de 40% de arcilla aumenta la viscosidad y el límite de resistencia al corte de los morteros con una dosis de agua constante.

Cuando se comparan morteros con la misma decantación, se comprueba que añadiendo arcilla, la viscosidad y el límite de resistencia al corte disminuye.

4.4.8. Mortero de arcilla-cemento-arena

Cuando en un trabajo de inyección, los huecos a rellenar son suficientemente grandes de tal manera que no hay límite restringiendo en los granos de un mortero de cemento-arcilla, puede éste aumentarse o proporcionarse con arena más o menos fina.

Para este mortero usamos la siguiente proporción:

Arcilla	20%
Arena fina	40%
Cemento	40%

5. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL *JET GROUTING*

5.1. Definición

El *Jet Grouting* es básicamente un método de tratamiento para mejorar el terreno por debajo de la superficie. Fue desarrollada en Japón a comienzos de los años 70. Su concepción y primeros usos de la técnica se remonta a los años 60 en este mismo país, pero su aplicación sistemática fue en los años 70 y basada en investigaciones realizadas por los japoneses Yahiro, Yoshida y Nishi del *Kajima Institute of Construction Technology* de Tokio, Japón.

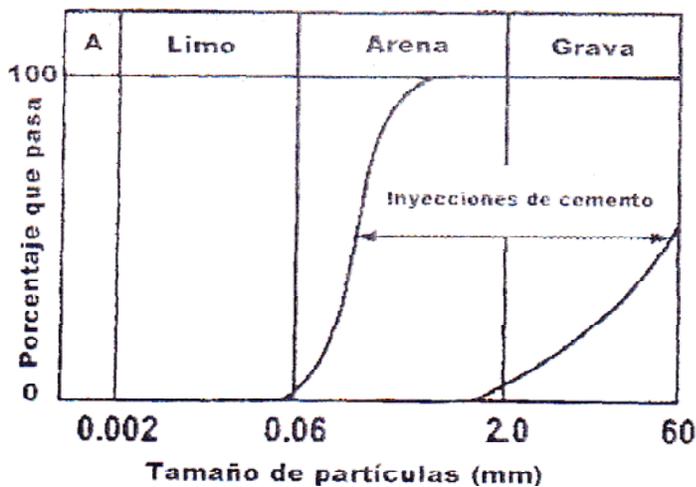
Estas investigaciones fueron dadas a conocer en 1973 durante el Congreso Internacional de Mecánica de Suelos celebrado en Moscú. Desde entonces el *Jet Grouting* ha tenido aceptación y uso durante más de diez años en Europa, Estados Unidos de América, Suramérica y en los países que conformaban la Unión Soviética.

El comité de Ingeniería Geotécnica de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles dedicado a las inyecciones en el suelo por medio de lechadas, definió en 1980 al *Jet Grouting*, como una técnica en la que se utiliza tubería especial de perforación que combina chorros de agua horizontales y verticales a alta presión para excavar suelos. Y cuya finalidad es producir columnas duras e impermeables por medio del bombeo de una lechada de agente cementante a través de toberas horizontales, la cual se mezcla con el suelo mientras se extrae la tubería de perforación.

El *Jet Grouting* viene a ser un tipo de mejoramiento del suelo por medio de inyección completamente distinta e innovador, ya que su aplicación y tipo de lechada, no depende de la permeabilidad del suelo ni tamaño de las partículas que componen el terreno. *El Jet Grouting* utiliza la energía de la erosión en el terreno para permitir la introducción de la lechada de inyección, esto hace posible la aplicación de esta técnica en prácticamente cualquier tipo de terreno (desde las arcillas hasta las gravas). Este método se clasifica como una inyección a alta velocidad.

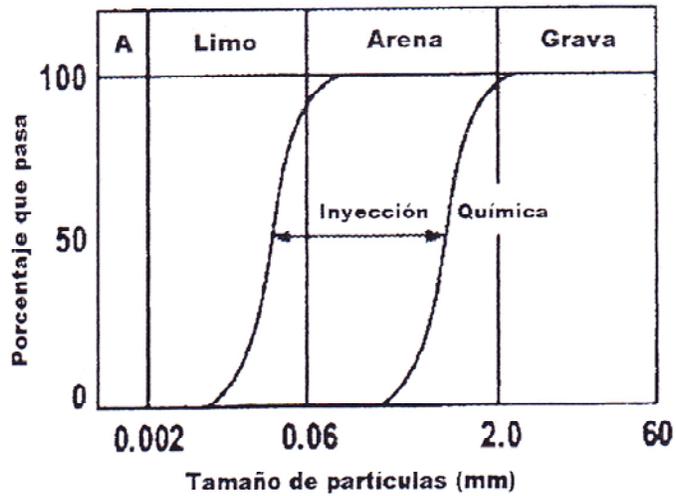
A continuación se muestran los rangos de granulometría para las cuales son factibles las inyecciones de cemento o de resinas químicas (figuras 6 y 7), mientras que el *Jet Grouting* abarca un mayor rango que incluye las granulometrías de las otras inyecciones gracias a su no dependencia directa en la permeabilidad del suelo (figura 8).

Figura 6. **Rangos de granulometría para la aplicación de inyección de cemento**



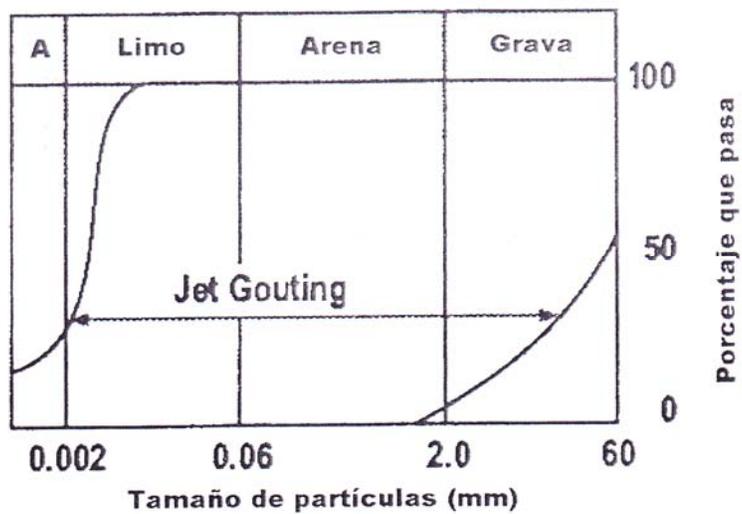
Fuente: Manuel Castellanos, La técnica de *Jet Grouting*, p. 6.

Figura 7. Rango de granulometrías para la aplicación de inyecciones químicas



Fuente: Manuel Castellanos, La técnica de *Jet Grouting*, p. 6.

Figura 8. Rangos de granulometrías para la aplicación del *Jet Grouting*



Fuente: Manuel Castellanos, La técnica de *Jet Grouting*, p. 7.

5.2. Clasificación

Existen varias técnicas de mejoramiento del suelo por medio de inyecciones, cuya finalidad es la de mejorar las características de resistencia, deformabilidad e impermeabilidad del terreno. Estas técnicas se aplican dependiendo del tipo de suelo, mientras que el *Jet Grouting* es aplicable a cualquier tipo de terreno. Dentro de estas se encuentran las siguientes:

5.2.1. Inyección por intrusión

En ellas, la lechada del agente cementante es introducido en el suelo a baja presión, para llenar sus vacíos sin modificar significativamente la estructura y volumen del terreno. Este tipo de inyección, la permeabilidad del suelo juega un papel importante y determinante para la selección del agente cementante (para permeabilidades mayores a 10^{-2} cm/seg se utilizan lechadas de agua y cemento, mientras que para valores de permeabilidad tan bajas como 10^{-5} cm/seg la utilización de resinas es la indicada). Los suelos con permeabilidades menores a 10^{-6} cm/seg no pueden ser tratados con esta técnica.

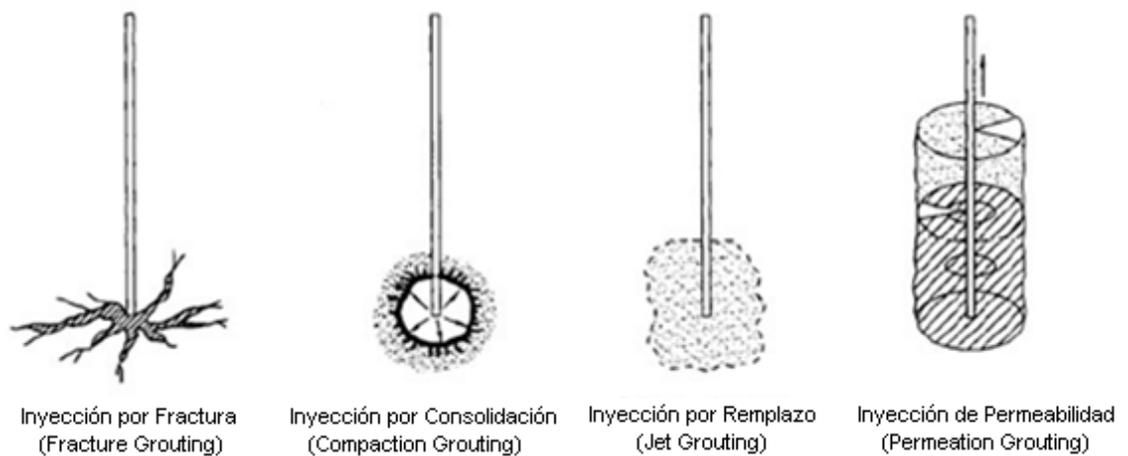
5.2.2. Inyección por desplazamiento

Conocidas también como inyecciones de compactación, son aquellas en las cuales se introduce una lechada altamente viscosa y con alta fricción interna dentro de un suelo capaz de compactarse. En este tipo de inyecciones la lechada actúa radialmente y análogamente a un gato hidráulico que desplaza físicamente las partículas del suelo, obteniéndose una densificación controlada de terreno.

5.2.3. Inyección por fracturación

En las que se utilizan tubos-manguitos, por medio de los cuales se introduce la lechada cementante a presiones altas para fracturar el suelo, y para rellenar con la misma lechada las fisuras producidas en el proceso. El resultado que se obtiene es una compresión del suelo circundante y una masa de suelo de mayor densidad.

Figura 9. Tipos de inyección para mejoramiento de suelo



Fuente: Raison, C.A., *Ground Improvement Solutions*, p.23.

6. PROCESO CONSTRUCTIVO, EQUIPO Y TIPOS DE *JET GROUTING*

6.1. Proceso constructivo

El procedimiento que sigue la construcción del *Jet Grouting*, no varía mucho con respecto al comúnmente utilizado en la perforación para la construcción de anclajes, micropilotes o en campañas de sondeos geotécnicos sin recuperación de núcleos de suelo. Este procedimiento está compuesto por tres pasos esenciales y uno opcional, que suele llevarse a cabo cuando el terreno no es fácil de erosionar. A continuación se expone cada uno de estos pasos que constituyen el método.

6.1.1. Instalación de maquinaria

Sobre el punto identificado topográficamente con anterioridad, se instala la perforadora, se nivela sobre una plataforma de trabajo, se recomienda que esta plataforma este lo más plana posible, para que el ángulo de inclinación no varíe, se acondiciona su mástil a fin de darle la inclinación requerida por el diseño a la perforación que se efectuará.

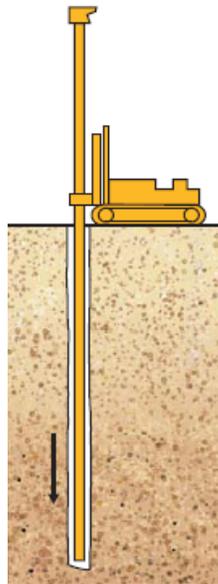
6.1.2. Ejecución de la perforación

La perforación se lleva a cabo a rotación hasta la cota deseada utilizando un tricono o tiraleta como elemento de corte que permite aportar un fluido de perforación acorde a las condiciones y tipo de suelo en el que se efectúa el taladro.

En el 90% de proyectos se utiliza agua como fluido de perforación; en el 10% restante se usa lechada de cemento, una mezcla de bentonita-cemento o espumas de productos químicos, como bicarbonato sódico y sulfato de aluminio.

