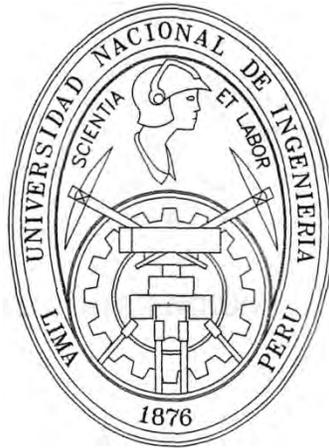


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**SECCIÓN DE POSTGRADO**



**MEJORAMIENTO DE CIMENTACIONES EN SUELOS Y ROCAS**  
**APLICANDO LAS TÉCNICAS DE GROUTING**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**  
**CON MENCIÓN EN INGENIERÍA GEOTECNICA**

**ING. SALOMÓN EDGARD AMPUERO CAYO**

**LIMA - PERU**

**2012**

**MEJORAMIENTO DE CIMENTACIONES EN SUELOS Y ROCAS  
APLICANDO LAS TÉCNICAS DE GROUTING**

**ING. SALOMÓN EDGARD AMPUERO CAYO**

**Presentado a la Sección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil en  
cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención de grado de**

**MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN  
INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

**De la**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**Abril de 2012**

© 2012, Universidad Nacional de Ingeniería, todos los derechos reservados

**Autor**

**SALOMÓN EDGARD AMPUERO CAYO**

**Facultad de Ingeniería Civil**

**Abril de 2012**

**Recomendado y aceptado por**

**Dr. Jorge E. Alva Hurtado**

**Asesor de Tesis**

*Escribir esta tesis demanda de bastante tiempo, sacrificio y dedicación.*

*Tiempo que hay que restarle a los seres queridos que nos rodean*

*A mis hijos Fiorela y André*

*A mis hermanos y a mi madre María, por su apoyo desinteresado, aliento y comprensión que me brindan.*

## RESUMEN

Las técnicas de inyecciones de grouting, se conocen desde el año 1802 en Francia, desde entonces se ha recopilado información y se practica esta técnica mejorando cada vez. Los diseños, procedimientos de inyección, están orientados hacia los objetivos básicos, que son el control de agua subterránea y el tratamiento de los macizos rocosos fracturados y suelos sin cohesión.

La aplicación de las técnicas de grouting en *rocas*; reducen el flujo de agua, refuerzan las rocas y mitigan la formación de sumideros. En *suelos*; densifica el suelo, reduce el nivel de asentamiento, incrementa la cohesión de los suelos y reduce la permeabilidad.

El mejoramiento de la fundación de una presa, aplicando las técnicas de inyecciones. Requiere de investigación geológica, geotécnica, hidrogeológica, y experiencia del constructor; teniendo éstas investigaciones, se puede diseñar las mezclas para las inyecciones y las cortinas, impermeabilizando la zona y consolidándola.

Las mezclas de lechada generalmente están compuestas de cemento, aditivos y agua. Estas mezclas son inyectadas en suelos y rocas a diferentes presiones, de acuerdo a la calidad del terreno, en presas de agua generalmente se hacen de 2 a 3 cortinas para un buen sellado y en presas de relave una sólo cortina con profundidades que van de 15 a 20 m.

En la presente tesis se encontrará las definiciones y procedimientos para los diseños de grouting en rocas y suelos, para cortinas de inyección en presas, en la cual se detalla los procedimientos de investigaciones y diseños de cortinas, estimación de presiones de inyección, procedimientos de diseño de mezclas, así como el uso de métodos de inyección, cálculo de estimaciones de perforación y cemento, control de calidad y evaluación de las absorciones de las cortinas.

En base a estos principios y teniendo en cuenta que en el Perú, ésta tecnología no se ha desarrollado ampliamente, se elaboró las metodologías investigadas de estas técnicas, con el objeto de proporcionar información orientada a estas técnicas y realizar mayores aplicaciones en nuestro país. Estas investigaciones se desarrollaron en diferentes proyectos como son: cortina de impermeabilización en Presa Huayrondo (Cerro Verde), cortina de impermeabilización en Seepage (Cerro Verde), Presa de relaves (Antamina), Presa de relaves Las Gordas, Las Aguilas y Las Hierbas (Cerro Corona). Para las diversas cortinas se elaboran diferentes diseños de mezclas y diseños de cortinas, de acuerdo a las investigaciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas, aplicando los diferentes tipos de cementos y aditivos.

## SUMMARY

The grouting injection techniques have been known since the year 1802 in France and since its conception, information has been collected that has been applied to improve the techniques. The designs and injection procedures are oriented towards basic objectives, which are groundwater control and treatment of fractured rock masses and cohesionless soils.

The application of the rock grouting techniques reduces the flow of water, reinforces rocks and mitigates the formation of sinkholes. In soils, the soil thickens, settlement is reduced and increases the cohesion of the soil and reduces its permeability.

Improving the foundation of a dam using injection techniques requires geological, geotechnical and hydrogeological surveys, and experience of the builder. Having these investigations we can design mixes for injections and grout curtains, waterproofing and strengthening the area.

Slurry mixtures are usually composed of cement, additives and water. These mixtures are injected into soils and rocks at different pressures, according to the quality of the rocks. On water dams usually 2 to 3 curtains are constructed for a good seal and in tailing dams a single curtain with depths ranging from 15 to 20 m.

In this thesis we will find definitions and procedures for the design of grouting in rocks and soils, for grout curtains in dams, which details the procedures for investigation and design of curtains, injection pressure estimation, design procedures of mixtures and the use of injection methods, calculation of estimates of drilling and concrete, quality control and evaluation of the curtain grout takes.

Based on these principles and taking into account that in Peru, this technology has not been developed extensively, methodologies are developed for these techniques in order to provide information targeted to these techniques and make further applications in our country. These investigations were carried out in various projects such as: grout curtain of Huayrondo Dam (Cerro Verde), Seepage control grout curtain (Cerro Verde), Tailings Dam (Antamina), Las Gordas, Aguilas y Hierba Tailings Dam (Cerro Corona). For the different curtains different mix and curtain designs are made, according to geological, geotechnical and hydrogeological investigations, applying different types of cements and additives.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
	1.1 Objetivos.....	2
	1.2 Teoría y principios de grouting.....	3
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>ENSAYOS DE INVESTIGACIÓN Y CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE CORTINAS DE INYECCIÓN (Aplicado a Proyectos Mineros).....</b>	<b>12</b>
	2.1 Materiales y equipos para perforación e inyección.....	12
	2.1.1 Perforación.....	12
	2.1.2 Inyección.....	16
	2.2 Investigación geológica.....	17
	2.2.1 Clasificación del material (terreno).....	20
	a) Suelo.....	20
	a.1) Clasificación y descripción del suelo.....	20
	b) Roca.....	23
	a) Clasificación, descripción física y propiedades de la roca... ..	23
	a.1) Clasificación de la roca.....	23
	a.2) Descripción de la roca.....	26
	2.3 Investigación geotécnica.....	27
	2.3.1 Evaluación de la clasificación del material.....	27
	a) Suelo.....	27
	b) Roca.....	28
	2.3.2 Ensayos que permiten caracterizar el material a inyectar.....	37
	a) Ensayos de Lugeon.....	37
	b) Ensayos de Lefranc.....	40
	c) Evaluación de los ensayos de permeabilidad.....	42
	2.4 Investigación hidrogeológica.....	43
	2.4.1 Porosidad.....	43
	2.4.2 Agua subterránea.....	43
	2.4.3 Afloramiento de agua.....	44
	2.4.4 Calidad de agua.....	44
	2.4.5 Consideraciones para grouting.....	45
	2.5 Pruebas de inyección en terreno.....	46
	2.5.1 Pruebas de grouting.....	46
	2.5.2 Metodología y procedimientos de campo.....	47
	2.5.2.1 Procedimientos de trabajos de perforación.....	47
	2.5.2.2 Procedimientos de trabajos de Inyección.....	48
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>DISEÑO DE MEZCLAS PARA GROUTING.....</b>	<b>51</b>
	3.1 Diseño de mezclas para inyecciones en laboratorio.....	51
	3.1.1 Equipos.....	52
	3.1.2 Materiales.....	53
	3.1.3 Ejecución.....	60

3.1.4 Mezclas de prueba.....	61
3.1.5 Ensayos de laboratorio.....	61
3.1.6 Presentación de resultados (registros).....	68
3.1.7 Análisis de resultados de las mezclas de diseño.....	69
3.2 Morteros.....	75
3.2.1 Morteros de inyección en estado líquido.....	75
3.2.2 Morteros inestables.....	77
3.2.3 Morteros estables.....	78
3.2.4 Morteros a base de aglomerantes hidrocarbonatados.....	81
3.2.5 Elección del mortero.....	81
<b>CAPÍTULO 4 DISEÑO DE GROUTING EN ROCAS.....</b>	<b>83</b>
4.1 Investigación de la fundación.....	83
4.1.1 Investigación geológica .....	83
4.1.2 Investigación geotécnica.....	85
4.1.3 Investigación hidrogeológica .....	85
4.2 Materiales y equipos para inyección.....	87
4.2.1 Materiales.....	87
4.2.2 Equipos de inyección .....	91
4.3 Equipos de perforación .....	96
4.4 Lechada de cemento .....	97
4.5 Presiones de Inyección .....	99
a) Pruebas de presión mediante ensayos de agua .....	99
b) Presiones para grouting en rocas .....	101
4.6 Objetivos de grout.....	103
4.7 Métodos de Inyección .....	107
a) Inyecciones aplicando el método tradicional .....	107
b) Inyecciones aplicando el método GIN .....	109
4.8 Control de filtración.....	116
4.9 Diseño de cortinas de grouting .....	117
4.9.1 Una cortina o varias cortinas .....	117
4.9.2 Profundidad de los taladros de las cortinas .....	118
4.9.3 Espaciamiento de taladros .....	119
4.9.4 Inclinación de los taladros .....	121
4.9.5 Longitud de los tramos .....	122
4.9.6 Plinto o capa de concreto .....	122
4.9.7 Longitud de la cortina .....	124
4.9.8 Estimación de cantidades .....	125
<b>CAPÍTULO 5 DISEÑO DE GROUTING EN SUELOS.....</b>	<b>127</b>
5.1 Generalidades.....	127
5.2 Función de grout en suelos.....	127
5.3 Mejoramiento de la masa.....	128
5.4 Módulos y mejoramiento de la resistencia.....	133
5.5 Reducción de la permeabilidad.....	136
5.6 Elementos estructurales.....	136

5.7 Técnica del Jet Grouting.....	137
5.7.1 Rangos de aplicación del jet grouting .....	138
5.7.2 Sistemas de jet-grouting .....	139
5.7.3 Descripción del método.....	140
5.7.4 Inyección de fluidos .....	142
5.7.5 Propiedades del suelo tratado .....	144
5.7.6 Criterios de diseño .....	146
5.7.7 Aplicaciones.....	151
<b>CAPÍTULO 6 CONTROL DE CALIDAD Y VERIFICACIÓN DEL GROUTING.....</b>	<b>152</b>
6.1 Control de calidad.....	152
6.1.1 Perforación de taladros de observación.....	154
6.1.2 Materiales y mezclas de grout .....	155
6.1.3 Verificación de los equipos.....	155
6.1.4 Presión de Inyección.....	155
6.1.5 Control de la lechada durante la inyección .....	156
6.2 Absorciones, criterios de cierre y evaluación estadística.....	158
6.2.1 Control de las absorciones.....	158
6.2.2 Criterios de cierre .....	160
6.2.3 Evaluación estadística.....	161
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>168</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>171</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>172</b>

# CAPÍTULO 1

---

## 1. INTRODUCCION

Las inyecciones en la fundación; es un proceso mediante el cuál, las fisuras y defectos geológicos, son sellados para reducir la filtración y fortalecer los cimientos, incrementando de este modo, las propiedades mecánicas de los mismos. El material de una lechada está compuesto de cemento, agua y aditivos.

La cortina de lechada tiene el objetivo de reducir la permeabilidad del macizo rocoso, en la base de la fundación, esto se construye mediante inyección de lechada de una o más filas perforadas e inyectadas para tal fin. Los taladros primarios, son espaciados de tal manera que la lechada es poco probable que se deriven de un taladro a otro, el espacio entre éstos taladros, se divide a la mitad y da origen a los secundarios, esta secuencia se repite y da origen a los terciarios, cuaternarios y así sucesivamente, hasta que se reduzca el volumen de la lechada, y esté dentro del criterio de rechazo, la lechada al solidificarse adquiere resistencias determinadas a través del tiempo.

Los ensayos de permeabilidad antes del inicio del programa de inyecciones; son muy importantes ya que de esto depende el tipo de mezcla y la presión a inyectar la lechada. Los ensayos de permeabilidad en los taladros de chequeo al finalizar la cortina inyectada, nos da una idea clara de cómo está el estado de la cortina y se puede evaluar, si está dentro del criterio de cierre.

En la superficie debajo de la presa en la zona impermeable, generalmente se construye un plinto de concreto reforzado, para reducir la capacidad de permeabilidad de la roca, cerca de la superficie y levantamientos de la superficie de la fundación a causa de los taladros de inyección.

Es importante saber identificar qué medios se pueden utilizar para remediar la naturaleza de los terrenos, y también determinar cuáles son los factores que intervienen para fijar las condiciones de empleo de las inyecciones.

Una inyección no se hace simplemente bombeando un mortero, el comportamiento del terreno, es a veces impredecible debido a sus heterogeneidades; por ello es necesario, ver lo que ocurre al comienzo de la inyección para adoptar el método correspondiente.

El mejoramiento de la fundación, consiste en impermeabilizar la roca y consolidarla, para lo cuál, se debe tener en cuenta los elementos esenciales para un buen proyecto de grouting; (Investigación geológica e hidrogeológica, buen procedimiento de inyección, experiencia del contratista y supervisión, Programación del grouting, Calidad de los trabajos).

## 1.1. OBJETIVOS

Objetivo principal es:

- Diseñar cortinas de inyecciones de consolidación e impermeabilización, en rocas y suelos, con diferentes tipos de mezclas, aplicando las técnicas de grouting.

Objetivos secundarios

- Tipo de inyecciones a realizar en función a las características geológicas de la zona, y de los estudios geotécnicos.
- Ensayos de mezclas de inyecciones en el laboratorio, con el objetivo de lograr una mejor penetrabilidad en las fisuras y fallas de la roca.
- Procedimientos, materiales y equipos usando un planeamiento y ejecución de grouting
- Control de calidad y verificación del grouting en tiempo real.

### Historia del grouting

La inyección de suelos; es un procedimiento de construcción reconocido por todos los ingenieros. Sin embargo no es muy antiguo; ya que sus comienzos se fijan en Francia a principios del siglo XIX.

Su inventor fue Bérigny en 1802, quién inyectó con éxito morteros de cemento, eventualmente asociados con puzolanas.

Sin embargo, en sus comienzos, no se pretendía más que rellenar grandes oquedades inyectando casi únicamente morteros líquidos por gravedad.

Poco a poco fueron perfeccionándose los métodos de inyección y los morteros utilizados, pero el mayor impulso de las inyecciones data de 1920 – 1930, época en que la construcción de ferrocarriles dio paso a la de grandes obras hidráulicas.

### Que es el grouting?

Los rellenos de grouting a presión; son variables, y su uso ahora es muy extendido y su aplicación es ilimitada.

El objetivo principal del grouting, es rellenar las fisuras o vacíos de los suelos y controlar las corrientes de agua a través de los defectos de las rocas debajo de las presas.

Ahora se realizan rellenos de grouting a presiones, para rellenar las fisuras y grietas, eliminar materiales de sedimento lodo y sólidos.

El grout, es usado para controlar las filtraciones y reforzar las rocas.

Los suelos o rocas grouteadas requieren de poco tiempo para alcanzar resistencias durables.

En las nuevas construcciones es recomendable emplear grouting en las fundaciones que no sean muy estables, en suelos porosos o en rocas que presenten fracturas.

El grouting en las rocas:

- Reduce el flujo de agua
- Refuerza las rocas
- Mitiga la formación de sumideros

El grouting en suelos:

- Densifica el suelo
- Reduce el nivel de asentamientos
- Incrementa la cohesión de suelos granulares
- Fortalecimiento por refuerzo
- Reduce la permeabilidad y controla el flujo de agua

Aplicaciones estructurales:

- Reforzamiento de concreto armado
- Relleno de espacios largos
- Reparación y rehabilitación de estructuras
- Control de filtración en estructuras
- Impermeabilización de filtros y tuberías

## **1.2. TEORÍA Y PRINCIPIOS DE GROUTING**

- *Consideraciones sobre el coeficiente de permeabilidad*

En fisuras finas de abertura constante y en aluviones constituídos por arenas finas o gravas la circulación de un fluido es generalmente laminar, su caudal está constituido por un coeficiente llamado coeficiente de permeabilidad.

Este coeficiente tiene las dimensiones de la velocidad, se designa por la letra K, es el coeficiente de Darcy.

- *Inyecciones en un medio permeable homogéneo e isotrópico*

En un medio homogéneo a una presión (P); se producirá un corrimiento radial del mortero en el medio citado, para el cuál la presión de inyección es proporcional al caudal, al peso específico de la lechada y su viscosidad.

Como la viscosidad de la lechada aumenta con el tiempo, y su fraguado se puede incrementar, y si la toma es de un pequeño volumen, es recomendable incrementar la presión.

- *Inyecciones de un medio permeable heterogéneo*

Los medios homogéneos e isotrópicos son una excepción en la naturaleza, casi siempre estamos en presencia de medios heterogéneos estratificados, de permeabilidades muy diferentes el espesor de éstas capas puede variar de algunos milímetros hasta centímetros

- *Dilución de los morteros de inyección que se mezclan con agua*

Esta consideración supone que el mortero rechaza el agua del terreno sin ninguna posibilidad de mezcla. Para que ésto ocurra, es preciso que el agua no se mezcle con el mortero, pero se trata de un caso muy raro.

Los morteros corrientes se pueden mezclar con agua y no existen tensiones superficiales; en vista a la experiencia los morteros no llenan inmediatamente los huecos o fisuras intersticiales, parece extenderse por sitios que ofrecen poca dificultad.

- *Circulación de los morteros en el curso de la inyección*

- *Inyección de un fluido no newtoniano en una fisura*

La inyección de un fluido en una fisura de abertura constante, corresponde a una circulación plana, es posible suponer que la viscosidad del fluido no es constante.

Los fluidos en los cuáles el esfuerzo de corte no es directamente proporcional a la relación de deformación, son no newtonianos. Estrictamente hablando la definición de un fluido es válida, solo para materiales que tienen un esfuerzo de deformación cero. Por lo común, los fluidos no newtonianos, se clasifican con respecto a su comportamiento en el tiempo, es decir, pueden ser dependientes del tiempo o independientes del mismo.

- *Inyección de un fluido newtoniano en una fisura*

En un fluido newtoniano para el coeficiente de permeabilidad de una fisura la presión es proporcional al caudal. Se define un fluido como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante. En ausencia de éste, no existe deformación. Los fluidos se pueden clasificar en forma general, según la relación que existe entre el esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación resultante. Aquellos fluidos donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación se denominan fluidos newtonianos. La mayor parte de los fluidos comunes como el agua, el aire, y la gasolina son prácticamente newtonianos bajo condiciones normales.

Un fluido newtoniano, es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo. La curva que muestra la relación entre el esfuerzo o cizalla contra su tasa de deformación es lineal.

Ejemplo de éste tipo de fluidos, es el agua en contraposición al pegamento, la miel o los geles que son ejemplos de fluido no newtoniano.

Un buen número de fluidos comunes se comportan como fluidos newtonianos bajo condiciones normales de presión y temperatura; el aire, el agua, la gasolina, el vino y algunos aceites minerales.

Matemáticamente, el rozamiento en un flujo unidimensional de un fluido newtoniano se puede representar por la relación:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dx}$$

Donde:

$\tau$ , es la tensión tangencial ejercida en un punto del fluido o sobre una superficie sólida en contacto con el mismo, tiene unidades de tensión o presión ([Pa]).

$\mu$ , es la viscosidad del fluido, y para un fluido newtoniano depende sólo de la temperatura, puede medirse en [Pa·s] o [kp·s/cm<sup>2</sup>].

$dv/dx$ , es el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección al plano en el que estamos calculando la tensión tangencial, [s<sup>-1</sup>].

- *Inyección de un mortero inestable en una fisura*

Si el mortero o lechada es demasiado espesa la roca no absorbe lechada. Para hacer una impermeabilización correcta es necesario aproximar los taladros, un mortero inestable es un relleno hidráulico.

• *Presión de inyección*

La presión de inyección, consiste en la inyección a presión de un fluido o en los huecos de una masa de suelo o roca. La lechada de inyección debe finalmente formar un gel o un sólido dentro de los huecos tratados, ésta lechada debe cubrir todos éstos vacíos.

Los objetivos principales de la presión de inyección de una masa de suelo o roca, son mejorar la fuerza y la durabilidad de la masa y / o para reducir la permeabilidad de la masa.

- i. Reducción de la permeabilidad.
- ii. Consolidación.
- iii. Mejora de las propiedades mecánicas: (1) aumento de la capacidad de carga, y (2) la consolidación de las rocas.
- iv. Relleno de vacíos. Lechada de cemento debe en lo posible, cubrir todos los vacios del subsuelo.
- v. Estabilización. Lechada de cemento, se utiliza para la estabilización de fundaciones y para la elevación, estabilización de las zapatas, losas, y pavimentos.

## **DEFINICIONES**

• **Inyecciones de Consolidación:**

Inyecciones poco profundas, perforadas, agujeros de diámetro pequeño a bajas presiones de inyección.

• **Cortina de Inyecciones:**

Inyecciones profundas, perforadas, agujeros de diámetro pequeño a presiones de inyección medias o altas.

- **Circuito de Inyecciones:**

Las inyecciones de circuito, consisten en bombear el mortero de cemento; mediante una tubería de inyección y mangueras de inyección, controlando la presión y haciendo que el retorno del mortero fluya a través de una manguera al agitador.

- **Tramo:**

Un tramo, es un segmento a lo largo de la superficie del terreno, de no más de 150 pies de largo, que es inyectado desde una sola ubicación del agitador o bomba de inyección, o desde la planta portátil de mortero de cemento.

- **Zona:**

Una zona, es un intervalo predeterminado de profundidad de un agujero inyectado.

- **Etapas:**

Una etapa, es un intervalo o segmento de agujero de inyecciones, ya sea preseleccionada o seleccionada en base a la condición encontrada en el agujero, que es aislada para fines de pruebas de agua y/o inyecciones.

- **Obturador:**

Un dispositivo que puede ser insertado con facilidad en un agujero, en una condición desinflada, y después inflado para proporcionar el sello o aislamiento requerido de una etapa. En caso de roca inestable, los obturadores a ser usados deberán ser descartables.

- **Inyecciones por Etapas Ascendentes:**

Las inyecciones por etapas ascendentes; consisten en perforar el agujero a la máxima profundidad planificada, o hasta aquella profundidad que pudiera ser por las condiciones existentes, y utilizar juegos de obturadores cada vez a profundidades menores, para aislar, pruebas de agua y de enlechado en etapas consecutivas o intervalos en el agujero.

- **Inyecciones por Etapas Descendentes:**

Las inyecciones por etapas descendentes consisten, en perforar un tramo luego inyectarlo y después reperforar el tramo y continuar perforando para nuevamente ser inyectado.

- **Método de Espaciamiento-Dividido:**

El método de espaciamiento dividido, consiste en iniciar las perforaciones e inyecciones mediante agujeros primarios relativamente bien separados entre sí, perforar e inyectar agujeros secundarios en la mitad de la separación entre los agujeros

primarios después que el mortero ha fraguado, y así sucesivamente reduciendo la separación de la misma manera, hasta que se haya obtenido la separación máxima permisible.

- Inyecciones en Patrón de Costura:

Inyecciones en patrón de costura en área de fallas, zonas de cizallamiento, juntas abiertas u otras discontinuidades mediante un patrón de agujeros diseñados para interceptarse y cruzar dicha zona a diferentes profundidades seleccionadas.

- Rechazo:

El rechazo es la aceptación del mortero a una tasa menor a un 0.5lt/min a presión máxima durante un tiempo mínimo de 5 min. Por lo general, no se inyectara en una sola etapa de cualquier agujero más de 200 bolsas de cemento

- Proporción Agua: Cemento:

La proporción agua:cemento, ésta proporción es en peso y puede ser también en volumen. Esto aplica a la formulación del mortero para inyecciones.

- Unidad Lugeón:

Un Lugeón, es una unidad de permeabilidad equivalente al flujo de 1 litro por metro de agujero por minuto para la colocación del mortero siendo probado, como medido a una presión de 10 atmósferas y de aquellas pruebas a presiones menores. El valor Lugeón se calcula de la siguiente manera:

$$UL = [(\text{litró / metro / minuto}) \times 10(\text{bars})] / (\text{presión de inyección en bars}).$$

- Lavado Especial:

Lavado especial se refiere a los dos tipos de lavado siguientes:

- Lavado mediante chorro de agua para remover materiales sueltos que obturan un agujero para inyecciones producidos por desmoronamientos o derrumbes en las paredes del agujero.
- Lavado a presión de juntas de arcilla o aperturas a través de las cuáles, el agua pasa de un agujero a otro, o de un agujero a la superficie de suelos circundantes observado durante las pruebas de agua.
- El lavado especial utiliza un cabezal especial (zapata), para dirigir la mayor parte del fluido de lavado y aire a las paredes del agujero perforado. Esta técnica se utiliza para remover el relleno en las fracturas, y para remover materiales sueltos luego obturando el agujero para inyecciones.

- Taladros de Verificación:

Taladros de verificación, se llevan a cabo después que un segmento de los taladros han sido perforados, inyectados, completados y probados mediante agua para determinar su permeabilidad después de las inyecciones.

- Profundidad de Obturación:

Con el fin de calcular la máxima presión de inyección permisible, la profundidad de empaque es la distancia más corta entre el packer y la superficie excavada de la fundación.

- Tiempo de Fraguado Tixotrópico:

Es el tiempo sobre el cuál, una muestra de mortero en un vaso de precipitación no fluye, cuando el vaso es inclinado a un ángulo de 45°.

- Criterios de Cierre:

Criterios de cierre, son los estándares en base a las absorciones de cemento (kg/m) y a la permeabilidad (Lugeón), utilizados para evaluar, si es que los objetivos de diseño de las actividades de inyecciones han sido culminados. La aplicación de estándares de cierre en base a la permeabilidad en cada agujero, y determinar, si se está obteniendo una reducción progresiva de la permeabilidad, en etapas sucesivas del procedimiento de inyección y los espaciamientos respectivos (primario, secundario, terciario, y cuaternario).

- Lavado a Presión:

El lavado a presión implica la instalación de un obturador encima de la zona a ser lavada, e inyectado un chorro de agua y aire bajo una presión controlada. Este tipo de lavado es beneficioso cuando se observen fugas conteniendo materiales en la superficie o que exista la comunicación con otros agujeros perforados durante las pruebas de agua o perforación.

- Mezcladoras Coloidales:

Las mezcladoras coloidales, están diseñadas para mojar completamente y disponer todas las partículas de cemento contenidas en una formulación de mortero. Típicamente, la característica principal de las mezcladoras coloidales es una bomba centrífuga de recirculación en la cuál se imparte una fuerza de corte al mortero a medida que pasa por una cámara estrecha conteniendo un impulsor rotando a una velocidad de 1,500 a 2,000 rpm. El mortero que pasa por esta cámara retorna a un

tanque vertical mediante una tubería montada-tangencialmente para inducir un vórtice, y recircula a través de la cámara hasta que se infiera que la mezcla adecuada ha sido obtenida. Dependiendo del diseño y eficiencia de la mezcladora, el período de tiempo requerido para una mezcla adecuada, puede ser de uno a tres minutos.

- **Agitador de Mezcla de Mortero:**

El agitador de mezcla de mortero, consiste de un tanque cilíndrico de capacidad variable adecuadamente equipado con deflectores y paletas giratorias para inducir la turbulencia. Su función es la de mantener las partículas inestables de la mezcla de mortero en suspensión después que se ha obtenido una mezcla completa y hasta que la mezcla de mortero se inyecte en el agujero.

- **Cabezal:**

El cabezal, es un colector múltiple conteniendo válvulas e indicadores de medición para monitorear, controlar y dirigir el mortero de cemento, a la tubería de inyección. Los colectores pueden ser montados directamente en la tubería de inyección o conectados a ésta mediante una manguera corta de conexión.

- **Varilla de Medición de Nivel:**

La varilla de medición de nivel, es una varilla calibrada utilizada para medir la cantidad de mortero tomado por un agujero, como medido en el agitador de mezcla de mortero. El nivel de mortero indicado en la varilla, indica la cantidad de mezcla de mortero que queda en el agitador.

**LAS LIMITACIONES FÍSICAS DE LECHADA DE CEMENTO SON:**

- i. El tamaño máximo y mínimo y la geometría de los huecos para ser rellenados.
- ii. El tamaño de las partículas del cemento, bentonita, u otros componentes sólidos en la mezcla de lechada.
- iii. La presencia de minerales en los materiales de las aguas subterráneas o fundación que tienen un efecto perjudicial en la fuerza de la lechada, ajuste de la hora, el volumen o permanencia.
- iv. La posible incompatibilidad de la inyección de materiales utilizados en la mezcla.
- v. La presencia de arcilla u otros materiales erosionables en la fundación que no se puede sacar completamente con el lavado.
- vi. Solución de partículas de cemento de la suspensión de la lechada.

Ejemplos de limitaciones relacionadas con la eficacia de la lechada al campo de operaciones y métodos incluyen:

- Daño a las fundaciones como resultado de presiones excesivas.
- El uso inadecuado de perforación y equipos de inyección.
- Inadecuada inyección de huecos de fundación por el engrosamiento de la mezcla mediante métodos inadecuados de la inyección.
- Inadecuada separación de los agujeros o la mala orientación de los agujeros de la lechada, si no se utiliza personal experimentado para supervisar e inspeccionar las operaciones de perforación e inyección.

# CAPÍTULO 2

---

## ENSAYOS DE INVESTIGACIÓN Y CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE CORTINAS DE INYECCION (Aplicado a Proyectos Mineros)

Los objetivos de éste capítulo, son evaluar:

- Investigaciones geológicas y geotécnicas del sitio
- Materiales a inyectar
- Elección de las mezclas de cemento
- Presiones de inyección
- Medidas de seguridad y control

Para realizar el diseño de una cortina de grouting, en una estructura rocosa, se debe seguir las siguientes pautas:

- Entender el tipo de proyecto
- Revisar la información existente
- Programa de investigación del sitio
- Programa de pruebas de mezclas de grout

### 2.1 MATERIALES Y EQUIPOS PARA PERFORACIÓN E INYECCIÓN

#### 2.1.1 Perforación

##### a) Las perforaciones rotativas.

Este tipo de perforación, es por lo general de investigación, y se realizan con los equipos diamantinos, la perforación para recuperación de testigos, deberá ser realizada de conformidad con los requerimientos de la norma ASTM D 2113, y según se especifique. La recuperación de testigos, deberá hacerse como sea requerido usando equipo de tamaños HW-HQ o NW-NQ.

a.1 Corridas: La perforación deberá realizarse de modo que sea recuperada la máxima cantidad de testigo. Esto requiere una estrecha vigilancia del agua de lavado, presiones de perforación, longitudes de las corridas, caídas de las barras, y toda otra información significativa, sobre la naturaleza del material perforado. Las recuperaciones de testigos, deberán ser limitadas a una máxima longitud de 1.5 m.

a.2 Preservación de Testigos: Los testigos, se deben colocar en cajas de madera. Todas las cajas deberán ser uniformes en tamaño. Las particiones deberán ser arregladas para detallar e interpretar los testigos de una manera conveniente. Las

profundidades de la parte inferior de todas las corridas, deberán ser marcadas en los espacios de los bloques.

a.3 Colocación de Testigos en Cajas. La corrida entera, deberá ser colocada en las filas paralelas de la caja, comenzando por la fila de arriba y colocándo los testigos en incremento de profundidad de la izquierda a derecha, y de arriba a abajo. Fracturas mecánicas de testigos y juntas inducidas, deberán ser diferenciadas e identificadas. Las recuperaciones de testigos, serán separadas por bloques de madera, marcándose claramente la recuperación y la profundidad. La roca fracturada deberá ser expuesta en toda su longitud verdadera y sujeta de manera segura. Los testigos sueltos deberán ser marcados con bloques de madera que tengan 5 cm cuadrados de sección transversal y una longitud igual a la del testigo suelto. Las marcas de profundidad, serán anotadas en la parte superior e inferior, de todos los bloques de testigos sueltos.

a.4 Marcación de la Cajas de Testigos. La identificación deberá incluir la designación del hueco, número de caja y número total de cajas, elevación de la parte superior del hueco, y la designación de la estructura del proyecto. Sólomente los testigos de un hueco deberán colocarse en una caja. Registros; En la perforación se, debe informar todos los cambios, dureza, pérdida o ganancia de agua de perforación, y toda otra información pertinente, el Ing. Geólogo hace un logeo de los testigos, y mantiene un registro de la perforación.

a.5 Fotografías de los Testigos; Se toma una foto a cada caja inmediatamente después de que todos los testigos, hayan sido colocados en la caja, y haya sido apropiadamente marcada.



Figura 2-1: Logeo Geológico, las cajas deben almacenarse cuidadosamente con los cores, para mostrar en el futuro las evidencias geológicas y geotécnicas



Figura 2-2: Equipo de perforación Longyear

a.6 Equipos y herramientas. Para la ejecución de las perforaciones diamantinas con recuperación de muestras, se debe contar con los siguientes equipos y herramientas:

### **Equipos:**

#### **Barras**

- Barras de revestimiento (Casing)
  - Línea PW con diámetro aproximado  $\pm 125$  mm
  - Línea HW con diámetro aproximado  $\pm 4 \frac{1}{2}$ "
  - Línea NW con diámetro aproximado  $\pm 3$ "
  - Línea BW con diámetro aproximado  $\pm 2$ "
  - Línea AW con diámetro aproximado  $\pm 1 \frac{1}{2}$ "
- Barras de perforación
  - Línea PQ con diámetro aproximado  $\pm 115$  mm
  - Línea HQ con diámetro aproximado  $\pm 100$  mm
  - Línea NQ con diámetro aproximado  $\pm 85$  mm
  - Línea BQ con diámetro aproximado  $\pm 65$  mm
  - Línea AQ con diámetro aproximado  $\pm 50$  mm
- Bomba impulsadora de agua.

#### **Herramientas**

- Herramientas para las operaciones de hizaje de la torre, varillado, acople y desacople de las líneas de revestimiento y perforación.

- Stock de brocas, zapatas, escareadores diamantados de diferente dureza, diámetro y diseño según el tipo de suelo y roca por atravesar.
- Saca muestra
- Canaleta porta testigo
- Caja porta testigo.

**b) Las perforaciones rotopercusivas.**

Generalmente éste tipo de perforaciones, son para inyecciones. Los equipos de perforación rotopercusivas son:

- Trackdrill
- Compresora de aire, que produzca más de 8 bares de presión;
- Conjunto completo de tuberías de perforación, brocas, herramientas y accesorios de perforación

El sistema de perforación rotopercusivo, es destructivo y se realiza con diámetros brocas de diámetro de 2 1/2" a 3" para los taladros de inyección y taladros de control.

En las perforaciones en roca, se debe evitar la desviación, y no se debe tolerar más de 3%, para esto se debe usar barras centralizadoras.

*Instrumentos para medir la desviación de taladros:*

- Tropari SDP
- Réflex EZ-Trac
- En huecos menores a 50m se puede verificar con (medidor de distancia laser)

Ejemplo,

Desviación de taladro

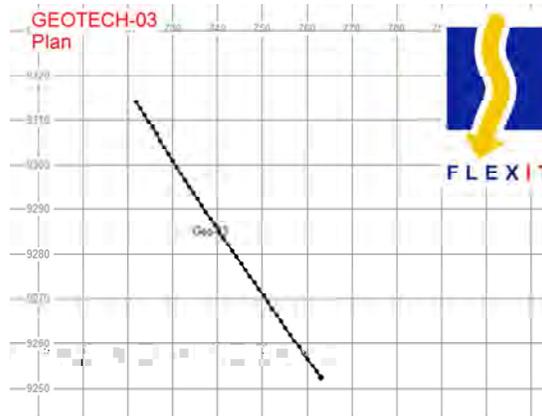


Figura 2-3: Desviación de taladro

En la Figura 2-3, el taladro tiene una profundidad de 63 m., se puede apreciar la desviación del taladro desde los 35m. Teniendo una deflexión aproximada de 1.25m. Para reducir la desviación en los taladros, se recomienda usar barras centralizadoras.

### 2.1.2 Inyección

*Los equipos de inyección son los siguientes:*

- Central de inyección, compuesta por: mezclador de alta turbulencia, agitador y bomba de media presión, para bombeo de lechada de cemento.
- Bomba inyectora, de caudal continuo y presión de 0 – 30 bar
- Sistema de registro en tiempo real de caudal y presión.
- Mezclador de cemento de alta turbulencia.
- Agitador de cemento de alta turbulencia, de volumen útil 200 litros.
- Bomba de agua de alta presión, 40 bares para lavado y abastecimiento de agua.
- Manómetros patrones para el chequeo periódico de los manómetros en obra.
- Varillas, tuberías, packers, válvulas, manómetros y registradores de flujo.
- Computadora con software instalado para lectura de parámetros de inyección en tiempo real del sistema de registro.

## 2.2 INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA

El reconocimiento geológico, debe incluir la geología general de la zona con sus características tectónicas, determinación de familias de juntas, planos de discontinuidad, buzamientos, zonas de poca resistencia, etc.

Para que mediante la alineación de los barrenos de inyección se obtenga una óptima intercepción.

Los sondeos de investigación con recuperación de testigo son la herramienta más usada en esta etapa.

Los aspectos más generales a tener en cuenta en un estudio geológico son los siguientes:

### a) Espaciamiento entre juntas abiertas

El espaciamiento, es importante, ya que cuánto más pequeño sea éste, es más fácil la inyección, además nos provee la información, como posibles vías de agua, cavidades, y posibles asentamientos diferenciales. De no tener en cuenta haría que la inyección sea mucho más cara, y difícil.

### b) Apertura de las grietas

Las juntas más fáciles de inyectar; son aquellas cuyas aperturas están; entre 0.5 a 6 mm en las juntas superiores a 6 mm, el fluido inyectado viaja muy fácilmente, y puede producirse una penetración excesiva, el cuál, se le debe dar un tipo de inyección intermitente.

### c) Inclinación y buzamiento

La inclinación de las juntas, con relación a las perforaciones, inciden en el tratamiento de las inyecciones, las perforaciones verticales, interceptan bien a las juntas que forman un ángulo de 0 a 60 grados, las juntas que tiene un fuerte buzamiento normalmente requieren el uso de perforaciones inclinadas.

d) Consistencia del macizo rocoso

La consistencia de un macizo rocoso bueno se puede ver cuándo se perfora un taladro y este se mantiene estable sin derrumbe, en cambio un macizo blando o fracturado, es cuando el taladro se derrumba en algún tramo y la perforación se hace difícil, provocándose atrapamiento de barras e incluso hasta se puede perder el taladro.

e) Rocas buenas; intrusivas y volcánicas sin alteración:

- Calizas
- Mármol
- Areniscas
- Cuarcitas
- Limolitas
- Gneis

f) Rocas malas; intrusivas y volcánicas con alteración:

- Lutitas
- Pizarras
- Filita
- Esquisto

g) Zonas geológicamente críticas

Las zonas críticas son: fallas, diaclasas, deslizamientos de estratos, materiales heterogéneos, etc. En éstas zonas, se tienen que realizar perforaciones con inclinaciones y espaciamentos diversos.

h) Permeabilidad

Cuando el terreno tiene permeabilidad alta y está muy suelto, existe la probabilidad de asentamientos, la inyección debe ser para reducir la permeabilidad y consolidar la zona.

Programa de investigaciones geológicas

- Revisión de la geología regional
  - i. Formación geológica; la formación geológica local es la mas importante

- ii. Filtraciones de agua
- Fotointerpretación
  - i. Los estudios de fotografías aéreas, revelan la geología regional, mostrando reservorios de agua, y la estructura geológica. Pueden detectar las fallas mayores
- Mapeo geológico
  - i. Es parte del diseño de exploración, el cuál se debe trabajar a escala en campo y a lo largo del eje de la presa, a partir del eje se debe explorar 10 m para cada lado, esto nos sirve para ver por dónde puede haber fugas, y donde están ubicadas las fallas y fisuras de las rocas, dando una interpretación más, detallada. Aquí se observa la orientación, buzamiento, descripción del material encontrado en la fisura o falla,
  - ii. Este mapeo, se debe realizar en escala 1cm=1m, localizando las fracturas, cortes, contactos, cavidades filtraciones, juntas. Esto es muy importante porque sirven para identificar las zonas que necesitan una aplicación, un tratamiento, ya sea de concreto o blanket
- Evaluación geofísica de la zona
  - i. Prospecciones geofísicas; Son de menos costo
    - Refracción sísmica

La refracción sísmica nos determinara los tipos de suelos y la profundidad de la roca sobre el cual están los tipos de suelos.
    - Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica con los sondeos eléctricos verticales determinara los tipos de suelo y la profundidad de la roca y la napa freática

Las perforaciones nos dará el nombre de los suelos y el nombre de la roca registrados en los core de las perforaciones

- ii. Down hole
  - iii. Los perfiles son muy importantes, para elaborar un programa de grouting, los métodos de investigación geofísica, nos sirven para ver, donde hay agua, vacíos, zonas de roca dura y blanda.
- Interpretaciones geológicas

Esta interpretación, nos dirá la calidad de la roca (RQD), las zonas de fallas e inclinaciones, dimensiones y tipos de rocas, así mismo, se apreciará las zonas más permeables, y la consistencia de la roca.

### 2.2.1 Clasificación del material (terreno)

#### a) Suelo

##### a.1) Clasificación y descripción del suelo

- ***Clasificación:*** el sistema de clasificación de suelos de acuerdo a la norma técnica ASTM D2487 es la Unified Soil Classification (Clasificación Unificada de Suelos), Esta clasificación divide los suelos en:
  - Suelos de grano grueso.
  - Suelos de grano fino.
  - Suelos orgánicos.

En ella, se encuentran criterios definidos para la nomenclatura de los suelos, y una lista en la que éstos, se agrupan dentro de divisiones fijas conforme al tamaño de sus partículas, y a los resultados de prueba de laboratorio acerca de sus características físicas.

***Suelos gruesos.*** Se dividen en gravas y arena, y se separan con el tamiz No. 4, de manera, que un suelo, pertenece al grupo de grava si más del 50% retiene el tamiz No. 4 y pertenecerá al grupo arena en caso contrario.

***Suelos finos.*** El sistema unificado, considera los suelos finos divididos entre grupos: limos inorgánicos(M), arcillas inorgánicas con limos y arcillas orgánicas (O). Cada uno de éstos suelos, se subdivide a su vez según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es  $Ll = 50\%$ . Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L (low compressibility). Si es mayor de 50 se añade la letra H (high compressibility). Obteniéndose de éste modo, los siguientes tipos de suelos:

- ML: Limos Inorgánicos de baja compresibilidad. OL: Limos y arcillas orgánicas.
- CL: Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad. CH. Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad. MH Limos inorgánicos de alta compresibilidad. OH: arcillas y limos orgánicas de alta compresibilidad.

Criterio para la asignación de símbolo de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio			Clasificación de suelos		
			Símbolo de grupo	Nombre del grupo	
Suelos de partículas gruesas más del 50% es retenido en la malla No. 200	Gravas Mas del 50% de la fracción gruesa es retenida en la malla No. 4	Gravas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	$Cu \geq 4$ y $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Grava bien graduada
			$Cu < 4$ y $1 > Cc > 3$	GP	Grava mal graduada
		Gravas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200	IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	GM	Grava limosa
			IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	GC	Grava arcillosa
	Gravas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No.200	Cumple los criterios para GW y GM	GW-GM	Grava bien graduada con limo	
		Cumple los criterios para GW y GC	GW-GC	Grava bien graduada con arcilla	
		Cumple los criterios para GP y GM	GP-GM	Grava mal graduada con limo	
		Cumple los criterios para GP y GC	GP-GC	Grava mal graduada con arcilla	
	Arenas El 50% o mas de la fracción gruesa pasa la malla No. 4	Arenas limpias Menos del 5% pasa la malla No. 200	$Cu \geq 6$ y $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Arena bien graduada
			$Cu < 6$ y $1 > Cc > 3$	SP	Arena mal graduada
Arenas con finos Mas del 12% pasa la malla No. 200		IP < 4 o debajo de la línea "A" en la carta de plasticidad	SM	Arena limosa	
		IP > 7 o arriba de la línea "A" en la carta de plasticidad	SC	Arena arcillosa	
Arenas limpias y con finos Entre el 5 y 12% pasa malla No.200		Cumple los criterios para SW y SM	SW-SM	Arena bien graduada con limo	
		Cumple los criterios para SW y SC	SW-SC	Arena bien graduada con arcilla	
Suelos de partículas finas El 50% o mas pasa la malla No. 200	Limos y arcillas Limite Líquido menor que 50	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CL	Arcilla de baja plasticidad
			IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	ML	Limo de baja plasticidad
		Orgánicos	Limite líquido - secado al horno < 0.75	OL	Arcilla orgánica
			limite líquido - no secado		Limo orgánico
	Limos y arcillas Limite Líquido mayor que 50	Inorgánicos	IP > 7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea "A"	CH	Arcilla de alta plasticidad
			IP < 4 y se grafica en la carta de plasticidad abajo de la línea "A"	MH	Limo de alta plasticidad
		Orgánicos	Limite líquido - secado al horno < 0.75	OH	Arcilla orgánica
			limite líquido - no secado		Limo orgánica
Suelos altamente orgánicos	Principalmente materia orgánica de color oscuro	PT	Turba		

Cuadro 2-1: Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) ASTM D 2487

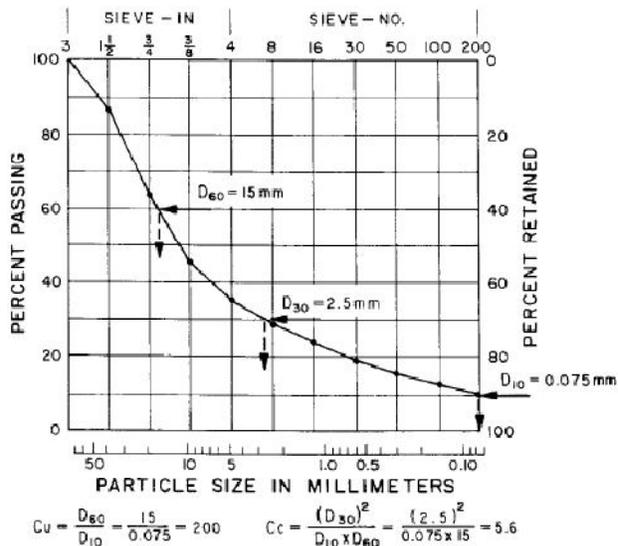


Figura 2-4, Cálculo de Cu y cc

CARTA DE PLASTICIDAD  
SUCS ASTM D2487

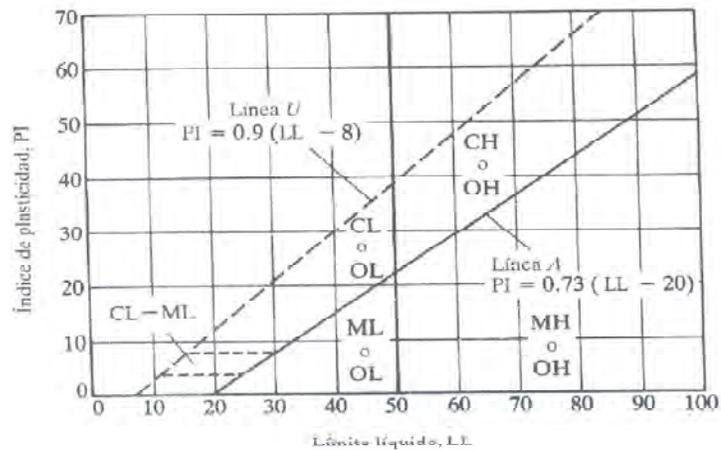


Figura 2-5: Carta de plasticidad

- Todas las investigaciones de suelos para ingeniería; tienen una prueba de calicata, trincheras, perforaciones u otros métodos de exploración, muestreos de la superficie y mapas, descripción de los logeos.
- La descripción terminológica con mucho criterio, es principal para la clasificación visual y pruebas manuales.
- Toda clasificación de suelos y descripción de partículas; están en un sistema métrico SI
- **Descripción del suelo;** para identificar y describir a un suelo se necesita saber lo siguiente:
  - Granulometría
  - Forma
  - Orientación de la estratigrafía
  - Composición química de las partículas
  - Las fracciones coloidales y sedimentables que contiene.

Un suelo cualquiera puede exhibir propiedades sólidas, viscosas, plásticas o líquidas; por tanto, cuando es posible predecir su verdadero estado físico, el diseño de cimentaciones; se realiza tomando en cuenta esa información.

Para que un suelo sea estable se debe estudiar lo siguiente:

- Estabilidad volumétrica
- Resistencia
- Permeabilidad

- Compresibilidad
- Durabilidad

## b) Roca

a) Clasificación, descripción física y propiedades de la roca

### *a.1) Clasificación de la roca*

La clasificación, es según su composición y origen.

- **Grupos de rocas por su composición.**
  - Rocas silíceas.** Están formadas por sílice (SiO<sub>2</sub>) ó silicatos, y se reconocen, porque son duras, (no se rayan con la navaja, y rayan al vidrio) y no reaccionan con el ácido clorhídrico diluído, es decir, no producen burbujas. Existen rocas silíceas sedimentarias (sílex, algunas areniscas y conglomerados), ígneas (prácticamente todas ellas) y metamórficas (cuarcita).
  - Rocas carbonatadas.** Se rayan fácilmente con la navaja y reaccionan con el ácido, produciendo burbújas de CO<sub>2</sub>. En ellas, es predominante el carbonato de calcio (caliza) o mezclado con arcilla (por ejemplo en margas). También pueden ser rocas que posean fragmentos de caliza (por ejemplo: conglomerados o canto angulosos, carbonatados) o cemento calizo (por ejemplo areniscas carbonatadas conocido como calcaranitas). Son llamadas también, rocas calcáreas. Un tipo especial, son las dolomitas. También se rayan con la navaja, pero no reaccionan con el ácido en frío, sino en caliente.
  - Rocas arcillosas.** Aunque las arcillas son silicatos, se diferencian de las silíceas por su aspecto terroso, y su plasticidad al mojarse. No reaccionan con el ácido si son puras, comenzando a hacerlo si son margosas, formado por arcillas de una granulometría menor a 2 micras.
  - Rocas salinas o evaporitas.** están constituídas por sales del tipo sulfatos (yeso) o cloruros (sal gema). El yeso se reconoce por su escasa dureza (se le raya con la uña). La sal gema y otras sales parecidas se reconocen por su sabor salado más o menos amargo. No reaccionan con el ácido (es necesario lavarlas bien de posibles impurezas), son solubles.

- v. **Rocas ferruginosas.** Si el hierro es abundante, su color suele ser rojizo y se reconocen porque se vuelven magnéticas al calentarlas al rojo vivo. Las areniscas ferruginosas; poseen cemento de hematites ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). También se comportan así, otros minerales ferruginosos cómo: goethita, siderita, limonita, ferrosita (sulfato de fierro hidratado, etc.
- vi. **Rocas carbonosas.** Algunas rocas de tonos negros, conservan materia orgánica que con frecuencia huele mal (al partirlas), o por lo menos reaccionan (burbujean) con agua oxigenada. También son carbonosas (no es lo mismo que carbonatadas) los carbones, y los hidrocarburos cómo el petróleo o el gas natural. Los carbones se reconocen con facilidad comprobando que son combustibles.
- vii. **Otras composiciones.** Con bastante frecuencia, suele haber mezcla entre las composiciones anteriormente descritas. Para proceder a su examen e identificación, conviene coger muestras recién fragmentadas y limpias de restos de barro ó vegetación, que habrá que retirar. Una identificación exacta se realiza estudiando bajo el microscopio en secciones muy delgadas realizadas por un petrólogo.

- **Grupos de rocas por su origen**

- **Rocas sedimentarias;** se formaron por la acción de los denominados procesos geológicos externos, (erosión, transporte y sedimentación) causados por agentes, como el viento, el agua (en sus diferentes estados). Al sedimentarse, los materiales que las originaron se ordenaron en capas de dimensiones y extensión que pueden variar ampliamente. Esta sedimentación puede haberse producido en un mar, a distintas profundidades, pero también, en zonas costeras, marismas, etc. ó áreas continentales como ríos, lagos, desiertos, etc.
- Existen tres grandes grupos de rocas sedimentarias:
  - a) *Rocas detríticas:* Están formadas por fragmentos de rocas; preexistentes, que se acumularon al disminuir la velocidad de las corrientes que los transportaron.
  - b) *Rocas químicas:* Se forman por precipitación química de sustancias disueltas en agua. Podríamos decir, que están

formadas principalmente de cemento (sin apenas fragmentos), al revés que las detríticas.

- c) *Rocas organógenas*: Están formadas principalmente por acumulaciones de restos de seres vivos. podemos denominarlas calizas organógenas, su composición y el cemento son calcáreos. Rocas sedimentarias carbonatadas con diseminación de carbón.
- **Rocas ígneas (o magmáticas)**: Se forman en relación con la solidificación de magmas, ya sea en la superficie terrestre (rocas volcánicas) o en su interior, a veces a mucha profundidad (rocas plutónicas y filonianas). Estas últimas, si las encontramos hoy día en superficie, se debe a que la erosión, ha desmantelado a lo largo de millones de años, todo lo que las cubría llamado techo.
  - a) *Rocas plutónicas*: Formadas por la solidificación de magmas en profundidad, se presentan en grandes masas llamadas batolitos, si su extensión es mayor de 100 km<sup>2</sup>, o Plutón si su extensión es menor de 100 km<sup>2</sup>. La roca que más frecuentemente se forma y presenta así es el granito. Es una roca muy dura, compacta y homogénea, rota por diaclasas a través de las cuáles, la erosión puede separarlo en bloques rocosos, frecuentemente de varios metros. De cerca, en corte fresco, se observan los granos minerales grises de cuarzo (algo traslúcidos), blanco-opacos de feldespato, y negro en laminillas brillantes de mica; biotita, horblenda no existe en el mundo un macizo rocoso que no tenga diaclasas, todas tienen diaclasas (fracturas de corta longitud).
  - b) *Rocas filonianas* : representan magmas u otros productos de origen ígneo que se han introducido en grietas, allí se han enfriado y, en consecuencia, ahora presentan geometría de filón que corta, llamados diques en intrusivos o en rocas estratificados cortados por el dique y como sills si son rocas ígneas paralelos a los estratos.
  - c) *Rocas volcánicas*: Se forman por el enfriamiento de lavas que solidificaron en la superficie terrestre en conos volcánicos, o a muy poca profundidad, por ejemplo; las andesitas, tufos

volcánicos, formadas por acumulación de los productos de explosiones volcánicas, estos tufos y brechas volcánicas se llaman rocas piroclásticas.

- **Rocas metamórficas:** Son rocas que se originan por transformaciones de otras anteriores causadas por altas presiones o temperaturas. Las características de estas rocas, son las que rodean a los intrusivos; el mármol se ha originado a partir de la caliza, también son metamórficas las cuarcitas, procedentes del metamorfismo de rocas silíceas. Por altas presiones y temperaturas por un metamorfismo regional o en contacto con intrusivos llamados metamórficos de contacto.

IGNEAS	ACIDAS	DE GRANO GRUESO	Granito, Granadiorita, Monsonita, monzonita cuarcífera, diorita, diorita cuarcífera o adamelita.
		DE GRANO FINO	Andesita, Riolita, dacita, latita, latita cuarcífera
	BASICAS	DE GRANO GRUESO	Gabro
		DE GRANO FINO	Basalto
	NO GRANULAR	Pedernal, Obsidiana	
SEDIMENTARIAS	DE GRANO GRUESO	Conglomerado, Brecha	
		Pudinga	
	DE GRANO FINO	Arenisca, Ortocuarcita, Arcosa, Grauvaca	
		Limolita, Arcilla	
	NO GRANULAR	Caliza, Dolomita, Marga	
CRISTALINAS	Yeso		
METAMORFICAS	DE GRANO GRUESO	Gneis	
	DE GRANO FINO	Pizarra, Esquisto, Fillita	
	NO GRANULAR	Cuarcita, Mármol	

Cuadro 2-2: Clasificación de rocas por su origen

### *a.2) Descripción de la roca*

Esta descripción, es cuantitativamente y cualitativamente, se realiza mediante las investigaciones, de logeos de explotación, mapeos y perfiles geológicos para describir la fundación de la roca.

Para realizar la descripción geológica de las rocas se realizarán los estudios de:

- 1) Litología
- 2) Dureza
- 3) Desgaste de la roca
- 4) Alteración de la roca

- 5) Resistencia de la roca
- 6) Frecuencia de fracturas
- 7) Color de la roca
- 8) Textura

### 2.3 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA

Las investigaciones geotécnicas, realizadas mediante sondeos con recuperación de testigos, y mediante la toma de datos de niveles de agua, tienen como fin principal, determinar las características del macizo rocoso o la granulometría de suelos, y el nivel de agua subterránea en la zona de la construcción.

#### 2.3.1 Evaluación de la clasificación del material

##### *a) Suelo*

- Evaluación de las propiedades físicas del suelo.
  - La consistencia de suelos; Los minerales de arcilla permiten remodelar (con agua), el suelo arcilloso sin desmenuzarse. Esta naturaleza cohesiva, se debe al agua adsorbida que rodea las partículas de arcilla.
  - La densidad relativa; el estado de densidad de los suelos arenosos, puede ser expresado numéricamente, por la fórmula de Terzaghi, determinable en laboratorio.

$$Dr = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} * 100$$

Material	Compacidad	D <sub>r</sub> (%) (1)	N (2)	Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	Índice de poros (e)	Ángulo de rozamiento interno
GW: Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena	Densa	75	90	2.21	0.22	40
	Medianamente densa	50	55	2.08	0.28	36
	Suelta	25	<28	1.97	0.36	32
GP: Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena	Densa	75	70	2.04	0.33	38
	Medianamente densa	50	50	1.92	0.39	35
	Suelta	25	<20	1.83	0.47	32
SW: Arenas bien graduadas, arenas con grava	Densa	75	65	1.89	0.43	37
	Medianamente densa	50	35	1.79	0.49	34
	Suelta	25	<15	1.70	0.57	30
SP: Arenas mal graduadas, arenas con grava	Densa	75	50	1.76	0.52	36
	Medianamente densa	50	30	1.67	0.60	33
	Suelta	25	<10	1.59	0.65	29
SM: Arenas limosas	Densa	75	45	1.65	0.62	35
	Medianamente densa	50	25	1.55	0.74	32
	Suelta	25	<8	1.49	0.80	29
ML: Limos inorgánicos, arenas muy finas	Densa	75	35	1.49	0.80	33
	Medianamente densa	50	20	1.41	0.90	31
	Suelta	25	<4	1.35	1.00	27
CL: Arcillas baja plasticidad			30-2 (3)	2,15-1,5 (4)		28-25
MH: Limos alta plasticidad			30-2 (3)	2,15-1,5 (4)		25-22
CH: Arcillas alta plasticidad			30-2 (3)	2,15-1,5 (4)		20-17

(1) Dr es densidad relativa ó índice de densidad.

(2) N es el número de golpes por 30 cm de penetración en el SPT.

Cuadro 2-3: Densidad, porosidad y ángulo de rozamiento interno típicos

## b) Roca

### - *Clasificación geomecánica*

Las clasificaciones geomecánicas, tienen por objeto, caracterizar un determinado macizo rocoso, en función de una serie de parámetros, a los que se les asigna un cierto valor. Por medio de la clasificación, se llega a calcular un índice característico de la roca, que permite describir numéricamente la calidad de la misma. Es una herramienta muy útil, en el diseño y construcción de obras subterráneas, pero debe ser usada con cuidado para su correcta aplicación, pues exige conocimientos y experiencia por parte de quién la utiliza. Las clasificaciones pueden ser usadas en la etapa de Proyecto y también durante la Obra

### ***ÍNDICE DE CALIDAD DE LAS ROCAS (RQD)***

- Se basa en la recuperación modificada de un testigo (El porcentaje de la recuperación del testigo de un sondeo)
- Depende indirectamente del número de fracturas, y del grado de la alteración del macizo rocoso.

- Se cuenta solamente fragmentos iguales o superiores a 100 mm de longitud.
- El diámetro del testigo, tiene que ser igual o superior a 57.4 mm y tiene que ser perforado con un doble tubo de extracción de testigo.

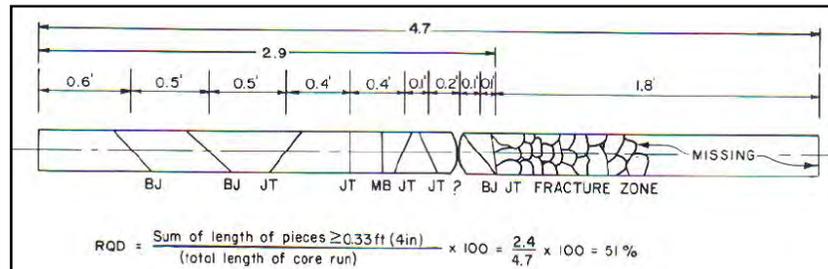


Figura 2-6: Cálculo de RQD

CLASIFICACION DE LA CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO SEGÚN EL INDICE	
RQD %	CALIDAD
<25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Media
75 - 90	Buena
90 - 100	Muy buena

Cuadro 2-4: Índice de calidad de la roca



### ***Evaluación del RQD***

- Del Cuadro 2-5, se puede observar que el RQD máximo es 47, en el tramo de 25 a 26 m, para este caso se recomienda usar mezclas de 1:1 a 0.6:1 relación agua:cemento.
- Cuando el RQD es mayor de 75% la absorción en este tramo del taladro es baja, y se debe usar una mezcla fluída por ejemplo 1:1+1%, agua:cemento + aditivo.
- Si el RQD es menor de 75% se deben usar mezclas más densas, ya que los consumos o absorciones, serán altas las mezclas a usar debe ser 0.8:1 a 0.6:1

### **CLASIFICACION DE BIENIAWSKI (R.M.R)**

El sistema de clasificación Rock Mass Rating o sistema RMR fue desarrollado por Z.T. Bieniawski durante los años 1972- 73, y ha sido modificado en 1976 y 1979, en base a más de 300 casos reales de túneles, cavernas, taludes y cimentaciones. Actualmente se usa la edición de 1989, que coincide con la edición de 1979. Para determinar el índice RMR de calidad de la roca, se hace uso de los seis parámetros del terreno siguientes:

- a) **La resistencia de la roca;** tiene una valoración máxima de 15 puntos, y puede utilizarse como criterio el resultado del ensayo de resistencia, a compresión simple ó bien, el ensayo de carga puntual (Point Load).
- b) **El RQD (Rock Quality Designation);** tiene una valoración máxima de 20 puntos. Se denomina RQD de un cierto tramo de un sondeo a la relación, en tanto por ciento, entre la suma de las longitudes de los trozos de testigo mayores de 10 cm y la longitud total del sondeo.
- c) **Separación entre discontinuidades;** tiene una valoración máxima de 20 puntos. El parámetro considerado, es la separación en metros, entre juntas de la familia principal de diaclasas de la de roca.
- d) **Estado de las discontinuidades;** es el parámetro que más influye, con una valoración máxima de 30 puntos. Pueden aplicarse los criterios generales, en la que el estado de las diaclasas se descompone en otros cinco parámetros: persistencia, apertura, rugosidad, relleno y alteración de la junta.
- e) **Agua Freatica;** la valoración máxima, es de 15 puntos. Se ofrece en tres posibles criterios de valoración: estado general, caudal cada 10 metros de túnel, y relación entre la presión del agua y la tensión principal mayor en la roca.

- f) **Orientación de las discontinuidades;** este parámetro, tiene una valoración negativa, y oscila para túneles entre 0 y -12 puntos. En función del buzamiento de la familia de diaclasas y de su rumbo, en relación con el eje del túnel (paralelo o perpendicular), se establece una clasificación de la discontinuidad en cinco tipos: desde muy favorable hasta muy desfavorable.

El RMR, se obtiene como suma de las puntuaciones, que corresponden a los valores de cada uno de los seis parámetros enumerados. El valor del RMR oscila entre 0 y 100, y es mayor cuanto mejor es la calidad de la roca.

**Valor de Q y RMR**

$$Q = (RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF)$$

$$RMR = 9 \times \ln(Q) + 44$$

Dónde:

Índice de calidad de la roca (RQD)

Número de sistemas de fisuras ( $J_n$ )

Rugosidad de las fisuras ( $J_r$ )

Alteración de las fisuras ( $J_a$ )

Factor de reducción por agua en las fisuras ( $J_w$ )

Factor de reducción de esfuerzos (SRF)

Ejemplo:

RQD=22.6;  $J_n=9$ ;  $J_r=2$ ;  $J_a=4$ ;  $J_w=1$  y SRF=2.5

$$Q = (RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF)$$

$$Q = (22.5/9) \times (2/4) \times (1/2.5)$$

$$Q = 0.5$$

$$RMR = 9 \times \ln(Q) + 44$$

$$RMR = 9 \times \ln(0.5) + 44$$

$$RMR = 37.76$$

CLASIFICACION GEOMECANICA RMR (Bieniawski, 1989)								
<b>* Parametros de Clasificacion</b>								
1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Ensayo de craga puntual	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	Compresion Simple (Mpa)	
		Compresion simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5 5 - 1 < 1	
		<i>Puntuacion</i>	15	12	7	4	2   1   0	
2	RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	< 25 %	
	<i>Puntuacion</i>		20	17	13	6	3	
3	Separacion entre diaclasas		> 2 m	0.6 - 2 m	0.20 - 0.60 m	0.06 - 0.20 m	< 0.06 m	
	<i>Puntuacion</i>		20	15	10	8	5	
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m	
		<i>Puntuacion</i>	6	4	2	1	0	
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.10 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm	
		<i>Puntuacion</i>	6	5	3	1	0	
		Rugosidad	Muy rugosa	rugosa	ligeramente rugosa	ondulada	suave	
		<i>Puntuacion</i>	6	5	3	1	0	
		Relleno	Ninguno	relleno duro < 5 mm	relleno duro > 5 mm	relleno blando < 5 mm	relleno blando > 5 mm	
		<i>Puntuacion</i>	6	4	2	2	0	
Alteracion	Inalterada	ligeramente alterada	moderadamente alterada	muy alterada	descompuesta			
<i>Puntuacion</i>	6	5	3	1	0			
5	Agua Freatica	Caudal por 10 m de tunel	nulo	< 10 lts/min	10 - 25 lts/min	25 - 125 lts/min	> 125 lts/min.	
		Relacion: Presion de agua/Tenaion principal mayor	0	0 - 0.10	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	
		Estado general	seco	ligeramente humedo	humedo	goteando	Agua fuyendo	
		<i>Puntuacion</i>	15	10	7	4	0	
<b>* Correccion por la Orientacion de las discontinuidades</b>								
Direccion y buzamiento			Muy	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy	
<i>Puntuacion</i>	Tuneles		0	-2	-5	-10	-12	
	Cimentaciones		0	-2	-7	-15	-25	
	Taludes		0	-5	-25	-50	-60	
<b>* Orientacion de las discontinuidades en el tunel</b>								
Direccion perpendicular al eje del tunel				Direccion paralela al eje del tunel		Buz. 0 - 20°. Cualquier direccion		
Excavacion con buzamiento		Excavacion contra buzamiento						
Buz. 45 - 90°	Buz. 20 - 45°	Buz. 45 - 90°	Buz. 20 - 45°	Buz. 45 - 90°	Buz. 20 - 45°			
Muy Favorable	Favorable	Media	Desafavorable	Muy desfavorable	Media	Desafavorable		
<b>* Clasificacion Final</b>								
Clase	I		II		III		IV	V
Calidad	Muy Buena		Buena		Media		Mala	Muy Mala
Puntuacion	100 - 81		80 - 61		60 - 41		40 - 21	< 20

Cuadro 2-6: Clasificación gemecánica RMR

- **Propiedades de la roca**

- Porosidad;
  - Indica la proporción entre la parte vacía de la roca (poros) y la parte sólida. Las porosidades normalmente fluctúan entre 0 y 40%.
- Densidad;
  - Corresponde al peso por unidad de volumen, puede relacionarse con la mineralogía y constitución de los granos que forman la roca.
  - Nos da información acerca de la composición mineralógica.
- Velocidad de Sonido;
  - Permite estimar el grado de fisuración (en combinación con un estudio petrográfico)
  - Como la roca no es homogénea, y presenta fisuras, éstas distorsionan el valor que resulta al medir la velocidad del sonido, a través del espécimen.
  - Se puede medir  $V_l$  experimentalmente (considera las fisuras de la roca)
  - Se define el índice de calidad :

$$IQ\% = \frac{V_l}{V_l^*} \cdot 100$$

- Se puede medir el índice de calidad, puede correlacionarse con la porosidad, mediante la siguiente relación:

$$IQ\% = 100 - 1.6 \cdot n\%$$

**Typical Values of  $V_l^*$  for Rocks**

Rock	$V_l^*$ m/s
Gabbro	7000
Basalt	6500–7000
Limestone	6000–6500
Dolomite	6500–7000
Sandstone and quartzite	6000
Granitic rocks	5500–6000

From Fourmaintraux (1976)

Cuadro 2-7: Valores típicos de velocidad en rocas

- Permeabilidad;
  - Permite evaluar la interconexión relativa de los poros, de modo que un fluido, pueda movilizarse a través de la roca.
- Durabilidad;
  - Indica la tendencia, a la descomposición de los componentes o estructuras, con la consecuente degradación de la calidad de la roca
- Resistencia;
  - Determina la competencia de la matriz rocosa para mantener unidos sus componentes
  - Se mide mediante el ensayo de carga puntual:

$$I_{S(50)} = \frac{P}{D^2}$$

- $I_{S(50)}$ ; es la resistencia a la carga puntual (rango típico va de 0.05 a 15 MPa)
- P; es la carga al momento de la ruptura
- D; es la distancia entre los puntos cargados

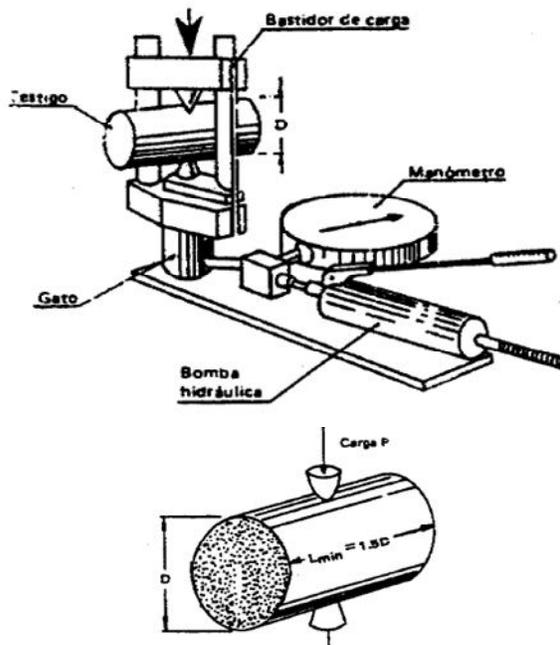


Figura 2-7: Ensayo de carga puntual

Tipo de roca	Peso específico seco		Porosidad (n) (%)
	(t/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	
<b>Ígneas</b>			
Basalto	2,21 - 2,77	21,66 - 27,15	0,22 - 22,06
Diabasa	2,82 - 2,95	27,64 - 28,91	0,17 - 1,00
Gabro	2,72 - 3,0	26,66 - 29,40	0,00 - 3,57
Granito	2,53 - 2,62	24,79 - 25,68	1,02 - 2,87
<b>Metamórficas</b>			
Cuarcita	2,61 - 2,67	25,58 - 26,17	0,40 - 0,65
Esquisto	2,6 - 2,85	25,48 - 27,93	10,00 - 30,00
Gneis	2,61 - 3,12	25,58 - 30,58	0,32 - 1,16
Mármol	2,51 - 2,86	24,60 - 28,03	0,65 - 0,81
Pizarra	2,71 - 2,78	26,56 - 27,24	1,84 - 3,61
<b>Sedimentarias</b>			
Arenisca	1,91- 2,58	18,72 - 25,28	1,62 - 26,40
Caliza	2,67 - 2,72	26,17 - 26,66	0,27 - 4,10
Dolomita	2,67 - 2,72	26,17 - 26,66	0,27 - 4,10
Lutita	2,0 - 2,40	19,60 - 23,52	20,00 - 50,00

Cuadro 2-8: Peso específico y porosidad típicos

TIPO DE ROCA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (Kg/cm <sup>2</sup> )	DENSIDAD (Tm /m <sup>3</sup> )
Andesita	1.500-2.500	2,5 a 2,8
Arcillita	280-800	2,2 a 2,7
Arenisca	80-2.000	1,6 a 2,9
Basalto	2.000-4.000	2,7 a 2,8
Caliza	800-1.500	1,5 a 2,8
Conglomerado	1.400	2,0 a 2,7
Cuarcita	900-4.700	2,3 a 2,7
Dacita	1200-5000	2,5 a 2,75
Diabasa	1.600-2.400	2,8 a 3,1
Dolomía	360-5.600	2,2 a 2,9
Esquisto	108-2.300	2,7 a 2,9
Gabro	1500-2800	2,8 a 3,1
Gneis	1.500-3.000	2,5 a 2,8
Granito alterado	108-1.450	2,5 a 2,6
Granito sano	800-2.700	2,5 a 2,8
Grauvaca	2.000-2.500	2,6 a 2,7
Marga	35-1.970	2,6 a 2,7
Mármol	800-1.500	2,6 a 2,8
Micacita	200-653	2,4 a 3,2
Pizarra	2.000-2.500	2,7 a 2,8
Riolita	800-1600	2,45 a 2,6
Traquita	3.300	2,70
Yeso	40-430	2,2 a 2,3

Cuadro 2-9: Resistencia a compresión típica

## 2.3.2 ENSAYOS QUE PERMITEN CARACTERIZAR EL MATERIAL A INYECTAR

### a) *Ensayo de Lugeon (1936)*

- Es un ensayo de absorción in situ, que se ejecuta en las rocas fisuradas, y tiene por objeto proporcionar una idea aproximada de su permeabilidad. Consiste en inyectar agua a presión mediante una bomba y medir el caudal que escurre por las fisuras del macizo rocoso.
- EQUIPOS PARA LAS PRUEBAS DE PRESIÓN DE AGUA
  - Los medidores de agua usados para las pruebas de presión de agua (pruebas de permeabilidad) deberán tener la capacidad de registrar volúmenes de flujo de 0.5 gpm o 0.07 pcm (dependiendo de la unidad en que fueron calibrados).
  - Los manómetros, utilizados para las pruebas de presión de agua; deberán estar calibrados con precisión a una presión máxima del manómetro, que no exceda los 60 psi, para las pruebas de baja presión (15 a 40 psi) y 250 psi, para las pruebas de alta presión (50 a 150 psi).
  - Los cabezales, utilizados para las pruebas de presión de agua; deberán estar equipados sólo con válvulas de diafragma del tipo-Saunders, y deberán incluir una válvula “de purga”; para facilitar el ajuste de la presión de agua.
  - Las bombas usadas para las pruebas de presión de agua, deberán proporcionar un flujo constante, sin-fluctuaciones dentro del rango de presiones de prueba deseados, y no deberán ser usadas para las inyecciones de mortero.
- El procedimiento de ensayo es el siguiente:
  - Se lleva a cabo una perforación en el macizo a ensayar, en tramos de 5 metros
  - Aproximadamente, para aislar el tramo a ensayar se utiliza un obturador de goma o packer que por compresión se expande. El fondo del pozo actúa, como segundo obturador.
  - Luego se inyecta agua, a presión con una bomba.

- Se dispone un manómetro en la boca del pozo, un caudalímetro (contador de agua) y una válvula de descarga, que permiten medir los caudales inyectados a una presión dada.
- Un Lugeon, es una unidad de permeabilidad equivalente al flujo de 1 litro por metro de agujero por minuto.
- El valor Lugeon se calcula de la siguiente manera:
- $L = [(\text{litro} / \text{metro} / \text{minuto}) \times 10(\text{bars})] / (\text{presión de inyección en bars})$ .
- El tiempo del periodo de medición de la prueba es en 5 etapas, la primera, segunda y tercera ascendente, cuarta y quinta descendente, esto se inicia cuando el agujero esté limpio y lleno de agua. Se efectuará, presiones de 0.5 a 1 psi/pie de profundidad del obturador, el cuál es equivalente de 0.1 bar/m a 0.21 bar/m.

$$1 \text{ Lugeon} = \frac{Q \left( \frac{\text{Lts}}{\text{min}} \right)}{L(m)} \times \frac{10}{P(\text{bar})}$$

- En rocas malas a normales, se considera una presión de 0.1 bar/m hasta una profundidad de 5 o 6 m y, luego se incrementa la presión, hasta 0.21 bar/m para las presiones máximas.

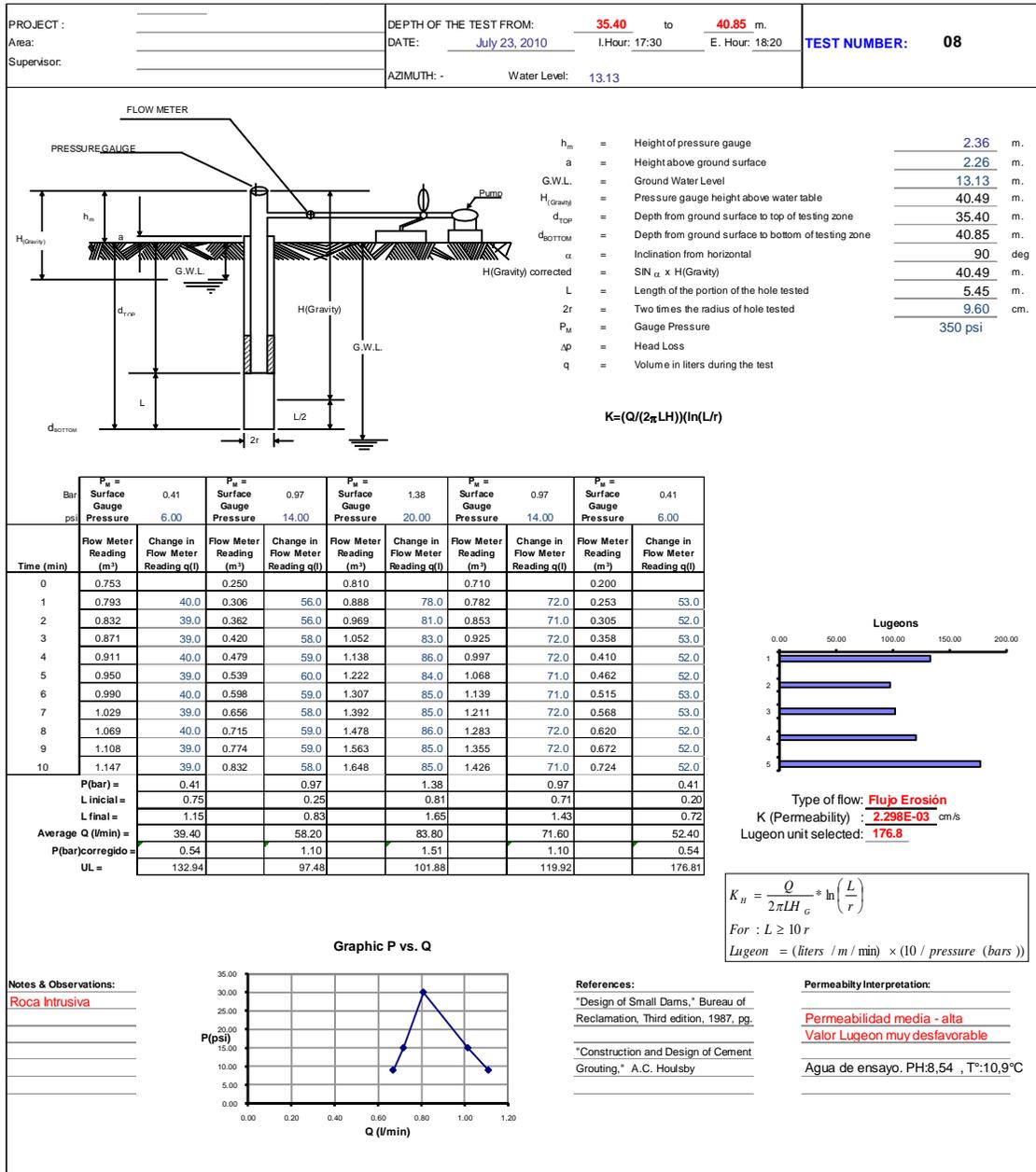


Figura 2-8: Equipos para ensayo de Lugeon, (manómetro y caudalímetro)

Estos equipos de medida, sirven para realizar las pruebas de tipo "Lugeon"; necesarias para el cálculo de la permeabilidad, de las formaciones geológicas realizadas en el transcurso de los sondeos de exploración.

- Manómetro, permite medir con facilidad las presiones resultantes de los diferentes caudales de agua inyectados en la recámara de pruebas aislada de bajo del obturador, de 0-25 bar.

- Válvulas de regulación: 2 válvulas de controles; 1 válvula de cierre
- Contador volumétrico (caudalimetro)



Cuadro 2-10: Ensayo de permeabilidad en un estadio de 27 a 33 m

## b) Ensayos de Lefranc

### Ensayo Lefranc con nivel constante

Se introduce un caudal constante,  $Q$ , para mantener el nivel del agua dentro del sondeo estabilizado a una altura  $h_m$ . Ver la figura adjunta para las variables usadas en las fórmulas siguientes.

La conductividad hidráulica se obtiene por esta expresión:

$$K = \frac{Q}{C \cdot h_m}$$

donde:  $K$  = conductividad hidráulica

$Q$  = caudal inyectado

$h_m$  = altura del agua dentro del sondeo, por encima del nivel estático previo

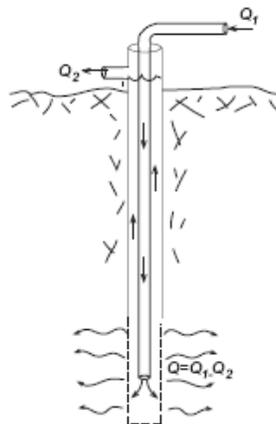
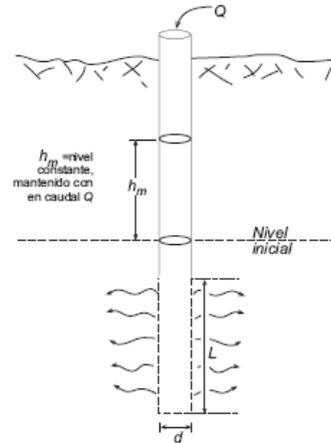
$C$  = factor de forma<sup>3</sup>:

$$C = \frac{2\pi L}{\ln(2L/d)}$$

$L$  = longitud de la zona filtrante

$d$  = diámetro del sondeo

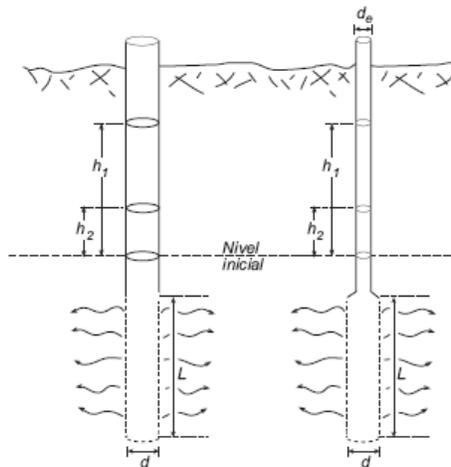
(Unidades homogéneas, por ejemplo: metros, segundos, m<sup>3</sup>/s, m/s)



Para poner en práctica el procedimiento, Custodio (op. cit.) propone un dispositivo como el esquematizado en la figura adjunta: se inyecta un caudal  $Q_1$ , rebosa un caudal  $Q_2$ , por tanto el caudal inyectado en el terreno será:  $Q = Q_1 - Q_2$ .