Se usa lechada de cemento, cuando se tiene la complicación de desprendimiento de las paredes del taladro; se usa la mezcla de bentonita-cemento cuando hay peligro de que la tubería de perforación quede aprisionada cuando se perfora hasta profundidades considerablemente grandes; las espumas de productos químicos se usan en los casos en los que el terreno es muy abierto o al aire libre.

Figura 10. **Perforación hasta la cota deseada**



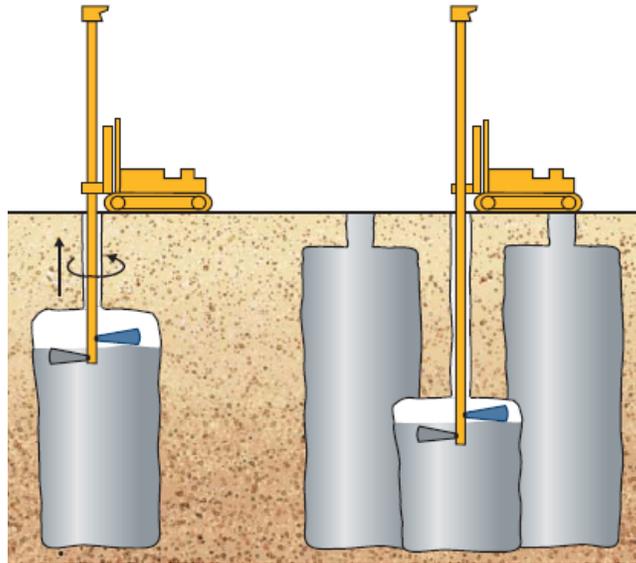
Fuente: Hayward Baker Inc., *Jet Grouting*, p. 3.

6.1.3. Inyección del chorro a alta velocidad

Consiste en la habilitación de las toberas para la inyección con chorro de alta velocidad, y en la cancelación de la o las aberturas utilizadas para la evacuación del fluido de perforación. En seguida se inicia el proceso de inyección de la lechada del agente cementante, desde el fondo de la perforación hacia arriba, extrayendo, a velocidades controladas, la tubería de perforación y rotándola 360 grados a una revolución constante o variable, o bien, sin darle rotación a los tramos de tubo o con rotaciones restringidas a ciertos ángulos nada más.

La forma de rotación depende de la geometría de la masa de suelo tratado que se desea obtener, la cual será cilíndrica si se permite rotar la tubería sin restricciones (a 360 grados); secciones semi-circulares si se rota menos de 360 grados o paneles planos si no hay movimiento de la tubería salvo el de ascensión.

Figura 11. **Inyección con chorro de lechada a alta velocidad**



Fuente: Hayward Baker Inc., *Jet Grouting*, p. 3.

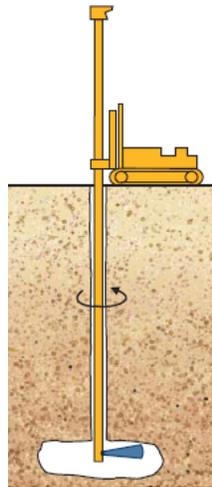
6.1.4. **Pre Jet**

Este paso puede formar parte del procedimiento constructivo, y se realiza después de la perforación y antes de la inyección. Este paso se efectúa cuando se encuentran estratos de suelo compactos, que son poco susceptibles a la erosión de la lechada de inyección; su finalidad es de romper la estructura del suelo y crear una pequeña caverna en el terreno a fin de obtener el diámetro deseado de la columna de suelo tratado, cuando se inyecte con el chorro de alta velocidad la lechada del agente cementante (*Jet Grouting*).

Esta erosión se lleva a cabo con un chorro de alta velocidad de agua, agua y aire o sólo de aire, que se expulsa a través de la o las toberas. En este paso se extrae la tubería hasta la cota a la que inicia el o los estratos que no son fácilmente erosionables y se desciende la tubería nuevamente aplicando el

chorro arriba mencionando. Esto se puede hacer hasta llegar a la cota del fondo de la perforación, o bien, hasta una profundidad previamente establecida en donde el terreno ya no presente una complicación al proceso de erosión.

Figura 12. **Erosión de suelos compactos**

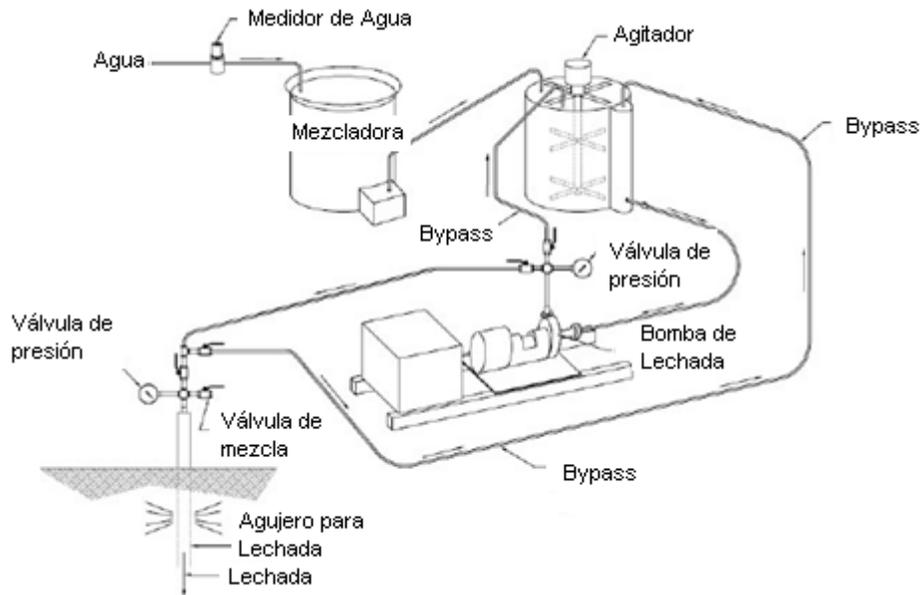


Fuente: Hayward Baker Inc., *Jet Grouting*, p. 3.

6.2. **Equipo utilizado en la ejecución del *Jet Grouting***

A continuación, se detalla el equipo utilizando para cualquier instalación de *Jet Grouting* y específico de esta técnica.

Figura 13. **Equipo utilizada en el *Jet Grouting***



Fuente: Ookaboo, *Jet Grouting Device*.

6.2.1. **Máquina perforadora**

Son relativamente pequeñas, auto-propulsadas con motores accionados por diesel o energía eléctrica, de potencia entre 135 a 185 caballos de fuerza, equipadas con motores de rotación hidráulicos o neumáticos en su mástil.

Básicamente son máquinas que poseen las mismas características que aquellas que se utilizan en las obras de ejecución de micropilotes y anclajes, con capacidad de perforar hasta 40 metros, pero equipadas con controles y mecanismos capaces de garantizar una velocidad de giro y de ascenso de la cabeza de rotación cuando se está en el proceso de inyección de la lechada de agente cementante.

La velocidad de ascenso de la cabeza de rotación es medida con respecto al mástil de la máquina perforadora. El operador deberá tener la opción de variarla para adaptar el tratamiento a los distintos estratos que componen el terreno y así cumplir con las necesidades del proyecto durante la inyección de un taladro. El rango de velocidades de ascenso varía de 8 a 60 centímetros por minuto y el rango de la rotación del varillaje oscila entre 5 a 50 revoluciones por minuto.

Figura 14. **Máquina perforadora**



Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en Rodio Swissboring.

6.2.2. Tubería de perforación

Los tramos de tubo de perforación e inyección están hechos con aceros tratados (templados o revenidos con resistencias superiores a los 80 kg/mm²) y los fabrican en longitudes que varían de 1 metro a 6 metros. Los diámetros varían según la casa que los produce, encontrándose en el rango de 60 a 114 milímetros de diámetro exterior.

Esta tubería es fabricada con roscas para unir los tramos entre sí y de tal forma que sean capaces de dejar el fluido de perforación e inyección sin riesgo de fuga debido a las altas presiones con las que se operan los fluidos. Al mismo tiempo, según el tipo de *Jet Grouting* que se desea construir, esta tubería deberá tener la capacidad de permitir el paso de dos fluidos distintos a través de ella, sin mezclarse y con diferentes presiones de trabajo.

6.2.3. Herramienta de corte

Se selecciona de acuerdo al tipo de suelo que se perforará; ésta suele ser por lo general trialetas o triconos (ver figuras 15 y 16). Cabe mencionar, que la selección del diámetro del útil de perforación, dependerá de la operación posterior de inyección, ya que debe existir un espacio anular entre el diámetro de perforación del útil y la tubería para facilitar la evacuación del suelo y de la mezcla de suelo-cemento, comúnmente llamado “rechazo”, que se produce durante la fase de inyección.

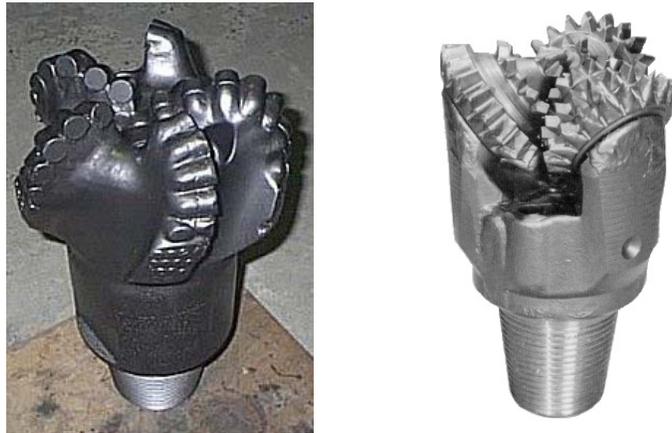
Las combinaciones mínimas de la relación diámetro de corte a diámetro de la tubería que se recomiendan en la práctica son 75/60 mm, 110/90 mm ó 132/90 mm. La combinación correcta a utilizar depende de la granulometría del suelo; a mayor tamaño de partículas de suelo mayor espacio anular será necesario y a un menor tamaño de partículas de suelo, menor relación se podrá utilizar. En casos extremos se puede llegar a relaciones de diámetro de 90/60 mm o de 150/90mm.

Figura 15. **Trialetas cortantes**



Fuente: K R Ham, Trialetas.

Figura 16. **Triconos de perforación**



Fuente: K R Ham, Triconos.

6.2.4. Toberas de inyección

Las toberas en el extremo inferior de la tubería, constituyen el punto importante y distintivo del *Jet Grouting*, ya que es a través de éstas que sale el chorro de la lechada del agente cementante a alta velocidad y debido a su tamaño es que se convierte la presión en velocidad con energía de erosión propia del método.

Estas toberas, al igual que la tubería de perforación, son fabricadas con aceros tratados debido a que se ven sometidas a una intensa abrasión por la lechada de inyección. Los diámetros en los que son producidas varían entre 1,8 mm y 5 mm, dependiendo de la casa fabricante y del suelo que se desea tratar.

Dichas toberas se construyen con orificios de 0,5 mm (0,02") a 51 mm (2") de diámetro, con gastos de derrame correspondientes de 0,038 a más de 760 l/min.

Figura 17. **Detalle de tobera**



Fuente: K R Ham, tobera.