En formaciones poco o muy poco permeables bastará con añadir volúmenes conocidos de agua para mantener el nivel constante, por ejemplo en la boca del sondeo.

### Ensayo Lefranc con nivel variable



Subida inicial, medida de descensos

Se hace subir el nivel hasta una altura  $h_0$ , y posteriormente medimos dos niveles,  $h_1$  y  $h_2$ , entre las que ha transcurrido un tiempo  $t$ .

La permeabilidad se calcula mediante la expresión siguiente:

$$K = \frac{d_e^2 \ln(2L/d)}{8 L t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

donde:  $K$  = conductividad hidráulica

$h_1, h_2$  = altura del agua al principio y al final del ensayo

$t$  = tiempo transcurrido entre la observación de los niveles  $h_1$  y  $h_2$

$L$  = longitud de la zona filtrante

$d$  = diámetro de la zona filtrante

$d_e$  = diámetro de la entubación (puede ser igual a  $d$ )

Proyecto:	Prof. de ensayo (m):	25.00	a	30.10	Sondeo Nº:	TEG-94
Area:	Fecha:	23-Jul-10	Inicio:	8:05:00	Ensayo Nº:	06
Elevación (m):	Stick Up (m):	2.30	Fin:	9:10:00	Profundidad Total (m):	30.10
Coordenadas:	Litología del tramo:	ROCA INTRUSIVA			Supervisor:	MT

DATOS DEL ENSAYO	
SWL : Profundidad del nivel estático	8.29 m
rb : Radio del pozo	0.048 m
rp : Radio de la tubería de descarga	0.013 m
β : Inclinación respecto de la horizontal	90°
Hwt : Columna de agua sobre el punto medio del intervalo de prueba	27.55 m
Hct : Carga Hidrostática sobre el punto medio del intervalo de prueba	19.26 m
SWL' : Profundidad del nivel estático (corregido)	8.29 m
Hct' : Carga Hidrostática sobre punto medio de Intervalo (corregido)	19.26 m
Hwt' : Columna de agua sobre el punto medio de Intervalo (corregido)	27.55 m
L : Longitud del intervalo de prueba	5.10 m
Lp : Longitud de la tubería de descarga	27.30 m
R : Radio de Influencia	5.10 m

MEDIDAS REALIZADAS			
t (min)	Lecturas	Q (l/min)	Q (m³/día)
0	650.00	-	-
1	702.00	52.00	74.88
2	755.00	53.00	76.32
3	805.00	50.00	72.00
4	855.00	50.00	72.00
5	905.00	50.00	72.00
6	965.00	50.00	72.00
7	1005.00	50.00	72.00
8	1055.00	50.00	72.00
9	1104.00	49.00	70.56
10	1153.00	49.00	70.56
11	1203.00	50.00	72.00
12	1252.00	49.00	70.56
13	1301.00	49.00	70.56
14	1351.00	50.00	72.00
15	1401.00	50.00	72.00

REPRESENTACIÓN GRÁFICA	
------------------------	--

CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA													
Fórmulas:													
$hf = 1.541e-8 * Lp(Q/140)^{1.85} / rp^{4.8655}$													
$H_{nit} = (Hwt' - Hct' - hf + Stick\ Up)$													
$K = 0 * \ln(R/r_0)$													
Notas:													
1. El nivel se debe mantener constante en el tope del stick up													
2. Si el pozo es seco, ingresar SWL = Profundidad del pozo													
	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Qp : Caudal promedio</td> <td>50.07 L/min</td> </tr> <tr> <td>Qp : Caudal promedio</td> <td>72.10 m³/día</td> </tr> <tr> <td>Hf : Perdida de carga por fricción</td> <td>3.91 m</td> </tr> <tr> <td>Hnit : Carga Neta sobre el punto medio del intervalo de prueba</td> <td>6.68 m</td> </tr> <tr> <td>K : Conductividad Hidráulica</td> <td>1.57E+00 m/día</td> </tr> <tr> <td>K : Conductividad Hidráulica</td> <td>1.82E-03 cm/s</td> </tr> </tbody> </table>	Qp : Caudal promedio	50.07 L/min	Qp : Caudal promedio	72.10 m³/día	Hf : Perdida de carga por fricción	3.91 m	Hnit : Carga Neta sobre el punto medio del intervalo de prueba	6.68 m	K : Conductividad Hidráulica	1.57E+00 m/día	K : Conductividad Hidráulica	1.82E-03 cm/s
Qp : Caudal promedio	50.07 L/min												
Qp : Caudal promedio	72.10 m³/día												
Hf : Perdida de carga por fricción	3.91 m												
Hnit : Carga Neta sobre el punto medio del intervalo de prueba	6.68 m												
K : Conductividad Hidráulica	1.57E+00 m/día												
K : Conductividad Hidráulica	1.82E-03 cm/s												

COMENTARIOS Y OBSERVACIONES	
Se obtura el terreno con Packer, presión de packer 350 Psi	
Agua de ensayo. PH: 9.61 , T°: 9.7°C , C: 450	
<b>PERMEABILIDAD MEDIA - ALTA</b>	

Cuadro 2-11: Ensayo de Lefranc

c) Evaluación de ensayos de permeabilidad

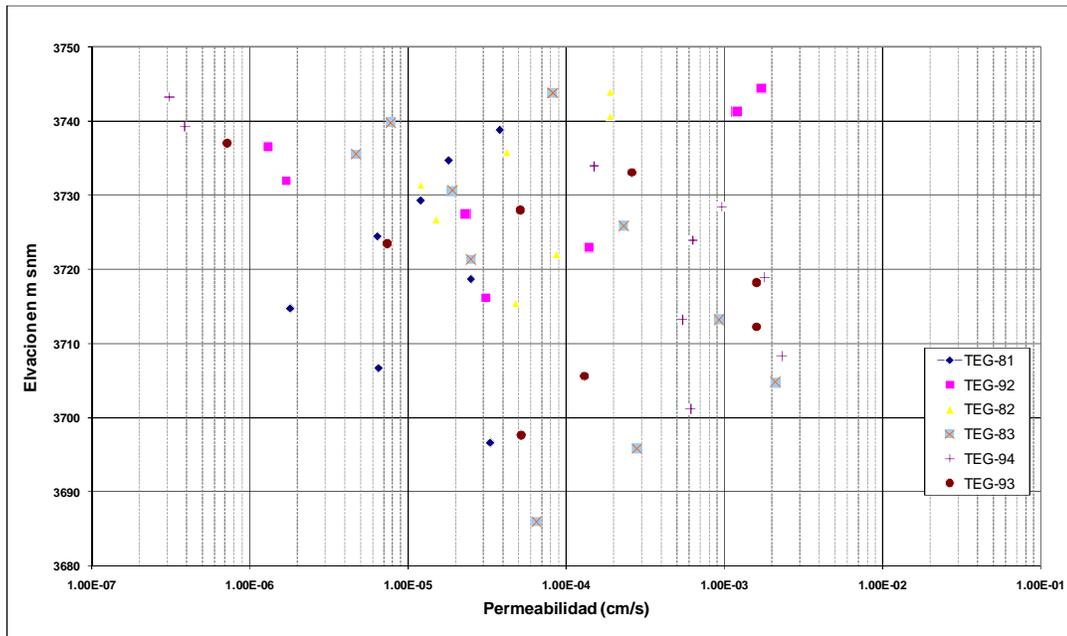


Figura 2-9: Evaluación estadística de los ensayos de permeabilidad realizados en la presa la Hierba Cerro Corona, en el cuál, se aprecia que entre la cota 3730 a 3700 es permeable y con mayor detalle entre la cota 3720 y 3700 los valores de permeabilidad están entre  $1 \times 10^{-3}$  y  $1 \times 10^{-2}$  los taladros que tienen éstas permeabilidades son: TEG93, TEG94 y TEG83.

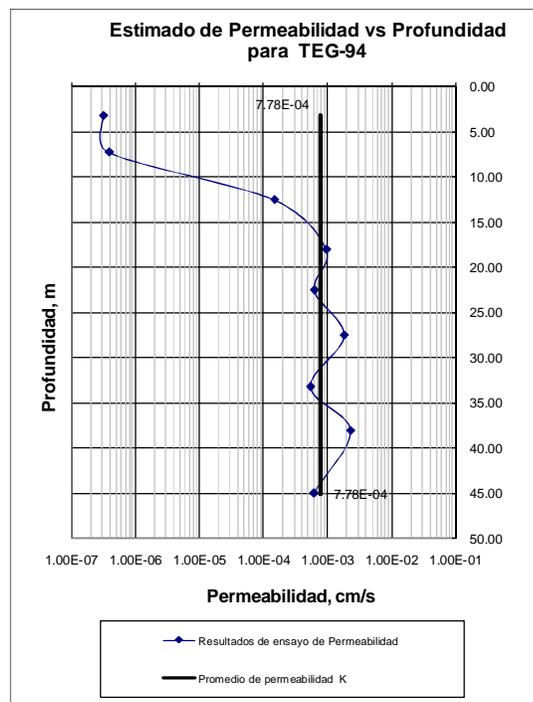


Figura 2-10: Evaluación de permeabilidad y la profundidad del taladro TEG94

## 2.4 Investigación hidrogeológica

La investigación de agua subterránea, está encaminada hacia el estudio químico del agua o su calidad, a la determinación de los niveles de agua y también a la evaluación de la permeabilidad.

### 2.4.1 Porosidad

Porosidad ( $n$ ) es una característica directamente mensurable del acuífero; es una fracción entre 0 y 1, que indica la cantidad de espacio de poro en un medio de suelo o dentro de una roca fracturada. Típicamente, la mayoría de agua subterránea (y cualquier cosa disuelta en él), se mueve con la porosidad disponible al flujo, (a veces llamado porosidad eficaz). Permeabilidad, es una expresión del conectibilidad de los poros. Un ejemplo de éste fenómeno, es piedra pómez, puede hacer un acuífero pobre.

La porosidad no afecta directamente la distribución hidráulica en un acuífero, sino que tiene un efecto muy fuerte en la migración de contaminantes disueltos, puesto que afecta velocidades del flujo del agua subterránea con una relación inversa proporcional.

### 2.4.2 Agua subterránea

La mayoría de los suelos, tienen un contenido en agua menor que la porosidad, que es la definición de condiciones no saturadas y saturadas, el contenido de agua en la franja capilar, disminuye con el aumento de distancia sobre la superficie.

Una de las complicaciones principales que se presenta en estudiar la zona de la franja, es el hecho de que la conductividad hidráulica no saturada es una función del contenido en agua del material. Mientras que un material deseca, la conductividad hidráulica disminuye.

La curva de la retención del agua, es la relación entre el contenido en agua volumétrico y potencial del agua del medio poroso. Es característico para diversos tipos de medio poroso.

Alteración Hidrotermal: Cambios mineralógicos, texturales y químicos de una roca producidas ante la presencia o circulación de soluciones hidrotermales.

La roca en contacto con vapor, agua caliente y gases, produce cambios en la mineralogía, textura y química de la roca.

Cuando hay un sistema abierto de interacción agua-roca, hay un desequilibrio químico, adición o remoción de componentes químicos.

La alteración hidrotermal puede involucrar; Crecimiento de nuevos cristales y Disolución y precipitación de nuevos minerales.

#### 2.4.3 Afloramiento de agua

A fin de conocer las características hidráulicas de la zona de los manantiales, es necesario hacer una evaluación estadística del caudal de agua, graficando una curva [caudal vs tiempo], y [nivel de agua vs tiempo]

#### 2.4.4 Calidad de agua

Los ensayos físico-químicos, son muy importantes para ver la calidad del agua para el uso de grouting, estos ensayos nos dan: conductividad específica, alcalinidad, sólidos totales disueltos, potencial de hidrógeno, calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, carbonatos, hidróxidos, sulfatos, nitratos, fierro y sílice. Ejemplo: resultados de un ensayo de calidad de agua

TestName	LD	ParameterSy	ParameterV	Units
FIELD		OD	178	mg/L
FIELD		pH	6.65	upH
FIELD		T	21.6	°C
FIELD		CEI	892.0	µS/cm
FIELD		SolTotDis	446.0	mg/L
FIELD		Turbidez	3.63	FTU
CHEMICAL	0.1	Nitritos	<0.1	mg/L
CHEMICAL	0.5	AyG	<0.5	mg/L
CHEMICAL	1	Cloruros	2	mg/L
CHEMICAL	0.023	N2Nitratos	<0.023	mg/L
CHEMICAL	0.03	Fosfatos	<0.03	mg/L
CHEMICAL	1	Sulfatos	74	mg/L
CHEMICAL	1	SolTotSusp	39	mg/L
CHEMICAL	1	SolTotDis	506	mg/L
CHEMICAL	0.002	CNlibre	<0.002	mg/L
CHEMICAL	0.002	CNwad	<0.002	mg/L
CHEMICAL	0.002	CNtot	<0.002	mg/L
CHEMICAL	0.1	Sulfuros	<0.1	mg/L
CHEMICAL	2	DBO	<2.0	mg/L
MICROBIOLO	4.71	DQO	<4.71	mg/L
MICROBIOLO	0.58	CaCO3	378.94	mg/L
MICROBIOLO	18	ColTot	<18	NMP/100mL
MICROBIOLO	18	ColFec	<18	NMP/100mL

***Evaluando estos resultados***, el contenido de sulfatos, es menos de 100 mg/l y los materiales orgánicos son bajos, la turbidez es poca, el agua se da por aceptada. Pero se debe tener en cuenta que el agua para grouting, no debe contener sulfatos, materiales orgánicos, ni turbidez.

***Limites de calidad de agua para grouting***

Como resultado de la experiencia de diferentes proyectos; se recomienda considerar los *límites máximos*:

Parámetros físico químicos:

pH	7	pH
Sólidos totales disueltos	100	mg/l
Turbidez	5	FTU

Parámetros inorgánicos:

Aniones		
Cloruros	10	mg/l
Sulfatos	300	mg/l
Nitrógeno		
Nitritos	<0.1	mg/l
Nitratos	<0.5	mg/l

Parámetros microbiológicos:

CaCO <sub>3</sub>	500	mg/l
-------------------	-----	------

2.4.5 Consideraciones para grouting

En general, para la preparación de la fundación de grouting de una presa, se debe optimizar la eficiencia y efectividad de las operaciones de grouting.

a) Estudios a considerar para el diseño de la cortina;

i. La investigación geológica

- Geología regional
- Fotointerpretación
- Mapeo geológico
- Perfiles geofísicos
- Perforaciones de investigación
- Interpretación geológica

ii. La investigación hidrogeológica

- Estudios hidrogeológica

- b) Con los estudios realizados en el punto anterior, se realizan los diseños de las cortinas de inyección:
- Profundidad de las cortinas
  - Longitud de las cortinas
  - Espaciamiento de los taladros
  - Orientación de los taladros
  - Groutcaps
  - Cortinas múltiples
  - Con las investigaciones, geológicas y hidrogeológicas, también se definirá los diseños de mezclas, tipo de cemento, agua y aditivos.
- c) Para el diseño de mezclas de grouting;
- Equipamiento
  - Materiales
  - Mezclas de prueba
  - Ensayos de laboratorio

Ver con mayor detalle en el Cap 3, diseño de mezclas.

## **2.5 Pruebas de inyección en terreno**

### **2.5.1 Pruebas de grouting**

El programa de pruebas de grouting, nos lleva a un desarrollo en los parámetros de construcción de grouting, para disminuir la permeabilidad en la cortina.

A la hora de realizar las pruebas de inyección; se debe evaluar cuatro parámetros principales los cuáles son:

- Volúmen de mezcla a inyectar en cada zona
- Presiones de inyección
- Caudal de inyección
- Tiempo de inyección

Diseño de mezclas;

Estos diseños se llevan a cabo, aprobando el tipo de cemento de acuerdo a la norma ASTM C 150, el tipo de agua y si se requiere los plastificantes, éstas pruebas de mezcla de grout, está en el rango de 2:1 a 0.5:1 agua:cemento por peso, de igual manera se añade plastificante de 1% a 2% y se realizan los controles de:

- Fluidez

- Densidad
- Cohesión
- Sedimentación
- Resistencia

Selección de la mezcla de diseño;

Se chequea que el agua sea neutral pH=7, y no deteriore los componentes del cemento.

Generalmente la selección de la mezcla, está en el rango de 0.7:1 a 1: 1 + plastificante.

## ***2.5.2 Metodología y procedimientos de campo***

### **2.5.2.1 Procedimientos de trabajos de perforación**

La perforación, se debe iniciar en los taladros primarios [P], los que serán inyectados, antes de iniciar los taladros secundarios. Para los taladros terciarios o cuaternarios se seguirá la misma secuencia.

Se establece diámetro de perforación mínima de 2 ½”

La perforación, se realiza con equipo rotoperkusivo trackdrill, equipado con marteillo de superficie, y eventualmente con marteillo de fondo, como fluido de perforación, se usará agua y/o aire.

En el caso de que el fluido de perforación se pierda en el proceso de perforación, por presentarse el macizo rocoso muy fracturado a extremadamente fracturado, se procederá con la inyección del tramo perforado en forma descendente hasta encontrar roca estable.

La reperfusión, se realizara cuando se use el método descendente; se reiniciará cuando la mezcla inyectada adquiera dureza, procediendo con el lavado o reperfusión del tramo, para luego continuar con la perforación hasta la profundidad programada.

Se tomará el debido control durante la perforación, para registrar los niveles de agua en cada taladro, anotándose y reportándose cualquier flujo artesiano encontrado.

Después de haberse completado la perforación del taladro, la longitud total será lavada con agua limpia por un periodo de 5 minutos como mínimo o hasta que retorne el agua limpia, previo a la ejecución de los ensayos de permeabilidad.

La ejecución de agua indicada y la inyección de lechada de cemento, forma parte del proceso de inyección, el cuál es tratado a continuación.

#### **2.5.2.1 Procedimientos de trabajos de inyección**

La inyección se realiza en forma ascendente, con el empleo de obturadores hidráulicos.

Antes del inicio de la inyección, se ejecutarán los ensayos de WPT (ensayos de agua a presión), los que se realizarán con las presiones que se establezcan en el diseño, los ensayos se ejecutan en un período de 10 minutos con lecturas de caudal por minuto. El resultado será expresado en unidades de Lugeón [UL] y servirá como parámetro para el inicio de la inyección o para no inyectar, si el valor es menos de 1 UL.

Concluído el ensayo de WPT, se procederá con el proceso de inyección de cada etapa del taladro.

La inyección se iniciará por el tramo, ubicado en el fondo del taladro, y se continuará en forma ascendente.

La inyección se realizará en etapas ascendentes de 5 m de longitud, hasta llegar a la superficie, inyectándose finalmente el contacto para lo cuál se obturará, en el niple o revestimiento colocado, o directamente en el taladro cementado.

La presión de inicio será de 1 bar, levantando progresivamente según las tomas de la lechada en el tramo inyectado, hasta la presión de rechazo especificada.

Se dará por concluída la inyección, cuando se alcance un caudal de inyección menor o igual a 0.1 lt/minuto, inyectando a la presión de rechazo por un periodo de 5 minutos.

Si en el proceso de inyección se inyecta 200 lt/m, a una presión menor al 20% de la presión especificada para el tramo, se cambiará a la siguiente mezcla, de repetirse ésta toma sin subir la presión al 20% de la presión máxima, se seguirá inyectando los 3 o cuatro tipos de mezclas elegidos, no se cambiará la mezcla si el caudal disminuye y la presión de rechazo sube.

Si el total de volumen máximo, acumulado ha alcanzado los valores acumulados de las mezclas de tipo 1 a la 4 y la presión no alcanzó al 20 % de la presión máxima, el proceso de la inyección será paralizado por un periodo de 12 horas, a fin de que la lechada frague. El taladro será lavado inmediatamente, cuando se haya paralizado la inyección.

La secuencia para continuar con la inyección ascendente, será la siguiente:

Una vez completada la inyección a una etapa, la válvula en la boca del taladro será cerrada, hasta que la presión en el manómetro de control, disminuya a menos de 0.5 bar de presión

Si no alcanza la presión máxima de rechazo definida para la etapa, la inyección será paralizada, por un tiempo suficiente para el inicio de fragua, normalmente de 6 a 8 horas.

La secuencia para continuar con la inyección en caso de ser descendente será la siguiente:

- Se considera aproximadamente, en 12 horas el tiempo necesario para la fragua de la inyección de la etapa, antes de reperfurar la etapa inyectada.
- Se considera, como alternativa el lavado con agua a presión del tramo, inyectado luego del inicio de la fragua, definido por los ensayos de laboratorio.
- Concluida la inyección del taladro, se procederá a su relleno con lechada de (A/C de 0.4:1), introduciendo tubería o manguera al fondo del taladro para asegurar el relleno completo.

El taladro podrá ser inyectado en etapas o tramos mayores, o más cortos pero no más de 7 m. se emplearán obturadores dobles en tramos que presenten altas absorciones, o en los cuáles sea necesario aislar un sector.

En algunos casos, ya sea por comunicación entre dos o más taladros, será necesario realizar inyecciones simultáneas.

En el caso de encontrarse cavidades tipo Karst en el macizo rocoso, se procederá al relleno con mortero, usando la mezcla w:c:arena 1:1:3 el procedimiento consistirá, en el bombeo de la mezcla previamente preparada.

La planta de inyección, contará con una línea de alimentación de lechada al taladro y una línea de retorno al agitador para permitir la circulación de la lechada, tanto al inicio como al final del tratamiento, o ante eventuales emergencias en el proceso de la inyección.

Las presiones de inyección, varían de 0.25 a 1 bar x m. dependiendo de la fracturación de roca

Las presiones máximas para la prueba de agua, varían de 0.1 a 0.3 bar x metro, dependiendo de la fracturación de roca

En caso de comunicación de la lechada entre taladros y fugas en la superficie, se tendrá las siguientes consideraciones:

- Se observa permanentemente la superficie del terreno, durante la inyección
- Se calafatea las grietas que presentan fuga, así cómo, se tomarán otras medidas engrosar la mezcla, para la inyección para darle fragua inicial.
- En caso de comunicación de 2 o más taladros, se podrá inyectar simultáneamente, previa evolución.

En el área de inyección, se tendrá un control estricto en tiempo real con respecto a la presión y caudal, para evitar un hidrofracturamiento o una mala inyección.

# CAPÍTULO 3

---

## DISEÑO DE MEZCLAS PARA GROUTING

El diseño de mezclas, tiene la finalidad de describir los procedimientos utilizados en los ensayos sobre mezclas de lechada de cemento, y presentar resultados obtenidos en el laboratorio, sobre las mezclas, a utilizar con las mejores propiedades de inyectabilidad en macizos rocosos.

Los objetivos de este capítulo son:

- Determinar las características de los materiales constituyentes del grout.
- Determinar el comportamiento y propiedades del grout en estado fresco y endurecido.
- Encontrar la relación óptima de la mezcla relación agua:cemento para un grout que será utilizado en la inyección de los taladros.

### 3.1 DISEÑO DE MEZCLAS PARA INYECCIONES EN LABORATORIO

A la hora de poner en práctica, la inyección, se han de tener bien presente algunos parámetros, los más importantes son los siguientes:

#### *a) Relación cemento/agua y su efecto sobre la durabilidad*

El agua es necesaria para dar movilidad al fluido inyectado, pero una vez que el transporte ha finalizado; puede llegar hacer una gran molestia. Normalmente el agua que se necesita para el transporte, excede a la cantidad que se precisa para la acción química y para la hidratación, es por esto que se debe usar la mínima cantidad de agua para lograr la penetración, si se usa demasiada la estructura del material inyectado, puede ser débil y carecer de durabilidad, pudiendo ser atacado por el agua subterránea.

Existen diversas opiniones en relación a la cantidad de agua, aunque parece ser que las teorías tan divergentes en los primeros años, están convergiendo hacia ideas comunes. Se puede decir que, una relación cemento/agua de 5:1, no es nada recomendable debido a su escasa durabilidad, mientras que las inyecciones con relaciones 3:1, son consideradas por muchos como las más finas.

Es por esto que, en la elección de la relación agua/cemento, se recomienda en función de la práctica, empezando por una mezcla más fina que el tamaño medio de las fracturas y aumentando la relación durante el transcurso de la inyección.

### ***b) La viscosidad y tixotropía y su influencia sobre la penetración***

Los factores que limitan la penetración de la inyección de cemento en las fisuras son:

- El tamaño de las partículas,
- La viscosidad y
- La forma en la que la tixotropía influye sobre la viscosidad.

Normalmente para que la inyección pueda entrar en una fisura, ésta debe ser de dos a tres veces más grande que las partículas de la mezcla. Una técnica para inyectar partículas más gruesas, es la inyección por desplazamiento, utilizándose presiones lo suficientemente altas para compactar y desplazar al terreno, y hacer que las fisuras más pequeñas puedan abrirse para poder recibir la mezcla de cemento.

Normalmente, a excepción de las mezclas ligeras, todas las mezclas de cemento tienen características tixotrópicas. Mientras que la mezcla es agitada y bombeada a velocidad a través de las tuberías e introduciéndose en las grietas, el engrosamiento tixotrópico es nulo, pero tan pronto como la mezcla disminuye la velocidad, la tixotropía hace que aumente su densidad y que pierda la capacidad para transmitir las presiones hidráulicamente. En el límite de la penetración, tanto la tixotropía como el comienzo del fraguado, contribuirán a mantener la mezcla en su lugar, haciendo frente a la contrapresión y a las filtraciones del terreno.

### **3.1.1 EQUIPOS**

Para la ejecución de los ensayos se usan los siguientes equipos básicos:

- Balanza de lodos
- Cono de Marsh
- Aguja de Vicat
- Probetas y pipetas graduadas
- Moldes de briquetas
- Balanza digital de 2500 gr
- Termómetro de aguja
- Licuadora
- Cronómetro

### 3.1.2 MATERIALES

Los materiales que se utilizan en el ensayo de mezclas son los siguientes:

**a) Agua**

El agua debe ser libre de sulfatos, materiales orgánicos u otros materiales sólidos, el pH debe estar en el rango de  $7 \pm 1$ .

**b) Cemento;** Cemento Portland, Cemento Ultra fino y Cementos Especiales

**i. Cemento Portland**

El cemento utilizado en los ensayos de mezcla es de acuerdo a la reacción química de la roca, según la Norma ASTM C-150. Los cementos Portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio hidráulicos, éstos fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua. En el curso de esta reacción denominada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una Mezcla (Lechada).

*Composición química del cemento Portland:*

Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	50%
Oxido de calcio (CaO)	40%
Oxido férrico (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6%
Dióxido de silicio	4%

La norma ASTM C 150 establece ocho diferentes tipos de cemento, de acuerdo a los usos y necesidades del mercado de la construcción:

Clasificación de los cementos		
Tipo	Nombre	Aplicación
I	I : Normal.	Para uso general, donde no son requeridos otros tipos de cemento.
IA	IA : Normal.	Uso general, con inclusor de aire.
II	II : Moderado.	Para uso general y además en construcciones donde existe un moderado ataque de sulfatos o se requiera un moderado calor de hidratación.
IIA	IIA : Moderado. Igual que el tipo II, pero con inclusor de aire.	Igual que el tipo II, pero con inclusor de aire.
III	III : Altas resistencias.	Para uso donde se requieren altas resistencias a edades tempranas.
IIIA	IIIA : Altas resistencias.	Mismo uso que el tipo III, con aire incluido.
IV	IV : Bajo calor de hidratación.	Para uso donde se requiere un bajo calor de hidratación.
V	V : Resistente a la acción de los sulfatos.	Para uso general y además en construcciones donde existe un alto ataque de sulfatos.

Cuadro 3-1: Clasificación de cementos

### **Tipo I**

Este tipo de cemento es de uso general, y se emplea cuando no se requiere de propiedades y características especiales que lo protejan del ataque de factores agresivos; como sulfatos, cloruros y temperaturas originadas, por el calor de hidratación.

### **Tipo II**

El cemento Pórtland tipo II ,se utiliza cuando es necesario la protección contra el ataque moderado de sulfatos. Genera menos calor que el cemento tipo I, y este requisito de moderado calor de hidratación, puede especificarse a opción del comprador. En casos donde se especifican límites máximos para el calor de hidratación, puede emplearse en obras de gran volumen y particularmente en climas cálidos, en aplicaciones como muros de contención, pilas, presas, etc.

### **Tipo III**

Este tipo de cemento desarrolla altas resistencias a edades tempranas, a 3 y 7 días. Esta propiedad se obtiene al molerse el cemento más finamente durante el proceso de molienda. Cuando por requerimientos particulares, una obra tiene que ponerse en servicio muy rápidamente.

### **Tipo IV**

El cemento Pórtland tipo IV, se utiliza cuando por necesidades de la obra, se requiere que el calor generado por la hidratación se ha mantenido a un mínimo. El desarrollo de resistencias de este tipo de cemento, es muy lento en comparación con los otros tipos de cemento.

### **Tipo V**

Cemento con alta resistencia a la acción de los sulfatos, se especifica cuando hay exposición intensa a los sulfatos. Las aplicaciones típicas comprenden las estructuras hidráulicas expuestas a aguas con alto contenido de álcalis y estructuras expuestas al agua de mar. La resistencia al sulfato del cemento Tipo V, se logra minimizando el contenido de  $C_3A = 3CaO \cdot Al_2O_3$ , este compuesto, es el más susceptible al ataque por el sulfato. Realiza su resistencia relativa del 65 al 85 %.

La norma ASTM C 595, reconoce la existencia de cinco tipos de cementos mezclados:

Cemento Pórtland de escoria de alto horno - Tipo IS.

Cemento Pórtlandpuzolánico - Tipo IP y Tipo P.

Cemento de escoria - Tipo S.

Cemento Pórtland modificado con puzolana - Tipo I (PM).

Cemento Pórtland modificado con escoria - Tipo I (SM).

### **Tipo IS**

El cemento Pórtland de escoria de alto horno, se puede emplear en las construcciones de concreto en general. Para producir este tipo de cemento, la escoria del alto horno, se muele junto con el clinker de cemento Pórtland, o puede también molerse en forma separada, y luego mezclarse con el cemento. El contenido de escoria varía entre el 25 y el 70% en peso.

### **Tipo IP y Tipo P**

El cemento Pórtland tipo IP, puede ser empleado en construcciones; en general y el tipo P, se utiliza en construcciones donde no sean necesarias resistencias altas a edades tempranas. El tipo P, se utiliza normalmente en estructuras masivas, como estribos, presas, y pilas de cimentación. El contenido de puzolana de estos cementos se sitúa entre el 15 y el 40 % en peso.

### **Tipo S**

El cemento tipo S, de escoria, se usa comúnmente en donde se requieren resistencias inferiores. Este cemento se fabrica mediante cualquiera de los siguientes métodos:

- 1) Mezclando escoria molida de alto horno y cemento Pórtland.
- 2) Mezclando escoria molida y cal hidratada.
- 3) Mezclando escoria molida, cemento Pórtland y cal hidratada.

El contenido mínimo de escoria es del 70% en peso del cemento de escoria

### **Tipo I (PM)**

El cemento Pórtland tipo I (PM), modificado con puzolana, se emplea en todo tipo de construcciones de concreto. El cemento se fábrica combinando cemento Pórtland o cemento Pórtland de escoria de alto horno con puzolana fina. Esto se puede lograr:

- 1) Mezclando el cemento Pórtland con la puzolana
- 2) Mezclando el cemento Pórtland de escoria de alto horno con puzolana

- 3) Moliendo conjuntamente el clinker de cemento con la puzolana
- 4) Por medio de una combinación de molienda conjunta y de mezclado.

El contenido de puzolana es menor del 15% en peso del cemento terminado.

### **Tipo I (SM)**

El cemento Pórtland modificado con escoria, TIPO I (SM), se puede emplear en todo tipo de construcciones de concreto. Se fábrica, mediante cualquiera de los siguientes procesos:

- 1) Moliendo conjuntamente el clinker con alguna escoria granular de alto horno.
- 2) Mezclando escoria molida y cal hidratada
- 3) Mezclando escoria, cemento Pórtland y cal hidratada

El contenido máximo de escoria es del 25% del peso del cemento de escoria.

A todos los cementos mezclados arriba mencionados, se les puede designar la inclusión de aire, agregando el sufijo A, por ejemplo, cemento TIPO S-A.

Además, en éste tipo de cementos, la norma establece como requisito opcional para los cementos tipo I (SM), I (PM), IS, IP, y los denominados con subfijo MS o MH, lo siguiente: moderada resistencia a los sulfatos y/o moderado calor de hidratación y en caso del tipo P y PA, moderada resistencia a los sulfatos y/o bajo calor de hidratación.

La Norma ASTM C 1157 establece los requisitos de durabilidad para los cementos hidráulicos cuando se utilicen en aplicaciones especiales o para uso general. Por ejemplo, donde se requieran altas resistencias tempranas, moderada a alta resistencia a los sulfatos, moderado o bajo calor de hidratación y opcionalmente baja reactividad con los agregados reactivos a los álcalis.

## ii. **Cemento ultrafino:**

Cemento Pórtland ultrafino, es utilizado para inyección en roca, suelo, y son de rápido fraguado

Entre ellos tenemos:

### **RHEOCEM 800;**

Es un cemento Pórtland ultrafino, para inyectarse en roca y suelo. Por su tamaño de partícula tan pequeño, y por su sistema de aditivos especialmente adaptado, penetra muy bien en juntas cerradas, fisuras y espacios de poros, para impermeabilizar la masa de roca o suelo con grout.

### **UltrafineUSGrout;**

Este cemento tiene las siguientes características:

- Baja relación agua cemento
- Poco o nada de sedimentación
- Dos horas de inyectabilidad sin medir la aglomeración
- Estabilidad de volumen inferior a 1% de contracción lineal
- Bajo contenido de superplastificante
- Reduce la conductividad hidráulica decreciendo la permeabilidad
- El material es más estable
- Resistencia química al ataque de alcalinos
- Resistencia a la fractura térmica y baja hidratación
- Su finesa es < a 5 micras

El tiempo inicial abierto de 1 a 1 1/2 horas, y un tiempo de fraguado inicial de 2 1/2 horas el fraguado final de 10 horas.

Usos recomendados de cemento ultrafino

- Inyección de rocas: túneles, cavernas, minas, etc.
- Impermeabilización al agua freática y estabilización del suelo.
- Inyección de suelo: estabilización del suelo, impermeabilización al agua freática
- Inyección de grietas, en concreto
- Inyección de contacto

Beneficios

- Excelente penetración en juntas cerradas, fisuras y espacios de poros
- Mejor hermeticidad al agua, después de una aplicación adecuada

- Mayor productividad en operaciones de grouting de túneles

*Propiedades del grout con cemento ultrafino rheocem 800:*

- Balanza de lodos 1.48 – 1.50 kg/l
- Relación agua/ cemento 1:1
- Cono de flujo 32 – 34 seg
- Exudación (máxima) 1%

*Propiedades del grout con cemento US GRUT:*

- Balanza de lodos 1.54 kg/l
- Relación agua/ cemento 0.8:1
- Cono de flujo 33 – 37 seg
- Exudación (máxima) 0.5%

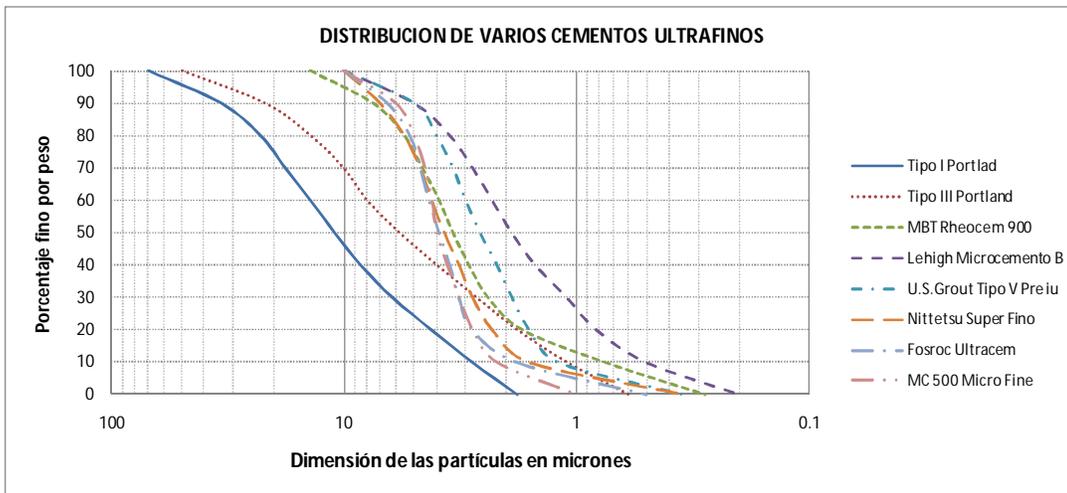


Figura 3-1: Distribución granulométrica de varios cementos ultrafinos<sup>1</sup>

### iii. Cementos Especiales

#### Cementos para Pozos Petroleros

Estos cementos, empleados para sellar pozos petroleros, normalmente están hechos de clinker de cemento Pórtland. Generalmente deben tener un fraguado lento, y deben ser resistentes a temperaturas y presiones elevadas. El Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute) establece especificaciones (API 10-A) para nueve clases de cemento para pozos (clases A a la H). Cada clase resulta aplicable para su uso en un cierto rango de profundidades de pozo, temperaturas, presiones y ambientes sulfatados. También se emplean tipos convencionales de cemento Pórtland con los aditivos adecuados para modificar el cemento.

<sup>1</sup>Distribución granulométrica de varios cementos; James Warner (2004), practical handbook of grouting, pag. 77

### **Cementos Plásticos**

Los cementos plásticos se fabrican añadiendo agentes plastificantes, en una cantidad no mayor del 12% del volumen total, al cemento Pórtland de TIPO I ó II durante la operación de molienda. Estos cementos, comúnmente, son empleados para hacer morteros.

### **Cementos Pórtland Impermeabilizados**

El cemento Pórtland impermeabilizado, usualmente se fabrica añadiendo una pequeña cantidad de aditivo repelente al agua, como el estearato de sodio, de aluminio, u otros, el cuál es añadido al clinker de cemento durante la molienda final.

### **c) ADITIVOS**

Son materiales que se adicionan al agua durante la mezcla con el cemento, cambiando sus propiedades químicas y físicas de la lechada, su estado es líquido o plástico

Las principales materias utilizadas para estos fines, son los siguientes:

#### **1) *aceleradores.***

El acelerador más utilizado en las mezclas de mortero, es cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ). En general, el cloruro de calcio, puede usarse con seguridad en cantidades de hasta dos por ciento en peso del cemento. El uso de cloruro de calcio en los casos en que la lechada puede estar expuesto a clima frío, es eficaz en reducir al mínimo la posibilidad de congelar la lechada durante el ajuste. Este acelerador puede reducir el ataque de sulfatos. No debe utilizarse cuando la pasta está en contacto con el acero. Otros aceleradores incluyen ciertos carbonatos solubles, silicatos, y trietanolamina.

#### **2) *retardadores.***

Los retardadores más comúnmente utilizados, son productos químicos orgánicos, sales más probables, es ácido o sales de ácidos carboxílicos hidroxilados o modificaciones de estos aditivos. Se utilizan para compensar los indeseables efectos de la aceleración de las temperaturas de la colocación y prolongar el tiempo de inyección. Un retardador puede ser requerido para las temperaturas por encima de 20 grados centígrados.

Aquí se presentan los aditivos que se utilizaron en los proyectos mineros de Cerro Verde, Antamina y Cerro Corona

**Aditivo EUCO 37**, superplastificante y reductor de agua, fabricado por Euclid Chemical Company. Este aditivo baja la viscosidad y cohesión, pero aumenta la penetrabilidad de la lechada, aumenta la resistencia a la compresión, permite reducir hasta un 30 % de agua logrando obtener una mezcla con trabajabilidad.

Se dosifica de 0.5% a 2% del peso de cemento, su densidad es de 1.19 kg/lit, éste aditivo se debe agregar al agua y no al cemento seco.

**Rheobuild2000PF**; retarda la fragua y hace que la mezcla sea fluida, desarrolla resistencias muy rápidamente. Se adiciona de 1.5% a 2% por kg de cemento, mejora la penetración de la lechada, generalmente se da en mezclas de relación agua/cemento 1/1, esto dará una mezcla estable capaz de penetrar en las grietas más pequeñas.

Es usado en cemento ultra fino, como, los microcementos RHEOCEM para inyección en fisuras muy finas y en suelos. Su densidad es de 1.23 a 1.25 kg/lit, su pH es de 7 a 9.