6.2.5. Bombas para fluidos

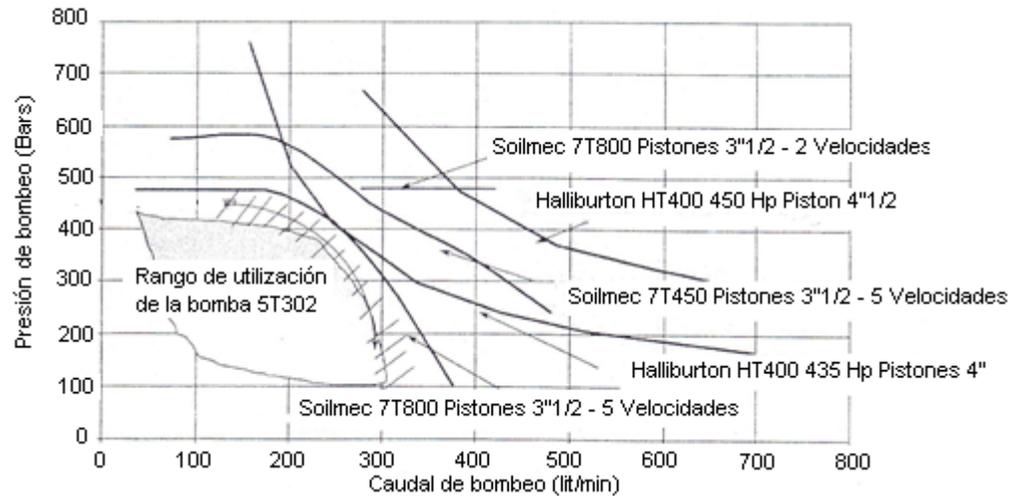
En toda obra de *Jet Grouting*, se requerirá de una a dos bombas de alta presión y altos caudales para impulsar tanto el fluido de perforación como la lechada del agente cementante durante la fase de inyección y erosión. Generalmente el tipo de bombas que se utilizan para este tipo de proyectos son accionadas por motores diesel con un rango de potencia que varía de 350 a 500 caballos de vapor.

Figura 18. **Bomba de inyección**



Fuente: RAISON, C.A., *Ground and Soil Improvement*, p. 115.

Figura 19. **Relación de caudal-presión para distintas bombas de inyección**



Fuente: RAISON, C.A., *Ground and Soil Improvement*, p. 137.

6.2.6. Planta de fabricación de fluidos

El elevado caudal que las bombas son capaces de impulsar (un promedio de 20-25 m³/hora) hace necesario poseer pequeñas instalaciones de fabricación de fluidos de perforación e inyección que sean capaces de suministrar estas cantidades con calidad suficiente, ya que se debe garantizar que la mezcla de inyección (generalmente de agua-cemento o bentonita-agua-cemento o con humo de sílice) sea completamente uniforme desde su fabricación hasta su inyección.

Estas plantas de fluidos, consisten en mecanismos de suministro y mezclado de forma controlada, automática y bastante precisa de los ingredientes que componen la mezcla. También cuentan con tanques de almacenamiento temporal equipados con palas agitadoras de alta turbulencia y de suficiente energía de batido.

Figura 20. **Mezcladora y tanque de almacenamiento**



Fuente: elaboración propia, fotografía tomada en Rodio Swissboring.

6.3. Tipos de *Jet Grouting*

Existen tres tipos de *Jet Grouting*, los cuales se diferencian según el número de fluidos que utilizan en el proceso de erosión e inyección, estos tres tipos de *Jet Grouting*, se basan en los mismos principios y conceptos: son inyecciones de alta presión hasta la tobera, a partir de la cual el fluido se convierte en un chorro de alta velocidad capaz de generar considerables niveles de energía de erosión, lo que permite tratar con el método a todos los suelos blandos capaces de erosionarse.

- a. *Jet Grouting* simple
- b. *Jet Grouting* doble fluido
- c. *Jet Grouting* triple fluido

Son inyecciones de alta presión debido a que la lechada del agente cementante se encuentra dentro del circuito de manguera flexibles, tubería de perforación y porta-toberas a altas presiones de bombas de inyección. Este fluido sometido a altas presiones, al salir a través de la o las toberas, se encuentra con un ambiente de baja presión relativa y debe equilibrarse con este nuevo ambiente. Utilizando la ecuación de Bernoulli para fluidos:

$$\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2} + g * \Delta y = 0$$

Donde:

P = presión hidrostática del fluido

ρ = peso específico del fluido

v = velocidad del fluido

y = cota del punto estudiado

Escribiendo la misma ecuación, agrupando las condiciones arriba descritas y denotando con el subíndice “circ” la condición del fluido dentro del circuito desde la bomba de inyección hasta el porta-toberas, y con el subíndice “ext” la condición del fluido en el instante en que sale por la tobera, se tiene:

$$\frac{P_{circ}}{\rho} + \frac{v_{circ}^2}{2} + g + y_{circ} = \frac{P_{ext}}{\rho} + \frac{v_{ext}^2}{2} + g + y_{ext}$$

Donde:

P_{circ} = presión hidrostática del fluido dentro del circuito de inyección

P_{ext} = presión hidrostática del fluido en el momento que sale por la tobera

ρ = peso específico del fluido

g = gravedad

v_{circ} = velocidad del fluido dentro del circuito de inyección

v_{ext} = velocidad del fluido en el momento que sale por la tobera

y_{circ} = cota del punto estudiado dentro del circuito de inyección

y_{ext} = cota del punto estudiado en el momento que sale por la tobera

Al tener que ambas cotas son iguales ($y_{\text{circ}}=y_{\text{ext}}$) y sabiendo que la presión externa será aproximadamente 300 atm inferior que la presión impuesta por la bomba al fluido ($P_{\text{ext}}<P_{\text{circ}}$), se deduce que la velocidad de salida del chorro de la lechada será muy alta a comparación de la velocidad dentro del circuito de mangueras y tubería.

El éxito de cualquier tipo de *Jet Grouting*, no dependerá únicamente de la calidad del suelo a tratar, sino de la adecuada combinación de las bombas (presiones y caudales) que se utilizan para el corte y la inyección y de la velocidad de ascenso de la tubería.

La selección del equipo que se utilizará en cada proyecto, se llevará a cabo según los objetivos que se tengan en éste y el tipo de suelo que se tratará.

A continuación, se presenta un cuadro que resume los parámetros mínimos y máximos que comúnmente se hallan en las obras de *Jet Grouting*, con el fin de proporcionar una idea de estas magnitudes.

Tabla II. **Parámetros comunes en proyectos de *Jet Grouting***

PARÁMETROS TÍPICOS DE <i>JET GROUTING</i>	SIMPLE		BI-FLUIDO		TRI-FLUIDO	
	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.	MÍN.	MÁX.
Presiones de la lechada (mpa)	20	60	30	60	3	7
Caudal de lechada (l/min)	40	120	70	150	70	150
Presión de aire (mpa)	-	-	0,6	1,2	0,6	1,2
Caudal de aire (mpa)	-	-	2 000	6 000	2 000	6 000
Presión de agua de inyección (mpa)	-	-	20	50	20	50
Caudal de agua (l/min)	-	-	70	150	70	150
Diámetro de toberas de lechada (mm)	1,5	3	1,5	3	4	8
Diámetro de toberas de agua (mm)	-	-	1,5	3	1,5	3
Abertura coaxial para el aire (mm)	-	-	1	2	1	2
Velocidad de rotación (rpm)	10	25	5	10	5	10
Velocidad de extracción de varillaje (cm/min)	10	50	7	7	5	30

Fuente: elaboración propia.

Una vez expuestos estos principios generales para los tipos de *Jet Grouting*, se procede a presentar las tres variantes del método arriba mencionados.

6.3.1. *Jet Grouting simple*

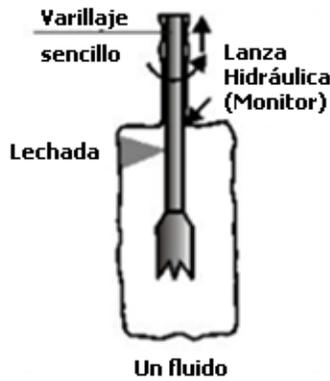
Conocido también como *jet* monofluido o *jet* uno, es la modalidad que primero fue desarrollada y empleada desde la concepción de esta tecnología. La primera aplicación conocida es la de Nakanishi, quien lo llamaba “*Chemical Curning Pile*” o simplemente CCP.

En este tipo de *jet* la lechada del agente cementante es la única que viaja dentro de la tubería de perforación y es el único fluido al que se le confía la acción de erosión de la masa del suelo que se trata, así como es el único líquido que se mezcla con el suelo y que lo sustituye en las partes en las cuales el terreno es completamente desplazado hacia afuera de la perforación o radialmente hacia afuera del eje de los tramos de tubo de perforación.

Se deduce de este tipo de *Jet Grouting* que la presión se imparte a la lechada del agente cementante debe ser alta, al mismo tiempo el caudal y cantidad que se consume en los proyectos en los que se utiliza esta variante son considerablemente altos.

Las presiones de inyección para el *jet* simple, varían usualmente entre los 350 kg/cm² hasta los 600 kg/cm² (para un máximo de 800 kg/cm²) con pérdidas de presión entre 5 y 10 kg/cm² por cada 100 metros de manguera flexibles. Los caudales típicos para mezclas de agua-cemento con relaciones 1:1 se encuentran en el rango de 1,5 a 2,5 litros por segundo. Este tipo de *Jet Grouting* suele ser económicamente y técnicamente factible para diámetros esperados de columnas de suelo tratado inferiores o iguales a los 90 centímetros.

Figura 21. **Jet Grouting monofluido**



Fuente: Hayward Baker Inc., *Jet Grouting*, p. 2.

6.3.2. **Jet Grouting doble fluido**

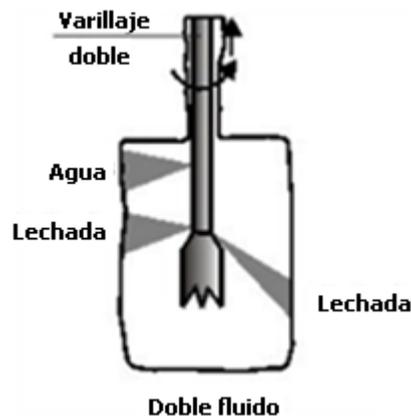
Conocido también como *Jet Grouting* doble, se diferencia del anterior en que la acción de erosión se le confía a un segundo fluido, siendo esta agua o aire, o bien, una mezcla de la lechada cementante con aire. En el caso del *jet* doble en la que se utiliza el agua o aire para destruir la estructura del terreno, se requiere de una tubería especial en la que ambos fluidos no se mezclan y que sea capaz de llevar dentro de sí a estos fluidos a presiones diferentes, además de tener que contar con una o varias toberas de salida independientes para cada uno de los fluidos.

En el caso de tener una mezcla de aire/lechada, esta combinación tendrá a su cargo tanto la erosión del terreno como la de sustitución y mezcla del volumen desplazado, lo cual requiere del mismo tipo de tubería, pero con un tipo de toberas especiales en las que se permite la expulsión de la lechada por el centro de ella y la salida del aire será en forma anular y concéntrica al chorro de la lechada (no se acostumbra utilizar agua como fluido anular al chorro de

lechada debido a que se incrementan las relaciones de agua-cemento, ocasionando una baja resistencia y mala calidad de la lechada final).

Este último tipo de *Jet Grouting* doble, se le conoce como “*Jumbo Jet Special Grout*” o JSG. En ambas variantes la presión de la lechada es significativamente menor (de unos 500 kg/cm² a lo sumo) y la del aire varía entre 7 y 12 kg/cm² cuando sale de forma anular y concéntrica a la lechada. La presión de un chorro de agua completamente independiente al que se expulsa por la tobera de la lechada del agente cementante es de 500 kg/cm².

Figura 22. ***Jet Grouting* doble fluido con chorros independientes**



Fuente: Hayward Baker Inc., *Jet Grouting*, p. 2.

6.3.3. ***Jet Grouting* triple fluido**

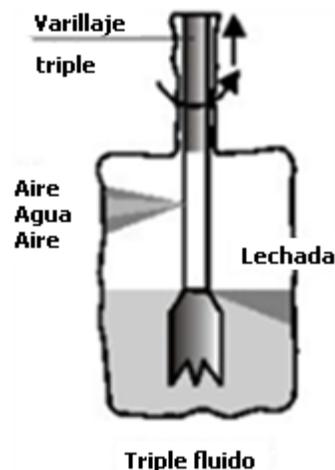
Llamado originalmente “*Colum Jet Grouting*”, CJG o método Kajima, también se le conoce como triple *jet* o *jet-3*. En este, se utilizan tres fluidos, dos para el proceso de erosión del terreno y un tercero que lo comprende la lechada del agente cementante. Por esta razón la tubería que se utiliza es aún más

compleja que la empleada en los otros tipos de *Jet Grouting*, ya que tiene que ser capaz de llevar dentro y separadamente a los tres fluidos a distintas presiones.