**Delvo®Crete,**

- ***Estabilizador;*** es un aditivo líquido, acelera el proceso de hidratación y retarda la fragua, se adiciona de 0.6% a 2%, del peso de cemento, su mezclado debe ser de 2 a 3 minutos su pH es < 2, y su densidad 1.10 kg/lit
- ***Activador;*** es un acelerante de fragua, generalmente es usado en shocrete, su adición es de 3% a 10% en peso del cemento, su densidad es de 1.35 a 1.56 kg/lit, su pH es de 11.5, el contenido de cloruros es menor de 0.1%.

**Bentonita,** en absorciones muy altas de tramos de taladros, se puede usar bentonita como aditivo en la lechada de inyección. Esta deberá hidratarse por 3 horas.

### **3.1.3 EJECUCIÓN**

Los ensayos de mezclas, son ejecutados antes de la ejecución de cualquier trabajo de inyección, el agua utilizada en la preparación de la mezcla de laboratorio, deberá ser en lo posible la misma a utilizar en las inyecciones, y debe tenerse en cuenta las variaciones de temperatura.

### 3.1.4 MEZCLAS DE PRUEBA

Previo al inicio de los trabajos, se lleva a cabo pruebas en laboratorio que permiten definir la mezcla utilizada en las inyecciones.

La proporción de agua:cemento en mezclas, debe ser cuidadosamente, considerada. La proporción, afecta a la capacidad de bombeo, viscosidad, penetración de la lechada, la influencia de las presiones.

Ejemplo de mezclas usadas para la cortina del seepage en Cerro Verde

Dosificación en peso (agua:cemento+plastificante): 0.67:1 + 2 % E37

- Cemento: Fabricación Yura, Tipo I, Peso específico 3.15 gr/cm<sup>3</sup>
- Euco 37: Plastificante, Densidad 1.19 gr/cm<sup>3</sup>
- Fluidéz de la mezcla: Rango de 28 a 31 seg.
- Densidad de la mezcla: Rango de 12.4 a 13.7 lbs/gln
- Sedimentación de la mezcla: Rango de 2.9 a 3.2 %
- Cohesión de la mezcla: Rango de 0.010 a 0.012 gr/cm<sup>2</sup>

Dosificación en peso (agua:cemento + superplastificante + retardante): 1:1 +2%+0.53%

- Cemento: Rheocem 800, peso específico 3.10 gr/cm<sup>3</sup>
- Rheobuilt: Hiperplastificante, densidad 1.24 gr/cm<sup>3</sup>
- Delvo Estabilizador: Retardante, densidad 1.06 gr/cm<sup>3</sup>
- Fluidéz de la mezcla: Rango de 34.2 a 37.8 seg.
- Densidad de la mezcla: Rango de 11.97 a 13.23 lb/gln
- Sedimentación de la mezcla: Rango de 2.8 a 3.15 %
- Cohesión de la mezcla: Rango de 0.0138 a 0.0152 gr/cm<sup>2</sup>
- Fragua Tixotrópica: Rango de 1:25 a 1:34 horas

### 3.1.5 ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos de mezclas realizados, son ejecutados en laboratorio y son los siguientes:

- Densidad (ASTM 4380)
- Fluidéz de Marsh (ASTM D6910)
- Cohesión de Lombardi
- Sedimentación (ASTM C243)
- Tiempo de fraguado con aguja de Vicat (ASTM C191)
- Resistencia a la compresión (ASTM C349)
- Temperatura

- **Densidad;**

La densidad o peso específico de una mezcla de inyección recién preparada, puede ser determinada:

- Con una probeta a 1000 ml, y luego pesada en una balanza de precisión digital.
- Con la balanza de lodos, el cual es un equipo bastante preciso, éste procedimiento fue acordado con API Recomendación Practica 13B-1(1990)<sup>2</sup>
  - se coloca la balanza en una mesa horizontal y estable, se llena la taza del instrumento con mezcla
  - se coloca cuidadosamente la tapa de la taza, rotándola para expulsar el excedente, se limpia todo el exceso de la mezcla.
  - Se coloca el brazo graduado en el soporte del instrumento, y se balancea moviendo el indicador por el brazo.
  - La densidad se determina leyendo directamente sobre la escala del brazo una vez nivelado.
  - Este equipo es calibrado con agua a temperatura de 21°



Figura 3-2: Balanza de lodos

- **Fluidez (Cono de Marsh)**

- Es también conocido como la viscosidad de Marsh, es definido como el tiempo en segundos necesarios para que una cantidad de mezcla o fluido, pase por un embudo estándar, la fluidez varía de acuerdo al clima, agua, tipo de cemento y temperatura, esta fluidez tiene mucha influencia en la inyectabilidad de las mezclas.
- Este ensayo se realiza colocándose 1.6 cuartos de galón (1500 ml) en el embudo, y anotándose el tiempo necesario para pasar un cuarto de galón (946 ml) en un envase de medida.

---

<sup>2</sup>Dam Foundation Grouting, Kenneth D. Weaver, Pag. 162, año 2007.



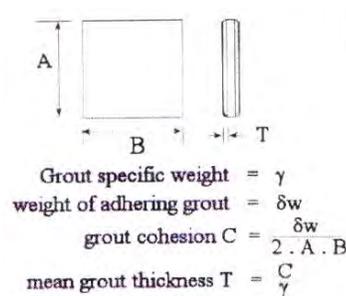
- **Cohesión (Lombardi) 1985**

- Es un ensayo simple de campo usando una placa de acero con varias pequeñas hendiduras por ambos lados, el procedimiento es el siguiente:
  - Se pesa la placa de [10 x 10] cm y se registra el dato.
  - Se sumerge completamente la placa en la mezcla se revuelve y luego de extraerla, se vuelve a pesar, anotando el dato.
  - El peso de la mezcla adherida en la placa se calcula restando el peso final menos el peso inicial.
  - Al dividir el peso entre el área total de la placa, se obtiene la cohesión.
  - Al dividir dicha cohesión por la densidad de la mezcla, se obtiene el espesor promedio adherido a la placa (mm) y se denomina cohesión relativa [Cr]



Figura 3-4: Placa para cohesión

- A partir de estos resultados se puede elegir una mezcla con cohesión suficiente para penetrar en las grietas una distancia requerida bajo una presión determinada.



- **Sedimentación**

- Es un proceso por el cuál, los granos de cemento en suspensión, se concentran por efecto de la gravedad en el fondo del recipiente, que lo contiene; al final de 2 horas la cantidad de agua libre que se separa en la superficie permanece constante.
- El ensayo es ejecutado en una probeta de 1000 ml y el factor de sedimentación se halla por la relación  $h/H$  en porcentaje, donde  $H$ , es la altura inicial de la mezcla (suspensión) y  $h$  es la altura de agua libre en la probeta después de 2 horas de reposo.
- Este ensayo nos da información sobre la estabilidad de la mezcla, la falta de mezcla implica la separación de los constituyentes de la suspensión, en una inyección bajo presión, posibilita la formación de una zona de alta capacidad

de granos que funciona como filtro, resultando el fenómeno denominado secamiento.

- En este caso la cohesión, se torna muy grande exigiendo presiones de inyección muy elevadas para que el flujo continúe. Este fenómeno es particularmente importante cuando se trata de inyección de fractura con pequeñas aberturas o en materiales granulares. Las mezclas de cemento con factor de sedimentación de hasta 5% son considerables estables.



Figura 3-5: Proceso de sedimentación

- **Tiempo de fraguado**

- El tiempo de inicio de fraguado se determina con la Aguja de Vicat; se considera como inicio de fragua al momento en que la aguja estandarizada, instalada en el equipo, bajando en la mezcla en caída libre, desde el tope de la lechada en el recipiente patrón se estaciona a 1mm del fondo del recipiente.
- Este tiempo es medido después de la preparación de la mezcla.



Figura 3-6: Aguja de Vicat

- **Resistencia a la compresión**

- El procedimiento para toma de muestras y ensayo de testigos, para este ensayo es igual al del concreto, sólo que los testigos son de menor tamaño. Generalmente los valores están comprendidos entre 50 a 100 Kg/cm<sup>2</sup>, suelen proporcionar adecuadas características a la mezcla frente a solicitudes de durabilidad y resistencia.



Figura 3-7: Briquetas con lechada de cemento

**Estimación de los materiales para las mezclas**

La estimación de cantidades, se hace en función a los materiales y la capacidad de la mezcladora, en este caso se puede usar una licuadora cuyo vaso tiene una capacidad de 1.6 lts. Las proporciones de agua y cemento así como el aditivo están en función de este volumen y sus densidades respectivamente.

Ejemplo de estimación de cantidades usadas en los diseños de mezclas para las cortinas de inyección en el proyecto Cerro Corona

**Ejemplo 1**

Datos:

Dosificación 1:1+1%

Volumen que se necesita = 1.6 lts.

Densidad del cemento = 2.93 gr/cm<sup>3</sup>

Densidad del aditivo = 1.19 gr/cm<sup>3</sup>

Cantidad de agua = ?

Cantidad de cemento = ?

Cantidad de aditivo = ?

Solución:

$$\#de\ bolsas = 1.6 / (42.5 \times 1 + 42.5 / 2.93 + 42.5 \times 1\% / 1.19) = 0.02789$$

$$\text{Cemento} = 0.02789 \times 42.5 = 1.185 \text{ kg} = 1185 \text{ gr}$$

$$\text{Agua} = 1185 \text{ gr} = 1185 \text{ ml por ser la misma relación 1:1}$$

$$\text{Aditivo} = 1185 \times 1\% = 11.85/1.19 = 9.96 \text{ ml}$$

### **Ejemplo 2**

Datos:

$$\text{Dosificación } 0.8:1+1\%$$

$$\text{Volumen que se necesita} = 1.6 \text{ lts.}$$

$$\text{Densidad del cemento} = 2.93 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Densidad del aditivo} = 1.19 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Cantidad de agua} = ?$$

$$\text{Cantidad de cemento} = ?$$

$$\text{Cantidad de aditivo} = ?$$

Solución:

$$\# \text{ de bolsas} = 1.6 / (42.5 \times 0.8 + 42.5 / 2.93 + 42.5 \times 1\% / 1.19) = 0.032745$$

$$\text{Cemento} = 0.032745 \times 42.5 = 1.391 \text{ kg} = 1391 \text{ gr}$$

$$\text{Agua} = 1391 \times 0.8 \text{ gr} = 1113 \text{ ml}$$

$$\text{Aditivo} = 1391 \times 1\% = 13.91 / 1.19 = 11.68 \text{ ml}$$

### 3.1.6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS (REGISTROS)

MEZCLA N°	DOSIFICACION EN PESO A : C : + Ad	MEZCLADO (Lts)					ADITIVO	HORA PREP.	T° AMB.	T° MEZ.	SEDIMENTACION			FLUIDEZ seg.	DENSIDAD Pe (gr/cm3)	COHESION C° (gr/cm2)	FRAGUA		
		A	C	Ad.	Acel	Vol. Lts.					INICIO	FINAL	%				INICIO	Hrs.	FINAL
<b>24/11/09</b>																			
Cemento PACASMAYO Tipo MS																			
AGUA DEL UCB																			
Euco 37 - Plastificante																			
1	1 : 1 + 2%	1.160	0.383	0.0195	-	1.563	Euco 37	14:42	16.2	17.8	14:45	16:45	8.5	30.00	1.50	0.011	15:40	24:58	2:00
2	0.8 : 1 + 1%	1.104	0.455	0.0116	-	1.571	Euco 37	15:23	16.0	19.5	15:27	17:27	1.0	31.45	1.55	0.035	11:20	19:57	0:00
3	0.7 : 1 + 1%	1.064	0.502	0.0128	-	1.579	Euco 37	16:00	15.7	19.0	16:03	18:03	0.6	33.43	1.62	0.051	10:50	18:50	0:00
4	0.67 : 1 + 1%	1.045	0.515	0.0131	-	1.573	Euco 37	16:28	15.9	18.9	16:30	18:30	0.5	35.65	1.62	0.061	11:10	18:42	23:00
5	0.6 : 1 + 1%	1.008	0.554	0.0141	-	1.576	Euco 37	16:55	14.7	18.3	17:00	19:00	0.3	38.58	1.67	0.069	10:25	17:30	22:30
6	0.5 : 1 + 1%	0.950	0.627	0.0160	-	1.593	Euco 37	17:23	13.4	18.3	17:30	19:30	0.2	53.73	1.77	0.085	10:55	17:32	22:30
7	0.9 : 1 + 1%	1.125	0.413	0.0105	-	1.549	Euco 37	19:00	12.2	17.9	19:05	21:05	9.0	30.78	1.51	0.019	17:45	22:45	3:40
<b>25/11/09</b>																			
Cemento PACASMAYO Tipo MS																			
AGUA DEL UCB																			
Euco 37 - Plastificante																			
1	1 : 1 + 1.5%	1.160	0.383	0.0146	-	1.558	Euco 37	9:35	11.0	15.7	9:40	11:40	14.0	29.74	1.48	0.014	8:30	22:55	21:00
2	0.9 : 1 + 1.5%	1.125	0.413	0.0158	-	1.554	Euco 37	10:00	12.5	16.5	10:05	12:05	10.0	30.47	1.51	0.015	8:00	22:00	20:00
3	0.8 : 1 + 1.5%	1.104	0.455	0.0174	-	1.576	Euco 37	10:35	16.2	19.2	10:40	12:40	2.0	31.77	1.55	0.016	8:00	21:25	19:20
4	0.7 : 1 + 1.5%	1.064	0.502	0.0192	-	1.585	Euco 37	11:05	17.3	19.1	11:10	13:10	1.2	33.17	1.61	0.019	9:00	21:55	15:00
5	0.6 : 1 + 1.5%	1.008	0.554	0.0212	-	1.583	Euco 37	11:33	16.3	19.7	11:37	13:37	1.0	36.10	1.69	0.025	8:00	22:27	15:00
6	0.5 : 1 + 0.5%	0.950	0.627	0.0080	-	1.585	Euco 37												
<b>02/12/09</b>																			
Cemento PACASMAYO Tipo MS																			
AGUA DEL UCB																			
1	1 : 1 + 2% + 0.5%	1.150	0.380	0.0193	0.0038	1.553	E-37 y G-L33	9:24	11.5	15.8	9:30	11:30	8.0	30.27	1.47	0.014	9:30	24:06	22:45
2	0.9 : 1 + 1% + 0.5%	1.125	0.413	0.0105	0.0042	1.553	E-37 y G-L33	9:45	12.1	17.3	9:50	11:50	6.0	31.30	1.52	0.020	5:30	19:45	18:50
3	0.8 : 1 + 1% + 0.5%	1.088	0.449	0.0114	0.0045	1.553	E-37 y G-L33	10:10	12.0	16.4	10:15	12:15	2.1	32.17	1.57	0.027	4:40	18:30	16:00
4	0.7 : 1 + 1% + 0.5%	1.043	0.492	0.0125	0.0050	1.553	E-37 y G-L33	10:33	10.9	17.1	10:40	12:40	1.2	33.96	1.62	0.039	1:00	14:27	13:40
5	0.6 : 1 + 1% + 0.5%	0.987	0.543	0.0138	0.0055	1.549	E-37 y G-L33	10:55	10.9	17.6	11:00	13:00	0.9	39.67	1.68	0.057	23:00	12:05	11:00
6	0.5 : 1 + 1% + 0.5%	0.923	0.609	0.0155	0.0062	1.554	E-37 y G-L33	11:16	10.8	17.7	11:20	13:20	0.1	65.97	1.78	0.112	22:30	11:14	9:30
<b>03/12/09</b>																			
Cemento PACASMAYO Tipo MS																			
AGUA DEL UCB																			
Aditivo Euco 37 y acelerante Gunitoc L-33																			
7	1 : 1 + 2% + 0.8%	1.150	0.380	0.0193	0.0061	1.555	E-37 y G-L33	11:20	13.9	16.1	11:25	13:25	8.0	30.71	1.48	0.019	11:00	23:40	3:00
8	0.9 : 1 + 1% + 0.8%	1.125	0.413	0.0105	0.0067	1.555	E-37 y G-L33	11:40	13.7	17.7	11:45	13:45	4.7	31.16	1.51	0.023	7:00	19:20	20:00
9	0.8 : 1 + 1% + 0.8%	1.088	0.449	0.0114	0.0073	1.556	E-37 y G-L33	12:00	13.8	18.1	12:05	14:05	1.5	32.96	1.54	0.026	5:30	17:30	15:00
10	0.7 : 1 + 1% + 0.8%	1.043	0.492	0.0125	0.0079	1.555	E-37 y G-L33	12:25	14.2	19.3	12:30	14:30	1.1	35.34	1.62	0.044	2:30	14:05	14:30
11	0.6 : 1 + 1% + 0.8%	0.987	0.543	0.0138	0.0088	1.553	E-37 y G-L33	12:50	14.5	19.1	12:55	14:55	0.9	40.29	1.66	0.059	24:10	11:20	13:00
12	0.5 : 1 + 1% + 0.8%	0.923	0.609	0.0155	0.0098	1.557	E-37 y G-L33	13:15	13.9	18.9	13:20	15:20	0.1	66.05	1.77	0.130	24:00	10:45	12:15
<b>04/12/09</b>																			
Cemento PACASMAYO Tipo MS																			
AGUA DEL UCB																			
13	1 : 1 + 2% + 1.5%	1.120	0.370	0.0188	0.0112	1.520	E-37 y G-L33	11:00	15.1	17.3	11:05	13:05	8.0	30.96	1.47	0.020	19:15	8:15	9:50
14	0.9 : 1 + 1% + 1.5%	1.098	0.403	0.0103	0.0122	1.524	E-37 y G-L33	11:25	15.4	17.4	11:30	13:30	2.2	31.80	1.53	0.024	18:50	19:25	8:30
15	0.8 : 1 + 1% + 1.5%	1.064	0.439	0.0112	0.0133	1.528	E-37 y G-L33	11:45	16.2	18.2	11:50	13:50	1.1	33.51	1.56	0.034	9:30	21:45	2:30
16	0.7 : 1 + 1% + 1.5%	1.015	0.479	0.0122	0.0145	1.521	E-37 y G-L33	12:05	15.4	18.2	12:10	14:10	1.0	36.32	1.62	0.045	8:05	20:00	20:40
17	0.6 : 1 + 1% + 1.5%	0.963	0.530	0.0135	0.0161	1.523	E-37 y G-L33	12:30	14.7	19.4	12:35	14:35	0.2	45.61	1.67	0.075	6:00	17:30	18:50
18	0.5 : 1 + 1% + 1.5%	0.905	0.597	0.0152	0.0181	1.535	E-37 y G-L33												

MEZCLA N°	DOSIFICACION EN PESO A : C : + Ad	MEZCLADO (Lts)				ADITIVO	HORA PREP.	T° AMB.	T° MEZ.	SEDIMENTACION			FLUIDEZ seg.	DENSIDAD Pe (gr/cm3)	COHESION C° (gr/cm2)	FRAGUA			
		A	C	Ad.	Acel					Vol. Lts.	INICIO	FINAL				%	INICIO	Hrs.	FINAL
<b>05/12/09</b>																			
Cemento PACASMAYO Tipo MS						AGUA DEL UCB													
19	0.8 : 1 + 0.5% + 1%	1.064	0.439	0.0056	0.0089	1.518	E-37 y G-L33	9:20	12.8	16.1	9:25	11:25	1.3	35.41	1.56	0.051	10:30	25:10	18:30
20	0.9 : 1 + 0.5% + 1%	1.098	0.403	0.0051	0.0081	1.514	E-37 y G-L33	9:40	12.1	14.9	9:45	11:45	1.7	32.63	1.52	0.031	11:20	26:25	19:15
<b>11/12/09</b>																			
Cemento PACASMAYO Tipo MS						AGUA DEL UCB													
21	0.9 : 1 + 0.5% + 1.5%	1.098	0.403	0.0051	0.0122	1.518	E-37 y G-L33	12:55	13.1	17.6	13:00	15:00	1.5	33.61	1.51	0.043	7:35	18:40	
22	0.8 : 1 + 0.5% + 1.5%	1.064	0.439	0.0056	0.0133	1.522	E-37 y G-L33	13:20	13.6	17.7	13:25	15:25	1.0	36.40	1.56	0.058	6:25	17:05	
23	0.7 : 1 + 0.5% + 1.5%	1.015	0.479	0.0061	0.0145	1.515	E-37 y G-L33	13:35	13.1	17.8	13:40	15:40	0.4	40.92	1.61	0.067	4:27	14:52	
<b>11/12/09</b>																			
Cemento PACASMAYO Tipo MS						AGUA DEL UCB													
24	0.9 : 1 + 0.5% + 1%	1.098	0.403	0.0051	0.0088	1.515	E-37 y Accelg.	14:00	12.7	16.2	14:05	16:05	3.1	31.71	1.52	0.028	8:10	18:05	
25	0.8 : 1 + 0.5% + 1%	1.064	0.439	0.0056	0.0096	1.518	E-37 y Accelg.	14:20	12.8	16.6	14:25	16:25	3.0	32.59	1.54	0.032	7:30	17:10	
26	0.7 : 1 + 0.5% + 1%	1.015	0.479	0.0061	0.0105	1.511	E-37 y Accelg.	14:40	13.9	16.7	14:45	16:45	2.9	34.84	1.58	0.048	7:40	17:00	
<b>12/12/09</b>																			
Cemento PACASMAYO Tipo MS						AGUA DEL UCB													
27	0.9 : 1 + 0.5% + 1.5%	1.098	0.403	0.0051	0.0133	1.519	E-37 y Accelg.	10:00	9.7	14.1	10:05			31.77	1.50	0.027	5:08	19:08	
28	0.8 : 1 + 0.5% + 1.5%	1.064	0.439	0.0056	0.0145	1.523	E-37 y Accelg.	10:20	10.3	14.2	10:25			32.82	1.54	0.032	4:15	17:55	
29	0.7 : 1 + 0.5% + 1.5%	1.015	0.479	0.0061	0.0158	1.516	E-37 y Accelg.	10:40	10.3	14.3	10:45			35.06	1.58	0.048	4:00	17:20	
<b>16/12/09</b>																			
Cemento PACASMAYO Tipo MS						AGUA DEL UCB													
30	0.9 : 1 + 1.5%	1.098	0.403	-	0.0133	1.514	Accelguard 80	13:10	17.8	20.2	13:15	15:15	2.0	31.94	1.49	0.042	2:15	13:05	10:20
31	0.8 : 1 + 1.5%	1.064	0.439	-	0.0145	1.518	Accelguard 80	13:30	18.0	20.4	13:35	15:35	1.9	34.27	1.53	0.050	2:30	12:55	10:30
32	0.7 : 1 + 1.5%	1.015	0.479	-	0.0158	1.510	Accelguard 80	13:50	18.2	20.5	13:55	15:55	1.0	38.15	1.61	0.058	2:30	12:40	10:00
<b>16/12/09</b>																			
Cemento PACASMAYO Tipo MS						AGUA DEL UCB													
33	0.9 : 1 + 2%	1.098	0.403	-	0.0177	1.519	Accelguard 80	14:10	19.3	20.6	14:15	16:15	3.0	31.82	1.48	0.042	3:50	13:40	12:00
34	0.8 : 1 + 2%	1.064	0.439	-	0.0193	1.522	Accelguard 80	14:35	18.3	21.9	14:40	16:40	2.1	34.04	1.52	0.054	3:50	13:15	11:30
35	0.7 : 1 + 2%	1.015	0.479	-	0.0210	1.515	Accelguard 80	14:55	20.5	21.1	15:00	17:00	1.2	37.24	1.58	0.061	3:15	12:30	10:50

Cuadro 3-2: Resultados de registros

### Resultados de ensayos a compresión

Ensayos realizados en el proyecto Cerro Corona para el LVU Las Gordas y presa Las Gordas

Codigo mix	Edad (días)	Area (cm2)	Carga (kg)	$\sigma$ (kg/cm2)	$\sigma$ (kg/cm2) Promedio
0.7:1+0.5 Euco 37	28	22.4	3380	150.89	117.63
0.7:1+0.5 Euco 37	28	22.4	1890	84.38	
1:1	28	22.15	1500	67.72	56.72
1:1	28	22.31	1020	45.72	
1:1+1%	28	21.91	1170	53.40	47.77
1:1+1%	28	22.31	940	42.13	
0.7:1	28	22.08	1660	75.18	73.40
0.7:1	28	22.06	1580	71.62	

Cuadro 3-3: Resultado de ensayos a compresión

### 3.1.7 ANALISIS DE RESULTADOS DE LAS MEZCLAS DE DISEÑO

Los resultados de éstos ensayos de laboratorio, son debidamente registrados y graficados en curvas típicas, (Gráficos de fluidez, sedimentación, cohesión e inyectabilidad). Estos ensayos son realizados antes de la ejecución de cualquier trabajo de inyección. El agua usada debe ser neutral y con un pH de 7, y no debe contener elementos que hagan daño al cemento. Está agua

usada en la preparación de la mezcla de laboratorio, debe ser en lo posible, la misma a utilizar en las inyecciones y se debe tenerse en cuenta la variación de temperatura.

Las curvas típicas de los, resultados de laboratorio pueden observarse en los gráficos de sedimentación, fluidez, inyectabilidad y cohesión.

**Gráfico de Sedimentación Vs. Relación Agua:Cemento**

En el gráfico3-1, 3-2 y 3-3, se pueden observar las mezclas con estabilidad adecuada para la inyección, así mismo se observa la variación de sedimentación en función a la relación a:c, a menor relación de a:c menor sedimentación y a mayor relación a:c mayor sedimentación.

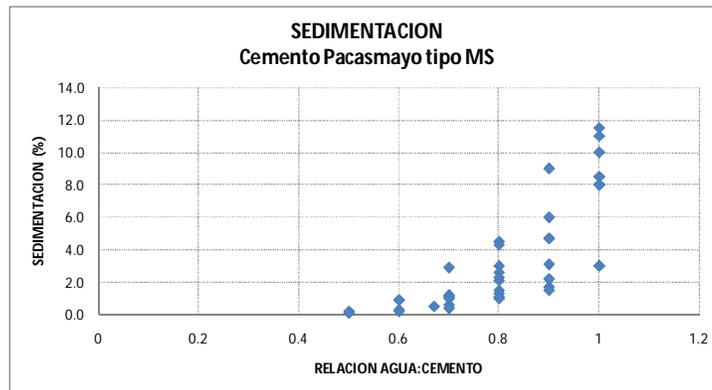


Gráfico 3-1: Variación de sedimentación con cemento Pacasmayo tipo MS

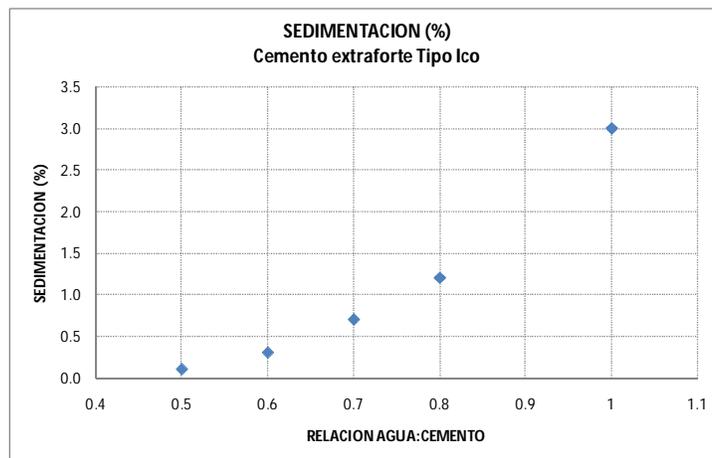


Gráfico 3-2: Variación de sedimentación con cemento Pacasmayo tipo extraforte

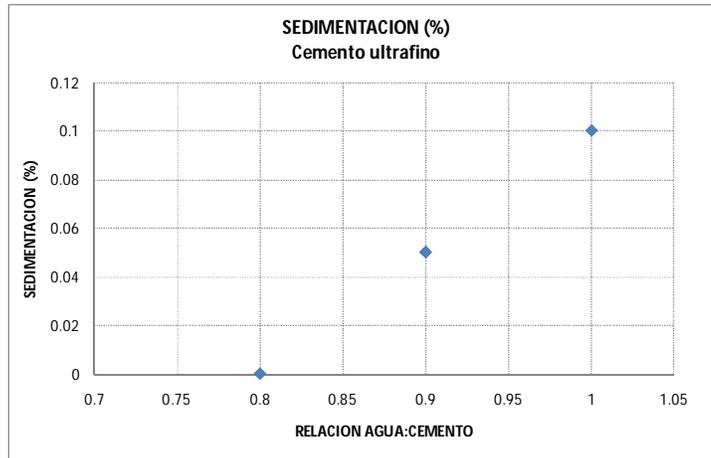


Gráfico 3-3: Variación de sedimentación con cemento ultrafino

**Fluidez Marsh vs relación agua:cemento**

En este gráfico se pueden observar los cambios en la fluidez, con respecto al tipo de mezcla, y principalmente a la relación agua:cemento, en el gráfico 3-4, se muestra el gráfico obtenido para las mezclas ensayadas, teniendo como referencia la fluidez del agua en 28 segundos, se observan las mezclas más fluidas, aquellas con relación mayores de agua:cemento.

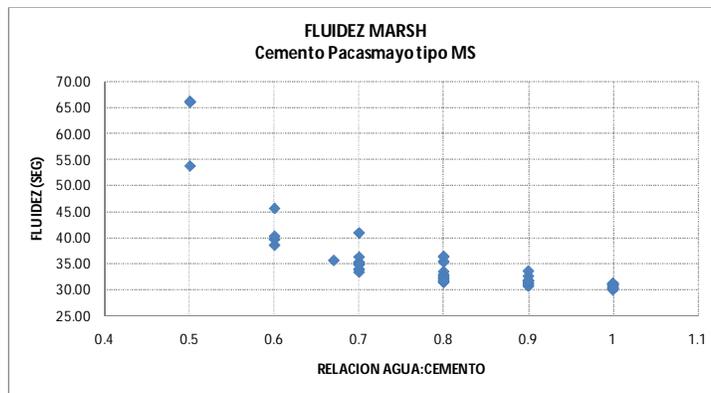


Gráfico 3-4: Variación de fluidez con cemento Pacasmayo tipo MS

En el gráfico 3-4, se observa una fluidez de 65seg cuando la relación agua cemento es 1:05, cuando hay menos cemento y cuando se observa una fluidez de 30 seg. La relación agua cemento es 1:1, significa que hay más cemento

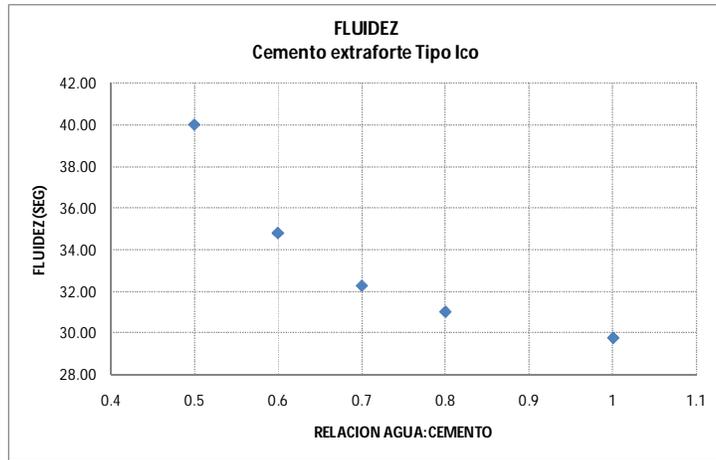


Gráfico 3-5: Variación de fluidez con cemento Pacasmayo tipo extraforte

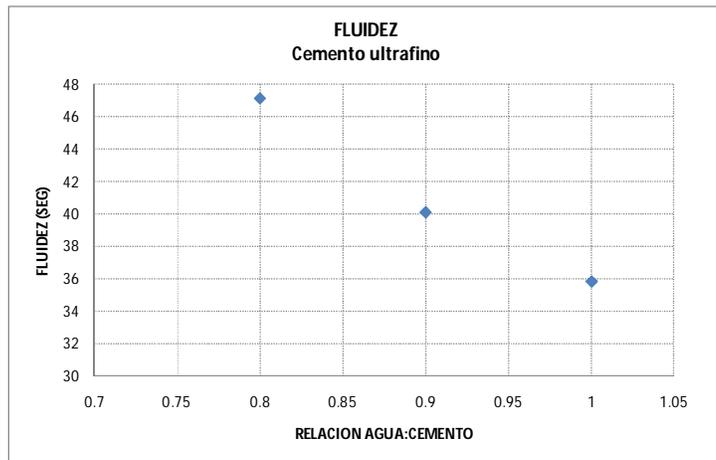


Gráfico 3-6: variación de fluidez con cemento ultrafino

### Gráfico de inyectabilidad

Este gráfico es el más importante, este gráfico muestra la correspondencia entre la viscosidad de la mezcla y su estabilidad, se trata de utilizar mezclas más fluidas, con mejores características de estabilidad.

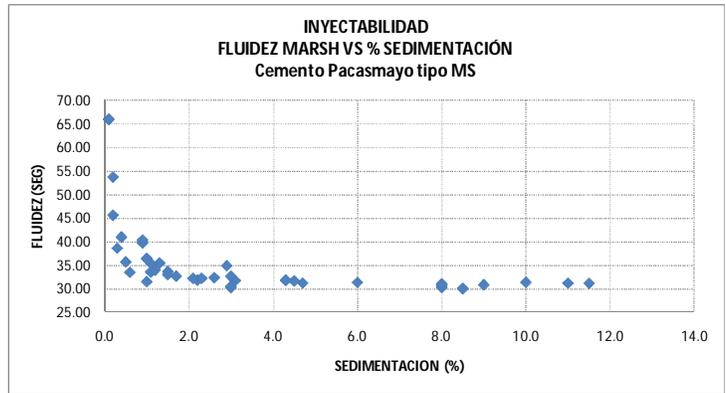


Grafico 3-7: Inyectabilidad de mezclas con cemento Pacasmayo tipo MS

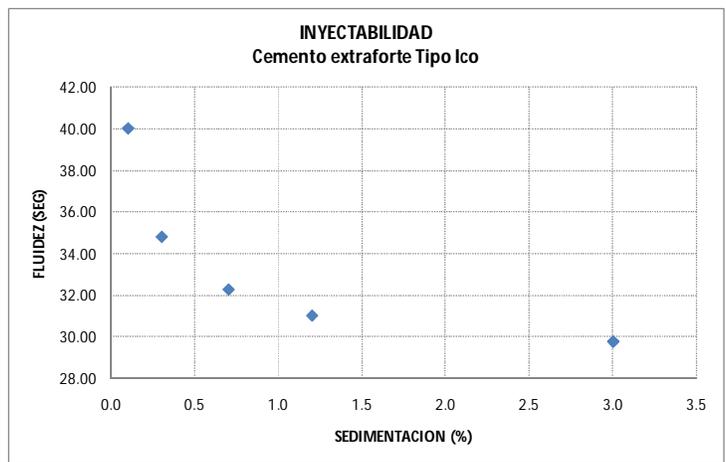


Grafico 3-8: Inyectabilidad de mezclas con cemento Pacasmayo tipo extraforte

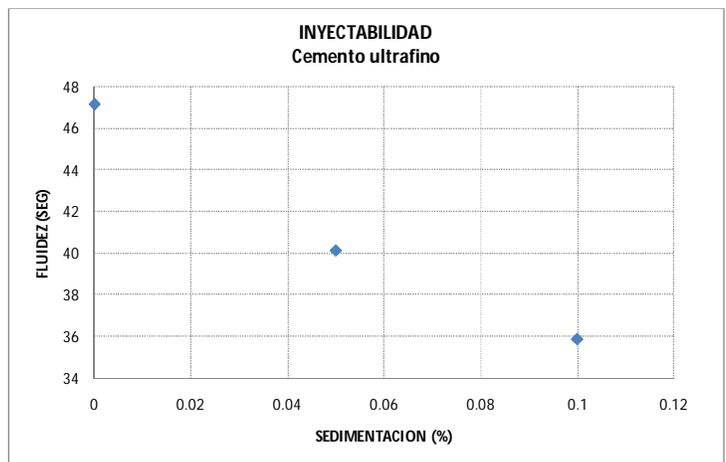


Grafico 3-9: Inyectabilidad de mezclas con cemento ultrafino

### Gráfico de cohesión

En este gráfico, se observa el cambio de la resistencia al corte de la lechada de cemento, (considerado como un fluido tipo Bingham) y la relación agua cemento de la mezcla. Este gráfico tiene mucha importancia en la determinación o verificación de la penetrabilidad de la mezcla, en general se busca la penetrabilidad eligiendo la mezcla, con baja cohesión con respecto a la relación a:c y el uso del aditivo súper plastificante.

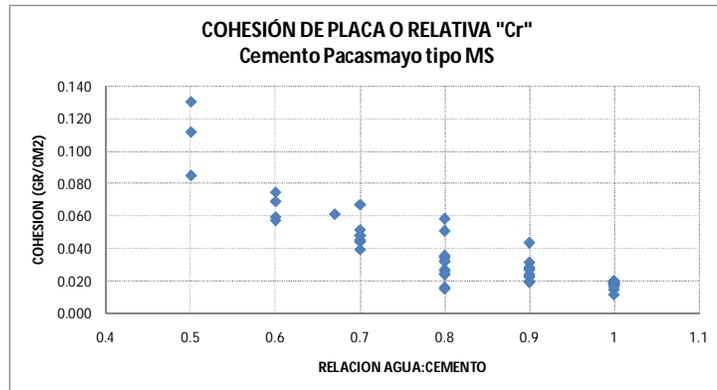


Grafico 3-10: Cohesión de mezclas con cemento Pacasmayo tipo MS

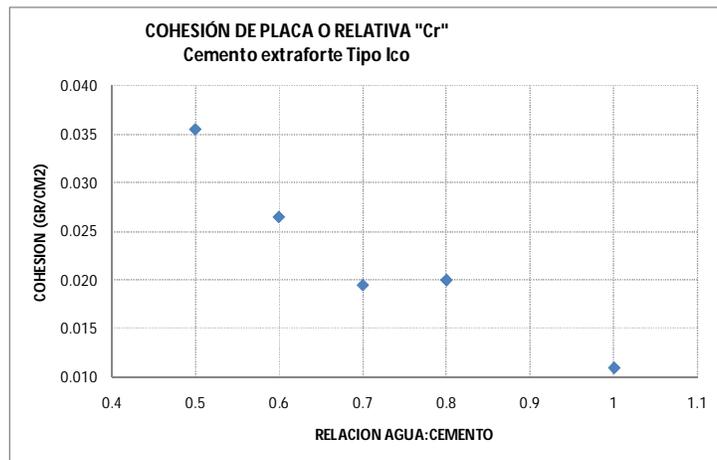


Grafico 3-11: Cohesión de mezclas con cemento Pacasmayo tipo extraforte

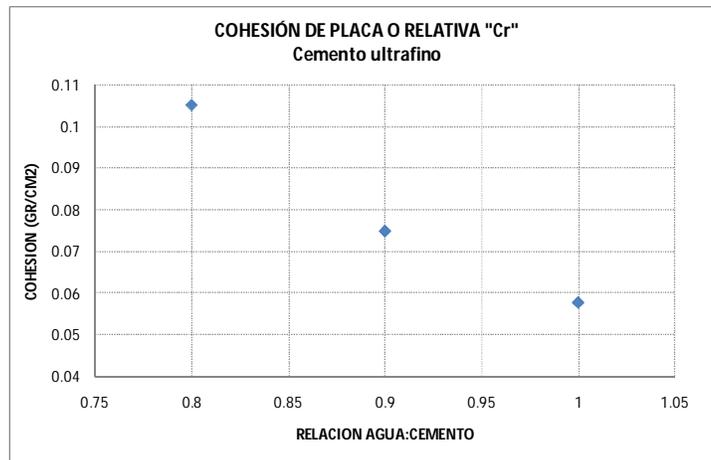


Grafico 3-12: Cohesión de mezclas con cemento ultrafino

### 3.2 MORTEROS

Son mezclas empleadas en inyecciones, tanto para impermeabilización, como para consolidación y pueden ser:

- Morteros de inyección en estado líquido
- Mortero de inyección inestables
- Morteros de inyección estables

#### 3.2.1 Morteros de inyección en estado líquido

Estos morteros son líquidos, el silicato de sodio se considera como un mortero líquido. Los morteros en estado líquido, pueden penetrar en todos los huecos por donde el agua discurre, pero para que esto pueda ocurrir en la práctica la permeabilidad del medio inyectado no debe ser demasiado pequeña, para que se pueda inyectar, es necesario que el medio a inyectar no tenga poros demasiado pequeños como en el caso de arcillas y limos que prácticamente no son inyectables, si el medio tiene poros apreciables y una permeabilidad no despreciable, pero el mortero tiene demasiada viscosidad, la inyección es igualmente imposible.

*Morteros líquidos a base de productos químicos*, son geles duros de silicato de sodio y de lignocromo, la dimensión de los granos o flóculos en la fase sólida en suspensión de los morteros clásicos limitan la penetrabilidad de esos morteros es, pues, normal que sea la química quien se ocupe de encontrar morteros perfectamente líquidos y como tales alcanzar todos los huecos del suelo donde el agua puede tener acceso.

Productos utilizados

Desde 1886 se viene utilizando el silicato de sodio patentando en aquella fecha y mejorado después.

Como consecuencia del precio relativamente elevado de esos productos, se consigue emplearlos disminuyendo su volumen, añadiéndoles un polvo fino, puesto en suspensión. Se puede ver como el cemento y la arcilla permite lograr fácilmente esos resultados. Sin embargo para conseguir una fuerte penetrabilidad, es necesario que la arcilla tenga los granos muy pequeños, es decir una bentonita. Se obtienen así suspensiones que se transforman, fraguan e incluso se polimerizan exactamente igual que los morteros líquidos.

#### Viscosidad

Prácticamente, todos estos morteros, salvo los geles de arcilla, son en un modo dado, líquidos newtonianos más o menos viscosos. Por el contrario su viscosidad puede aumentar en función del tiempo y se comprende fácilmente que la inyección sea tanto más fácil cuanto más viscoso es el mortero. La evolución de la viscosidad de los morteros es por ello determinante para la marcha de la inyección.