El chorro que efectúa la erosión es expulsado a través de toberas como las empleadas en el tipo de *Jet* doble, ya que por el centro de dicha tobera saldrá el chorro de agua envuelto por aire de forma anular y concéntrica al primer chorro mencionado. Las toberas por las que sale el chorro de lechada son del mismo tipo que las usadas tanto en el *Jet* simple como el doble *Jet* son generalmente las siguientes:

- a) Las presiones del chorro de agua varía alrededor de los 500 kg/cm^2
- b) El chorro de aire anular tiene un rango entre los 7 a los 12 kg/cm^2
- c) El chorro de aire anular tiene un rango entre los 7 a los 12 kg/cm^2
- d) La lechada cementante es inyectada a una presión relativamente baja de alrededor a los 80 kg/cm^2

Figura 23. ***Jet Grouting* triple fluido**



Fuente: Hayward Baker Inc., *Jet Grouting*, p. 2.

6.4. Ejemplos de aplicación del *Jet Grouting* en Guatemala

6.4.1. Muro Banco Empresarial, Z.9 Guatemala

Como parte de la construcción del edificio del Banco Empresarial, ubicado en la zona 9 de la ciudad de Guatemala, se realizó la excavación para la cimentación del edificio y la construcción de niveles subterráneos de estacionamiento. Para estabilizar esta excavación y debido a las cargas sobre una de las caras del edificio se decidió construir un muro pantalla, aplicar *Jet Grouting* en esta cara y proteger con un muro de *Soil Nailing* las otras caras de la excavación.

El trabajo consistió en la construcción de un muro pantalla de 450 milímetros de espesor y 15 metros de profundidad con anclajes activos de hasta 40 toneladas. Este muro es colindante con un edificio de 5 niveles por lo que la construcción del muro guía y la excavación se realizó con suma precisión. Para estabilizar las caras restantes de la excavación se construyeron muros de *Soil Nailing*, ya que las cargas para estos muros eran menores y por lo tanto el riesgo de derrumbes también.

Figura 24. **Vista de la perforación de los anclajes del muro del Banco Empresarial**



Fuente: Rodio Swissboring.

Principales cantidades de trabajo:

- 750 m³ aproximados de inyección
- 540 ml de anclajes activos
- 1 200 m³ de muro de *Soil Nailing*

Equipos principales:

- Grúa Kynos 405
- Grúa telescópica Grove
- Cuchara Rodio 450 mm
- Perforadora Wirth BO
- Compresor IR 750 / 250
- Planta de inyección Cosma

Figura 25. **Vista aérea del muro terminado del Banco Empresarial**



Fuente: Rodio Swissboring.

6.4.2. Muro Anclado para la estabilización de talud en Cuesta Villalobos, km 12 salida al Pacífico, Guatemala

En la entrada sur en la Ciudad de Guatemala, Cuesta Villalobos existía un talud, el cual había sufrido de deslizamientos provocando la interrupción del tránsito de vehículos en esta ruta. Para recuperar la estabilidad del talud, se decidió la construcción de plataformas protegidas con un muro anclado y estabilizado con *Jet Grouting*.

El trabajo consistió en la construcción de plataformas, en las cuales se construyó un muro con anclajes activos de 24 metros de longitud y con una capacidad de 40 toneladas y 10 metros de longitud de *Jet Grouting* a una presión de 6 bares. El muro tiene una altura de 45 metros con anclajes espaciados 3 metros en ambos sentidos. Para realizar el trabajo fue necesario utilizar una grúa telescópica para el lanzamiento y colocación de malla.

Figura 26. **Vista durante la estabilización de talud en Cuesta Villalobos**



Fuente: Rodio Swissboring.

Principales cantidades de trabajo:

- 3 000 m de anclajes
- 350 m³ de concreto armado
- 3 200 m³ de corte de terreno
- 1 250 m³ aproximados de inyección

Equipos principales:

- 2 Wirth BO
- Grúa Grove de 20 Ton
- Excavadora Komatsu PC-200
- Bomba de Lanzado Reed

- Bomba de Lanzado Mayco
- Compresor IR-750/250 psi
- Central de Inyección Cosma
- 2 Bombas Bean Royal

Figura 27. **Vistas del muro de la Cuesta Villalobos terminado con una extensión de 100 metros de longitud**



Fuente: Rodio Swissboring.

6.4.3. Estabilización de muros para sótanos de edificio, Avenida Hincapié, Z.13, Guatemala

Como parte de la alta demanda de edificios para colocar oficinas o bien, lo que está cobrando auge en el país, lo que son edificios para operadoras de llamadas, en un terreno ubicado en la zona 13 de la ciudad de Guatemala, se realizó la excavación para la cimentación del edificio y la construcción de niveles subterráneos de estacionamiento.

Para estabilizar esta excavación, se decidió construir un muro de *Soil Nailing* en dos caras de la excavación, ya que no se contaba con el permiso para realizar anclajes activos en una cara, debido a la cercanía con el aeropuerto internacional La Aurora, en las otras caras de la excavación, se procedió a colocar anclajes activos, ya que aquí si se contaba con el permiso para realizar este tipo de estabilización.

En este proyecto, se contó con un inconveniente, ya que en los muros donde se realizaron los anclajes activos, las colindancias eran con casa y cuando se procedió a hacer el *Jet Grouting*, este método tiende a romper la estructura del suelo, debido a que es con presión, las casas empezaron a sufrir daños, como lo fueron daños en el sistema de agua potable y el sistema de drenajes, debido a que la inyección rompió las tuberías.

El trabajo consistió en la construcción de dos muros de anclajes activos de 450 milímetros de espesor y 30 metros de profundidad con anclajes activos de hasta 60 toneladas. Para estabilizar las caras restantes de la excavación se construyeron muros de *Soil Nailing*.

Figura 28. **Vista de muro con *Soil Nailing***



Fuente: Rodio Swissboring.

Figura 29. **Detalle de anclajes activos, donde se aplica el *Jet Grouting***



Fuente: Rodio Swissboring.

Figura 30. **Detalle de muro terminado (aplicación de *Jet Grouting*)**



Fuente: Rodio Swissboring.

Principales cantidades de trabajo:

- 9 000 m³ aprox. de inyección
- 7 500 ml de anclajes activos
- 1 200 m³ de muro de *Soil Nailing*

Equipos principales:

- Grúa Kynos 405
- Grúa telescópica Grove
- Cuchara Rodio 450 mm
- Perforadora Track Drill
- Perforadora Hidráulica Manual
- Compresor IR 750 / 250
- Planta de inyección Cosma
- Excavadora Caterpillar 320C

7. PARÁMETROS DEL *JET GROUTING* Y SU INSIDENCIA EN EL PRODUCTO FINAL

7.1. Los parámetros y su influencia

La técnica del *Jet Grouting*, se ha definido anteriormente como un método de inyección, basado en el poder erosivo o energía de erosión de un chorro de fluido para romper la estructura del suelo y tratarlo para su mejoramiento. Esta energía de erosión, conocida como la energía del *Jet Grouting*, se encuentra regida por la relación de distintos parámetros propios de esta técnica. La ecuación de esta energía está dada por:

$$E_j = \frac{P * Q}{V} \quad \left(\text{en } \frac{MJ}{m}\right)$$

Donde:

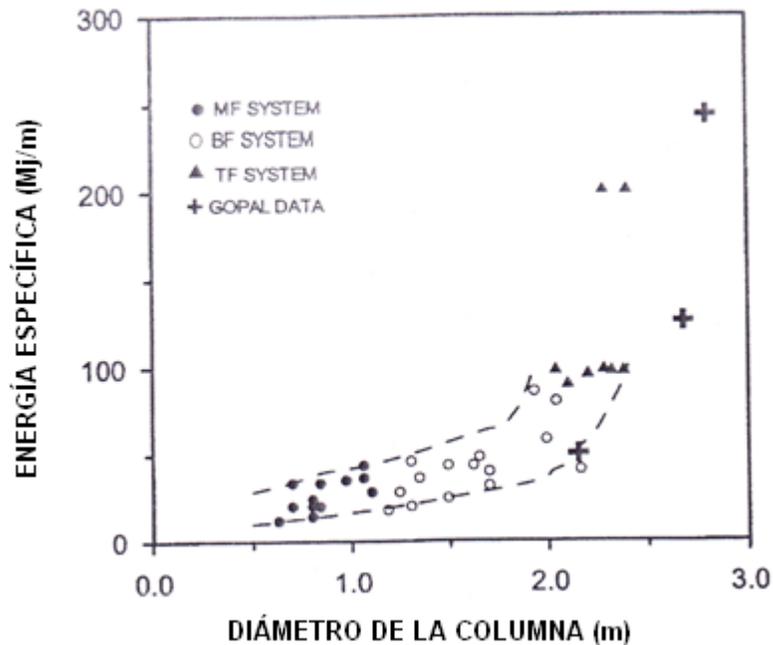
P = presión de la lechada en Mpa

Q = caudal en m³ por hora

V = velocidad a la que se extrae el varillaje en m/hr

De esta ecuación, se desprende que los parámetros que tienen una incidencia directa en el producto final del *Jet Grouting* son únicamente tres. Se entiende que a mayor energía aplicada durante el proceso de inyección mayor será el volumen de suelo tratado.

Figura 31. **Relación de energía específica de *Jet Grouting* con diámetros de columnas de suelo tratado**



Fuente: Kutzner, Christian. *Grouting of Rock and Soil*, p.72.

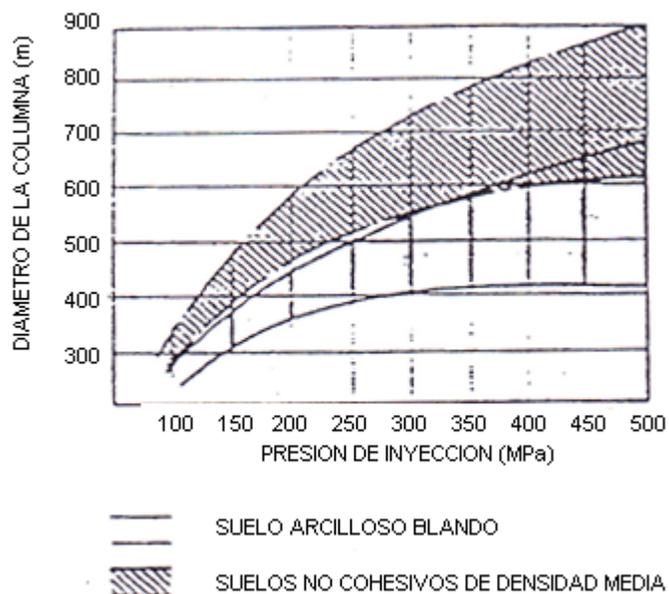
7.1.1. La presión de inyección

Ésta juega un papel importante en el tratamiento del suelo con el *Jet Grouting*. Como se menciona en la ecuación de Bernoulli, la transformación de la presión del fluido a una energía cinética de ésta, es la que da forma al chorro de alta velocidad. La acción de erosión del chorro de alta velocidad o *jet* depende directamente de esta energía cinética ($\frac{1}{2}mv^2$), o sea de la velocidad con que sale el fluido expulsado de la tobera. Entre más presión se le imprima al fluido antes de la salida de la tobera, mayor será la velocidad del chorro que se obtiene a la salida de ésta.

En la figura 32, se puede observar como varía el diámetro de una columna de suelo-cemento con la presión del fluido, medida a la salida de la bomba de inyección. Se comprueba que a mayor presión se obtienen mayores diámetros de columnas, debido a que la energía específica del *Jet Grouting* se ve afectada de manera directa por este parámetro. Al mismo tiempo se demuestra que el tipo de suelo influye igualmente en el diámetro de la columna final.

Los suelos con poca cohesión, que al mismo tiempo son más propensos a perder su estructura, son erosionados más fácilmente que los terrenos en los que predominan los materiales cohesivos o arcillas. Este fenómeno de menor efectividad del tratamiento en suelos arcillosos se debe al “efecto de muelle” característico de estos ante los chorros de agua que chocan contra su estructura.

Figura 32. **Relación de presión de inyección versus diámetro de columnas de suelo-cemento**

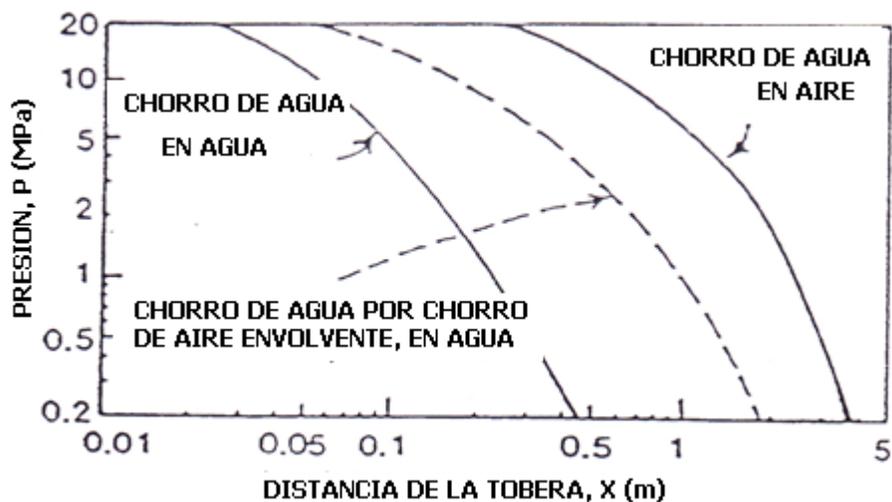


Fuente: Kutzner, Christian. *Grouting of Rock and Soil*, p.74.

Otro factor que afecta la efectividad de la presión que se le imprime al fluido de erosión, es la presencia de agua en el terreno o nivel freático, ya que esta agua crea una barrera que amortigua la velocidad del fluido y por ende disminuye la energía cinética que sirve en la erosión.

Como se puede observar en la figura 33, como ayuda un chorro de aire envolvente y concéntrico a contrarrestar el amortiguamiento producido por el agua subterránea al fluido de erosión. El resultado que se obtiene con la utilización de un sistema doble fluido con aire concéntrico bajo nivel freático es casi igual que el alcanzado con un chorro libre del efecto del agua.

Figura 33. **Disminución de la presión del fluido de erosión**



Fuente: Kutzner, Christian. *Grouting of Rock and Soil*, p.78.

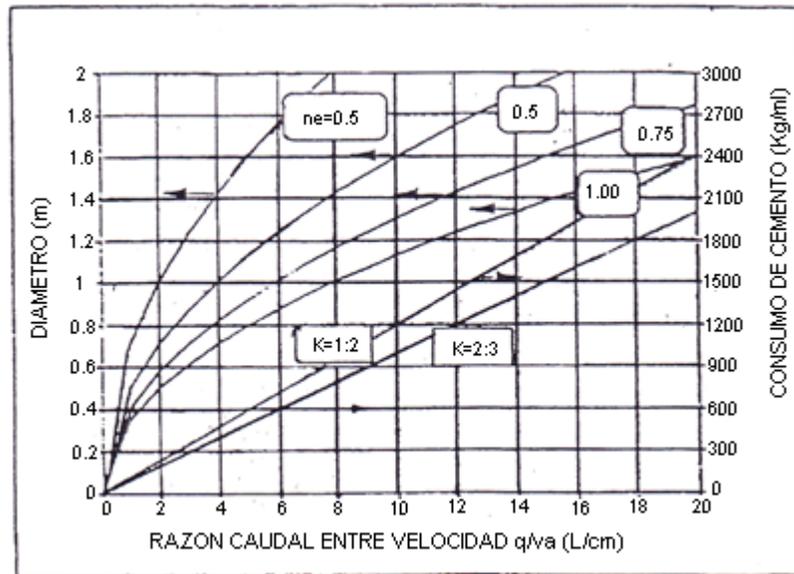
7.1.2. Caudal de agente cementante y/o fluido de erosión

El volumen del agente cementante que se llega a inyectar dentro de la masa del suelo, será casi el mismo que el del suelo desplazado y tratado, por lo tanto entre más fluido de erosión y agente cementante se introduce durante el proceso de ejecución del *Jet Grouting*, mejores serán los resultados que se obtengan del producto final. El volumen que se inyecta durante el proceso del *jet* se mide registrando el caudal a la salida de cada una de las bombas de inyección que se utilizan.

Cabe mencionar que no debe esperarse que el caudal inyectado sea igual que el volumen de la masa del terreno tratado, ya que el rechazo que se produce durante el proceso de inyección es una mezcla del suelo con los fluidos que se introducen, lo cual genera pérdidas del material cementante.

En la figura 34, se relacionan dos parámetros básicos con la porosidad equivalente y el diámetro de algunas columnas de suelo.

Figura 34. **Relación de consumo de cemento y densidad de la lechada con el diámetro y resistencia de columnas de suelo-cemento**



Fuente: Kutzner, Christian. *Grouting of Rock and Soil*, p.83.

En la figura 34, “K” es la relación de agua cemento de la lechada que se inyecta para hacer columnas de *jet* y “ne”, es una porosidad equivalente que se define como el grado de relleno de los huecos disponibles y el grado de utilización del caudal de lechada aportado.

Se puede apreciar que a mayor cantidad de lechada inyectada mayor es el diámetro de la columna que se obtiene. Sin embargo, es muy curioso observar que a mayores densidades de esta misma lechada de agua-cemento, el aumento del diámetro con el incremento en el volumen de la lechada introducida se vuelve menos pronunciada que para densidades de lechada más bajas.

Esto se debe a que una lechada de agente cementante más densa es mucho más difícil de inyectar porque pesa más, es más viscosa y requiere de mayor potencia de bomba para imprimirle un valor de presión. Lógicamente las mezclas de agua-cemento más cargadas de este último producen resistencias de columna mucho más alta que las lechadas más diluidas.

Todo esto indica, que balancear los parámetros del *Jet Grouting* para obtener los objetivos de un proyecto es de suma importancia; así la necesidad de tratar mayores volúmenes de suelo implica utilizar menores densidades de lechada que resultan en menores resistencias de la columna, o bien, el uso de mayores densidades de lechada para adquirir resistencia de columna más altas conlleva un volumen menor de terreno tratado.

7.1.3. Velocidad de ascenso de la tubería

Este último parámetro, tiene una relación indirecta sobre la energía específica del *Jet Grouting*, ya que los valores elevados de la velocidad a la que se retira la tubería implican una menor energía específica. El tiempo al que pasa expuesto un determinado punto dentro de la masa del suelo a la acción erosiva y de llenado del *Jet Grouting* es muy importante, ya que entre mayor sea este tiempo mayor será la oportunidad que tiene el chorro de erosión y el de llenado para tratar el terreno.

Así se llega a la conclusión que la velocidad de rotación juega un papel importante y estrechamente ligado a la velocidad de ascenso de la tubería de inyección.

7.2. Producto y resultado que se puede obtener del *Jet Grouting*

Una forma de evaluar la resistencia final del suelo-cemento de las columnas producidas por el *Jet Grouting*, es extrayendo testigos de pequeño diámetro de la masa del terreno, tratado para ser probadas en laboratorios, en donde se les aplica pruebas de resistencia a la compresión no confinada. Esta resistencia depende básicamente del tipo de suelo que se ha inyectado, siendo los materiales orgánicos y las arcillas los que dan resultados de resistencia más bajos, mientras los mejores valores se obtienen con arenas y gravas.

La tabla III, resume los valores de la resistencia a la compresión no confinada que comúnmente se obtiene en los proyectos de *Jet Grouting*.

Tabla III. Rangos de resistencia a la compresión no confinada de la masa de suelo cemento obtenida con el *Jet Grouting*

TIPO DE SUELO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA EN kg/cm ²
Turba	1,4 – 7
Arcillas	25 – 45
Limos orgánicos	7 – 28
Limos cohesivos	14 – 40
Limos	40 – 60
Arena limosa	50 – 60
Arena y gravas	60 - 140 (hasta 210)

Fuente: Raison, C.A., *Ground and Soil Improvement*, p. 133.

En el cuadro anterior, no se hace diferencia ni mención en la diferencia que existe entre los tres tipos de *Jet Grouting*, ya que la selección y uso de cada uno de los tipos de jet se basa en los resultados que se desean obtener. A continuación se presenta la tabla IV, en el que se enfatiza la diferencia en la resistencia de mezclas de suelo-cemento construidas por materiales de arenas, gravas y arcillas con respecto a los tres tipos de *Jet Grouting*. Se puede observar que los mejores resultados se obtienen con el *Jet Simple*.

Esto se debe a que los diámetros que se obtienen con este tipo son menores en relación al volumen de lechada que se inyecta, por lo que las mezclas que resultan de este tipo son más ricas en lechada que las producidas por los otros tipos de *jet* de varios fluidos.

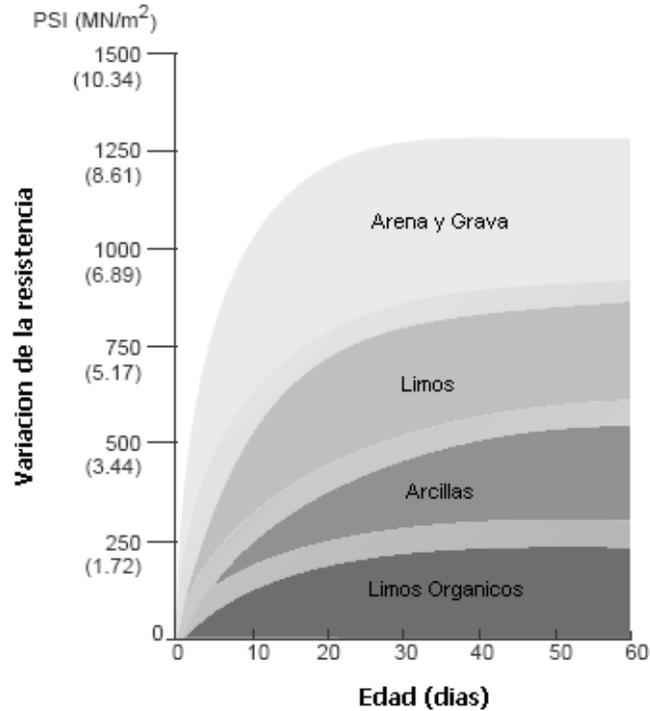
La figura 35, muestra que la variación de la resistencia de la mezcla suelo-cemento con respecto a su edad, presenta curvas similares a las registradas por las mezclas de concreto. Los valores de resistencia que aquí se presentan son un promedio de muestras de suelo-cemento hechas con todos los tipos de *Jet Grouting*, esto responde a la finalidad de mostrar la relación de la resistencia y la edad de mezcla y no para determinar rangos de valores.

Tabla IV. **Variación de la resistencia a la compresión no confinada según el tipo de *Jet Grouting* y suelo**

TIPO DE JET GROUTING Y SUELO	RANGO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA EN kg/cm ²
JET SIMPLE Arena y grava Arcillas	70 - 140 (hasta 210 en casos especiales) 17,5 - 70
JET BI-FLUIDO Arena y grava Arcillas	35 - 140 15 - 53
JET TRI-FLUIDO Arena y grava Arcillas	34 - 105 10 - 45

Fuente: Kutzner, Christian. *Grouting of Rock and Soil*, p.99.

Figura 35. **Variación de la resistencia del suelo-cemento con respecto a su edad y según distintos tipos de suelo**



Fuente: Hayward Baker Inc., *Jet Grouting*, p. 5.

Con respecto a los diámetros de las columnas de suelo-cemento que se pueden obtener con tratamientos de *Jet Grouting* se afirma que el *Jet* simple produce menores diámetros mientras que los tipos doble fluido y triple fluido producen diámetros considerablemente mayores a los primeros. Al igual que la resistencia de la masa del terreno tratado, el diámetro también varía con el material que compone el suelo.

En la tabla V se resume los diámetros que comúnmente se obtienen con la técnica del *Jet Grouting* según el tipo de *jet* y el material componente del suelo.