#### Determinación del tiempo de fraguado

El tiempo que tarde el mortero líquido en transformarse en sólido, más o menos perfecto, se llama tiempo de transformación o más corrientemente tiempo de fraguado. No es fácil determinarlo salvo en casos en que el fraguado está perfectamente definido, como sucede con las resinas, la medida de la viscosidad no suele ser buena norma para determinar el fraguado; existen cuerpos como las breas que no son más que líquidos extremadamente viscosos.

#### Geles de silicato de sodio

Se inyecta en el terreno, una solución de silicato de sodio con un ácido y después una solución de cloruro de calcio. El silicato da un gel resistente que consolida el terreno impermeabilizándolo.

Efectivamente se mezcla el silicato de sodio con un ácido, y esta solución única inyectada en el terreno, se coagula al cabo de cierto tiempo. El gel obtenido de esta forma no es muy rígido y no debe utilizarse más que para impermeabilizar.



Figura 3-8: Probeta de silicato de sodio

### 3.2.2 Morteros inestables

El mortero de cemento, es un mortero inestable, con la condición de que el cemento esté suficientemente diluido. El límite de dilución, es imposible de precisar depende de la naturaleza del cemento. Las inyecciones de estas lechadas, cuando el terreno o la roca no presentan grandes dificultades, pueden ser un método barato y eficaz.

El fenómeno de sedimentación de estos morteros inestables depende del tipo de cemento y la disolución.

Se indican los porcentajes de decantación en función de la relación agua:cemento. Estos datos se han obtenidos con más de 15 tipos de cementos diferentes.

Agua/cemento	Decantación
1/1	5-35
2/1	15-60
3/1	32-72

En una suspensión como las lechadas de cemento, la capacidad para penetrar en las grietas y poros del terreno depende de la forma y tamaño de las partículas sólidas más grandes de la concentración estabilidad y tixotropía de la mezcla.

La estabilidad de una mezcla es importante, y su ausencia provocará la decantación de las partículas, lo cuál llevará consigo que, en algunas partes del terreno, no se inyecten de forma homogénea o también que se produzcan fallas en los equipos, como por ejemplo obturaciones en las mangueras.

### **3.2.3 Morteros estables**

Se definen como lechadas estables, a las suspensiones en agua de las partículas finas, Lo suficientemente pequeñas para que no pueda manifestarse sedimentación alguna durante la inyección como; arcilla pura, cemento, bentonita, o cementos activados por aditivos, que no presentan una decantación apreciable durante la operación de la inyección, estas lechadas son tanto menos estables cuanto mayor sea su relación agua/cemento.

En el proyecto de inyecciones, se debe indicar los casos en los que es admisible u obligatorio el empleo de lechadas de cemento estabilizadas mediante silicato de sodio, para compensar la disminución de rigidez provocada por la bentonita.

Las inyecciones de cemento, son normalmente las más usadas para el tratamiento de macizos rocosos. En la mayoría de casos la inyección de cemento está constituida por cemento portland

Una suspensión de arcilla coloidal, en tanto que no sedimente, pertenece a este tipo de morteros, pero que siempre mantenga la fluidez necesaria para hacer posible la inyección y proporcione después la rigidez suficiente.

Estas propiedades a veces contradictorias, son difíciles de obtener, se alcanzan con métodos de fabricación que aseguren la defloculación de los coloides.

Entre los morteros estables podemos mencionar:

#### ***Mortero de cemento bentonita***

La adición de bentonita, aumenta la viscosidad y el límite de resistencia al corte de los morteros de cemento en los que la relación a/c este constante, éste aumento es tanto más sensible cuanto más densos son los morteros iniciales.

#### ***Morteros de cemento silicato***

La rigidez de un mortero de cemento queda mejorada por la adición de silicato de sodio, ésta mejora es tanto más sensible cuanto más fuerte es la dosificación del cemento. Además si un mortero de éstas características permanece en reposo su rigidez va creciendo con el tiempo. Este efecto se manifiesta claramente al cabo de una hora aproximadamente, corresponde a una aceleración del fraguado de cemento debida al silicato.

### ***Morteros 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, de la experiencia de Henry Cambefort, se demuestra que el mortero así obtenido es homogéneo y tiene una rigidez inicial más importante que únicamente con la bentonita teniendo un comportamiento claramente tixotrópico, además las resistencias mecánicas son relativamente elevadas.

### ***Mortero de cementos activados***

El objetivo de la activación es permitir la obtención de morteros inyectables de elevada dosis en cemento que tengan una ligera sedimentación, o incluso ninguna.

### ***Morteros de fraguado rápido***

En ciertos trabajos, se necesita disponer de morteros que ofrezcan a la vez, una cierta resistencia mecánica y un fraguado relativamente rápido de un cuarto de hora, a media hora, con el objetivo de reducir las fugas del mortero.

La resistencia mecánica, impone el empleo de cemento en la confección de los morteros

En cuanto al fraguado acelerado puede obtenerse de tres maneras:

- Dosificando convenientemente un acelerador de fraguado
- Mezclando cemento aluminoso y cemento siderúrgico (este cemento proporciona fraguados menos rápidos que el portland).
- utilizando un producto que aumente fuertemente la viscosidad del mortero.

### ***Morteros económicos de cemento-cenizas volátiles***

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

Nada impide utilizar polvo de piedra inerte, pero el hollín de ciertas centrales térmicas, llamado también cenizas volátiles, constituyen un residuo abundante, barato y perfectamente adaptado a la elaboración de morteros de inyección, estas cenizas lejos de ser inertes tienen propiedades puzolánicas.

### ***Morteros inyectables***

La adición de arena a un mortero de cemento estable da como resultado la obtención de un mortero inyectable, según el resultado que se desee, la cantidad de arena será más o menos grande y su granulometría más o menos fina. De manera general cuanto más fuerte es la dosificación de arena más fácilmente pueden permanecer en suspensión los granos más gruesos. Por eso se pueden realizar morteros que contengan granos de 5 a 8 mm de diámetro, pero estos morteros no pueden ser inyectados con cualquier bomba. Además se les debe reservar para cavidades relativamente importantes.

### ***Morteros de arcilla tratada***

Estos morteros; son suspensiones de arcilla en el agua, adicionadas de productos químicos convenientes para permitir una inyección satisfactoria. Sabemos por experiencia, que después de la inyección la suspensión sedimenta e incluso en ciertos casos se orea, quedando en el terreno una masa pastosa relativamente consistente. Estos morteros no tienen resistencia mecánica, por lo que no se pueden utilizarse en consolidación alguna por muy pequeña que sea.

### ***Morteros de arcilla-cemento***

Un mortero de arcilla pura que no presente tixotropía bastante fuerte, corre el riesgo de ser deslavado en el transcurso de la inyección, si no está lo suficientemente aireado, de no resistir la carga de agua a la que se verá posteriormente sometido. Es interesante pues dar al producto final una cierta resistencia mecánica para bloquearlo en los intersticios del suelo. Esta resistencia puede, por otra parte ser muy débil apenas unos kilos por centímetro cuadrado. Se llega a este resultado añadiendo cemento a la arcilla, pero al mismo tiempo se sacrifica la principal propiedad teórica de los morteros de arcilla, ya que deliberadamente se añaden a granos muy pequeños, otros granos los de cemento mucho más gruesos.

El principio de esos nuevos morteros no deberían ser aptos para la estanqueidad de intersticios tan finos como los obturados por morteros de arcilla pura, se comprende fácilmente que en un mortero de arcilla pura todos los granos se desfloculan, esto no impide que se elijan cementos de grano muy fino para mejorar esos morteros.

### 3.2.4 Morteros a base de aglomerantes hidrocarbonatados

La ausencia de granos, la plasticidad la impermeabilidad y la inercia frente a todos los agentes de corrosión, hacen de los aglomerantes hidrocarbonatados productos de inyección casi ideales, éstos productos son muy caros en Europa, también su empleo como mortero de inyección es extremadamente limitado.

Este mortero solo se podrá utilizar para impermeabilización provisional. Utilizarlo para consolidación es imposible a menos que se añada un cuerpo que de rigidez al producto final.

### 3.2.5 Elección del mortero

En determinados casos está bien definido el único mortero que conviene, pero en otros puede dudarse desde los morteros propiamente dichos hasta las lechadas aireadas, siendo además ciertas composiciones susceptibles de dos o tres variantes.

La naturaleza del suelo, los resultados que se deseen obtener, el precio de los productos, su posibilidad de aprovisionamiento, la mayor o menor facilidad de fabricación del mortero, su penetrabilidad, el modo de ejecución de los taladros y de los trabajos, el clima, etc., todo entra en juego en la elección.

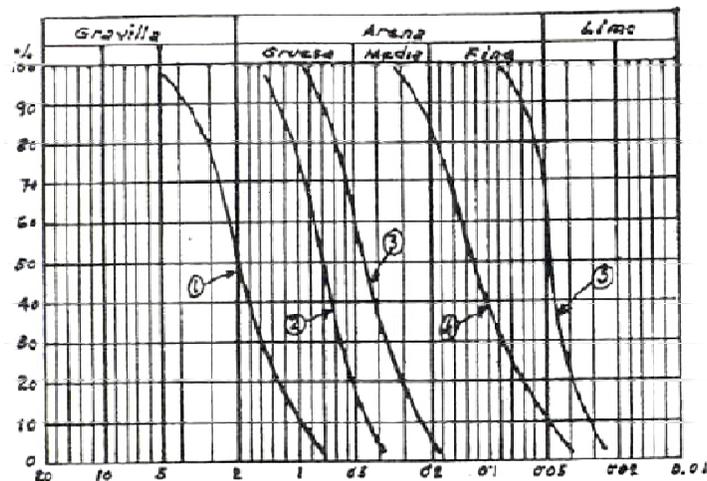


Grafico 3-13: Límites de penetrabilidad en función de la granulometría<sup>3</sup>;  
1-Cemento, 2-Arcilla-Cemento, 3-Arcilla, 4-Gel de arcilla, 5-Resinas

<sup>3</sup>Límites de penetrabilidad en función de la granulometría, Inyección de suelos (Cambefort) pág. 341

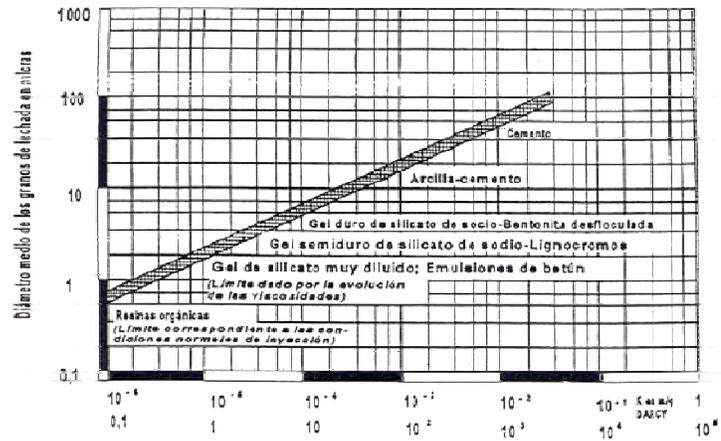


Grafico 3-14: Límites de penetrabilidad de los morteros basados en la penetrabilidad de los terrenos<sup>4</sup>

<sup>4</sup>Límites de penetrabilidad, Inyección de suelos (Cambefort) pág. 342

# CAPITULO 4

---

## DISEÑO DE GROUTING EN ROCAS

Los objetivos de este capítulo son:

- Evaluar la fundación
- Definir las mezclas para grouting
- Equipos de inyección y perforación
- Definir las presiones para grouting
- Diseño de cortinas de grouting
- Métodos de inyección tradicional y GIN
- Controlar las filtraciones
- Estimación de cantidades

### 4.1 Investigación de la fundación

La investigación de la fundación, que se desarrolle en campo, como la información procedente de muestras del subsuelo y ensayadas en laboratorio, pueden determinar la elección del método óptimo, tanto técnica como económicamente hablando, esto depende de diversos factores, como hidrogeología del lugar, estructura geológica, disponibilidad del sistema, experiencia del constructor. Con la investigación preliminar del terreno, se deben cubrir tres objetivos fundamentales:

- Evaluar la permeabilidad del terreno, en función de ello, fijar el grado de permeabilidad deseada.
- Explorar las variaciones locales de la distribución de fisuras, con el fin de valorar la inyectabilidad.
- Investigar el contenido de sales del terreno y del agua subterránea, para identificar la presencia de sales que pueden afectar a la técnica del tratamiento.

La investigación de campo, comprende un estudio geológico, geotécnico y un estudio hidrogeológico.

#### 4.1.1 Investigación geológica

El reconocimiento geológico, debe incluir la geología general de la zona, con sus características tectónicas, determinación de familias de juntas, juegos de fracturas o diaclasas, fallas, planos de discontinuidad, buzamientos, zonas de poca resistencia, etc. Para que mediante la alineación de los taladros de inyección, se obtenga una óptima intersección.

Los sondeos de investigación con recuperación de testigo; son la herramienta más usada en esta etapa, aunque pueden usarse métodos más avanzados como sondas con cámara de TV para observar las descripciones con mayor detalle, tales como: anchura de fracturas abiertas, condiciones de grietas en las paredes, valoración de las juntas y su continuidad

Los aspectos más importantes a tener en cuenta en éste estudio geológico, son los siguientes:

**a) *Tipo de roca***

De acuerdo a los sondeos de investigación y a los mapeos geológicos se debe tener una idea clara del tipo, o tipos de roca, que están involucradas en la zona, mostrados en un perfil geológico, más detalles ver cap. 2, ítem 2.2.1 clasificación del terreno

**b) *Espaciamiento entre juntas abiertas***

El espaciado o separación es muy importante; ya que cuanto más pequeño sea éste, más fácil será la inyección. Además, nos provee de información relevante, como posibles vías de agua, cavidades o posibilidades de asentamientos diferenciales, que de no tenerlos en cuenta inicialmente harían la inyección, mucho más cara y difícil.

**c) *Apertura de grietas***

Las juntas más fáciles de inyectar, son aquellas cuya abertura está entre 0.5 mm a 6 mm. En la juntas con aperturas superiores a 6 mm, el fluido inyectado viaja muy fácilmente, lo cuál puede resultar perjudicial al producirse una penetración excesiva. Por el contrario, las juntas con un grosor inferior a los 0.5 mm, hacen que la entrada del fluido, sea realmente fácil. En este caso habría que tomar medidas, como por ejemplo; espaciar los períodos de inyección al menos 24 horas.

**d) *Inclinación y buzamiento***

La inclinación de las juntas, con relación a los taladros perforados de inyección, incide en la mayor o menor facilidad para realizar el tratamiento. Así se sabe que los taladros verticales, los más fáciles de perforar, van a tener una buena intersección con las juntas que formen un ángulo entre  $0^{\circ}$  y  $60^{\circ}$ . Las juntas que tienen un fuerte buzamiento, normalmente requieren el uso de taladros inclinados, los cuáles, no deben tener inclinaciones mayores a  $45^{\circ}$  con relación a la vertical.

La orientación y buzamiento de las fallas, es muy importante para determinar el nivel de presión que se usará en la inyección, en esta zona. En estas zonas se presentan generalmente desviaciones de taladros.

***e) Tensiones de la roca y consistencia del macizo***

Las inyecciones en rocas duras y firmemente ancladas, son normalmente más fáciles, que en rocas sueltas, fracturadas y sin consistencia, en los que, el taladro se cierra y colapsa rápidamente. Cuando la roca está sometida a tensiones debido a la tectónica, antes de iniciar la inyección, es muy importante que se haga un reconocimiento y valoración de estas tensiones, para llegar a definir el método de inyección más adecuado

***f) Zonas geológicamente críticas***

Cuando se estudia la geología de algunos lugares, se comprueba que, en muchas zonas geológicas, como fallas, diaclasas, presencia de karts, deslizamiento de estratos, permeabilidades grandes, etc. En estas zonas tan críticas, es normal que se tengan que realizar diversas series de taladros de inyección, con inclinaciones y espaciamentos diversos, de tal manera que áreas muy alteradas pueden requerir unas inyecciones especiales intensas y muy localizadas.

***g) Permeabilidad***

Cuando el terreno a tratar tiene una permeabilidad grande y está muy suelto, existe gran probabilidad de que puedan producirse avenidas de material, y hundimientos. En éste caso la inyección debe tener como misión principal eliminar o reducir la permeabilidad del terreno.

***4.1.2 Investigación geotécnica***

Las investigaciones geotécnicas, realizadas mediante sondeos con recuperación de testigos y mediante la toma simultánea de datos de los niveles piezométricos, tienen como fin principal determinar las características del macizo rocoso, o la granulometría del suelo y determinar el método de inyección más adecuado, para el mejoramiento de la roca. La simplificación de estos estudios no es recomendable, debido a tres razones:

- El material que constituye la fundación, no suele ser de un sólo tipo de roca o suelo, por lo que el método de tratamiento del terreno puede variar.
- La granulometría del terreno, no es la única propiedad que afecta a la elección de la técnica de tratamiento.
- Los valores de los niveles piezométricos, y la presión de aguas artesanales, pueden influir, en la elección del método, y presión de inyección del grouting.

***4.1.3 Investigación hidrogeológica***

La investigación del agua subterránea está encaminada hacia el estudio químico del agua y su calidad, a la determinación de niveles piezométricos, y también a la evaluación de la permeabilidad.

Con relación a la composición química, ésta debe estar perfectamente definida, ya que puede incidir de forma importante en los tipos de fraguado o gelidificación. También es importante determinar los niveles piezométricos y las posibles bolsas de agua colgadas.

El otro aspecto, es la determinación de la permeabilidad mediante pruebas con agua a presión, o ensayos Lugeón. Los resultados de tales investigaciones, indicarán la severidad del problema del agua subterránea, y las posibles soluciones aplicables.

Las pruebas de agua a presión; tienen como fin principal, evaluar la permeabilidad de los terrenos. Entre todos los test, o pruebas que valoran la permeabilidad, el más conocido y aceptado es la prueba de Lugeón. Este ensayo fue introducido por Lugeon en 1933, y mide el volumen de agua que puede ser admitida mediante bombeo, en una sección del taladro, en intervalos de tiempo ya determinados.

Ejemplos de magnitudes de Lugeon:

- 1 Lugeon, es el grado de permeabilidad de un terreno que no requiere inyección, y es considerado como el límite de inyección empleando cemento normal.
- 10 Lugeon, garantizan la inyección en cualquier tipo de obra
- 100 Lugeon, es el grado de permeabilidad en zonas muy fracturadas con número relativamente alto de juntas abiertas.

Los ensayos de agua aportan información importante, así una admisión estable proporciona unas condiciones uniformes. En el caso de que la admisión disminuya, significa que existen cavidades que se han ido rellenando con agua, mientras que, un aumento en la admisión puede indicar que la roca se ha desplazado o que el material de relleno ha sido barrido fuera de las cavidades.

Para valorar el flujo de agua a travéz de las fracturas, y seleccionar un valor característico, se aplica el siguiente método, aplicando cinco cambios de presión, inmediatamente seguidos uno del otro durante 10 minutos cada estadio, iniciando con presión baja, presión media y presión máxima, luego presión media y presión baja.

De la experiencia de trabajo, en los proyectos mineros peruanos; los criterios de cierre en función a ensayos de Lugeon, se consideró lo siguiente:

- Antamina presa de relaves < 7 Lugeon
- Cerro Verde Arequipa (LVU presa de relaves), se consideró < 5 Lugeon
- Cerro Verde Arequipa (presa Huayrondo), se consideró < 5 Lugeon
- Cerro Corona Cajamarca (LVU presa de relaves Las Gordas), se consideró < 5 Lugeon
- Cerro Corona Cajamarca (presa de relaves Las Gordas), se consideró < 10 Lugeon
- Cerro Corona Cajamarca (LVU presa de relaves Las Aguilas), se consideró < 5 Lugeon

- Cerro Corona Cajamarca (presa de relaves Las Aguilas), se consideró < 10 Lugeon

La forma de realizar la inyección de agua, también aporta importante información, así una admisión estable, proporciona condiciones uniformes. En el caso de que la admisión disminuya, significa que existían cavidades que han sido rellenados con agua, mientras que un aumento en la admisión puede indicar que la roca se ha desplazado, o que el material de relleno de las fisuras, han sido barridos fuera de las cavidades presentes, ver más información en cap. 2, ítem 2.3.2 ensayos que permiten caracterizar el material.

## 4.2 MATERIALES Y EQUIPOS DE INYECCION

### 4.2.1 MATERIALES

El uso de los materiales, debe considerar dos factores principales:

- La compatibilidad de los materiales individuales y
- El propósito de cada uno de los componentes. Los resultados de la adición de varios materiales para la mezcla de lechada; permitirá al usuario, no sólo desarrollar una amplia gama de propiedades físicas de la lechada, sino también hacer ajustes en el campo de las variaciones de las condiciones del proyecto.

#### 4.2.1.1 Cemento

**El cemento Portland;** usado para la formulación del mortero de cemento Portland, deberá ser de acuerdo a la norma ASTM C150.

En el proyecto (Mina Cerro Verde, Presa Huayrondo), se usó el cemento Yura portland tipo IP, en sacos de 42.50 kg

**El cemento ultra-fino;** es un cemento portland/escorial o cemento Portland, con un rango granulométrico equivalente a MC-500 los principales suministradores de éste cemento son; Geochemical Corporation, de Ridgewood, New Jersey, The Chemical Company Basf (Rheocem) y US Grout.

En el proyecto (Mina Cerro Verde, Presa Huayrondo), se usó el cemento ultra-fino Rheocem 800, en sacos de 25 kg

En el proyecto (Mina Goldfields, LVU Las Gordas), se usó el cemento ultra-fino Rheocem 800, en sacos de 25 kg

En el proyecto (Mina Goldfields, LVU Las Aguilas), se usó el cemento ultra-fino US Grout, en sacos de 20 kg

**El Silicato de Sodio;** Neutro 3.3 y debe cumplir con los siguientes requerimientos:

Aspecto: Líquido ITINTEC 311.155-12:75

Olor: Inodoro ITINTEC 311.155-12:75

Na<sub>2</sub>O: 8.0% a 8.6% UNE 55-620-81  
 UNE 55-627-83  
 SiO<sub>2</sub>: 28.0% a 29.0% UNE 55-628-83  
 Proporción: 3.30 a 3.37 UNE 55-624-82  
 Densidad (20oC): 40.0 a 40.7 Be  
 UNE 55-622-82  
 Gravedad Específica: 1.368 a 1.380  
 UNE 55-622-82  
 Viscosidad (20oC): 250 a 400 cps  
 Sólidos Totales: 36.0% a 37.6%  
 UNE 55-624-82  
 pH Solución Acuosa al 1% (20oC): 12.

Principales fábricas que producen cemento en el Perú:

Empresas	Cemento Portland					C. Portland Adicionados				
	I	II	III	IV	V	IP	I(PM)	MS	HS	I Co
Cemento Andino	1	1			1					
Cementos Lima		1								
Cementos Pacasmayo										
Cementos Selva	1	(1)(2)			(1)(2)					
Cementos Sur		2			2					
Yura		2			2					

 Produccion de Cemento

(1) de bajo contenido de álcalis

(2) a pedido

### Tipos y aplicaciones

- Tipo HS, Extra durable
- Tipo ICO, Extraforte
- Tipo MS, Antisaltre
- Tipo I: De uso general
- Tipo IP: Cemento Portland Puzolánico
- Tipo IPM: Cemento Portland Puzolánico
- Tipo II: De uso general, específico cuando se desea:
  - \* moderada resistencia a los sulfatos o
  - \* moderado calor de hidratación
- Tipo III: Alta resistencia inicial
- Tipo IV: Bajo calor de hidratación
- Tipo V: Alta resistencia a los sulfatos

Los cementos normales deben tener como máximo 100 µm. y al menos 90%, deben contar con las partículas < a 50 µm.

Los cementos ultra finos deben tener como máximo 20 µm. y al menos 90%, deben contar con las partículas < a 15 µm.

Ejemplo de granulometría del cemento Rheocem 800

Distribución de tamaño de partícula (granulometría)	% que pasa
40 micrones	100 %
30 micrones	99 %
20 micrones	99 %
15 micrones	98 %
10 micrones	92 %
5 micrones	58 %
2 micrones	20 %

Algunos de los cementos son caros como los cementos ultra finos, y no están disponibles en el Perú, por lo que se tiene que traer desde el extranjero por ejemplo, Rheocem, US Grout.

La disponibilidad de cemento portland, se debe determinar antes de realizar la inyección en los taladros. Por ejemplo: El tipo de cemento portland produce el país, y los que pueden ser considerados para su uso en las aplicaciones de inyección. Para mayor información ver cap. 3 ítems 3.1.2 materiales.

#### 4.2.1.2 Agua

El agua usada en la formulación del mortero de cemento, deberá estar libre de sulfatos, materias orgánicas u otros materiales particulados. La temperatura del agua no deberá ser menor a 40°F (4°C) ni mayor a 75°F (24°C). El pH debe estar en el rango de  $7 \pm 1$ .

De la experiencia de uso de agua para grouting, en diferentes proyectos mineros, se puede considerar límites máximos, para la calidad de agua a usar en grouting:

##### Parámetros físico químicos:

pH	7	pH
Sólidos totales disueltos	100	mg/l
Turbidez	5	FTU

##### Parámetros inorgánicos:

Aniones		
Cloruros	10	mg/l
Sulfatos	300	mg/l
Nitrógeno		
Nitritos	<0.1	mg/l
Nitratos	<0.5	mg/l

##### Parámetros microbiológicos:

CaCO <sub>3</sub>	500	mg/l
-------------------	-----	------

#### ***Definición del pH y alcalinidad***

La palabra pH es la abreviatura de "pondus Hydrogenium". Esto significa literalmente el peso del hidrógeno. El pH es un indicador del número de iones de hidrógeno. Tomó forma cuando se descubrió que, el agua estaba formada por protones (H<sup>+</sup>) iones hidróxilo (OH<sup>-</sup>), el pH no tiene unidades; se expresa simplemente por un número.

Cuando una solución es neutra, el número de protones iguala al número de iones hidróxilo.

Cuando el número de iones hidróxilo es mayor, la solución es básica, Cuando el número de protones es mayor, la solución es ácida.

La calidad del agua y el pH, son a menudo mencionados en la misma frase. El pH es un factor muy importante, porque determinados procesos químicos, sólo pueden tener lugar a un determinado pH. Por ejemplo, las reacciones del cloro, solo tienen lugar cuando el pH tiene un valor de entre 6,5 y 8.

El pH, es un indicador de la acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno ( $H^+$ ) en una sustancia. La acidez, es una de las propiedades más importantes del agua. El agua disuelve casi todos los iones. El pH sirve como un indicador que compara algunos de los iones más solubles en agua.

El resultado de una medición de pH viene determinado por una consideración entre el número de protones (iones  $H^+$ ) y el número de iones hidróxilo ( $OH^-$ ). Cuando el número de protones iguala al número de iones hidróxilo, el agua es neutra. Tendrá entonces un pH alrededor de 7.

El pH del agua puede variar entre 0 y 14. *Cuando el pH de una sustancia es mayor de 7, es una sustancia básica.* Cuando el pH de una sustancia está por debajo de 7, es una sustancia ácida.

El pH es un factor logarítmico; cuando una solución se vuelve diez veces más ácida, el pH disminuirá en una unidad. Cuando una solución se vuelve cien veces más ácida, el pH disminuirá en dos unidades. El término común para referirse al pH es la alcalinidad.

A continuación se resume una lista de productos y su pH:

Sustancia básica	
14	hidróxido de sodio
13	lejías
↑	
11	amoníaco
10.5	manganeso
8.3	levadura en polvo
7.4	sangre humana
Sustancia neutra	
7.0	agua pura
Sustancia ácida	
6.6	leche
↓	
4.5	tomates
4.0	vino
3.0	manzanas
2.0	zumos de limón
0	ácido clorhídrico

### 4.2.1.3 Los aditivos

Según el caso, se podrá usar aditivos acelerantes, retardadores, expansores, silicatos, asfaltos, u otros, previa evaluación del diseñador.

En tomas altas, se puede usar bentonita, como aditivo en la lechada de inyección. Esta deberá hidratarse por 3 horas para que tenga el L.L. de 400.

En los proyectos de Mineros de Cerro Verde y Goldfields, se usó los siguientes aditivos:

*Súper plastificante Euco 37*; (reductor de agua de alto rango, densidad 1.19Kg/lt, produce mezclas de bajo contenido de agua, produce también resistencias mas altas que las normales). Para cemento portland normal

*Hiperplastificante Rheobuilt*; densidad 1.24 gr/cm<sup>3</sup>, (1.0 – 3.0 % en peso del cemento). La relación agua/ cemento (en peso) debe ser normalmente de 0.5 a 1.0, para cemento ultra fino

**Estabilizador, retardante Delvo®crete**; densidad 1.06 gr/cm<sup>3</sup>, para cemento ultra fino

Protección de todos los materiales utilizados en la mezcla de la lechada; debe tener especial cuidado con el cemento ultra-fino, que en contacto con el medio ambiente se puede humedecer. No se deben usar bolsas rotas de cemento Portland o ultra-fino, o bolsas que contengan terrones endurecidos.

### 4.2.2EQUIPOS DE INYECCION

El equipo básico para realizar inyecciones de cemento se debe componer de lo siguiente:

- Mezclador
- Agitador
- Bomba de inyección
- Manómetros y caudalímetros
- Mangueras y obturadores
- Equipo de medición

El proceso básico de una inyección, se puede resumir de la manera siguiente:

Los materiales de inyección como el cemento, el agua y los aditivos, se añaden al mezclador coloidal, el cual normalmente es de alta velocidad, y son mezclados todos ellos energicamente, al cabo de unos minutos la mezcla es impulsada al agitador donde se batirá lentamente. El papel de este equipo, es mantener la mezcla agitada hasta que se realice la inyección. En el momento en que, se produce ésta, la mezcla es extraída por la bomba y trasladada al taladro a través de mangueras y tuberías. Una vez dentro de éste, dentro del taladro, se usan obturadores y manguitos.

**a) Mezcladores**

El amasado de la mezcla, debe realizarse en máquinas que trabajen a velocidades, como mínimo de 1500 r/min, de ahí que se utilicen los mezcladores de alta velocidad, en vez de los mecánicos. Algunos mezcladores de alta velocidad, están dotados de un efecto ciclón que al trabajar con una elevada velocidad hacen que el cemento y los demás compuestos; sean sometidos a una gran acción de disgregación, individualizando las partículas y eliminando cualquier impureza superficial en los granos.

Esta característica de los mezcladores coloidales de alta velocidad, hace que la mezcla producida tenga una gran estabilidad, con mejor penetración y mayor duración para los trayectos largos.

**b) Agitador**

Los agitadores, son elementos intermedios entre el mezclador y la bomba de inyección, que tiene como misión mantener la mezcla en estado de suspensión hasta que sea bombeada al taladro. Normalmente se trata de un recipiente con una capacidad doble que, la del mezclador, y está provisto de una serie de paletas que giran lentamente, a unas 100 r/min.

El giro producido por las paletas, hace que los sólidos se mantengan en suspensión y que liberen las burbujas de aire que se han originado durante el amasado.

**c) Bomba de inyección.**

La bomba de inyección, debe ser capaz de impulsar el material a zonas que por sus características, harán que la velocidad del fluido sea baja y que puedan sedimentar los granos. Además deberán resistir la abrasión ocasionada por las partículas de cemento.

Hay tres tipos básicos de bombas de inyección: de pistón, de diafragma y de tornillo coloidal

- i. **Bombas de motor helicoidal**, producen un caudal continuo y una presión más constante sin oscilaciones bruscas, que ronda entre 1 y 1.5 MPa. Los caudales alcanzados con estas bombas, pueden llegar a ser de 4000 l/min.



Fig. 4-1: Bomba inyectora de grout

Características de la bomba inyectora:

- Marca.....moyno
- Capacidad.....hasta 10 m<sup>3</sup>/hr
- Presión.....12-15 bar
- Dimensiones.....2.45x0.70x0.87 mts.
- Peso.....200kg

- ii. **bombas de pistón**, hay personas que abogan que la presión de pulsación beneficia el proceso de inyección. Estas bombas pueden producir presiones superiores a los 10 MPa y caudales de 200 l/min. Normalmente, estas bombas, están constituidas por dos cilindros dobles, que tienen un gran ajuste, y que deben estar construidos por materiales muy resistentes a la abrasión. El punto débil de estos equipos, es la necesidad de válvulas, cosa que no es necesaria en las helicoidales, que requerirán un gran mantenimiento para mantenerlas operativas durante un largo período de tiempo.
- iii. **Las bombas de diafragma**, están normalmente constituidas por dos diafragmas flexibles, conectados a un cigüeñal hace que se flexionen hacia dentro y hacia fuera, con lo cuál succionan y expelen la mezcla. También este tipo de bombas necesita válvulas.

#### d) **Líneas de circulación**

Las líneas de circulación, están constituidas por las tuberías que serán las encargadas de transportar el fluido. En la actualidad la gran mayoría de los equipos trabajan con retorno de la mezcla sobrante. En el sistema de circulación con retorno existen dos líneas: la de salida de inyección que conecta la bomba a los accesorios de la inyección en el taladro y la de retorno que lleva la lechada al agitador.

Todas las líneas, están equipadas con manómetros de presión, válvulas para mantener la presión en el tramo de inyección.

Tanto la presión como el caudal, son regulados mediante la llave colocada en la línea de retorno, la cuál permite que el fluido sobrante retorne al agitador. Cuando se utilicen líneas de retorno, se deberá controlar el tiempo que ha transcurrido desde que se efectuó la primera mezcla, pues aunque el fraguado se retrase, las reacciones químicas, habrán empezado y es posible que se inyecte fluido en malas condiciones.

En cuanto al diámetro de las tuberías, éste será tan pequeño como sea posible, por dos razones principales:

- a) una es, conseguir altas velocidades de inyección y otra
- b) es evitar obturaciones en las líneas, pues de tener velocidades pequeñas y poseer las mezclas de inyección con capacidad de adherencia, las condiciones de transporte serian malas. El diámetro de las líneas es normalmente 25 mm.

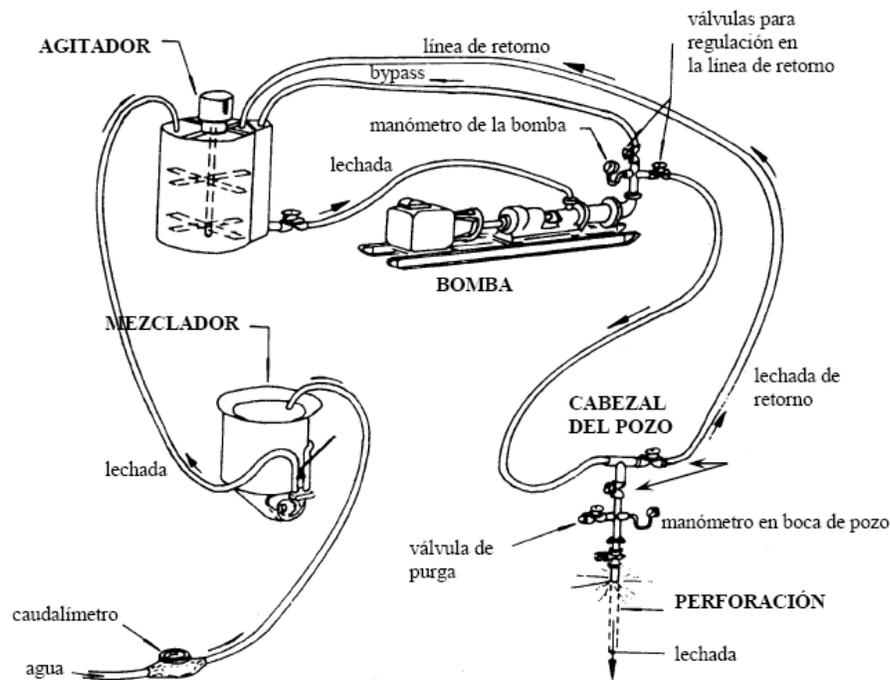


Fig. 4-2: Esquema de la línea de circulación

#### e) *Obturadores*

Los obturadores, son elementos encargados de aislar partes del taladro inyectado. Existen dos tipos de obturadores: los neumáticos y los mecánicos.

- *Los obturadores neumáticos*, están constituidos por un tubo de goma blanda, la cuál se hincha hidráulica o neumáticamente, expandiéndose contra las paredes del sondeo, aunque éstas sean irregulares. La longitud de expansión del manguito de goma es grande, así como la presión de hinchado, que debe ser alta para conseguir

una buena obturación. El inconveniente de estos obturadores, es que tienen tendencia a romperse durante la subida o bajada por el taladro.



Fig. 4-3: Packer hidráulico

- *Los obturadores mecánicos*; son mucho más resistentes, pero únicamente pueden instalarse en la boca de los taladros; están compuestos por una junta de goma gruesa, la cuál se expande contra las paredes del taladro, por una compresión longitudinal usando un tornillo en la superficie.



Fig. 4-4:Packer Mecánico

#### *f) Equipos de medición*

El equipo de medición, está constituido por manómetros de presión y caudalímetros. Normalmente, estas lecturas se realizan con un grupo registrador de forma simultánea y una computadora, con el fin de seguir con todo detalle los cambios de presión y caudal que pudieran producirse.



Fig. 4-5: Equipo de medición (registro)

### 4.3 EQUIPOS DE PERFORACIÓN

El equipo de perforación, se seleccionará en función de las características del trabajo a realizar (diámetro, profundidad, inclinación, ubicación de las perforaciones) y del macizo a tratar considerándose por supuesto, razones de disponibilidad, plazos y economía. La ubicación de los trabajos es fundamental, se requerirán equipos diferentes para inyecciones desde superficie, en estribos, en túneles o galerías.

#### a) *Equipos a percusión*

La perforación se realiza con equipos track- drill, un vástago hueco, que en su extremo tiene acoplada una broca intercambiable. Este vástago, está unido a las barras de perforación fijadas en superficie, con un mandril donde actúa un pistón operado con aire comprimido que es el que transmite el golpe (un valor de referencia del caudal de aire a suministrar por el compresor es 5m<sup>3</sup>/min). La broca se mantiene siempre en contacto con el fondo de la perforación, salvo en el rebote de cada golpe del pistón, y entre golpes tiene una pequeña rotación de la broca para variar su posición. El detritus, es removido por aire o agua que ingresa por las barras de perforación, sale por la broca y regresa a superficie.

Una variante de este sistema es el martillo de fondo. En el siguiente esquema se tiene un modelo comercial para perforaciones de 4" que pesa 19 kg y mide 68cm. Sus componentes principales son; la cabeza con la que se conecta a las barras de perforación, y es la que le transmite la rotación del equipo, una válvula de retención que mantiene la presión de aire dentro del martillo cuando se corta la provisión de aire comprimido desde la superficie, el tubo de alimentación encargado de dirigir el aire al centro del pistón, el pistón que es la parte móvil del martillo, es el que transmite la acción de percusión para que la broca golpee contra la roca (un valor de referencia es de 20 golpes/segundo).