Tabla V. **Diámetros de columnas de suelo-cemento producidos por los tipos de *Jet Grouting* según el material del terreno**

TIPO DE SUELO	DIÁMETRO DE COLUMNA EN METROS	
	JET SIMPLE	JET DOBLE Y TRIPLE FLUIDO
Arcilla y limo arcilloso	0,4 – 0,5	0,8 – 1,0
Arena limosa	0,8 – 0,9	1,4 – 1,6
Grava arenosa	0,9 – 1,0	2,0 – 2,4

Fuente: elaboración propia.

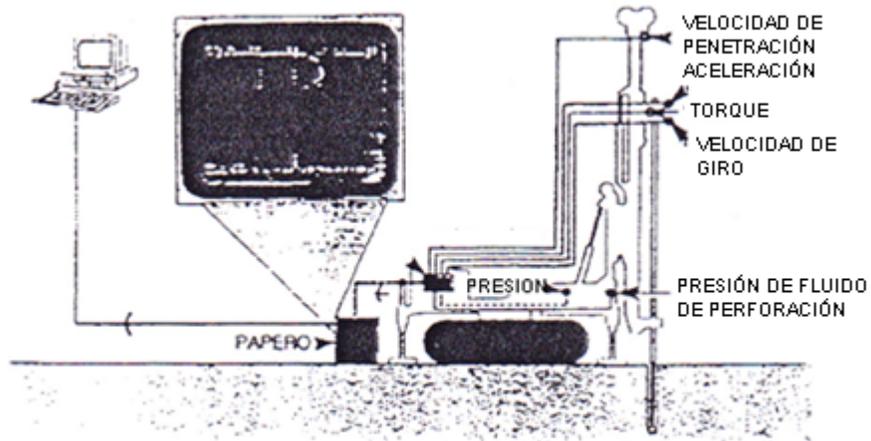
8. CONTROL DE CALIDAD Y ESPECIFICACIONES ASTM APLICABLES AL *JET GROUTING*

8.1. Control de calidad durante la ejecución

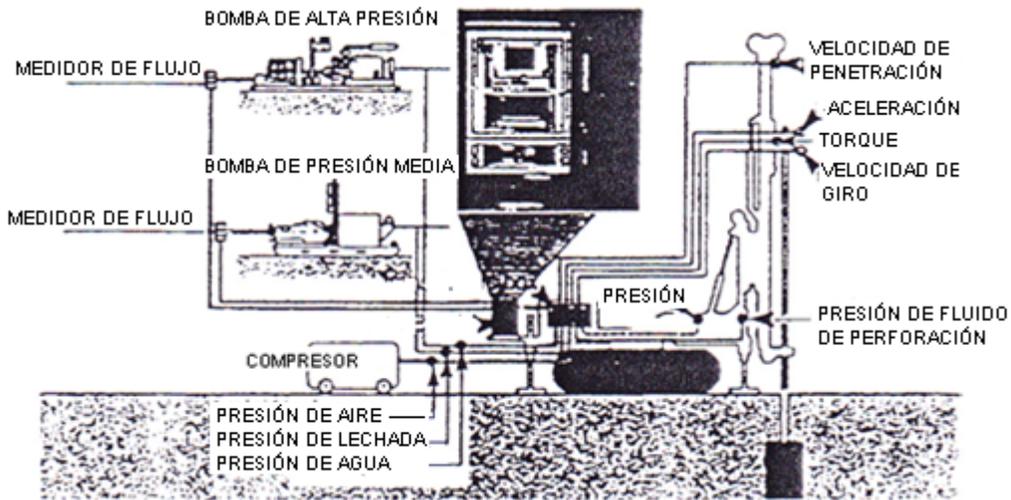
El control de calidad en todo proyecto, está constituido por procedimientos controlados durante la ejecución de la obra y por pruebas de calidad del producto terminado. En la técnica del *Jet Grouting* también se aplican ambos tipos de control, gracias a los avances tecnológicos que permiten registrar en forma digital, precisa y económica, los parámetros que influyen en el proceso constructivo. Existen diferentes procedimientos así como métodos interpretativos, sin embargo todos convergen hacia una misma teoría de interpretación.

Gran parte del control de calidad durante la ejecución de los proyectos, está constituido por sistemas de instrumentación de la máquina perforadora, lo cual permite obtener al mismo tiempo condiciones del terreno para efectuar una interpretación, un monitoreo continuo y su registro que ayuda al operador a reaccionar ante cualquier cambio necesario de los parámetros para lograr los objetivos del proyecto y un control del desvío de la dirección del taladro inherente a todos los procesos de perforación.

Figura 36. **Sistemas de monitoreo en las fases de perforación y de inyección a chorro**



SISTEMA DE MONITOREO PARA LA FASE DE PERFORACIÓN



SISTEMA DE MONITOREO EN FASE DE JET GROUTING

Fuente: Tsao, Francisco. *Mejora del suelo con la técnica del Jet Grouting*, p. 56.

8.1.1. Instrumentación y monitoreo para la fase de perforación

Consiste en el registro de la velocidad de penetración, velocidad de rotación, empuje efectivo, torque efectivo, presión y caudal de los fluidos de perforación y la vibración de la tubería de perforación. Todos estos parámetros pueden separarse en parámetros primarios y parámetros secundarios.

Los primeros, se refieren más al tipo de suelo que se perfora y, por lo tanto, son más sensibles a los cambios estratigráficos; ellos son: la velocidad de penetración, torque aplicado a la tubería y la vibración de los tubos de perforación. Mientras que, los parámetros secundarios son aquellos que se ven afectados directamente por el proceso de perforación: tipos y dimensión de los útiles de perforación (tubería y brocas), rotación y empuje de la tubería hacia abajo, presión y caudal del fluido de perforación.

Adicional de los parámetros ya descritos, suele medirse cuán desviada se ha ejecutado, o se está ejecutando, la perforación con respecto a la inclinación y dirección deseada. Esto se hace a través de la introducción de una pequeña sonda que contiene inclinómetros electrónicos cubiertos por materiales antimagnéticos, un reloj digital, batería para suministro de energía y una tarjeta de memoria. Esta sonda se instala generalmente entre la broca de perforación y el porta-toberas y su uso depende de lo crítico que sea la localización exacta de cada una de las perforaciones que se realizan en el proyecto.

Figura 37. **Inclinómetros electrónico**



Fuente: Keller Terra, Proceso de *Jet Grouting*, p. 7.

8.1.2. Monitoreo de la fase de inyección o *Jet Grouting*

Los parámetros involucrados en la fase de inyección a chorro son: caudal de la lechada de inyección, presión aplicada, rotación de la tubería y la velocidad a la que se retira ésta. Así todo sistema de control deberá ser capaz de registrar cada uno de estos parámetros en tiempo real, interpretarlos y relacionarlos para proporcionar al operador información necesaria para que pueda reaccionar ante cualquier modificación durante la ejecución de las columnas de suelo tratado o para detectar anomalías durante el proceso.

El cálculo de energía es aplicable a cualquiera de los tres tipos del *Jet Grouting*; para el caso de los tipos poli-fluido la energía del *jet* resulta de la suma de la energía del chorro de agua y la energía del chorro de la lechada del agente cementante. La energía de erosión del chorro de aire se desprecia de estos cálculos debido a que este fluido es muy compresible, y se requiere de mediciones complicadas de la humedad y temperatura en el punto de la

descarga para determinar el impacto que produce en el terreno. Despreciar la energía del aire no afecta significativamente la fiabilidad de este proceso de medición.

Actualmente muchas compañías y equipos de investigación se han concentrado en encontrar un método fiable que estime la calidad del producto terminado del *Jet Grouting* durante su ejecución. Un método que parece ser muy prometedor y fiable es la determinación y correlación de las características físicas y de resistencia del rechazo obtenido durante la fase de *jet* con la resistencia final y diámetro de las columnas de suelo tratado.

8.2. Control de calidad post-ejecución

Este control consiste en la perforación con recuperación continua de testigos, posterior a la ejecución y fraguado de la lechada de la masa de suelo tratado. A estos testigos se les efectúan distintas pruebas en un laboratorio para determinar sus propiedades físicas y de resistencia.

Dentro de los tipos de control post-ejecución se encuentran: la realización de ensayos de penetración dinámica continua (empleado en la caracterización de un reconocimiento geotécnico del suelo), ensayos presiométricos (permite interpretar la condición límite de rotura del suelo), digrafía de sondeos, tomografía eléctrica (determina la distribución real de la resistividad del subsuelo) y respuesta a ondas superficiales. Todas estas deben practicarse antes y después del tratamiento del terreno con *Jet Grouting* a fin de obtener parámetros comparativos.

Figura 38. **Testigos de una columna de *Jet Grouting***



Fuente: Keller Terra, Proceso de Jet Grouting, p. 7.

8.3. **Especificaciones ASTM aplicables al *Jet Grouting***

A continuación se presenta una lista de las especificaciones de la Sociedad Americana para Pruebas de Materiales (*ASTM* por sus siglas en ingles), que se han aplicado a lo largo de estos años como parte de las especificaciones técnicas en los proyectos de *Jet Grouting* llevados a cabo en el continente americano.

- *ASTM C 39-96*: método de pruebas para la determinación del esfuerzo a compresión de especímenes cilíndricos de concreto
- *ASTM C 150-96*: cemento Pórtland
- *ASTM C 494-92*: aditivos químicos para el concreto
- *ASTM C 618-97*: polvos “*Fly-ash*”, puzolana natural y puzolana natural calcinada como uso de aditivos minerales en concreto de cemento tipo Pórtland
- *ASTM C 1017-92*: aditivos químicos para la fabricación de concretos fluidos
- *ASTM D 2488-93*: descripción e identificación de suelos

9. RESULTADOS OBTENIDOS

Tabla VI. Resistencia en mortero cemento activo 2:1

Edad (días)	Resistencia a compresión (psi)	Resistencia a tensión (psi)
3	3 700,05	826,93
7	3 652,29	1 041,93
28	5 906,46	1 245,91

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Resistencia en mortero agua-cemento

Edad (días)	Resistencia a compresión (psi)	Resistencia a tensión (psi)
7	2 403,01	782,83
14	3 082,77	821,42
28	3 768,03	843,47

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Resistencia en mortero cemento activo 2,3:1**

Edad (días)	Resistencia a compresión (psi)	Resistencia a tensión (psi)
7	5 022,81	1 245,91
14	6 172,88	1 262,45
28	7 073,09	1 278,99

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Resistencia en mortero cemento-arcilla-arena**

Edad (días)	Resistencia a compresión (psi)	Resistencia a tensión (psi)
7	206,68	286,67
14	308,64	369,36
28	390,40	402,44

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Resistencia en mortero cemento-arcilla**

Edad (días)	Resistencia a compresión (psi)	Resistencia a tensión (psi)
7	1 690,19	622,95
14	2 158,67	711,16
28	2 755,75	959,24

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resistencia en mortero cemento-silicato 2:1**

Edad (días)	Resistencia a compresión (psi)	Resistencia a tensión (psi)
7	3 810,28	898,60
14	3 389,57	986,80
28	6 439,27	1 240,40

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Resistencia en mortero cemento-ceniza**

Edad (días)	Resistencia a compresión (psi)	Resistencia a tensión (psi)
7	1 783,89	683,60
14	2 336,88	810,39
28	3 723,94	1 086,04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resistencia en mortero cemento-silicato 1:1**

Edad (días)	Resistencia a compresión (psi)	Resistencia a tensión (psi)
3	867,14	479,62
7	1 260,30	821,42
28	2 224,81	837,96

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Resistencia en mortero cemento-silicato 1,5:1**

Edad (días)	Resistencia a compresión (psi)	Resistencia a tensión (psi)
3	1 576,29	573,34
14	2 046,60	523,72
28	3 696,38	1 030,91

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Resistencia en mortero cemento-bentonita-silicato**

Edad (días)	Resistencia a compresión (psi)	Resistencia a tensión (psi)
7	826,42	286,67
14	2 404,85	523,72
28	4 427,57	678,08

Fuente: elaboración propia.