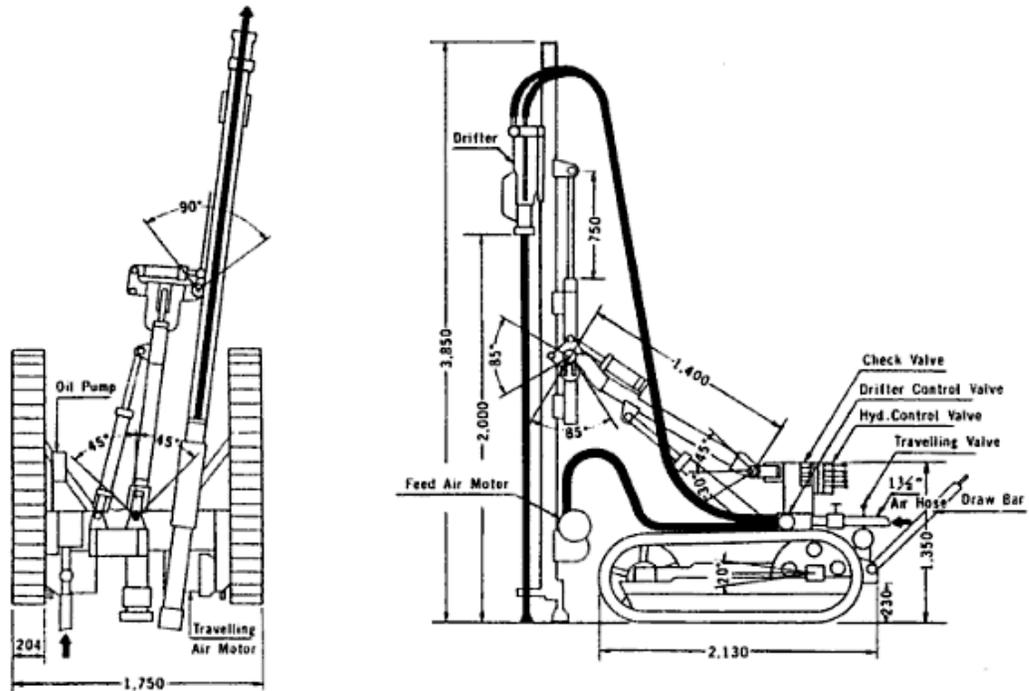


Fig. 4-6: Equipo de perforación

#### 4.4 LECHADA DE CEMENTO

Una vez realizado los diseños de mezclas en laboratorio, se elige las mezclas más adecuadas, teniendo presente los siguientes parámetros:

- Lechada estable: sedimentación < 5%
  - Viscosidad baja: tiempo cono < 32 seg.
  - Cohesión relativa: < 0.2 mm
  - finura cemento: > 4.0 cm<sup>2</sup>/gr
- \* Fluidez (la viscosidad Marsh en los segundos), control de la penetración del grouting con relación al tiempo
  - \* La densidad (la Densidad Específica) utilizando la balanza BaroidMud
  - \* La Cohesión /movilidad (el Límite de Elasticidad.), controla la distancia máxima de penetración, el cual es un indicador tixotrópico para las propiedades de flujo de grout.
  - \* La sedimentación %, tiempo de fragua, solubilidad, las partículas de un fluido de grouting tienden a asentarse por gravedad,
  - \* La resistencia a la compresión a los 7 y 28 días
  - \* Prueba de los materiales, pruebas descomposición química del cemento,
  - \* Índices físicos del cemento;

- *resistencia a la compresión a 7 y 28 días.*

Estas lechadas se clasifican en estables e inestables

- a) *Lechada inestable*; se llama así, a aquellas de cemento diluido con agua en exceso en proporciones variables. Las inyecciones con esta lechada, se pueden usar cuando la roca no presenta dificultades. La decantación es mayor a 5% para mezclas de 1:1, 2:1,3:1 relación a:c
- b) *Lechada estable*; es cuando la decantación es menos a 5% para mezcla 0.9:1,0.8:1, 0.7:1, 0.6:1, 0.5:1 relación a:c

*Ejemplo de propiedades físicas de mezclas usadas en proyectos mineros:*

- En el proyecto Minero de Cerro Verde, se definió las mezclas utilizadas, que tienen las siguientes características:
  - Para lechada con cemento Yura Tipo I, envase en bolsa de 42.5 kg:
    - Dosificación en peso (agua:cemento + súper plastificante): 0.67:1 + 2 % E37
    - Cemento: Fabricación Yura, Tipo I, Peso específico 3.15 gr/cm<sup>3</sup>
    - Euco 37: Plastificante, Densidad 1.19 gr/cm<sup>3</sup>
    - Fluidez de la mezcla: Rango de 28 a 31 seg.
    - Densidad de la mezcla: Rango de 12.4 a 13.7 lbs/gln
    - Sedimentación de la mezcla: Rango de 2.9 a 3.2 %
    - Cohesión de la mezcla: Rango de 0.010 a 0.012 gr/cm<sup>2</sup>
  - Para lechada con cemento Ultrafino Rheocem 800, envases bolsa de 25 kg:
    - Dosificación en peso (agua:cemento + súperplastificante + retardante): 1:1+2%+0.53%
    - Cemento: Rheocem 800, peso específico 3.10 gr/cm<sup>3</sup>
    - Rheobuilt: Híper plastificante, densidad 1.24 gr/cm<sup>3</sup>
    - Delvo Estabilizador: Retardante, densidad 1.06 gr/cm<sup>3</sup>
    - Fluidez de la mezcla: Rango de 34.2 a 37.8 seg.
    - Densidad de la mezcla: Rango de 11.97 a 13.23 lb/gln
    - Sedimentación de la mezcla: Rango de 2.8 a 3.15 %
    - Cohesión de la mezcla: Rango de 0.0138 a 0.0152 gr/cm<sup>2</sup>
    - Fragua Tixotrópica: Rango de 1:25 a 1:34 horas

- En el proyecto Minero de Goldfields, se definió las mezclas que tienen las siguientes características para la presa La Hierba:

- Cemento extraforte

MEZCLA	CEMENTO EXTRAFORTE					
	SEDIMENTACION (%)		FLUIDEZ (seg.)		DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
1:1+2%	2.9	3.2	28.3	31.28	1.391	1.537
0.8:1+2%	1.1	1.3	29.49	32.59	1.476	1.632
0.6:1+2%	0.3	0.3	33.07	36.55	1.594	1.762
0.5:1+2%	0.1	0.1	38.01	42.01	1.672	1.848

- Euco 37: Plastificante, Densidad 1.19 gr/cm<sup>3</sup>
- Cemento: Fabricación extraforte, Peso específico 2.93 gr/cm<sup>3</sup>
- Cohesión de la mezcla: Rango de 0.010 a 0.085 gr/cm<sup>2</sup>

- Cemento ultra fino

MEZCLA	CEMENTO ULTRAFINO					
	SEDIMENTACION (%)		FLUIDEZ (seg.)		DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
1:1	0.1	0.1	34.01	37.59	1.343	1.485
0.9:1	0	0.05	38.59	42.65	1.379	1.525
0.8:1	0	0.02	45.17	49.93	1.414	1.562

- Cemento: Fabricación U. S. Grout, Peso específico 2.7 gr/cm<sup>3</sup>

## 4.5 PRESIONES DE INYECCIÓN

### A) Pruebas de presión mediante ensayos de agua.

Ya se ha comentado anteriormente que se hacen pruebas de inyección de agua para valorar la permeabilidad del terreno. También estas pruebas, pueden servir para valorar la presión, que la mezcla puede alcanzar.

Generalmente, en este tipo de pruebas, se utiliza una presión más baja que en la inyección, debido a dos factores: la pérdida de presión que aparece en la mezcla y la pérdida de capacidad de transmisión, cuando la mezcla penetra en la grieta.

Para mezclas ligeras, como por ejemplo: con una proporción en peso de 3:1, se puede decir que, su comportamiento en cuanto a la transmisión de la presión es comparable a la del agua.

Es para mezclas más espesas, donde empiezan a aparecer las diferencias, así mientras que en la prueba del agua, ésta transmite presión indefinidamente en las paredes del sondeo, por el contrario, en el caso del comportamiento de la mezcla en la grieta no es así, pues a medida que la mezcla empieza a penetrar

en la junta comienza el efecto tixotrópico, disminuyendo la velocidad de introducción de la mezcla y reduciéndose la transmisión de presión.

Las inyecciones de cada etapa deberán estar precedidas, por una prueba de agua de 10 minutos, con el objetivo de verificar que el obturador, está asentado en forma adecuada, seleccionar la formulación apropiada de mortero, y establecer, si se está obteniendo la reducción deseada de permeabilidad o conductividad hidráulica.

El tiempo del período de medición de la prueba, se iniciará, cuando el agujero este lleno de agua, y se haya obtenido una tasa de flujo constante. Todas las pruebas de presión de agua (permeabilidad) serán efectuadas a una presión de 1 psi por pie de profundidad del obturador.

<b>Resumen de presiones para ensayos de Lugeon:</b>	
Roca fracturada	0.10 a 0.14 bar/m
Roca buena	0.10 a 0.25 bar/m

Estadio	Pruebas de presión				
	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5
(m)	(bars)	(bars)	(bars)	(bars)	(bars)
1-6	0.25	0.36	0.5	0.36	0.25
6-11	0.5	0.76	1	0.76	0.5
11-21	1.43	2.14	2.86	2.14	1.43
21-31	2.35	3.47	4.6	3.47	2.35

$$U.L. = Q \text{ (litros/minuto/metro)} \times (10 \text{ Kg/cm}^2 / P E \text{ Kg/cm}^2)$$

Dónde:

Q= caudal específico expresado en litros por minuto y por metro de longitud del taladro.

P E= Presión efectiva en el tramo de la prueba

La PE se obtiene de:  $P E = P M - P \text{ carga} - P h$

P M = Presión manométrica leída en el manómetro en la boca del taladro en  $\text{Kg/cm}^2$

P carga = Pérdida de carga por fricción del agua, a través de la tubería de inyección, en  $\text{Kg/cm}^2$

P h = Presión en  $\text{Kg/cm}^2$ , por la carga hidráulica del agua (profundidad del ensayo en m/10).

La línea de conducción del agua para las pruebas, es de 1" de diámetro, por lo que no se considera en el presente, caso pérdida de carga por fricción.

Con esta prueba, se analiza si el agua atraviesa las fisuras de la roca en flujo laminar o turbulento, si el agua dilata las fisuras, si se produce lavado o erosión de los rellenos en las fisuras o grietas y si el agua llena los espacios de las fisuras, grietas o vacíos.

En la prueba de agua el valor de Lugeon, se puede convertir a unidades de conductividad hidráulica, en (cm/seg) usando la siguiente correlación:

$$K \text{ (cm/seg)} = \text{Lugeon} * \frac{\ln(24*(L/D))}{384,800}$$

$$K \text{ (cm/seg)} = (\text{Lugeón} * \ln(24 * (L/D)))/384800$$

L = Longitud (ft)

D = Diámetro del taladro (pulgadas)

Por lo general la longitud (L) de estadios son de 5 metros (16.4 ft). Para todos los estadios, se usa 3.0 pulgadas, en diámetro de los taladros, por lo tanto la conductividad hidráulica usada en las cortinas de los proyectos de Cerro Corona son calculados así:

$$K \text{ (cm/seg)} = (\text{Lugeon} * \ln(24 * (16.4\text{ft}/3.0 \text{ in})))/384800$$

$$1 \text{Lugeon} = 1.2656 \times 10^{-5} \text{ cm/seg}$$

### ***B) Presiones para grouting en rocas.***

Estas presiones están condicionadas por la resistencia de la roca, aunque para obtener la máxima penetración del fluido, éstas deben ser tan altas, como sea posible.

Existen dos grandes escuelas con relación al valor de la presión: por un lado, los que prefieren presiones moderadas que no rompan el terreno, y, por otro, las que emplean presiones altas deliberadamente para desplazar las rocas y hacer que se abran las fracturas, para que después, una vez concluida la inyección, la fractura se cierra dejando una fina película de material inyectado.

En formaciones débiles o estratificadas, como la piedra caliza sin cristalizar, normalmente, se recomienda limitar la presión al peso de la roca subyacente. Una regla que se usa para éste tipo de roca entre media y débil, es aplicar presiones de 0.25 bar/m de profundidad.

Aunque en rocas sanas también se ha usado esta cifra dando buenos resultados.

En formaciones duras tales como granito y gneis, el efecto de retención es importante, pudiéndose emplear presiones de hasta 10 veces el peso del recubrimiento, sin que se produzca fracturación o movimiento del terreno. Normalmente la regla que se utiliza para estos casos, es 1 bar/m de profundidad.

Otras reglas que pueden darse son en función de la profundidad, así en las zonas más profundas se pueden usar presiones más altas que en las zonas superficiales (del orden de 4 veces más que con las reglas anteriores). En la fig 4.7, se muestra los valores de la presión en función de la profundidad.

Generalmente el proceso que se sigue consiste en empezar a inyectar con presiones bajas observando si existen problemas en las fracturas y conexiones, para más tarde ir alcanzando gradualmente la totalidad de la presión.

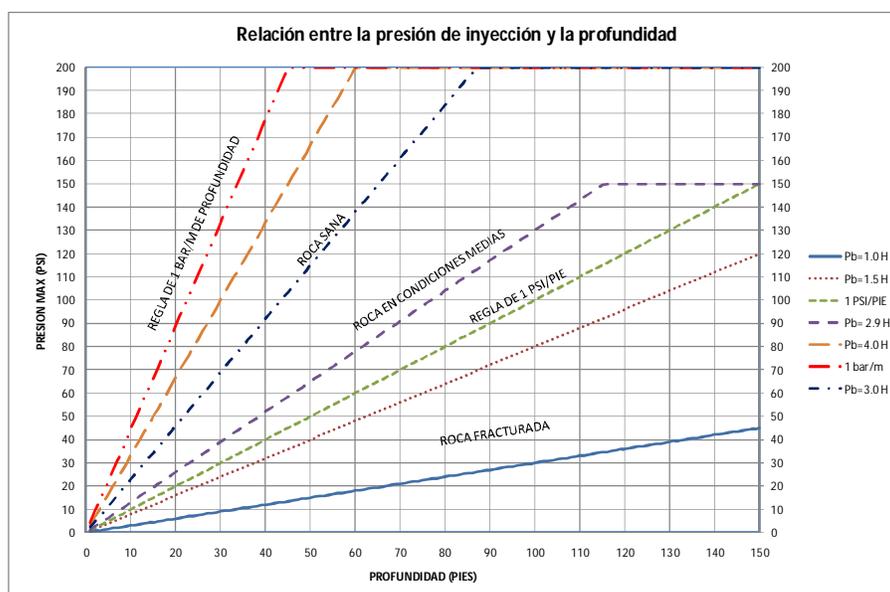


Figura4-7: Relación de presión de inyección y la profundidad en condiciones normales<sup>1</sup>.

Reglas para determinar la presión de grout en la inyección, criterios empíricos<sup>2</sup>

- Europeo (Francés): 1 kg/cm<sup>2</sup>
- Americano: 2.3 kg/cm<sup>2</sup>

Resumen de presiones para grouting y experiencia de proyectos mineros Cerro Verde y Cerro Corona:

<sup>1</sup>Construction and design of cement grouting, By A. Clive Houlsby, pag. 152

<sup>2</sup>Reglas para seleccionar la presión de inyección [Kenneth D. Weaver], Dam foundation grouting, pag 185

- Roca muy fracturada débil 0.20 a 0.30 bar/m
- Roca fracturada 0.30 a 0.50 bar/m
- Roca buena 0.50 a 0.70 bar/m
- Roca muy buena 0.70 a 1.0 bar/m

En el proyecto Cerro Corona LVU Las Gordas se usó

Profundidad	presión (PN)
0 - 2 m	1 bar
2 - 5 m	3 bar
5 - 10 m	5 bar
10 - 15 m	10 bar
15 - 20 m	15bar
20 - 25 m	15bar

En el proyecto Cerro Corona LVU las Aguilas se usó

Profundidad	presión (PM)
0 - 2 m	1 bar
2 - 5 m	3 bar
5 - 10 m	5 bar
10 - 15 m	10 bar
15 - 20 m	10 bar
20 - 25 m	10 bar

#### **4.6 OBJETIVOS DEL GROUT**

##### **a) Inyectabilidad en las rocas**

La principal consideración para las inyecciones de cemento usadas en el sellado de grietas y fisuras, en las rocas para el control del agua o para la mejora de la estructura, es el tamaño de las partículas inyectadas, comparadas con la apertura de la fractura, que será inyectada para valorar la inyectabilidad de la roca; se puede emplear la siguiente relación:

$$N_R = \text{apertura de fisura}/(D_{95})\text{inyección}$$

$N_R > 5$ , La inyección es consistente.

$N_R < 2$ , La inyección no es posible.

No se puede tener control sobre las características de la roca, pero si se puede cambiar las características del material inyectado, así como la incorporación reciente de finos pulverizados permite aumentar la penetración. En la figura 4.8, se compara las curvas granulométricas de los cementos portland convencionales, y las de los cementos con elementos finos pulverizados.

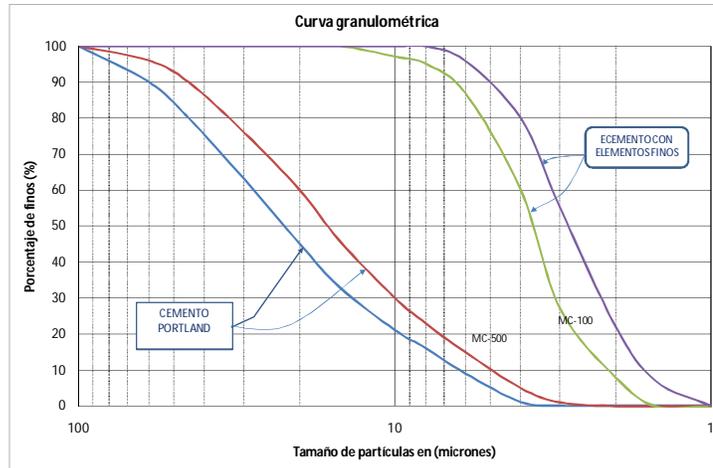


Figura 4-8: Curvas granulométricas de cementos Portland y con elementos finos.

**b) Fases de la inyección**

- *Lechada con fase sólida:* por lo menos uno de los componentes es sólido y está suspendido en la fase líquida. (Lechadas de cemento)
- *Lechadas con fase líquida:* todos los componentes son líquidos o solubles en la fase líquida. (Geles de silicato de sodio)

**c) Propiedades de las lechadas de cemento**

El estudio de las partículas de grout, son muy complejas, para poder conocer las características se tiene 4 parámetros:

- *Viscosidad;* control de la penetración del grouting con relación al tiempo
- *Cohesión;* controla la distancia máxima de penetración, en el cual, es un indicador tixotrópico para las propiedades de flujo de grout
- *Fricción interna;* entre dos componentes sólidos, es muy alta, causa obstrucción de las fisuras al iniciar la inyección, para lo cuál, se debe incrementar la presión para que haya movimiento de la lechada. *Tixotropía* propiedades de un material, que le permite endurecerse en corto tiempo en reposo, la agitación mecánica permite adquirir una viscosidad inferior, siendo a veces el proceso reversible.
- *Sedimentación;* las partículas en un fluido de grouting tienden a asentarse por gravedad, relación de sedimentación  $dH/H$  (%)

d) **Estimación del radio de influencia del grout en la inyección<sup>3</sup>:**

Se considera a la lechada como un fluido visco-plástico, Lombardi y Deere, desarrollaron un modelo para este tipo de fluido escurriendo en una fractura, llegando a las siguientes expresiones:

$$R_{max} = p_{max} \times \frac{(t/2)}{c} \quad V_{max} = 2 \times \pi \times p_{max}^2 \times \frac{(t/2)^3}{c^2} \quad F_{max} = \pi \times p_{max}^3 \times \frac{(t/2)^2}{3 \times c^2}$$

Donde:

- R<sub>máx</sub>: máximo radio de penetración
- t: abertura de fisuras
- p<sub>máx</sub>: presión final máxima alcanzada
- c: cohesión de la lechada
- V<sub>máx</sub>: máximo volumen de lechada inyectado
- F<sub>máx</sub>: Fuerza máxima total aplicada

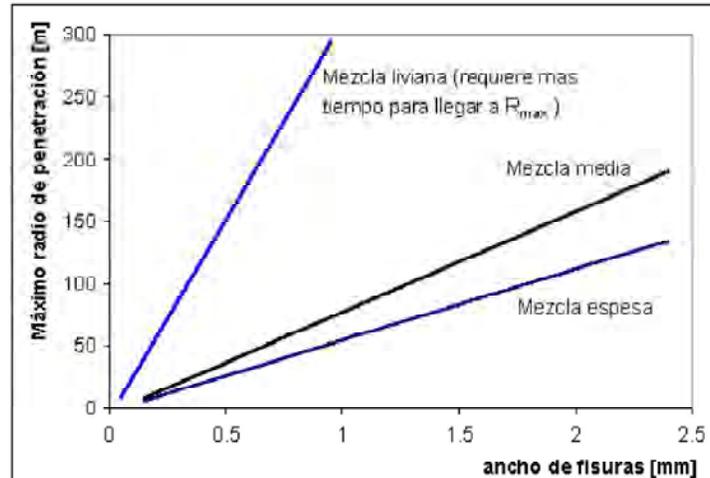


Fig. 4-9: Estimación del radio de influencia

e) **Limitaciones de la lechada**

Las limitaciones tienen que ver con los materiales y con los aspectos operativos de la ejecución. Las primeras están asociadas a la naturaleza física de los materiales de la inyección y las propiedades físicas y químicas de los materiales, con los cuáles la lechada tendrá contacto.

i. *Limitaciones con los materiales:*

- El tamaño y geometría de los vacíos a rellenar
- El tamaño de las partículas de cemento, bentonita u otro constituyente sólido de la lechada,

<sup>3</sup>Geotecnia tratamiento de fundaciones con inyecciones, Pablo Giordano, pg 3

- La presencia de minerales en el agua o en los materiales de fundación que puedan tener efectos negativos en las características de la lechada, como resistencia, volumen, permanencia o tiempo de fraguado
- La posible incompatibilidad de los materiales componentes de la mezcla
- La presencia de arcillas u otros materiales erosionables que no puedan ser totalmente removidos, lo que conduciría a descartar la inyección con cemento para pasar a una inyección química
- El asentamiento de las partículas de cemento suspendidas en la lechada

ii. *Limitaciones con los aspectos operativos:*

1. Generación de presiones de levantamiento o daños en las fundaciones por excesivas presiones de inyección
2. Uso de equipos no apropiados de perforación e inyección
3. Deficiente relleno de los vacíos de la fundación debido a un prematuro espesamiento de la mezcla o un mal programa de inyección
4. Deficiente espaciamiento u orientación de las perforaciones
5. Falla en el personal de diseño, ejecución e inspección de las inyecciones.

Hay una serie de circunstancias, que pueden impedir el proceso de inyección. Así el flujo de agua puede requerir aditivos. También las bajas temperaturas pueden hacer daño, en la mezcla se forma coágulos y no inyecta bien, o no hay una buena penetración en la roca.

**f) La durabilidad**

Se observa que algunas cortinas de lechada de presas prácticamente habían desaparecido después de unas décadas. La lechada de mezcla demasiado delgada que se utilizó, fue lavada por fugas de agua.

La debilidad de una lechada de cemento se da:

- En un material débil, débilmente unido a las paredes de las fisuras.
- Cuando el agua se filtra a lo largo de las juntas de lechada de cemento

Esta última condición se cumple, cuando una presión de inyección es baja y no con una presión de rechazo, o cuando la lechada podría reducirse lo suficiente como para abrir un camino a lo largo de la superficie de las fisuras, juntas, o vacíos, dejados por el agua sedimentada en la lechada.

**g) Hidrofracturamiento**

Hidrofracturamiento por lechada de cemento, se describe como la fractura de rocas y formación de nuevas grietas. Cuando se incrementa demasiada presión más de lo diseñado se produce un hidrofracturamiento. De hecho, no todas las caídas de presión en una inyección, pueden ser hidrofracturamiento, ya que hay fisuras que se pueden abrir, el

hidrofracturamiento está relacionado con la rotura de fisuras. Esta apertura se debe a los esfuerzos de tensión inducida en la roca por la lechada a presión. Depende también del ángulo entre las fisuras posibles. En cualquier caso se debe a la penetración principal de la lechada, en las fisuras o juntas.

#### **h) Propiedades y mezclas que afectan la penetración de grouting**

- *Viscosidad*, Adherencia entre las fisuras, para poner mayor o menor resistencia al flujo de la lechada
- *Cohesión*; adherencia de las fisuras entre sí
- *Gravedad específica*; limita la presión efectiva de la inyección
- *Sedimentación*; es un porcentaje de grout, que no es absorbido por la roca, es preferible que este porcentaje, sea bajo menor a 5%.
- *Presión de filtración*; la distancia para poder penetrar grout en una fractura de roca, es limitado por la pérdida de agua para las mezclas por presión de filtración.
- *Tamaño del grano*; el tamaño de grano de las partículas de cemento en el grout, pueden tener mayor efectividad en la penetración de las fracturas de roca.
- *Lavado del taladro*; el lavado de un tramo de un taladro, influye bastante en la penetración de grout

Características de las fracturas que afectan la penetración del grouting

- Apertura de fisuras
- La rugosidad
- Fugas hidráulicas
- Porosidad
- Permeabilidad

### **4.7 MÉTODOS DE INYECCIÓN**

Dentro de los métodos de inyección y criterios de cierre se busca definir el momento, en el cuál debe finalizar la inyección de un tramo en un taladro, porque se ha alcanzado las condiciones impuestas en el proyecto. Son criterios necesarios sobre todo, en las cortinas de impermeabilización de presa en las cuales se debe automatizar los trabajos para optimizar la ejecución, evitar errores de interpretación y facilitar el seguimiento. Siempre se deben analizar algunos criterios puntualmente en cada situación.

#### **A) Inyecciones aplicando el método tradicional**

Un proceso “tradicional” de inyección consiste en definir una presión de inyección y el uso de diferentes tipos de lechadas, cada vez mas espesas, por ejemplo, lechadas con relaciones agua

cemento sucesivamente menores ( 2:1, 1:1, 0.8:1, 0.67:1). Los cambios de mezcla tienen lugar a determinados volúmenes de lechada tomados por la perforación. La cohesión de estas mezclas aumenta progresivamente y por lo tanto, la resistencia a fluir y penetrar de la mezcla por lo que siguiendo estos pasos, se va a detener el proceso de inyección en algún punto.

Tomemos como ejemplo el siguiente criterio:

- Se define la longitud del tramo a inyectar, por ejemplo 5m.
- Se define la presión de inyección máxima  $[kg/cm^2] = 0.25 \text{ a } 0.5 \times z[m]$  (usual en USA, los europeos van hasta  $1 \times z[m]$ ), usan estas grandes presiones con mezclas muy fluidas y en rocas sanas, considerando que abren las fisuras durante la inyección, y luego se cierran “expulsando” el exceso de agua). Esta presión se alcanzará en 10 minutos, que es el intervalo de tiempo a considerar.
- Se eligen los distintos tipos de mezcla a utilizar. Hay muchos criterios para elegir la mezcla inicial en base a los ensayos previos de agua, anchos de fisuras y otros, pero siempre se requiere la experiencia del sitio. Para cada una de ellas, se definen las absorciones máximas, los volúmenes máximos acumulados, y las absorciones finales máximas para cerrar (rechazo).
- Definidas estas variables para cada mezcla se procede de tal manera que, si no se cumple en cada etapa cualquiera de las tres condiciones o no se llega a la presión máxima, se pasa a la mezcla siguiente más espesa. Por ejemplo:

Aplicación en el proyecto Presa de relaves Las Hierbas (Goldfields)

EXTRAFORTE	DOSIFICACION	1 BOLSA DE CEMENTO	CAMBIO	BOLSAS	VOLUMEN (Its)	APROXIMADO (Its)	ACUMULADO (Its)
	1 : 1 + 2 %	57.72	SE HARA EL CAMBIO DE DOSIF. A LAS ...	16	923.52	925	925
	0.8 : 1 + 2 %	49.22		20	984.4	985	1910
	0.6 : 1 + 2 %	40.72		20	814.4	815	2725
	0.5 : 1 + 2 %	36.47		HASTA EL RECHAZO			

ULTRAFINO	DOSIFICACION	1 BOLSA DE CEMENTO	CAMBIO	BOLSAS	VOLUMEN (Its)	APROXIMADO (Its)	ACUMULADO (Its)
	1 : 1	27.41	SE HARA EL CAMBIO DE DOSIF. A LAS ...	16	438.56	439	439
	0.9 : 1	25.41		20	508.2	509	948
	0.8 : 1	23.41		44	1030.04	1030	1978
	0.7 : 1	21.41					
0.6 : 1	19.41	HASTA EL RECHAZO					

LVU Las Gordas Proyecto Cerro Corona

De varios diseños de mezclas se escogen 3 o 4 diseños que sean los más óptimos por ejemplo:

- a:c + Euco 37,      a = agua, c = cemento
- 1:1
  - 0.7:1 + 1%
  - 0.67:1 + 1%
  - 0.5:1 + 1%

Los cambios de mezclas son cada 100 l/m y 3 tipos de mezclas

Ejemplo de inyección en un tramo

Tramo de 20 a 25 m. estadio o tramo de 5 m

- $P_{max} = 0.23 \text{ bar/m} \times 20 \text{ m} = 4.6 \text{ bars (PM)}$
- Volumen y mezclas
  - Mix a:c, 1:1, volumen inyectado acumulado = 510 lts,  $P=3\text{bar}$ ,  $Q=10 \text{ lts/m}$ . se pasa a otra mezcla.
  - Mix a:c + aditivo, 0.7:1 + 1%, volumen inyectado acumulado = 1025 lts,  $P=4 \text{ bar}$ ,  $Q= 8 \text{ lts/m}$ . se pasa a otra mezcla
  - Mix a:c + aditivo, 0.5:1 + 1%, volumen inyectado acumulado = 1550 lts.  $P= 4.6 \text{ bars}$ ,  $Q=0.1 \text{ lts/m}$ .

### ***B) Inyecciones aplicando el Método GIN***

El diseño y control del inyectado empleando el principio de "GIN", número de intensidad de inyectado (Grouting Intensity Number) (GIN), para el inyectado con mezcla de cemento de masas rocosas. Las características principales, únicas del método son:

- (1) Una sola mezcla de inyectado estable para todo el proceso (relación agua: cemento por peso de 0.67 a 0.8:1) con un aditivo súperplastificante, para incrementar la penetrabilidad.
- (2) una velocidad constante baja a mediana de bombeo de la lechada conduce con el tiempo, a una presión que se incrementa gradualmente, conforme la lechada penetra más dentro de las fracturas de la roca.
- (3) el monitoreo de la presión, la velocidad de flujo, el volumen inyectado y la penetrabilidad contra el tiempo, en tiempo real, por medio de gráficos en una computadora PC.
- (4) la terminación de una trayectoria de inyectado registrado sobre el diagrama de presión contra volumen total (por metro de intervalo inyectado) intercepta a una de las curvas de volumen limitante, presión limitante o intensidad de inyectado limitante, queda dado por la curva hiperbólica seleccionada de GIN

#### ***Calculo del valor de GIN en función de varios factores:***

Para las juntas de apertura constante

$$R = \frac{p.e}{2.c} \text{ (Radio de alcance)}$$

$$V = \pi . R^2 . e \text{ (Volumen de toma)}$$

Definición de  $GIN = p \cdot V$

Donde:

$GIN$  = Número de intensidad de Grouting

$c$  = cohesión relativa de la mezcla (mm)

$R$  = Radio de alcance (m)

$p$  = presión de inyección final (bar)

$V$  = volumen de toma en (lts)

$e$  = abertura de la junta (mm)

Ejemplo de cálculo del valor  $GIN$

P	e	Cr	R	V	L	GIN
bar	mm	mm	m	Lts	m	bar *lts/m
10	1	0.35	14.29	641.14	5	1282.28

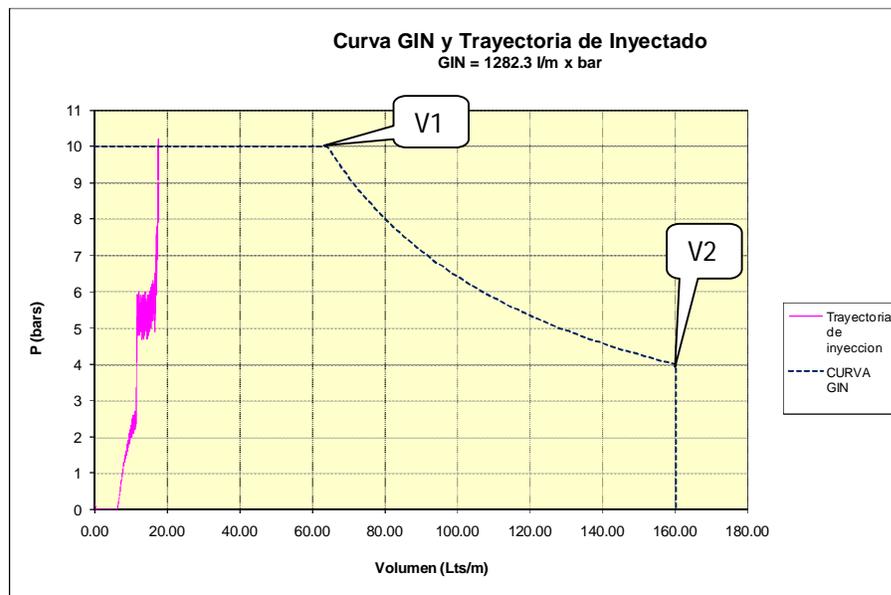


Fig. 4-10: Trayectoria del inyectado

Para graficar la curva GIN se divide la presión ( $P$ )/GIN, la presión se reduce en intervalos de 0.1

Volumen acumulado (lts) entre la longitud (m), nos da volumen de (lts/m), para la trayectoria de inyección, se grafica la presión vs (lts/m), en intervalos de 1 seg.

$$V = GIN / (2 \times P)$$

$$V1 = 1282.28 / (2 \times 10) = 64.11 \text{ (l/m)}$$

$$V2 = 1282.28 / (2 \times 4) = 160.28 \text{ (l/m)}$$

Valoración de la intensidad GIN:

<500	muy baja
>500<1000	baja
>1000<1500	moderada
>1500<2000	alta
>2000	muy alta

Trayectoria GIN:

<40	Fisura extremadamente cerrada
>40<50	Fisura cerrada
>50<75	Fisura promedio
>75<100	Fisura abierta

RESULTADOS DE LA TRAYECTORIA DE INYECCION							
Pmax (bar)	Vol Total (L)	Tramo (m)	Vol (l/m)	GIN (bar.l/m)	R	Intensidad GIN:	
10.00	65.41	5.00	13.08	130.81	5.08	Trayectoria:	Muy Baja FISURA EXTREMADAMENTE CERRADA

De manera que:

$$R \approx \sqrt[3]{GIN}$$

La penetración de la lechada, en las fisuras de la roca en un tramo de un taladro está en función de la relación de caudal/presión.

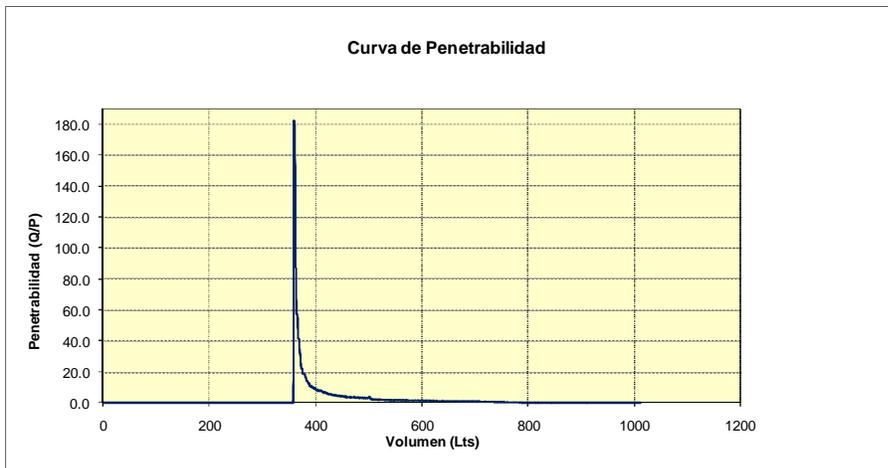


Figura 4-11: Curva de penetrabilidad

La presión máxima, debe de alguna manera estar relacionada con la presión del agua que se debe esperar durante la vida futura de la estructura. Una relación de 2 a 3 con respecto a esta presión de agua parece razonable.

El límite de volumen, está relacionado con el objetivo de cualquier inyección, pero no debe ser visto como un absoluto límite.

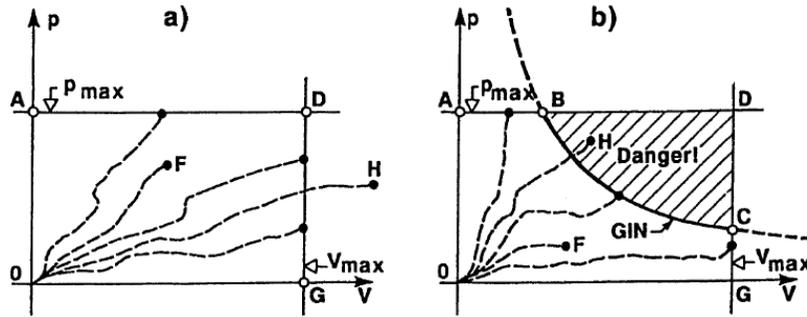


Figura 4-12: Las limitaciones de los procesos de grouting<sup>4</sup>

- a) Método tradicional, límite ADG      b) Método GIN, límite ABCG

P = presión máxima;

V = volumen máximo de toma

GIN = límite de curva ( $P \times V = \text{const.}$ ); En el extremo superior existe peligro de hidrofracturamiento. Lechada en las trayectorias F y H no está permitido.

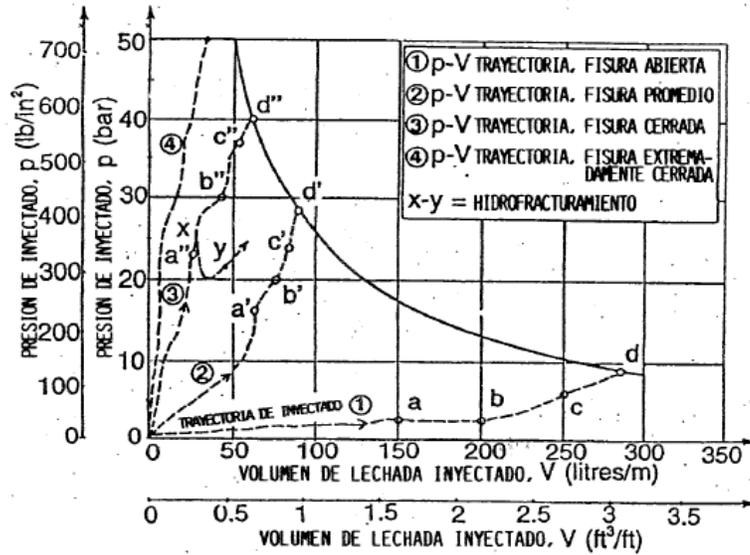


Fig. 4-13: Curvas de trayectorias de inyectado

<sup>4</sup>Grouting of rock masses, Giovanni Lombardi (2003), pg 18

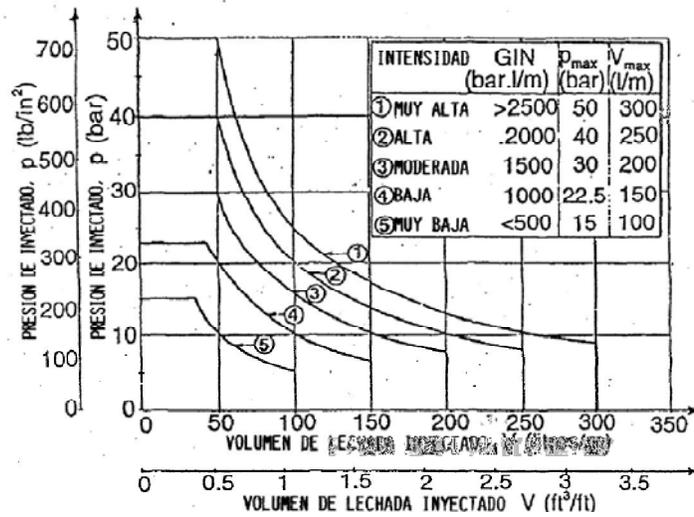


Figura 4-14: Envolturas limitantes propuestas para inyectado GIN.

*Relación entre caudal y presión de inyección*

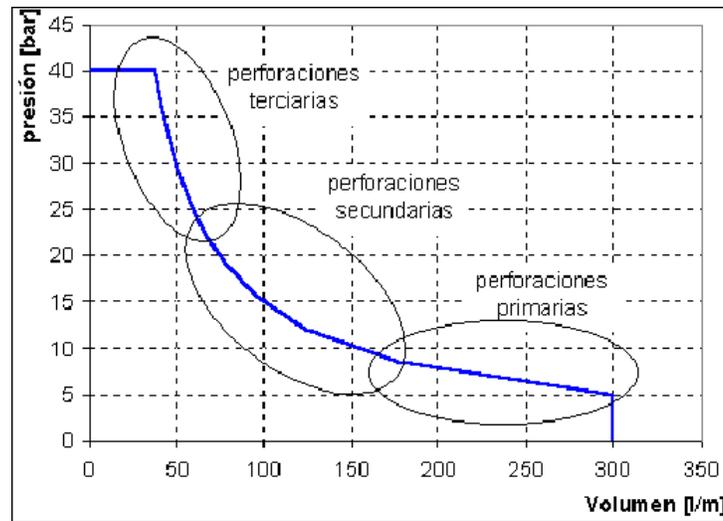


Figura 4-15: Zonas típicas dónde llegan las curvas GIN de la inyección.

La ruta de la inyección de cualquier etapa de un taladro, resultará en una penetración disminuyendo con el tiempo, cómo se muestra en la Figura 4-16, donde se define ésta penetración como la relación entre el caudal y la presión de inyección.

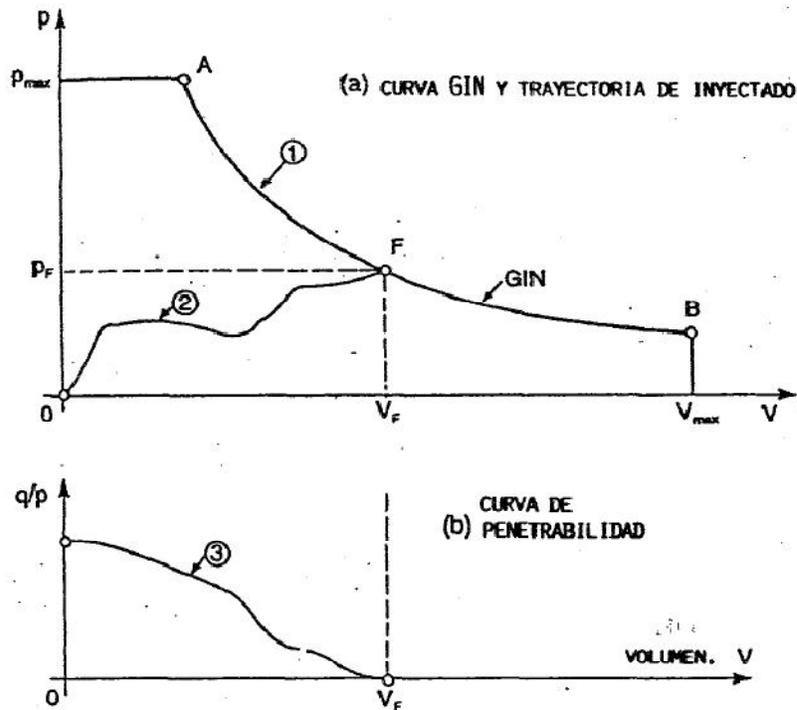


Figura 4-16: Proceso de inyectado de una sola progresión (típico), en donde (1)= curva límite presión contra toma de lechada; (2)= Trayectoria real del inyectado, presión contra toma de lechada; (3)= penetrabilidad ( $q/p$ ) contra toma de lechada, F= punto final del inyectado,  $P_f$ = Presión final del inyectado, y  $V_f$ = Toma real de lechada.