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

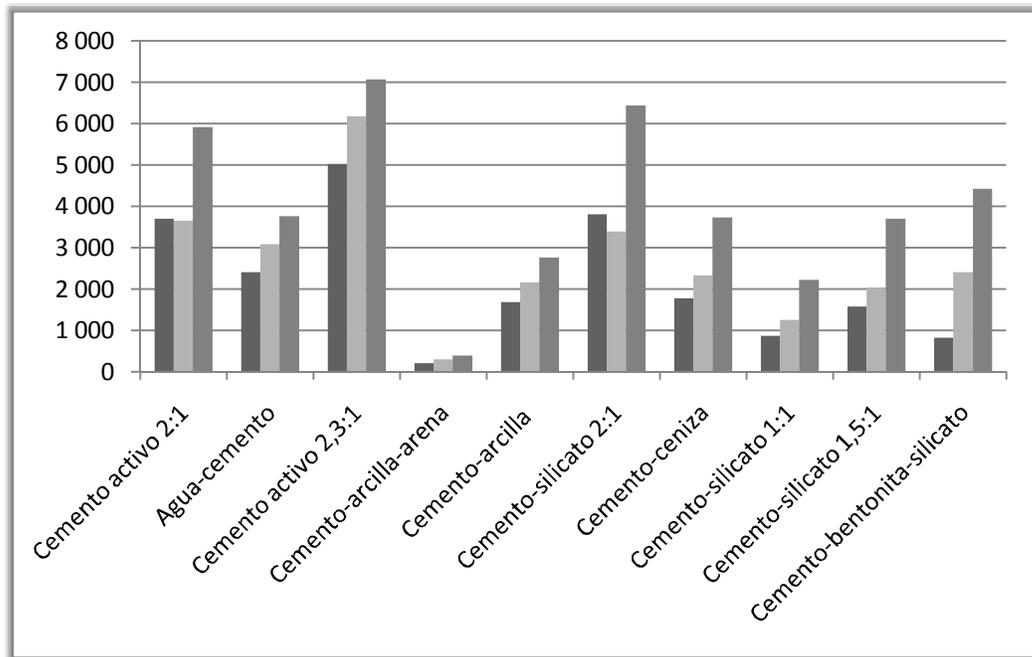
Se obtuvo 3 cubos y 2 briquetas de cada diseño de mezcla, los cuales se ensayaron a compresión y tensión, respectivamente, a 3, 7 y 28 días.

Los resultados de los ensayos dieron que el mortero de cemento activo con proporción 2.3:1 es el que más resiste, por lo cual se recomienda para la inyección. Otro resultado fue que el mortero de cemento-bentonita, no alcanzó a fraguar, ya que se desintegró, debido a encontrarse en un ambiente húmedo, con humedad relativa promedio de 75% a 90%, por lo cual se recomienda en climas cálidos secos, donde la humedad relativa varía de 10% a 55%.

El mortero de agua-cemento, fue la base para la comparación con los otros morteros, debido a que éste es el más utilizado para la inyección, ya que es el más económico.

Prueba a compresión

Figura 39. Gráfica de resultados de ensayos a compresión



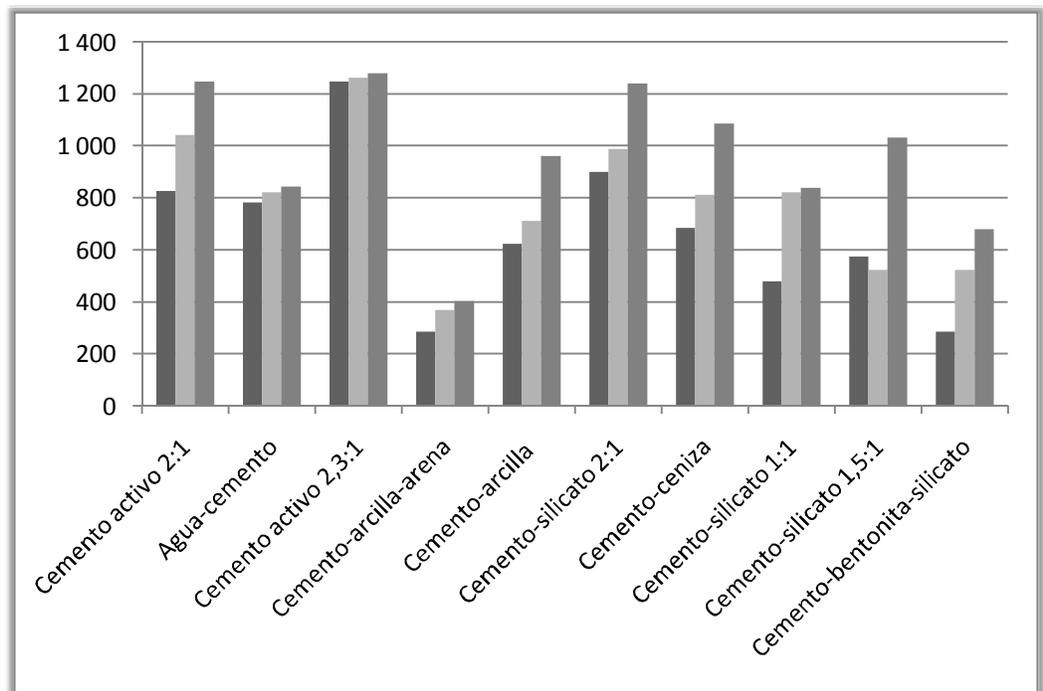
Fuente: elaboración propia.

Este gráfico comparativo entre los diferentes tipos de morteros, muestra los resultados de las pruebas realizadas a compresión, obteniendo que el mortero cemento activo 2,3:1 es el más resistente y el mortero cemento-arcilla-arena, es el menos resistente, también se podrían utilizar los morteros de cemento-silicato 2:1 y cemento activo 2:1, que su resistencia a los 28 días es la más próxima a nuestro mortero más resistente.

Otro resultado obtenido por esta prueba, es que el mortero cemento activo 2,3:1 no varió mucho su resistencia a lo largo de los ensayos, por lo que su resistencia casi se mantuvo constante.

Prueba de tensión

Figura 40. Gráfica de resultados de ensayos a tensión



Fuente: elaboración propia.

Este gráfico comparativo entre los diferentes morteros, muestra los resultados de la prueba a tensión de briquetas, obteniendo que el mortero de cemento activo 2,3:1 tiene más resistencia a tensión, seguido del mortero cemento activo 2:1 y cemento-silicato 2:1, siendo el que menos resistencia a la tensión el mortero de cemento-arcilla-arena.

CONCLUSIONES

1. La inestabilidad del suelo se da por la diferencia de niveles topográficos, entre los dos planos unidos por un talud, existe una tendencia natural de las masas a equilibrar sus potenciales energéticos.
2. Las inyecciones, son procedimientos que se aplican al subsuelo, mediante los cuales se introduce en los poros o fisuras del medio a tratar una lechada, que se solidifica adquiriendo una resistencia determinada a través del tiempo.
3. El *Jet Grouting* es un proceso que consiste en la desagregación del suelo, mezclándolo y parcialmente sustituyéndolo, por un agente cementante, normalmente cemento hidráulico.
4. Actualmente existen tres tipos de *Jet Grouting*, agrupados en un sistema de fluido simple, en el que se utiliza únicamente un líquido para corte y relleno del suelo y un sistema de múltiples fluidos, que involucra más de un fluido en su proceso.
5. Con el resultado de la aplicación del *Jet Grouting*, se obtiene un mejoramiento de la capacidad del suelo para soportar carga, disminuye o elimina problemas de asentamiento por consolidación del terreno.
6. El *Jet Grouting* puede aplicarse prácticamente a casi todo tipo de suelo, lo que hace este método una solución técnica muy atractiva, además de brindar muchas otras ventajas.

RECOMENDACIONES

1. El *Jet Grouting* utiliza la energía de la erosión en el terreno para permitir la introducción de la lechada de inyección, esto hace posible la aplicación de esta técnica en prácticamente cualquier tipo de terreno (desde las arcillas hasta las gravas). Por eso se recomienda este sistema para todo tipo de estabilización de suelos, especialmente para muros de contención o construcción de túneles.
2. Hacer una buena selección de las mezclas de inyección, porque es uno de los aspectos determinantes en el éxito de una inyección y deben seleccionarse acorde con los fines que se persigan en la zona a tratar.
3. Toda mezcla debe ser proporcionada y analizada en el laboratorio para que cumpla con parámetros de resistencia, viscosidad, rigidez, etc.
4. El equipo a utilizar en obra debe ser el adecuado para la comodidad del operador y el número de máquinas a utilizar debe calcularse según el volumen de trabajo a realizar.

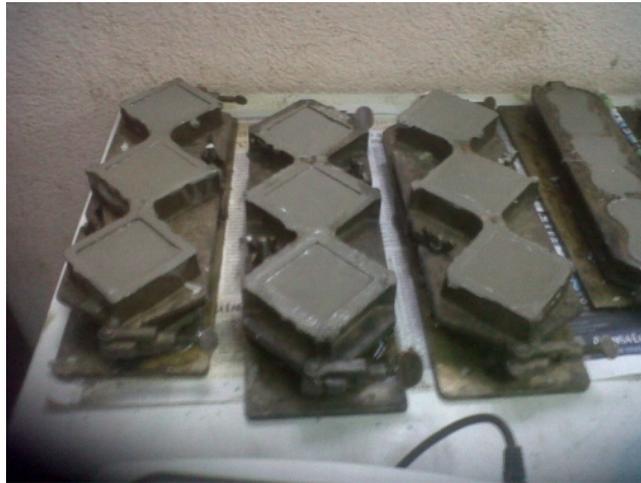
BIBLIOGRAFÍA

1. BIELZA, Ana. *Manual de técnicas de tratamiento del terreno*. Madrid: U.D, 1999. 432 p. ISBN 8492170883
2. CAMBEFORT, Henri. *Inyección de Suelos*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A., 1968. 432 p. ISBN 8428201773
3. Geo Institute. *Jet Grouting Guideline* [en línea]. Estados Unidos: Randy Post. 2009, [ref. de 23 de agosto de 2009]. Disponiblen en Web: <<http://www.geoprac.net/geonews-mainmenu-63/63-standards-and-codes/518-geo-institute-releases-jet-grouting-guideline-document>>
4. BAKER, Hayward. *Jet Grouting*. Estados Unidos: Hayward Baker Inc., 2004, 8 p.
5. KUTZNER, Christian. *Grouting of Rock and Soil*. Rotterdam, Netherlands: Balkema Publishers, 1996. 251 p. ISBN 90 5410634 4
6. MUZAS LABAD, Fernando. *Reflexiones Sobre El Jet Grouting*. Revistas de obras públicas. 1989. p. 89-94. ISBN 0034-8619
7. RAISON, C.A., *Ground and Soil Improvement*. Gran Bretaña: C.A. Raison, 2004. 183 p. ISBN 0 7277 3170 X
8. TSAO, Francisco. *Mejora del suelo con la técnica del Jet Grouting. España*, 2008. 36 p.

APÉNDICES

APÉNDICE 1

Cubos y briquetas ya elaborados



Fuente: pruebas de laboratorio.

Cubos y briquetas ya desencofrados



Fuente: pruebas de laboratorio.

Ensayo de briquetas



Fuente: pruebas de laboratorio.

Ensayo de cubos en Máquina Universal



Fuente: pruebas de laboratorio.

APÉNDICE 2

Resistencia en mortero cemento activo 2:1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21951

RESISTENCIA EN MORTEROS

INFORME No. S.C. - 082

O.T. No. 27489

Interesado: Héctor Andrés Ovando Pineda Carné 2003-12632
Proyecto: DISEÑO DE MEZCLA Y RESISTENCIA A LA COMPRESION Y TENSION A 3, 7 Y 28 DIAS
Asunto: Tesis "Inyección de Suelo por medio de la técnica de Jet Grouting"
Fecha: 23 de febrero de 2011.

Resultados:

Resistencia a la Compresión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
3	26/10/2010	8640	7800	3700	6713.33	25.81	260.14	3700.05
7	26/10/2010	6900	6230	6750	6626.67	25.81	256.78	3652.29
28	26/10/2010	11000	9100	12050	10716.67	25.81	415.27	5906.49

Resistencia a la Tensión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	-----				
3	26/10/2010	385	365	-----	375.00	6.45	58.14	826.93
7	26/10/2010	445	500	-----	472.50	6.45	73.26	1041.93
28	26/10/2010	570	560	-----	565.00	6.45	87.60	1245.91

OBSERVACIONES : I. Materiales proporcionados por el interesado.
II. La identificación de la proporción es 2:1

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados y Concreto

APÉNDICE 3

Resistencia en mortero agua-cemento



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21952

RESISTENCIA EN MORTEROS

INFORME No. S.C. - 083

O.T. No. 27489

Interesado: Héctor Andrés Ovando Pineda Carné 2003-12632
Proyecto: DISEÑO DE MEZCLA Y RESISTENCIA A LA COMPRESION Y TENSION A 3, 7 Y 28 DIAS
Asunto: Tesis "Inyección de Suelo por medio de la técnica de Jet Grouting"
Fecha: 23 de febrero de 2011.

Resultados:

Resistencia a la Compresión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
7	27/10/2010	4000	4500	4580	4360.00	25.81	168.95	2403.01
14	27/10/2010	5400	5900	5480	5593.33	25.81	216.74	3082.77
28	27/10/2010	6700	7200	6610	6836.67	25.81	264.92	3768.03

Resistencia a la Tensión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	-----				
7	27/10/2010	350	360	-----	355.00	6.45	55.04	782.83
14	27/10/2010	370	375	-----	372.50	6.45	57.75	821.42
28	27/10/2010	345	420	-----	382.50	6.45	59.30	843.47

OBSERVACIONES : I. Materiales proporcionados por el interesado.
 II. La identificación de la proporcion agua-cemento

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CI/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados y Concreto



APÉNDICE 4

Resistencia en mortero cemento activo 2,3:1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21953

RESISTENCIA EN MORTEROS

INFORME No. S.C. - 084

O.T. No. 27489

Interesado: Héctor Andrés Ovando Pineda Carné 2003-12632
Proyecto: DISEÑO DE MEZCLA Y RESISTENCIA A LA COMPRESION Y TENSION A 3, 7 Y 28 DIAS
Asunto: Tesis "Inyección de Suelo por medio de la técnica de Jet Grouting"
Fecha: 23 de febrero de 2011.

Resultados:

Resistencia a la Compresión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
7	27/10/2010	9280	8420	9640	9113.33	25.81	353.14	5022.81
14	27/10/2010	10800	11600	11200	11200.00	25.81	434.00	6172.88
28	27/10/2010	11500	13600	13400	12833.33	25.81	497.29	7073.09

Resistencia a la Tensión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	----				
7	27/10/2010	580	550	----	565.00	6.45	87.60	1245.91
14	27/10/2010	560	585	----	572.50	6.45	88.76	1262.45
28	27/10/2010	600	560	----	580.00	6.45	89.92	1278.99

OBSERVACIONES : I. Materiales proporcionados por el interesado.
II. La identificación de la proporcion 2,3:1 Cemento Activo

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados y Concreto



APÉNDICE 5

Resistencia en mortero cemento-arcilla-arena



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21954

RESISTENCIA EN MORTEROS

INFORME No. S.C. - 085

O.T. No. 27489

Interesado: Héctor Andrés Ovando Pineda Carné 2003-12632
Proyecto: DISEÑO DE MEZCLA Y RESISTENCIA A LA COMPRESION Y TENSION A 3, 7 Y 28 DIAS
Asunto: Tesis "Inyección de Suelo por medio de la técnica de Jet Grouting"
Fecha: 23 de febrero de 2011.

Resultados:

Resistencia a la Compresión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
7	28/10/2010	380	360	385	375.00	25.81	14.53	206.68
14	28/10/2010	540	590	550	560.00	25.81	21.70	308.64
28	28/10/2010	690	710	725	708.33	25.81	27.45	390.40

Resistencia a la Tensión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	-----				
7	28/10/2010	140	120	-----	130.00	6.45	20.16	286.67
14	28/10/2010	165	170	-----	167.50	6.45	25.97	369.36
28	28/10/2010	185	180	-----	182.50	6.45	28.29	402.44

OBSERVACIONES : I. Materiales proporcionados por el interesado.
 II. La identificación de la proporción es Cemento-arcilla-arena

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Inga. Dilma Yapet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados y Concreto

m.c.

APÉNDICE 6

Resistencia en mortero cemento-arcilla



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21955

RESISTENCIA EN MORTEROS

INFORME No. S.C. - 086

O.T. No. 27489

Interesado: Héctor Andrés Ovando Pineda Carné 2003-12632
Proyecto: DISEÑO DE MEZCLA Y RESISTENCIA A LA COMPRESION Y TENSION A 3, 7 Y 28 DIAS
Asunto: Tesis "Inyección de Suelo por medio de la técnica de Jet Grouting"
Fecha: 23 de febrero de 2011.

Resultados:

Resistencia a la Compresión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
7	28/10/2010	3230	2650	3320	3066.67	25.81	118.83	1690.19
14	28/10/2010	4030	3980	3740	3916.67	25.81	151.77	2158.67
28	28/10/2010	5100	5000	4900	5000.00	25.81	193.75	2755.75

Resistencia a la Tensión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	-----				
7	28/10/2010	280	285	-----	282.50	6.45	43.80	622.95
14	28/10/2010	330	315	-----	322.50	6.45	50.00	711.16
28	28/10/2010	430	440	-----	435.00	6.45	67.44	959.24

OBSERVACIONES : I. Materiales proporcionados por el interesado.
II. La identificación de la proporción es Cemento-arcilla.

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Marcela Caño Morales
DIRECTORA CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados y Concreto



m.c.

APÉNDICE 7

Resistencia en mortero cemento-silicato 2:1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21956

RESISTENCIA EN MORTEROS

INFORME No. S.C. - 087

O.T. No. 27489

Interesado: Héctor Andrés Ovando Pineda Carné 2003-12632
Proyecto: DISEÑO DE MEZCLA Y RESISTENCIA A LA COMPRESION Y TENSION A 3, 7 Y 28 DIAS
Asunto: Tesis "Inyección de Suelo por medio de la técnica de Jet Grouting"
Fecha: 23 de febrero de 2011.

Resultados:

Resistencia a la Compresión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
7	29/10/2010	6960	6780	7000	6913.33	25.81	3810.28	
14	29/10/2010	5290	5380	7780	6150.00	25.81	3389.57	
28	29/10/2010	11200	11550	12300	11683.33	25.81	6439.27	

Resistencia a la Tensión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	-----				
7	29/10/2010	430	385	-----	407.50	6.45	898.60	
14	29/10/2010	385	510	-----	447.50	6.45	986.80	
28	29/10/2010	525	600	-----	562.50	6.45	1240.40	

OBSERVACIONES : I. Materiales proporcionados por el interesado.
 II. La identificación de la proporción es Silicato 2:1.

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados y Concreto



APÉNDICE 8

Resistencia en mortero cemento-ceniza



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21957

RESISTENCIA EN MORTEROS

INFORME No. S.C. - 088

O.T. No. 27489

Interesado: Héctor Andrés Ovando Pineda Carné 2003-12632
Proyecto: DISEÑO DE MEZCLA Y RESISTENCIA A LA COMPRESION Y TENSION A 3, 7 Y 28 DIAS
Asunto: Tesis "Inyección de Suelo por medio de la técnica de Jet Grouting"
Fecha: 23 de febrero de 2011.

Resultados:

Resistencia a la Compresión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
7	29/10/2010	3010	3280	3420	3236.67	25.81	125.42	1783.89
14	29/10/2010	4280	4340	4100	4240.00	25.81	164.30	2336.88
28	29/10/2010	6860	6620	6790	6756.67	25.81	261.82	3723.94

Resistencia a la Tensión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	-----				
7	29/10/2010	310	310	-----	310.00	6.45	48.06	683.60
14	29/10/2010	385	350	-----	367.50	6.45	56.98	810.39
28	29/10/2010	490	495	-----	492.50	6.45	76.36	1086.04

OBSERVACIONES : I. Materiales proporcionados por el interesado.
 II. La identificación de la proporción es Cemento-Ceniza.

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados y Concreto

m.c.

APÉNDICE 9

Resistencia en mortero cemento-silicato 1:1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21958

RESISTENCIA EN MORTEROS

INFORME No. S.C. - 089

O.T. No. 27489

Interesado: Héctor Andrés Ovando Pineda Carné 2003-12632
Proyecto: DISEÑO DE MEZCLA Y RESISTENCIA A LA COMPRESION Y TENSION A 3, 7 Y 28 DIAS
Asunto: Tesis "Inyección de Suelo por medio de la técnica de Jet Grouting"
Fecha: 23 de febrero de 2011.

Resultados:

Resistencia a la Compresión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
3	10/01/2011	1380	1640	1700	1573.33	25.81	60.97	867.14
7	10/01/2011	2380	2240	2240	2286.67	25.81	88.61	1260.30
28	10/01/2011	4320	3010	4780	4036.67	25.81	156.42	2224.81

Resistencia a la Tensión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	-----				
3	10/01/2011	220	215	-----	217.50	6.45	33.72	479.62
7	10/01/2011	370	375	-----	372.50	6.45	57.75	821.42
28	10/01/2011	385	375	-----	380.00	6.45	58.91	837.96

OBSERVACIONES : I. Materiales proporcionados por el interesado.
II. La identificación de la proporción es Silicato 1:1.

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados y Concreto

APÉNDICE 10

Resistencia en mortero cemento-silicato 1,5:1



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21959

RESISTENCIA EN MORTEROS

INFORME No. S.C. - 090

O.T. No. 27489

Interesado: Héctor Andrés Ovando Pineda Carné 2003-12632
Proyecto: DISEÑO DE MEZCLA Y RESISTENCIA A LA COMPRESION Y TENSION A 3, 7 Y 28 DIAS
Asunto: Tesis "Inyección de Suelo por medio de la técnica de Jet Grouting"
Fecha: 23 de febrero de 2011.

Resultados:

Resistencia a la Compresión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
3	10/01/2011	2830	2910	2840	2860.00	25.81	110.83	1576.29
14	10/01/2011	4100	3100	3940	3713.33	25.81	143.89	2046.60
28	10/01/2011	6400	7620	6100	6706.67	25.81	259.88	3696.38

Resistencia a la Tensión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	-----				
3	29/10/2010	270	250	-----	260.00	6.45	40.31	573.34
14	29/10/2010	240	235	-----	237.50	6.45	36.82	523.72
28	29/10/2010	500	435	-----	467.50	6.45	72.48	1030.91

OBSERVACIONES : I. Materiales proporcionados por el interesado.
 II. La identificación de la proporción es Silicato 1,5:1.

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Inga. Dilma Yaret Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados y Concreto

mc

APÉNDICE 11

Resistencia en mortero cemento-bentonita-silicato



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 21976

RESISTENCIA EN MORTEROS

INFORME No. S.C. - 091

O.T. No. 27489

Interesado: Héctor Andrés Ovando Pineda Carné 2003-12632
Proyecto: DISEÑO DE MEZCLA Y RESISTENCIA A LA COMPRESION Y TENSION A 3, 7 Y 28 DIAS
Asunto: Tesis "Inyección de Suelo por medio de la técnica de Jet Grouting"
Fecha: 23 de febrero de 2011.
Resultados:

Resistencia a la Compresión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
7	11/01/2011	1500	1400	1600	1500.00	25.81	58.13	826.73
14	11/01/2011	4390	4480	4220	4363.33	25.81	169.08	2404.85
28	11/01/2011	7540	8080	8480	8033.33	25.81	311.29	4427.57

Resistencia a la Tensión:

EDAD EN DIAS	FECHA DE HECHURA	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	-----				
7	11/01/2011	140	120	-----	130.00	6.45	20.16	286.67
14	11/01/2011	240	235	-----	237.50	6.45	36.82	523.72
28	11/01/2011	300	315	-----	307.50	6.45	47.67	678.08

OBSERVACIONES : I. Materiales proporcionados por el interesado.
 II. La identificación de la proporcion es Bentonita-Silicato

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Terna Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Inga. Dilma Yahet Mejicanos Jo
Jefa Sección de Agregados y Concreto