#### ***Monitoreo y registro de los trabajos de grouting***

Dado el alto nivel alcanzado por los equipos de inyección de hoy, ninguna actividad de lechada deberá llevarse a cabo, sin un seguimiento en tiempo real, y una grabación completa de los parámetros principales, los controles más importantes son:

- a) La presión vs tiempo (x);
- b) El caudal vs tiempo (x);
- c) Volumen total vs tiempo (x);
- d) Toma (l/m) vs presión
- e) Toma (l/m) vs penetrabilidad (Q/P)

La interpretación en tiempo real de estas funciones, permite caracterizar el proceso de la inyección, y para detectar cualquier hidro-fracturamiento y por lo tanto, adaptar el proceso de inyección a las condiciones reales de la masa rocosa.

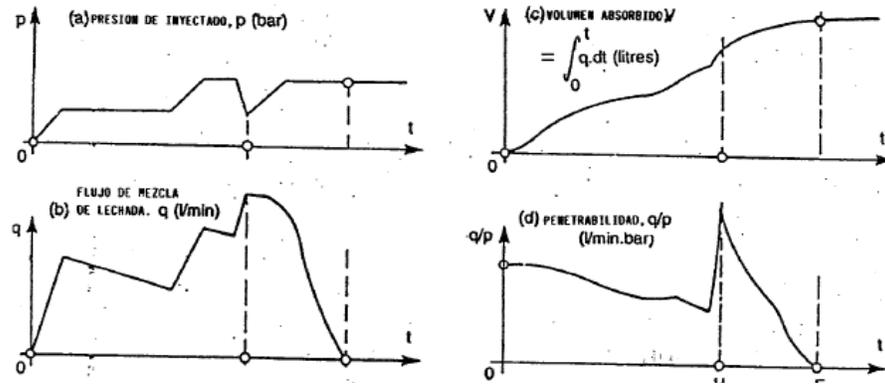


Figura 4-17: Proceso de inyectado de una sola progresión: (a) presión de inyectado, (b) Flujo de mezcla de lechada, (c) volumen absorbido (d) penetrabilidad

Las principales ventajas del método GIN son:

- simplificar el procedimiento en el uso de una mezcla única, y eliminar o reducir al menos los residuos no utilizados de las mezclas;
- reducir el riesgo de exceso de hidro-elevación en la eliminación de la combinación de altas tomas y altas presiones.
- igualar aproximadamente el alcance de la lechada, en cualquier etapa de inyección, independientemente de la calidad de la roca, por lo tanto hacer el proceso más predecible;
- producir un conjunto de datos coherente, que permite evaluar el progreso, así como el resultado alcanzado, y por lo tanto optimizar;
- en primer lugar el procedimiento del GIN es una adaptación, que compensa una parte sustancial, de las condiciones naturales de la roca

El método tradicional y el método GIN, tienen la intención de evitar altas tomas de lechada.

- *En el caso del método tradicional*, la limitación, se obtiene en el aumento en los pasos de la cohesión de la más delgada de la mezcla espesa.
- *En el caso del método GIN*, dicho objetivo, se consigue mediante una constante en la reducción de la cohesión progresivamente el objetivo de presión en función del volumen ocupado.

### Comparación de los métodos de inyección

<u>Método Tradicional</u>	<u>Método GIN</u>
• Lechadas estables	• Lechada estable
• Cemento - bentonita	• Solo cemento
• 3 o 4 dosificaciones	• 1 dosificación
• Viscosidad creciente	• Viscosidad baja
• Fin: Presión rechazo-volumen	• Fin: por curva GIN
• Uso todo tipo de roca	• Uso roca homogénea
• Control computacional	• Control computacional

#### 4.8 CONTROL DE FILTRACIÓN

El control de filtración se realiza instalado piezómetros, del tipo abierto, o Casagrande, aguas abajo de la cortina de inyecciones. Se toma 1 lectura diaria, con una sonda eléctrica, durante los trabajos de inyección, y después de la inyección, registrándose y evaluándose esta información de niveles de agua.

Ejemplo de control de filtraciones en el proyecto Cerró Verde (seepage).

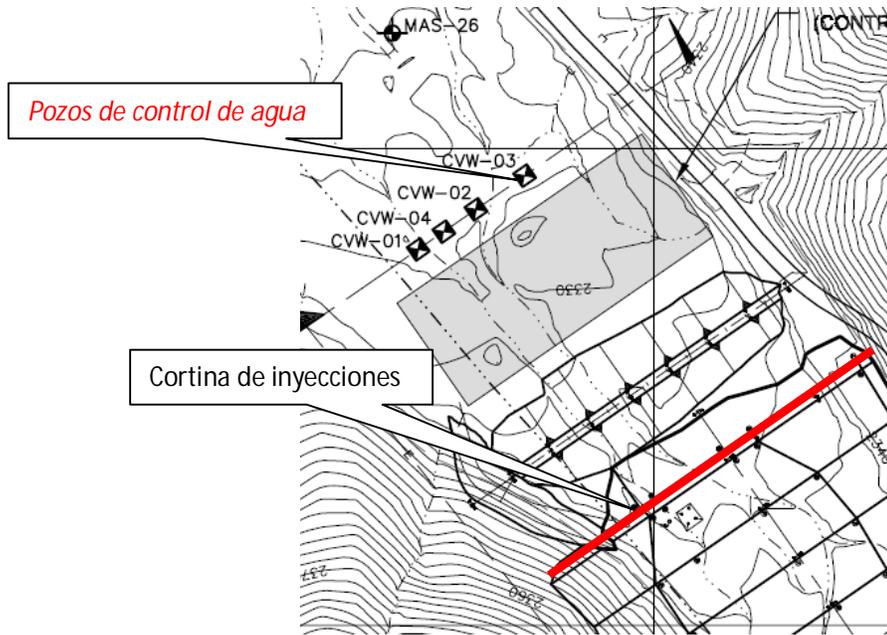


Figura 4-18: Ubicación en planta de cortina y pozos de monitoreo (Seepage)

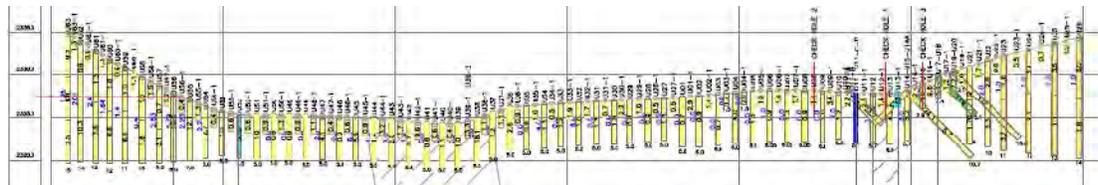


Figura 4-19: Sección de ubicación de taladros de contacto en el (seepage)

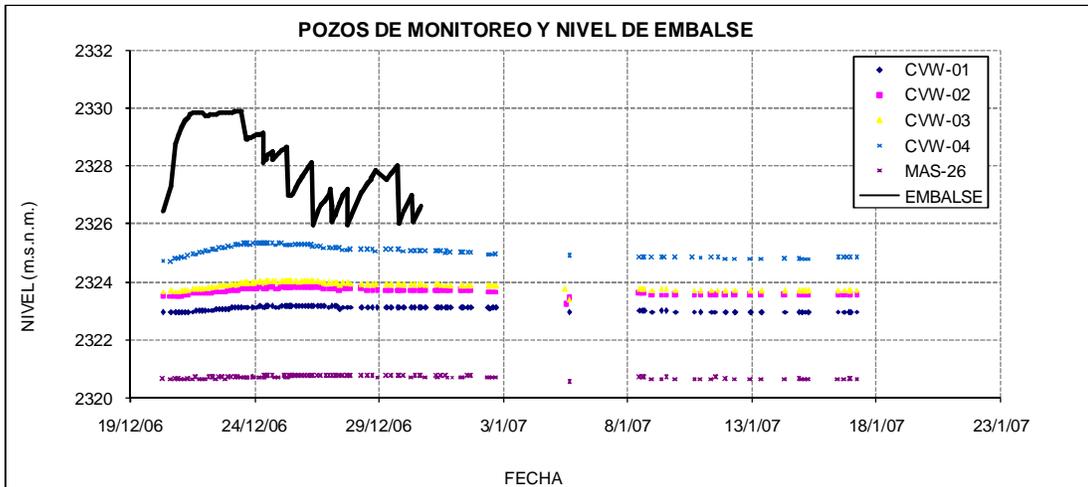


Figura 4-20: Control de filtraciones mostrado en la fig. 4-18

## 4.9 DISEÑO DE CORTINAS DE GROUTING

### 4.9.1 Una cortina o varias cortinas

La construcción de una sola cortina, pone un riesgo con la existencia de condiciones geológicas, que no permitan interacción hidráulica completa entre taladros inyectados, ya que puede haber taladros desviados, y puede darse una cortina defectuosa de lechada, en zonas erosionables, lo cual no es recomendado para cortinas profundas de más de 15 m. de profundidad, se recomienda hasta 15 m para presas de relaves.

Deere (1982), recomienda que para un cierre de la cortina, se deba usar 3 líneas<sup>5</sup>, y la línea del medio cerrará completamente el flujo de agua, las líneas exteriores permitirán un confinamiento, para lo cual, la cortina central debe ser inyectada con cemento de grano muy fino o cemento ultrafino y con una presión más alta, por la viscosidad de la mezcla. Las tres filas deben tener direcciones contrarias con el objetivo de minimizar cualquier fuga hidráulica.

En general, una permeabilidad de 10 Lu de una manera realista puede ser lograda con una cortina correctamente diseñada, y construída, de dos filas. Sin embargo, una fila intermedia de taladros orientados adecuadamente y grouteados con una mezcla apropiada, se notará que la permeabilidad reduce con un valor menor de 5 Lu.

<sup>5</sup>Dam foundation grouting, Kenneth D. Weaver, pag. 74

Houlsby<sup>6</sup>, recomienda el espaciamiento entre cortinas de 1 a 1.5 m y no exceda en 1.5 m, para tener un buen cierre de éstas cortinas.

Espaciamiento entre cortinas usado, en los proyectos mineros:

- Presa Huayrondo (Cerro Verde) 0.85 m entre ejes de cortinas, se realizaron 3 cortinas, ancho de groutcap = 3m
- LVU Las Gordas (Cerro Corona Goldfields) 1.4 m entre ejes de cortinas, se realizaron 3 cortinas, ancho de groutcap = 3.9 m
- LVU Las Aguilas (Cerro Corona Goldfields) 1.26m entre ejes de cortinas, se realizaron 3 cortinas, ancho de groutcap = 3.9 m
- Groutcap presa Las Hierbas (Cerro Corona Goldfields), 2.5 m entre ejes de cortinas, se realizaron 2 cortinas, ancho de groutcap = 4.0 m
- Presa LasAguilas y LasGordas (Cerro Corona Goldfields), solo se realiza una cortina.

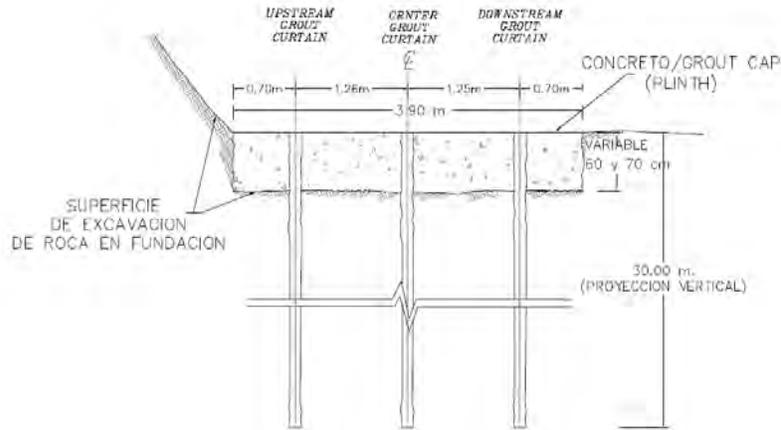


Fig. 4-21: Espaciamiento típico entre cortinas

#### 4.9.2 Profundidad de los taladros en las cortinas

La profundidad de la cortina de lechada, es seleccionada en base a la geometría, y al flujo hidráulico, en algunos casos en Europa seleccionan la misma altura de la represa.

El objetivo principal, es alargar la ruta de filtración de la represa, sin embargo, la cantidad de filtración, necesariamente no será reducida. Por consiguiente, si el agua produce una erosión interna, se debe prever el sistema de filtración; pueden ser galerías a lo largo de la cortina impermeable. Las dimensiones de las profundidades varían de acuerdo a la estructura geológica y superficie del terreno.

<sup>6</sup>Construction and Desing of Cement Grouting, A. C. Houlsby, pag. 241

El U.S. Bureau of Reclamation, usa la fórmula<sup>7</sup> :

$$D = H/3 + C$$

Donde:

D = profundidad del taladro en (pies)

H = Altura de la presa (pies)

C = es una constante de variación que está entre 25 a 75.

Por experiencia en Perú, para presas de relave, generalmente están entre 15 a 20 m, en rocas regulares a buenas, y para presas de agua, están por debajo de los 30 m.

La desviación del barreno, puede convertirse en un control significativo en la profundidad práctica, para la cual, una cortina de la lechada puede estar extendida, porque la desviación excesiva puede dejar "ventanas" no tratadas entre taladros. La cantidad de desviación dependerá de las condiciones geológicas del sitio y los equipos de perforación.

(Wilson y Dreese 1998)<sup>8</sup>. Proponen extender la cortina para un estrato impermeable, en vez de para alguna profundidad basada en fórmulas; un caso particular es en terreno de caliza con karst, ya que podrían erosionarse y causar daños potenciales, para estos casos se construyen cortinas de múltiple fila y la lechada con suficiente presión para rellenar todos los vacíos, de la zona de la cortina.

#### **4.9.3 Espaciamiento de los taladros**

Donald A. y Kenneth D.<sup>9</sup> recomiendan en su libro Dam Foundation Grouting, usar 6m entre centros de taladros primarios, y Houlby<sup>10</sup> recomienda usar el espaciamiento horizontal constante entre taladros primarios, secundarios, terciarios, cuaternarios y quaternarios. Los cuáles son proyectados a la superficie.

---

<sup>7</sup> Dam Foundation Grouting, Kenneth D. Weaver, pag. 206

<sup>8</sup> Dam Foundation Grouting, Kenneth D. Weaver, pag. 70

<sup>9</sup> Dam Foundation Grouting, Kenneth D. Weaver, pag. 72

<sup>10</sup> Construction and Design of Cement Grouting, A. C. Houlby, pag. 238

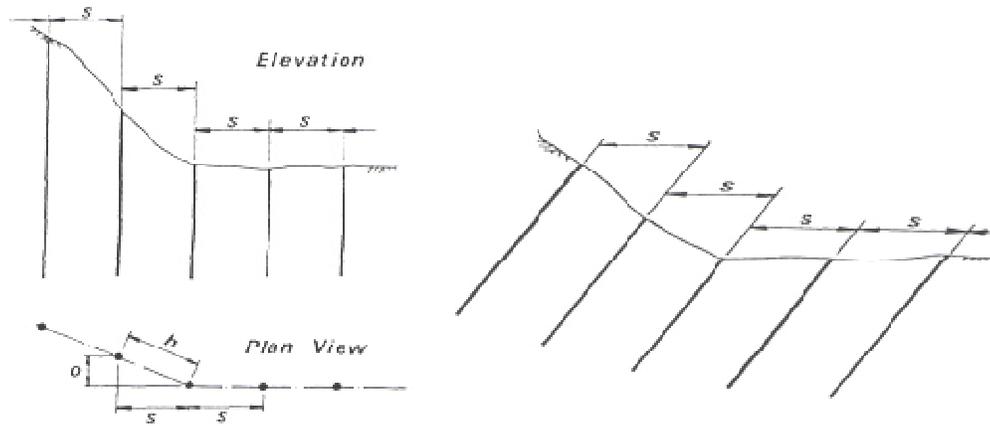


Fig. 4-22: Proyección de taladros

En diferentes proyectos mineros supervisados en el Perú, los espaciamientos entre taladros primarios son de 6 m, los secundarios 3m, terciarios 1.5 m, cuaternarios 0.75 m y quinarios 0.375 m



Fig. 4-23: Espaciamiento entre taladros

Los taladros terciarios están ubicados a la mitad, entre los taladros primarios y secundarios. Estos taladros están separados entre primario y secundario, a una distancia de 1.5 m., con estos taladros, se puede llevar al cierre de la cortina de inyección, aunque podrían también ser necesarias más etapas, como cuaternarios y quinarios y taladros de chequeo, ésto dependiendo del criterio de cierre de la cortina.

Londe y Le May (1993)<sup>11</sup> dicen que, la filosofía de diseñar el espaciamiento de los taladros, nunca debe ser rígidamente especificado, ya que las pruebas de agua, y las pruebas de inyección, reducirán el espaciado de las taladros, ellos indican que el gasto reduce el espaciado, de no realizarse así se tendrían que realizar costos potenciales, al reparar las cortinas, también señalan

<sup>11</sup> Dam Foundation Grouting, Kenneth D. Weaver, pag.72

que se debe tener mucho cuidado con las rocas erosivas, como rocas areniscas. Así mismo los precios deben ser conservadores y realistas.

#### 4.9.4 Inclinación de los taladros

Desde hace mucho tiempo, se ha practicado que los taladros de inyección son perpendiculares a la superficie, con el objetivo de lograr una cortina, con una profundidad del taladro constante. Los taladros de grouting deben ser perforados en orientación que permita lograr una mejor inyección de la zona, así logrando intersecciones con las discontinuidades que potencialmente son manifestadas, en el mapeo geológico, de la evaluación de fallas y fisuras, en éste mapeo nos ayuda a decidir la inclinación de los taladros y así rellenar las fisuras con grout.

El Comité Suizo en Represas Grandes (1985)<sup>12</sup> manifiesta que los taladros de la lechada deberían cruzar la superficie, con ángulos de 30° a fin de cruzar discontinuidades como fisuras. Una adaptación de ésta orientación, ha sido usada exitosamente en numerosos lugares en los Estados Unidos en éstos últimos años y refleja un sentido común.

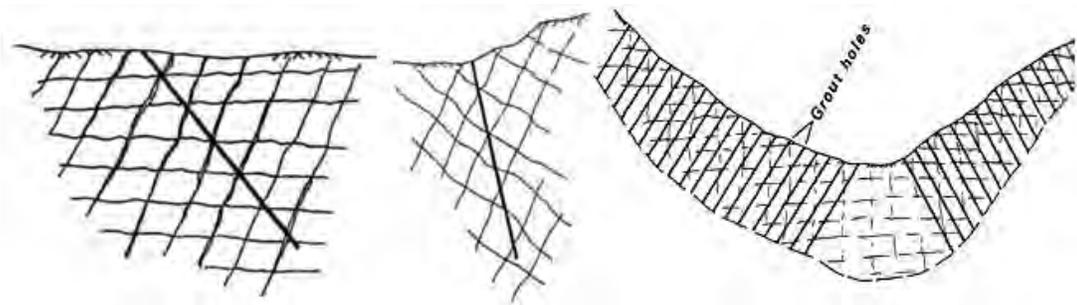


Figura 4-24: Inclinación de los taladros interceptando las fisuras

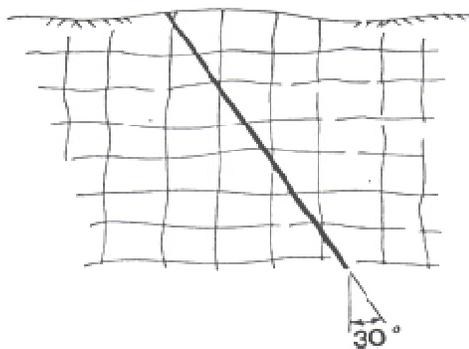


Figura 4-25: Angulo de inclinación recomendado<sup>13</sup>

Angulo de inclinación usado en proyectos mineros de Perú:

- Presa de relaves LasHierbas, bajo el groutcap 7 grados con la vertical
- LVU Las Gordas, 20 grados con la vertical

<sup>12</sup>Dam Foundation Grouting, Kenneth D. Weaver, pag.73

<sup>13</sup>Construction and Desing of Cement Grouting, A. C. Houlby, pag. 233

- LVU Las Aguilas 15 grados con la vertical
- Presa Huayrondo entre 15 y 30 grados con la vertical
- En la presa Las Aguilas y gordas, 35 grados con la vertical

Estas inclinaciones están en función al promedio de ángulo de inclinación de fisuras, tratando de intersectar la mayor cantidad de fisuras.

#### **4.9.5 Longitud de tramos**

La longitud de los tramos de inyección, se adaptan a la condiciones locales, el valor de RQD es una buena referencia, en general la longitud de los tramos, aumenta con la profundidad del terreno.

Ejemplo de longitud de tramos en diferentes proyectos, en el proyecto minero Cerro Verde cada 5 m, en Cerro Corona cada 5 m, en la presa huayrondo tramos de 5 m

#### **4.9.6 Plinto o capa de concreto**

Los diseños de presas de agua, debe tener prevista la construcción de un plinto o capa de concreto; la cuál será usada como tapa de las inyecciones; estas capas generalmente se construyen en rocas débiles y fracturadas, las cuales son expuestas en la superficie. Esta capa permitirá que no haya fugas por la superficie, las presiones efectivas de la inyección, deben ser bien coherentes entre los taladros con la probabilidad de realizar la llamada inyección de contacto.

Estas capas de concreto son apropiadas en superficies irregulares, estas capas por lo general son de 0.7 m a 0.90 m de profundidad y alternativamente, se colocan barras de anclaje para que se pueda evitar el levantamiento de la capa de concreto debido a la presión de inyección, estas barras deben de ser de 2.4 a 3 m con barra # 11 espaciada cada 1.5 m. En estas capas de concreto se deben instalar niples de acero de 10 cm de diámetro y 75 cm de longitud, y un espesor de ¼", para evitar la contaminación del taladro al momento de la perforación y lavado del taladro, también se pueden colocar niples de PVC, los cuales son instalados antes de vaciar el concreto, la desventaja de estos niples es que, en el momento de vaciado del concreto, se pueden mover, y al momento de perforar cambia la inclinación del taladro.

Se requiere 1.8 m para el ancho de la capa de concreto de una cortina, 3.0 m para la construcción de 2 cortinas y 4 m para la construcción de 3 cortinas, aproximadamente.

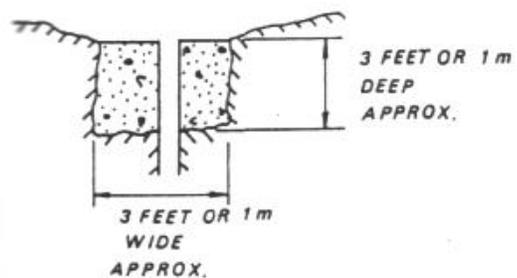


Figura 4-26: Espesor típico de capa de concreto

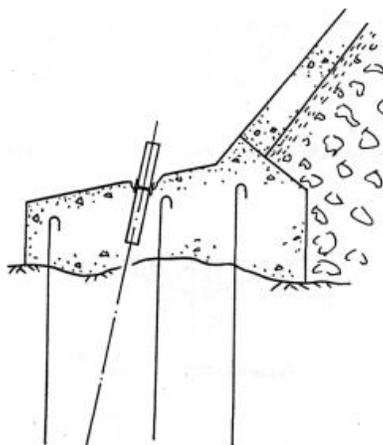


Figura 4-27: Barras de anclaje en la capa de concreto.

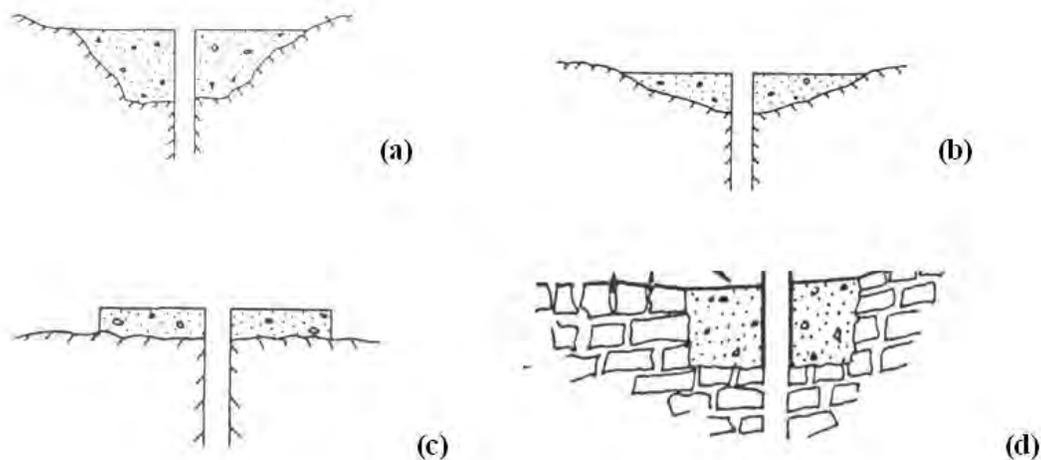


Figura 4-28: Figuras (a,b,c,d) llevan estructura de refuerzo de acero



Fig. 2-29:Niples instalados

#### 4.9.7 Longitud de la Cortina

Para prevenir filtración de la represa, la cortina deberá extenderse hasta el nivel máximo de operación o hasta la cresta de la presa, en el caso de zonas pronunciadas, los taladros de la cortina pueden ser en forma de abanico, y de esa manera extender la cortina, al perforar en las zonas de abanicos. Se debe tener bastante cuidado en la alineación, y los ángulos con respecto a la vertical, de la experiencia de varios proyectos a más de 15 m de profundidad se deben usar barras guía de perforación o centralizadores y minimizar la desviación.



Figura 4-30: Longitud de la capa de concreto donde se construirá la cortina de inyecciones

#### 4.9.8 ESTIMACIÓN DE CANTIDADES

Se estima cantidades para una doble cortina en la presa de relaves La Hierba

Ejemplo:

- Longitud de 160 metros a lo largo de la fundación de la presa entre las estaciones 0+695 a 0+855.
- La cortina estará establecida sobre la cota 3700 msnm
- La longitud promedio de los taladros es de 42 m. el espaciamiento entre taladros primarios es de 6 m.
- Un número adicional de taladros aguas arriba y aguas abajo igual a 120% del total de primarios, secundarios y terciarios con una profundidad aprox de 35.
- Se asume un total de 20 taladros de chequeo con longitudes en promedio de 45 m
- Se estima 15 taladros de costura de 15m en zonas donde hay fallas y zonas puntuales.

##### Cortina aguas abajo

160 m ÷ 6 m = 28 taladros	
- 28 primarios x 42 m	= 1176 m
- 27 secundarios x 42 m	= 1134 m
- 54 terciarios x 42 m	= 2268 m
- Σ taladros 28+27+54=109	= 4578 m
- Número de taladros adicionales = 109x1.2	= 131
- Adicional en metros 131x 35	= 4585 m
- Taladros de chequeo 8x45	= 360 m
- Número total de taladros = 109+131+8	= 248
- Longitud total de perforación = 4578+4585+360	= 9523 m

##### Cortina aguas arriba

160 m ÷ 6 m = 28 taladros	
- 28 primarios x 42 m	= 1176 m
- 27 secundarios x 42 m	= 1134 m
- 54 terciarios x 42 m	= 2268 m
- Σ taladros 28+27+54=109	= 4578 m
- Numero de taladros adicionales = 109x1.2	= 131
- Adicional en metros 131x 35	= 4585 m
- Taladros de chequeo 12x45	= 540 m
- Número total de taladros = 109+131+12	= 252
- Longitud total de perforación = 4578+4585+540	= 9703 m

##### Taladros de costura

- Número de taladros para costura	= 15
- 15 taladros x 15 m	= 225 m

##### Estimación total de número de taladros y longitud de perforación

- Número total de taladros = 248 + 252 + 15	= 515
- Longitud total de perforación = 9523 + 9703 + 225	= 19451 m
- Total de re perforación = 19451 x 0.5	= 9726 m

### **Estimación de cemento:**

- Se estima 20% de cemento inyectado en la roca de fundación
- El promedio de cemento inyectado en la formación de roca en todas las cortinas = 20 kg/m por taladro.

#### Cortina aguas abajo:

- \* Cemento inyectado =  $9523 \text{ m} \times 20 \text{ kg/m} = 190460 \text{ kg}$
- \*  $190460 \text{ kg} \times 20\% = 38092 \text{ kg}$
- \* Total de cemento para la mezcla =  $190460 + 38092 = 228552 \text{ kg}$
- \* Total de bolsas para la mezcla =  $228552/42.5 = 5378$  bolsas de cemento portland

#### Cortina aguas arriba:

- \* Cemento inyectado =  $9703 \text{ m} \times 20 \text{ kg/m} = 194060 \text{ kg}$
- \*  $194060 \text{ kg} \times 20\% = 38812 \text{ kg}$
- \* Total de cemento para la mezcla =  $194060 + 38812 = 229272 \text{ kg}$
- \* Total de bolsas para la mezcla =  $229272/42.5 = 5395$  bolsas de cemento portland

#### Cortina aguas arriba (B):

- \* Cemento inyectado =  $9703 \text{ m} \times 20 \text{ kg/m} = 194060 \text{ kg}$
- \*  $194060 \text{ kg} \times 20\% = 38812 \text{ kg}$
- \* Total de cemento para la mezcla =  $194060 + 38812 = 229272 \text{ kg}$
- \* Total de bolsas para la mezcla =  $229272/20 = 11464$  bolsas de cemento ultrafino

#### Taladros de costura

- \* Cemento inyectado =  $225 \text{ m} \times 20 \text{ kg/m} = 4500 \text{ kg}$
- \*  $4500 \text{ kg} \times 20\% = 900 \text{ kg}$
- \* Total de cemento para la costura =  $4500 + 900 = 5400 \text{ kg}$
- \* Total de bolsas usadas para la mezcla de la costura =  $5400 \text{ kg}/42.5 \text{ kg/bolsa} = 127$  bolsas de cemento portland.

### **Estimación total de cemento:**

- \* Alternativa (A) cemento portland
  - $5378 + 5395 + 127 = 10900$  bolsas de cemento portland
- \* Alternativa (B) cemento portland y cemento ultrafino
  - $5378 + 127 = 5505$  bolsas de cemento portland
  - 11464 bolsas de cemento ultrafino

### **Estimación de niples de acero:**

- \*  $515 \text{ niples} \times 1 \text{ niple/taladro} = 515 \text{ niples}$
- \*  $515 \text{ niples} \times 0.6 \text{ m/niple} = 309 \text{ m}$
- \*  $309 \text{ m} \times 13.56 \text{ kg/m} = 4190 \text{ kg}$  de tubería de acero negro de 4 pulgadas

# CAPÍTULO 5

---

## DISEÑO DE GROUTING EN SUELOS

Los objetivos de este capítulo son:

- Funciones de grouting en suelos
- Penetración de grouting en suelos
- Mejoramiento de la resistencia del suelo
- Método de jet grouting
- Criterios de diseño de jet grouting
- Procedimiento y control de jet grouting

### 5.1 GENERALIDADES

El grouting, es una herramienta versátil, con muchas aplicaciones, estas incluyen un control o reducción de los asentamientos, incremento de la capacidad portante, reduciendo el flujo de agua, en la fundación, soportes de tierra o suelo y pilotes que incrementan la resistencia, ante eventos de licuefacción.

No hay límite para poder usar el grouting, se debe considerar las propiedades adecuadas y los métodos de diseño. El diseño de grouting, está asociado a la construcción.

La uniformidad de las inyecciones está condicionada a la variabilidad de las condiciones del subsuelo, con los cuales se puede estimar las cantidades de grouting en la inyección.

### 5.2 FUNCIONES DE GROUTING EN SUELOS

La lechada puede realizar diferentes funciones en el suelo. El más común es el control de asentamientos, reducir la permeabilidad y reducir la capacidad de cargas.

Para lograr estos objetivos, la lechada puede aumentar la resistencia del suelo y reforzar la masa, o la forma elementos estructurales que directamente llevan la carga. El enfoque de análisis y diseño para cada una de estas funciones es diferente.

- Una de las funciones es adicionar cohesión al material y rellenar los espacios vacíos de la masa.
- Impermeabilizar cierto volumen de suelo debajo o alrededor de una estructura.
- Densificar los suelos de fundación para aumentar la resistencia a la rotura y reducir la compresibilidad.
- Rellenar grietas para prevenir asentamientos excesivos.
- Controlar el movimiento del suelo durante el proceso de construcción de un túnel.
- Apoyo de fundaciones.
- Control del cambio de volumen de suelos expansivos.

### 5.3 MEJORAMIENTO DE LA MASA

Adición de materiales que mejoran la capacidad portante y reducen la permeabilidad del terreno.

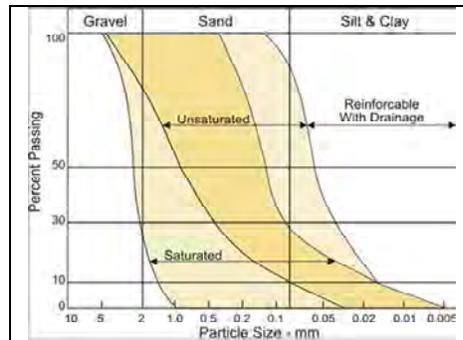


Figura 5-1: Materiales que mejoran la capacidad portante.

En general, el mejoramiento del suelo es:

- Desplazamiento de suelo.
- Restauración de la capacidad de carga.
- Remediar densificaciones de suelo.
- Prevenir asentamientos.

La mejora del suelo, implica la modificación del suelo de un sitio para mejorar su desempeño en el cumplimiento de un objetivo de diseño. Esto se puede lograr de manera uniforme por la modificación del suelo, o mediante la creación de distintos elementos que actúan en la masa del suelo.

Donde los elementos discretos son usados, deben ser pequeños para cerrar los vacíos de modo que no existe una concentración de carga efectiva. En el diseño de mejorar el suelo, lo que importa es el comportamiento de la mezcla del volumen del suelo cementado, y los elementos discretos se pueden utilizar, sólo para proporcionar un beneficio compuesto que actúa en general, sin tener en cuenta la ubicación de los elementos individuales. Obviamente, los elementos separados no son muy apropiados para el control de filtraciones, pero si para resistir esfuerzos y asentamientos, aplicaciones relacionadas con la solución que puede ser eficaz y económica.

### a) *Uniformidad de Mejoramiento Masa*

La creación de masa relativamente homogénea de suelo mejorado, es una práctica común y bastante fiable cuando las condiciones del suelo lo permiten. Este enfoque suele ser obtenido con el uso de la permeabilidad, la compactación, o jet grouting. Cuando un grado razonable de uniformidad se logra, el diseño se puede basar en las propiedades del suelo mejorado. Lograr la uniformidad requiere un conocimiento bien definido de la estructura y las características de la formación del suelo para ser rellenadas. La capacidad de inyectar lechada de la cantidad previsible y calidad, se verá afectada por los siguientes factores físicos del subsuelo en el que se inyecta:

- Homogeneidad del suelo
- Presencia de la estructura secundaria proporcionando rutas preferenciales para la lechada
- Cohesión y el esfuerzo de fricción del suelo.
- Compresibilidad del suelo
- Tendencia del suelo para disipar las presiones de poros
- La presencia y la proximidad de estructuras subterráneas o aberturas
- Isotropía y anisotropía de las propiedades del suelo
- Existencia de esfuerzos en el suelo
- La presencia de superficies libres, tales como pendientes o excavaciones

Todos estos factores deben ser evaluados para determinar la viabilidad de la inyección y las limitaciones físicas de las inyecciones de lechada individuales con el fin de diseñar un programa de inyección que logra la continuidad de la masa del suelo.

### b) *Impregnación de grouting*

Un límite práctico de la impregnación de inyección puede ser estimado, basado en el tiempo de inyección y las lechadas químicas de Newton, la ecuación propuesta por Maag (1938)<sup>1</sup>, es de la siguiente manera:

$$t = \frac{\mu n}{3kHr} (R^3 - r^3)$$

Donde:

$\mu$  = viscosidad del grout en centipoises

$n$  = porosidad del suelo

$k$  = permeabilidad del suelo

$H$  = tope de grout

$r$  = radio de inyección del taladro

$R$  = radio de inyección de grout con respecto al tiempo  $t$

---

<sup>1</sup>Practical Handbook of Grouting (2004), by James Werner, pag. 499

Para Bingham los flujos de grout, se limitan en base a los diámetros de los poros, el límite de elasticidad y la alta acción del grout, es descrito por Bruce (1994)<sup>2</sup>, de la siguiente manera:

$$RL = \frac{\delta_w * g * H * d}{4 * Ts} + r$$

Donde:

RL = límite del radio

$\delta_w$  = densidad del agua

g = aceleración de la gravedad

d = diámetro efectivo de la porosidad media

Ts = límite de elasticidad Bingham

H = tope de grout

r = radio de inyección de grout con respecto al tiempo t

La ubicación de la inyección; se establece para asegurar una continuidad razonable, mantener una suficiente cantidad de inyecciones usando un 10 a 25 por ciento de coincidencia es razonable, aunque la distancia puede variar dependiendo de la forma apropiada de la tolerancia sin lechada de anomalías en la aplicación en particular. El espaciado debe establecerse para garantizar que el diseño se realiza correctamente, teniendo en cuenta la mayor anomalía que puede permanecer sin lechada.

### c) *Jet Grouting*

Una masa de jet grouting uniforme, se puede lograr con el continuo relleno de las columnas, de suelo cemento. Normalmente, el diámetro de la columna es determinado por las condiciones del suelo y la energía del sistema de jet grouting usado.

Las estimaciones de las dimensiones de la columna alcanzable, se puede obtener con inyección convencional dimensiones de la columna de 8 a 52 pulgadas (0,2 a 1,3 m), dependiendo de las condiciones del suelo y la presión de inyección. En suelos granulares, los sistemas especiales de la utilización de chorro múltiple y/o boquillas especiales pueden lograr resultados muy diferentes.

### d) *Compactación de grouting*

La distribución de las inyecciones mejora radicalmente la compactación, inyecciones aisladas disminuye la compactación en la zona de inyección, ver figuras 5-2. Para lograr una mejor uniformidad, las inyecciones múltiples, deben estar separada lo suficientemente

---

<sup>2</sup>Practical Handbook of Grouting (2004), by James Werner, pag. 500

cerca donde la fuerza aplicada por sucesivas inyecciones de lechada reacciona contra la masa, como resultado de las inyecciones previas.

Por esta razón, los patrones de compactación de inyección, deben estar diseñados de manera que los agujeros son inyectados desde el perímetro hacia el centro de un área a mejorar, y los agujeros deben estar separados, como se muestra en la figura 5.2.b, el espaciamiento de las inyecciones de lechadas, Se ha reportado de 8 a 12 pies (2,5 a 3,7 m) (Alusi al, 1977), de 8 pies (2,5 m) (Bamdimere, 1997), y 6 pies (1,8 m Stillely 1982). En general el espacio seleccionado, se determina a partir de condiciones específicas del lugar. La sensibilidad del sitio para el movimiento, determinará la mayor inyección que se puede hacer con seguridad. *Una regla de oro es el espacio de la inyección de tres a cinco veces el diámetro de la masa inyectada*<sup>3</sup>.

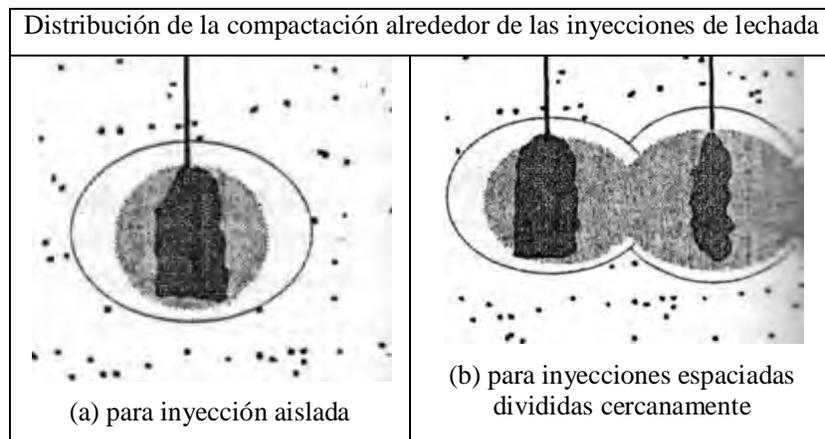


Figura 5-2: Distribución de compactación

**La inyección por compactación;** 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.

<sup>3</sup>Practical Handbook of Grouting (2004), by James Werner, pag. 500

e) **Presiones en suelos.**

Cuando se trata de inyectar en suelos, las presiones van a depender de factores tales como: porosidad, permeabilidad, viscosidad de la mezcla, tamaño de las partículas, tipo de equipos de inyección, y sus accesorios como tuberías y válvulas. Es por esto, que para valorar las presiones se deben realizar pruebas in situ antes de comenzar los trabajos.

Debido a la pérdida de presión en las válvulas y en las tuberías, las presiones que pueden registrarse en superficie pueden ser bastante altas.

Un método que suele utilizarse es el conocido como *corte de sable*, en el cuál se utilizan presiones muy altas intermitentemente y durante tiempos reducidos, con el fin de provocar una fractura en el suelo, que después será rellenada por el fluido, cuando disminuya la presión. Técnicamente es empleada para cerrar fugas importantes y crear un cierre de paredes entrelazadas en suelos finos, en los que la penetración de la inyección es muy difícil.

f) **Inyectabilidad del terreno**

La principal consideración para las inyecciones de cemento usadas en el sellado de grietas y fisuras, tanto en roca como en suelos, para el control del agua o para mejorar la fundación de la estructura, es el tamaño de las partículas inyectadas, comparadas con la apertura de la fractura o del tamaño de grano del terreno, que será inyectado. Para valorar la inyectabilidad del suelo, se pueden emplear las siguientes relaciones:

• En suelos.

$$N = \frac{(D_{10})_{\text{suelo}}}{(D_{65})_{\text{inyección}}}$$

$N > 24$ : La inyección es consistente  
 $N < 11$ : La inyección no es posible.

$$N_c = \frac{(D_{10})_{\text{suelo}}}{(D_{95})_{\text{inyección}}}$$

$N_c > 11$ : La inyección es consistente  
 $N_c < 6$ : La inyección no es posible.

No se puede tener control sobre las características del suelo, ni de la roca, pero sí se pueden cambiar las características del material inyectado, así como la incorporación reciente de finos pulverizados permite aumentar la penetración

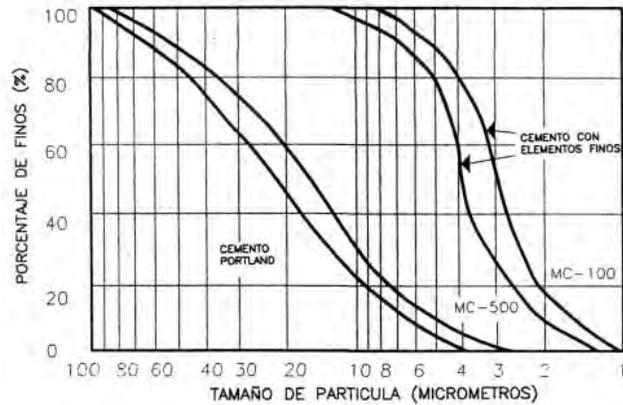


Figura 5-3: Comparación de las curvas granulométricas de los cementos Portland convencionales y las de los cementos con elementos finos pulverizados.

Cuadro 5-1: Límites de penetración del cemento en suelos granulares

TIPO DE CEMENTO	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (cm/s)	TAMAÑO $d_{85}$ DEL CEMENTO (mm)	TAMAÑO $d_{15}$ DEL SUELO (mm)
Portland normal	$2,3 \cdot 10^{-1}$	0,047	0,87
Alta resistencia	$1,3 \cdot 10^{-1}$	0,033	0,67
Fino coloidal	$3,2 \cdot 10^{-2}$	0,019	0,38
Ultra fino	$3,5 \cdot 10^{-3}$	0,006	0,12

#### 5.4 MODULOS Y MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA

Aunque el módulo de elasticidad y la fuerza no son siempre directamente relacionados, la mejora de uno de los dos, se asocia con una mejoría del otro. El aumento del módulo del suelo puede ser necesario para reducir los asentamientos, ante un evento sísmico. El aumento de la fuerza puede ser necesario mejorar la estabilidad de taludes. *El primer paso en el diseño de programas de inyección es por lo tanto para determinar la cuantía de la mejora necesaria y alcanzable, y luego definir los límites necesarios de mejora, para alcanzar el rendimiento deseado.*

La cantidad de mejora que se puede lograr depende del método de inyección seleccionado, y las propiedades del suelo. A pesar de que el jet grouting, normalmente alcanza la fuerza de compresión hasta 300 psi (2,1 MPa) en limos y arcillas, y en suelos granulares pueden alcanzar a 2000 psi (13,8 MPa).

Las soluciones químicas para lechadas, generalmente aumentan la cohesión y el módulo de elasticidad del suelo, pero puede reducir el ángulo de fricción interna. Por otra parte, muchos de estos suelos rellenados experimentarán deslizamiento por las altas cargas sostenidas, que presentan resistencias a largo plazo de una cuarta parte y la mitad de la

resistencia a la compresión. Para estos métodos, las pruebas de banco y prueba de campo de inyección; son necesarias para determinar la fuerza real, utilizando métodos diferentes y apropiados.

Una recomendación es que el contratista tiene que ser competente y con experiencia, tiene que familiarizarse con las condiciones locales, para lo cual, esta puede ser la mejor fuente de datos para el diseño preliminar.

La mejora de la compactación de inyección, está sujeta a menos variables. Inyección de compactación puede aumentar el ángulo de fricción interna de los suelos, basado en el aumento de la densidad relativa. La mejora puede estimarse a partir de Myerhof (1956)<sup>4</sup> las ecuaciones son las siguientes:

$$\phi = 25 + 25Dr \quad \text{para suelos con } > 5\% \text{ de finos}$$

$$\phi = 30 + 25Dr \quad \text{para suelos con } < 5\% \text{ de finos}$$

Donde:

$\phi$  = ángulo de fricción interna

Dr = Densidad relativa

La densidad relativa inicial puede estimarse a partir de la prueba de penetración estándar (SPT), y así obtener la fricción interna necesaria.

Módulo del suelo puede estimarse a partir de relaciones empíricas o medida a partir de los ensayos in situ.

Estas 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.

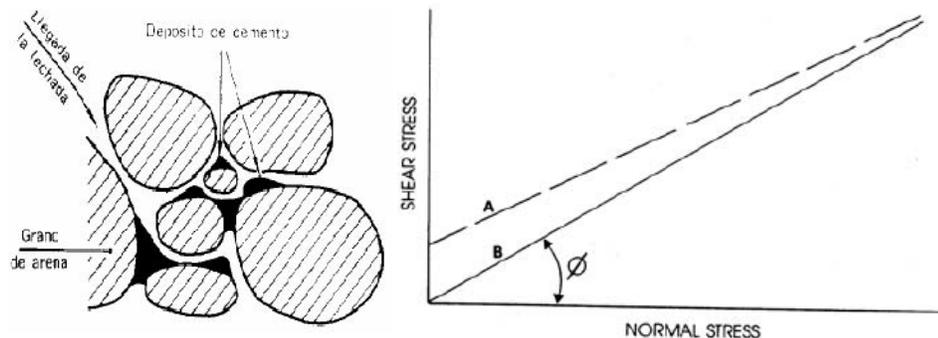


Figura 5-4: Aumento de la cohesión del suelo

<sup>4</sup>Practical Handbook of Grouting (2004), by James Werner, pag. 501

### ***El volumen de tratamiento***

Para cualquier método de mejoramiento del suelo, aumentando la fuerza o módulo de elasticidad de un suelo, la zona a tratar debe estar definida para alcanzar los objetivos del proyecto. El volumen a tratar es estimado, basado en la teoría elástica de distribución de la tensión, para proporcionar un apoyo adecuado a la zona en cuestión.

La profundidad del tratamiento debe incluir la consideración del efecto del peso del suelo, incluido el peso de la lechada, en estratos más profundos. Mejorar las capas más profundas puede ser necesario para soportar el peso adicional de la masa de suelo que cubre la lechada. Cuando una capa más suave se mantiene por debajo del volumen de lechada de cemento, la solución del sistema de múltiples capas debe ser calculada para cada capa en el sistema. Los asentamientos diferenciales entre el centro y los bordes de la zona de carga y lechada deben ser considerados. Cálculo de los asentamientos para una carga circular es el siguiente:

$$S = C_d \alpha \sigma B \frac{(1 - \mu^2)}{E_u}$$

Donde:

S = Asentamiento estimado

$C_d$  = es un factor de forma igual a 0.64 para area circular

$\sigma$  = esfuerzo de carga uniforme

B = diámetro del área de carga

$\mu$  = relación de Poisson

$E_u$  = módulo de Young de la capa de suelo

$\alpha$  = factor de corrección para la relación de rigidez y el grosor de la capa, como se muestra en la Figura 5-5.

En caso de inyección se incrementará la rigidez del suelo, lo que es mucho mayor que el del suelo circundante, el suelo cementado puede actuar de una forma estructural, y llevar la carga a una capa más profunda; en este caso, se debe chequear la distribución de carga en las capas más profundas. El área de lechada de cemento debe ser del tamaño adecuado para evitar los esfuerzos excesivos en los estratos profundos.

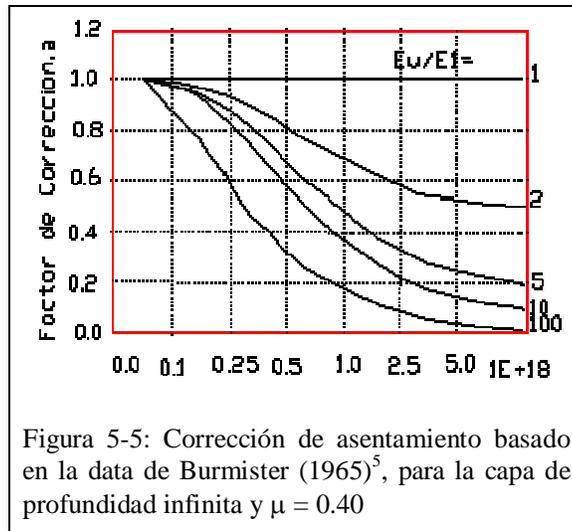


Figura 5-5: Corrección de asentamiento basado en la data de Burmister (1965)<sup>5</sup>, para la capa de profundidad infinita y  $\mu = 0.40$

## 5.5 REDUCCION DE LA PERMEABILIDAD

Grouting, se usa comúnmente para reducir la permeabilidad de los suelos. Para cortar la filtración, se puede lograr mediante la creación de líneas o los paneles de la superposición de columnas de chorro de lechada, o barreras de permeabilidad del suelo-lechada. Limitada la movilidad de inyección, incluyendo la compactación de inyección, tendrá poca influencia en la permeabilidad de un suelo y es rara vez usado, para este propósito.

### *Penetración Inyección*

Impregnación de la inyección reduce la permeabilidad de relleno y sellado de los espacios de poros en el suelo.

El principal problema de diseño consiste en determinar el valor de la permeabilidad fiable que se pueden obtener, y el programa requiere de inyección para asegurar la continuidad del suelo cementado. Estas estimaciones se basan en el grouting, así como las estimaciones de campo y de laboratorio de postgrouting permeabilidad convencionales ecuaciones de flujo de Darcy, se puede utilizar para evaluar las necesidades de la zona de inyección. El espaciamiento y la distribución de las inyecciones se basan en los límites físicos de la inyección.

## 5.6 ELEMENTOS ESTRUCTURALES

El principal uso de jet grouting y aplicaciones; limita el movimiento de elementos estructurales en el suelo. Formas estructurales pueden ser creadas a partir de las columnas jet grouting, mediante la inyección de lechadas limitan el movimiento del suelo.

<sup>5</sup>Practical Handbook of Grouting (2004), by James Werner, pag. 502

La inyección controlada estabiliza el área. Las principales aplicaciones geestructurales de inyección, incluyen el apoyo de excavación temporal y permanente, apoyando la fundación, y el aumento de las fundaciones estructurales.

Pueden ser creados por la penetración del suelo debajo de la fundación o mediante la creación de un elemento base de reemplazo (jet grouting) o desplazamiento (inyección limitada movilidad). La fuerza de un apoyo de impregnación o lechada jet, se basa en la resistencia del material, formando columnas de lechada, limitando la movilidad y controlando las propiedades de la lechada y la capacidad de desplazar el suelo circundante.

## **5.7 TECNICA DEL JET GROUTING**

El Jet-Grouting es una tecnología que utiliza la inyección radial de fluidos, a muy alta velocidad y alta presión, para desagregar (erosionar) el terreno, sustituyendo parcialmente el material erosionado y mezclándolo con un agente de cementación para formar un nuevo material y mejorar el suelo.

La aplicación de esta técnica, tan versátil, nos permite introducir en el terreno nuevos materiales en la forma de columnas enteras o truncadas, que consiguen mejorar las características geotécnicas resistentes de la zona tratada, reducir su deformabilidad, disminuir su permeabilidad. Sus aplicaciones se han extendido a una gran variedad de trabajos que incluyen: cimentaciones, soporte de excavaciones, mejoras del terreno, obras auxiliares para la construcción de túneles, estabilización de taludes, control del agua subterránea, etc.

Es una de las tecnologías más demandantes de los sistemas de mejora, requiriendo excelencia técnica en el diseño y la construcción por parte de especialistas.

Las ventajas de aplicación de esta técnica radican en su aplicabilidad a casi todos los tipos de suelos; tratamientos particularizados, o a estratos de suelos específicos; utiliza componentes inértiles; su ejecución es sin vibraciones; puede evitar instalaciones enterradas; y la posibilidad de trabajar con limitaciones de espacio.



Figura 5-6: Jet de agua saliendo por la tobera del monitor de Superjetgrouting

### 5.7.1 RANGOS DE APLICACIÓN DEL JET GROUTING

Tal como puede apreciarse en la figura 5-7, la técnica del Jet Grouting es aplicable, en general, para todo tipo de tamaño de partículas.

*Aplicaciones del Jet Grouting;* Dentro de sus aplicaciones es posible mencionar:

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

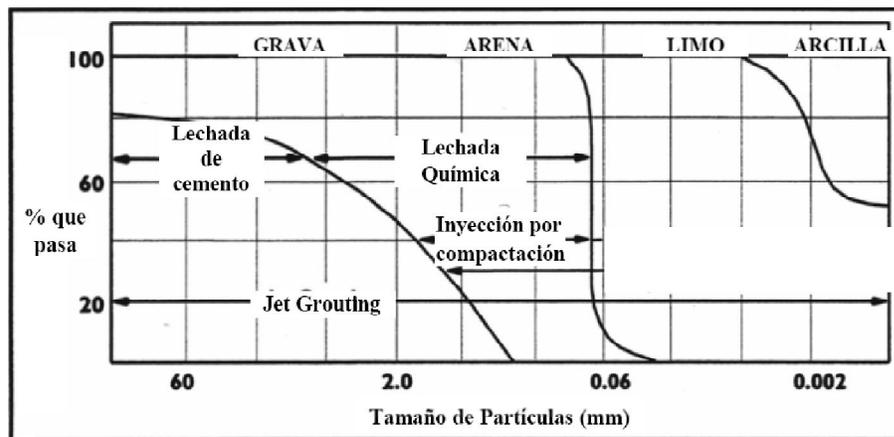


Figura 5-7: Rango de aplicación del Jet Grouting según tamaño de partículas del suelo a inyectar

## 5.7.2 SISTEMAS DE JET-GROUTING

Es posible inyectar lechada sola (Jet 1), lechada con aire comprimido (Jet 2) y lechada con aire comprimido y agua a presión (Jet 3).

La selección del sistema más apropiado; es una función del suelo a tratar, la aplicación y las propiedades del suelo tratado para el fin deseado. Sin embargo, cualquier sistema puede ser utilizado en casi todas las aplicaciones; si el diseño y la ejecución son congruentes con el sistema elegido.

### *(Jet 1) Monofluido:*

La inyección de lechada de cemento es bombeada por el varillaje y sale por la tobera horizontal del monitor con una alta velocidad (aprox. 200 m/seg). Esta energía causa la erosión, disgregación, mezcla y desplazamiento del suelo. Este sistema es el más antiguo y simplificado. Este sistema produce un verdadero y homogéneo suelo cemento, con la más alta resistencia y el menor desperdicio de lechada.

### *(Jet 2) Doble fluido:*

El segundo fluido que se emplea en este sistema el agua o el aire. La lechada se inyecta a una presión más baja, y es ayudada por un cono de aire comprimido que cubre la lechada de inyección.

El aire reduce la fricción, permitiendo a la lechada de cemento desplazarse a una mayor distancia desde el inyector, con lo cual, se logran columnas de inyección más grandes que con el Jet 1.

### *(Jet 3) Triple fluido:*

El tercer fluido empleado en este sistema, es el agua. La misma se inyecta a alta presión mediante la ayuda de un cono de aire comprimido que la rodea. Este proceso produce un efecto de levantamiento de aire, el cual empuja el suelo circundante, provocando su corrimiento y ocasionando de este modo, un vacío en forma de columna alrededor del inyector.

Mientras tanto, por otra tobera colocada por debajo de la anterior, se inyecta la lechada de cemento, con lo cual, se llena el vacío creado por el efecto del proceso del levantamiento del aire.

El Jet 3 a diferencia del Jet 1 y del Jet 2, no es un procedimiento de mezcla in situ del suelo, sino que es un sistema de reemplazo del mismo.

Lechada, aire y agua, son bombeadas a través de diferentes líneas al monitor inferior. Agua a alta velocidad envuelta en un chorro de aire forman el medio erosivo. La lechada sale a una velocidad menor por una tobera separada, debajo del jet de erosión. Esto separa el proceso de erosión del proceso de inyección.

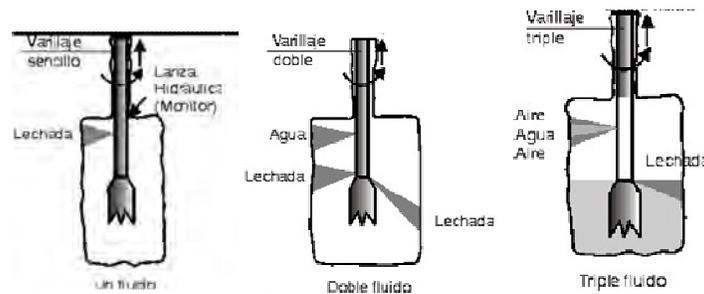


Figura 5-8: Sistema estandar de jet grouting

*SuperJet (doble fluido, aire):*

Este sistema utiliza la base de un sistema de doble fluido (aire+lechada), pero con un monitor altamente sofisticado, especialmente diseñado para gobernar y focalizar de una manera precisa la energía de la materia inyectada. La lechada es empleada para erosionar y mezclarse con el suelo. El aire envuelve el jet de lechada para incrementar la eficacia de la erosión. Valiéndose de una baja velocidad de rotación y ascenso, se alcanzan grandes diámetros de columnas de suelo tratado.

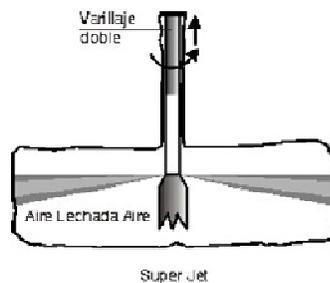


Figura 5-9: Sistema de Superjet-Grouting

Tipo de Jet Grouting	Diámetro (m)	Consumo de cemento (kg/m) arenas limosas
Monofluído	0,45 a 0,80	250 a 400
Doble fluido	0,60 a 2,00	500 a 1400
Triple fluido	1,00 a 2,50	800 a 1500
Super jet	2,00 a 5,00	1000 a 8000

Cuadro 5-2: Para dosificaciones de lechada a/c de 0,67/1

### 5.7.3 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

El procedimiento de ejecución comienza con la realización de una perforación en el terreno hasta la profundidad requerida, que permite que la inyección acceda al lugar deseado del tratamiento. A continuación se inicia la inyección para poder formar el cuerpo

de suelo tratado, mediante el desplazamiento vertical del monitor (la cabeza de inyección) y aplicando simultáneamente rotación.

El jet rompe el terreno que es desplazando parcialmente hacia el exterior por el espacio anular que queda disponible entre el varillaje y la perforación. La holgura entre el monitor y las paredes de la perforación, es de vital importancia para el tratamiento, pues si se obtura este camino, el recinto perforado entrará en carga y podrá producirse una fracturación. La inyección de cemento se mezcla con el terreno, y también parte de la misma es expulsada. Todo el material expulsado a la superficie, constituye el material de resurgencia. El monitor se extrae con una velocidad de ascenso y una velocidad de rotación por lo que las formas constructivas habituales son “columnas”. También se puede programar el equipo para realizar otras formas o porciones de la columna (restringiendo la rotación entre ciertos rangos) o como paneles (ascenso casi sin rotación). Se comprende qué, ejerciendo una acción constante con el jet (chorro), la respuesta del terreno es variable según la resistencia que oponga al mismo, y por ello el tamaño y forma del cuerpo tratado obtenido, mostrará oscilaciones en dimensiones, configuración, etc., en función del tipo de suelo encontrado.

Hay dos formas de ascenso del monitor, una en forma discontinua con etapas de permanencia en cada escalón de ascenso y otra continua formando, en conjunto con la rotación, un espiral.

Las instalaciones para el equipamiento consisten habitualmente en: silos de cemento, plantas automáticas, especialmente diseñadas para facilitar una mezcla vigorosa de las partículas coloidales, con proporciones exactas y con una producción suficiente (hasta 30 m<sup>3</sup>/hora), bombas hidráulicas capaces de suministrar los fluidos en los volúmenes y presiones apropiados, perforadora hidráulica, varillaje y herramientas adecuadas tanto de perforación, como de inyección, mangueras de alta presión, etc.

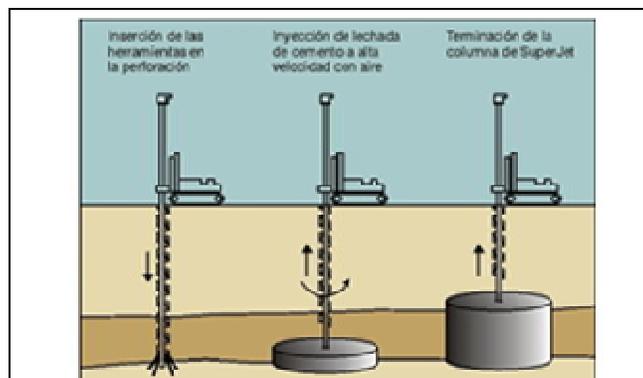


Figura 5-10: Proceso de ejecución de Superjet-Grouting.

El método de perforación, se elige de acuerdo a las condiciones del terreno, los rasgos característicos del sitio de la obra, y las especificaciones de diseño con relación a la longitud e inclinación de inyección. Los diámetros más habituales del varillaje del tratamiento oscilan entre los 60 y los 114 mm, y los de perforación entre 90 y 150 mm.

#### 5.7.4 INYECCIÓN DE FLUIDOS

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

Poco se puede decir del primer tramo de la lechada, más que la importancia de una mezcla uniforme, y unas características físicas del polvo de cemento y densidad de la lechada adecuada, para que no haya problemas al salir a altas velocidades por los finos orificios de las toberas. Es importante saber la relación entre la presión de impulsión y la velocidad del chorro, ya que las pérdidas de carga pueden ser importantes, y varían de una maquinaria a otra. Velocidad inicial a la salida de la tobera<sup>6</sup>:

$$V_0 = m\sqrt{2gp_0} \quad Q = VA = m\sqrt{2gp_0}\frac{\pi}{4}d^2$$

Biosca(1997)<sup>7</sup> sugiere como parámetros habituales de bombeo de 1 a 3 l/s, con densidades de lechada de 1.5 a 1.65, para maquinarias con bombas de 350 a 500 CV, orificios de salida de 1.8 y 5 mm.

Parámetros de trabajo	Monofluido	Doble fluido (aire)	Doble fluido (Agua)	Triple fluido	SuperJet
Presión de la lechada (Mpa)	30-50	30-50	>2	>2	30-50
Caudal de la lechada (L/min)	50-450	50-450	50-200	50-200	300-450
Presión de agua (Mpa)	-	-	30-60	30-60	-
Caudal de agua (l/min)	-	-	30-150	50-150	-
Presión de aire (Mpa)	-	0.2 – 1.7	-	0.2-1.7	0.2-1.7
Caudal de aire (m <sup>3</sup> /min)	-	3-12	-	3-12	3-12
Toberas de corte (mm)	1.5- 5	1.5-6	1.5-6	1.5-6	4-6
Toberas de relleno (mm)	-	-	4-12	4-12	-
Velocidad de ascenso (cm/min)	20-70	10-50	10-50	10-50	5-30
Velocidad de rotación (rpm)	10-30	5-20	5-20	5-20	2-15

Cuadro 5-3: Parámetros de inyección

<sup>6</sup>Mejora de suelos con la técnica de jet grouting (2008), Francisco J. TsaoSantín, pag. 17

<sup>7</sup>Mejora de suelos con la técnica de jet grouting (2008), Francisco J. TsaoSantín, pag. 17

Como formulas de aplicación directa, Covil<sup>8</sup> señala un par de formulas ajustables empíricamente:

Fórmulas de aplicación directa,

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

Donde  $\lambda$  es el parámetro empírico de Kanematsu (figura 5-11) y  $\beta$  la pérdida de carga; el volumen de suelo erosionado  $V_e$

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

$R_a$  = Radio del jet

$L_s$  = Velocidad de retirada (en cm/min)

Un paso más, es establecer relaciones entre diámetros de toberas, tipos de técnica, relación agua/cemento, densidad de la lechada, presión, caudal ver figura 5-11, propuesta por TekTracker

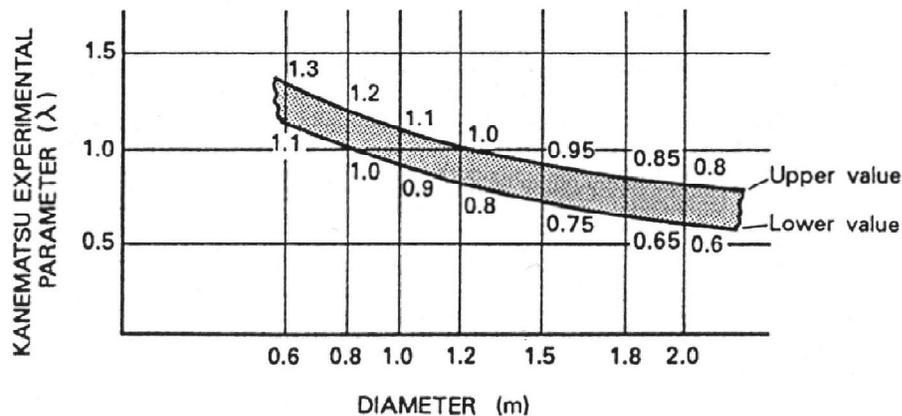


Figura 5-11: Parámetro  $\lambda$  experimental de Kanematsu

Zege, Broid, Antonov y Sin'ko<sup>9</sup>, proponen una fórmula aproximada para prever el diámetro  $D$  (en metros) de la columna, para suelos no cohesivos:

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

Donde: ( $Q_g$ ) es el flujo de lechada en una tobera, ( $v_y$ ) es la tasa de ascenso efectivo del jet, ( $d$ ) es el diámetro del taladro, ( $n$ ) la porosidad natural del suelo, ( $w_0$ ) es la humedad natural

<sup>8</sup> Mejora de suelos con la técnica de jet grouting (2008), Francisco J. Tsao Santín, pag. 18

<sup>9</sup> Mejora de suelos con la técnica de jet grouting (2008), Francisco J. Tsao Santín, pag. 19

del suelo (en unidades de masa de agua por volumen de suelo), ( $\rho_w$ ) es la densidad del agua, ( $\rho_g$ ) la densidad de la lechada, ( $\rho$ ) la densidad de la mezcla de lechada y suelo expulsada, ( $\rho_{r0}$ ) la densidad de suelo erosionado y agua contenida en sus poros ( $\rho_{r0} = \rho_p(1-n) + \omega_0$ ), ( $\rho_p$ ) densidad de las partículas de suelo; todo en unidades del S.I.

### 5.7.5 PROPIEDADES DEL SUELO TRATADO

El diseño de un tratamiento del terreno mediante la técnica de jet-grouting, precisa conocer las propiedades medias del suelo-cemento de las columnas. Tanto las propiedades intrínsecas del suelo tratado, (resistencia media a tracción, compresión, cortante y módulo de deformación, y el coeficiente de permeabilidad), como las propiedades geométricas, en particular el diámetro mínimo de la columna creada. Estas propiedades se pueden obtener mediante métodos empíricos, con tablas obtenidas en tratamientos realizados en terrenos similares ó mediante columnas de prueba realizadas “in situ”, previamente al tratamiento general.

El producto que se obtiene con un tratamiento tipo jet grouting depende de muchos factores, que a su vez residen tanto, en los parámetros del propio sistema (tipo de jet, presión de inyección, caudal, material inyectado, velocidad de rotación y de ascensión, etc.) como del terreno (granulometría, densidad, estructura, nivel freático). Las lechadas de cemento utilizadas en las inyecciones de relleno y mezcla con el terreno, habitualmente están dosificadas con una relación agua/cemento ( $a/c$ ), en peso, comprendida entre 0,5 y 1,5. Se pueden emplear aditivos para reducir el contenido de agua, o para variar la viscosidad, estabilizar o aumentar la impermeabilidad de la mezcla adoptada. Además se pueden utilizar otros materiales tales como bentonita.

La resistencia a compresión simple (RCS) del jet grouting puede variar de 2 a 25 MPa, y está determinado por el contenido de cemento o cementante, la porción y tipo de suelo remanente en el suelo tratado.

La resistencia a la tracción se puede aproximar como un 10% de la RCS y la resistencia al corte como un 8% de la RCS. En el Cuadro 5-4, se dan referencias de rangos de valores del suelo tratado.

Tipo de suelo tratado	Arcilla	Arenas Limosas	Arenas y Gravas Limpias
Resistencia a la compresión simple (RCS, MPa)	2 - 5	3 - 7	4 - 15
Módulo de deformación E (MPa) = $\alpha$ *RCS (MPa)	$\alpha=300$	$\alpha=700$	$\alpha=1000$

Cuadro 5-4: Resistencia a la compresión

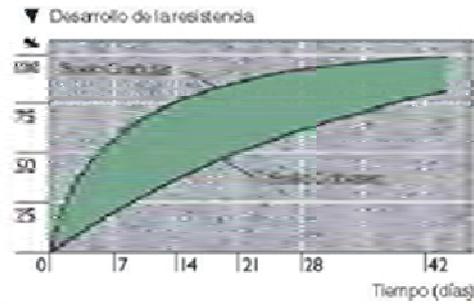


Figura 5-12: Desarrollo porcentual de la resistencia en el tiempo

Keller<sup>10</sup> relaciona tipos de suelos con permeabilidad y resistencia, Cuadro 5-5

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

Cuadro 5-5: Permeabilidad y resistencia de Keller grundbau GmbH

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

Cuadro 5-6: Resistencias standard. Asociación japonesa del Jet Grouting

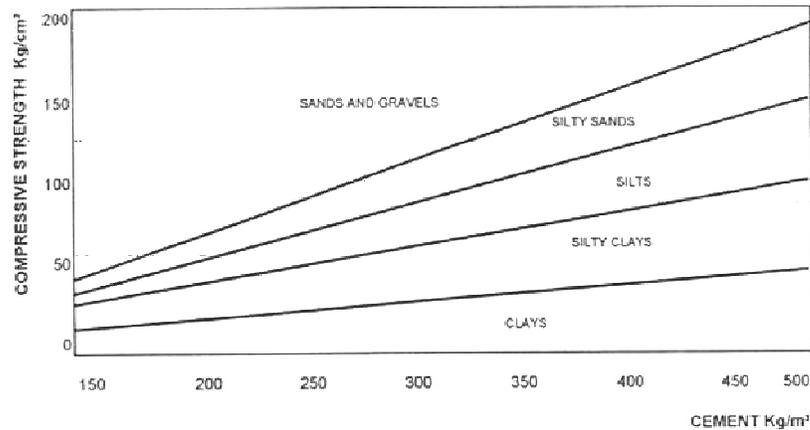


Figura 5-13: Resistencia según áridos y contenido de cemento<sup>11</sup>. TekTraker

<sup>10</sup> Mejora de suelos con la técnica de jet grouting (2008), Francisco J. TsaoSantín, pag. 30

<sup>11</sup> Mejora de suelos con la técnica de jet grouting (2008), Francisco J. TsaoSantín, pag. 30

### 5.7.6 CRITERIOS DE DISEÑO

Cuando se elige el jet grouting como forma de tratar y mejorar el terreno, se deben tener en cuenta una serie de criterios, para poder llegar a la elección de los parámetros idóneos que controlan los tratamientos. Los más importantes son:

#### a) *Investigación preliminar y toma de muestras*

La investigación del terreno es primordial, no sólo en esta técnica, sino en cualquier tratamiento como ya se ha indicado. Los pasos que deben cubrir son:

- i. Realizar perfiles geológicos del suelo y recopilar toda la información hidrogeológica posible in situ, mediante ensayos con el fin de estimar la consistencia del suelo o la densidad relativa.
- ii. Ensayos de laboratorio sobre muestras, lo más representativo posible, para evaluar la distribución de los tamaños de grano, contenido de humedad, Límites de Atterberg
- iii. Pruebas de jet grouting in situ para chequear los parámetros de inyección

#### b) *Geometría del tratamiento*

La flexibilidad de los métodos de jet grouting, permite resolver un gran número de problemas con un adecuado diseño. Mediante este tipo de técnicas, se pueden desarrollar tratamientos para formar pantallas que controlan los flujos de agua, o formar estructuras para contener los terrenos, mediante la superposición de una o más filas de elementos verticales como se puede ver en la figura 5-14

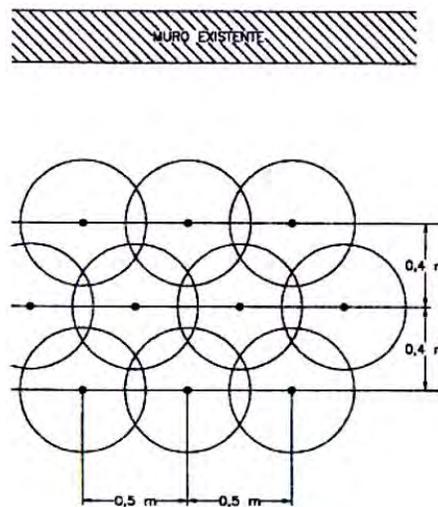


Figura 5-14: Esquema típico de columnas de jet grouting para una pantalla

La geometría de los sondeos puede ser elíptica o circular, en función de las proporciones en excavaciones profundas.

**c) Elección del tipo de inyección**

Los criterios que deben seguirse en la elección de los constituyentes y la composición de la mezcla, a fin de conseguir una cierta resistencia y permeabilización, son este tipo de tratamientos diferentes a los que deben cumplirse en las inyecciones convencionales.

Se debe tener en cuenta que el detrito procedente del proceso de corte no sale al exterior, sino queda dentro de la columna, y se mezcla con la lechada que está siendo inyectada. Normalmente la lechada está compuesta de cemento y agua en una relación de cemento/agua entre 0.5 a 1, con la posibilidad de adicionar bentonita u otros compuestos.

El producto obtenido dependerá sobre todo, de dos factores de la naturaleza del terreno y de las características de la lechada inyectada, pero su composición puede ser un problema complejo en función de la permeabilidad del terreno y según se esté trabajando por debajo del nivel freático. Así, en un terreno saturado y poco permeable debido a la baja compresibilidad del agua y a la saturación, la difusión del agua a otras zonas se realiza de forma lenta, lo cual hace que se produzcan elevadas presiones, que harían que por el punto más débil, como es el contacto entre varillaje y terreno, pudiera reventar el circuito siendo expulsado el material por la boca del taladro.

Cuando se trabaja en terrenos permeables o por encima del nivel freático, no existe rebose de material, aunque también pueden aparecer problemas por no rellenar los huecos creados al no existir una adecuación entre el caudal inyectado y la porosidad del terreno tratado por unidad de tiempo, por lo que la lechada podrá circular libremente por los poros.

Es por lo dicho anteriormente, que aunque en teoría no debería ser necesario inyectar más lechada de lo necesaria para colmatar el hueco, el hecho de ver salir algo de fluido es un buen síntoma de que los huecos del terreno estén rellenos.

**d) Selección de parámetros jet grouting**

Los parámetros que regulan la aplicación práctica del tratamiento; son los siguientes:

- Diámetro de los cilindros de la bomba de inyección.
- Velocidad de funcionamiento del motor de la bomba.
- Diámetro de las toberas de salida de la lechada.

- Velocidad de giro del varillaje.
- Velocidad ascensional del varillaje.
- Características del terreno.
- Separación entre barrenos.
- Características de la inyección.

Todos estos parámetros tienen una gran influencia, tanto en el corte del sondeo como en la mezcla del detrito y de la lechada.

Para seleccionar en una primera aproximación, el caudal de suministro de la bomba, se puede jugar el tamaño del cilindro y la velocidad del motor, siendo función el régimen de funcionamiento del diámetro de las toberas de salida de la lechada, la cuál ronda los 2 mm. Con la combinación de estos tres parámetros, y de acuerdo con las curvas características de la bomba, queda determinado el caudal y la presión de suministro a pie de máquina.

Para el tamaño de cilindro y una velocidad de funcionamiento de la bomba, que representa el caudal de inyección, se establece que a menor diámetro de las toberas, corresponde una mayor presión y por lo tanto aumenta en la velocidad de salida, con lo que aumenta la velocidad de corte.

Pero la fuerza transmitida al terreno, va disminuyendo de forma importante con la distancia a la tobera, para ello basta con un ejemplo, para una tobera de 2 mm de diámetro con una apertura de chorro de 1%, la fuerza de impacto se reduce a la décima parte a 20 cm de distancia, y se divide entre 100 a un mm, mientras que con una apertura de chorro de un 10 % estas reducciones se producen a distancias 10 veces menores, de ahí la importancia de la concentración del chorro.

También las velocidades de rotación y ascensional tiene influencia tanto en el corte del terreno, como en el radio de acción del tratamiento.

La relación óptima entre los parámetros, no coincide con el óptimo económico, ya que la perforación de los barrenos tiene un peso muy importante; en cuanto al costo económico, lo más recomendable será, apurar al máximo las posibilidades de corte y conseguir el mayor radio de acción posible, aunque no se obtenga el máximo aprovechamiento energético.

**e) *Características del suelo tratado***

Los resultados de un tratamiento, en términos de la uniformidad conseguida y de las propiedades mecánicas, dependen de un gran número de factores interdependientes entre las características del terreno y los parámetros de jet grouting vistos anteriormente.

Una vez que se ha realizado el tratamiento, es normal realizar una toma de muestras con las cuales, se pueden hacer ensayos de laboratorio

*f) Controles durante los trabajos*

El volumen de inyección necesitado es mayor que el volumen de huecos presentes en el terreno natural, esto se debe a la utilización del fluido de inyección como medio para fracturar el terreno. Es por esto que, durante el período de tratamiento, puedan provocarse elevaciones y desplazamientos del terreno. Dependiendo de donde se realice el tratamiento y la importancia de controlar estos desplazamientos, es necesario realizar una serie de controles. Los más importantes son los siguientes:

- i. Medir movimientos verticales en superficie y estructuras.
- ii. Medir inclinaciones para valorar los desplazamientos horizontales a distancias variables del área tratada.
- iii. Evaluar la cantidad y calidad de los materiales que rebosan. Esta fase es esencial para estimar la cantidad de cemento rechazado y poder chequear la composición de la mezcla, en ese momento junto con las muestras llevadas al laboratorio.

**Procedimientos de control**

Para garantizar la homogeneidad en el tratamiento, según los parámetros propuestos, se hace muy recomendable la utilización de aparatos electrónicos que mediante la colocación de sensores en los distintos circuitos de fluidos, máquinas y varillaje, nos proporcione información en espacio y tiempo de los parámetros fundamentales que definen los distintos tipos de Jet.

Cuando no se disponga de experiencia comparable, es conveniente que se proyecte y realice un ensayo de campo preliminar a pie de obra que se adecúe a las condiciones encontradas. Esta prueba deberá abarcar todas las condiciones pertinentes probables que se puedan encontrar en el lugar de la instalación, con el fin de permitir una selección del sistema más efectivo y de los parámetros de la inyección, verificar que los resultados estén conformes a los requisitos del proyecto.

Con relación a la mezcla de inyección, se deberá determinar la densidad, la decantación, la viscosidad, y el tiempo de fraguado, debiéndose así mismo, tomar muestras con la periodicidad para la realización de ensayos de compresión simple.



Figura 5-15: Estrangulamiento por cambio de suelo.



Figura 5-16: Columnas de SúperJet Grouting en arcillas firmes

En el caso de que se efectúe extracción de testigos de elementos ejecutados, ésta se deberá ser una vez que haya transcurrido un tiempo de endurecimiento. Además, se deberá prestar especial cuidado, en que las muestras sean representativas. Cuando se extraigan testigos para la determinación de la geometría del elemento inyectado, se deberá realizar, siempre que sea posible, mediante testigos inclinados con relación al eje del elemento, debiendo determinarse la inclinación del eje de extracción y la posición e inclinación del eje del elemento.

### 5.7.7 APLICACIONES

Las aplicaciones son diversas, aquí se muestran algunos ejemplos en las siguientes figuras:

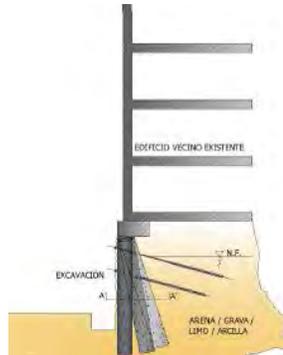


Figura 5-17: Calzaduras de estructuras vecinas a excavaciones y muros de contención



Figura 5-18: Calzaduras como refuerzo de estructuras antiguas

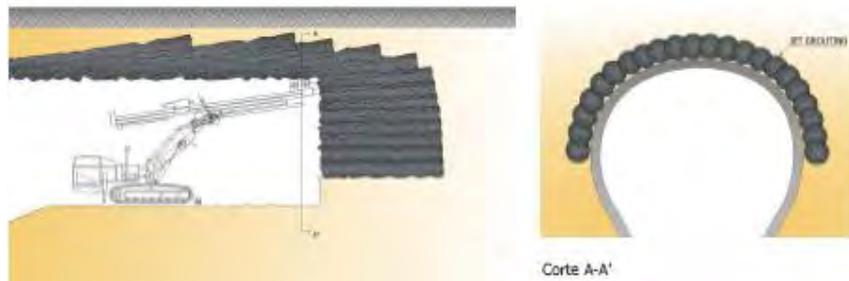


Figura 5-19: Paraguas de jet grouting para túneles.

# CAPÍTULO 6

---

## CONTROL DE CALIDAD Y VERIFICACIÓN DEL GROUTING

Los objetivos de este capítulo son:

- Evaluación de la perforación
- Verificación de los materiales
- Verificación de los equipos
- Control de las mezclas
- Control de la inyección en tiempo real
- Control de las absorciones en las cortinas de grouting

### 6.1 CONTROL DE CALIDAD

La supervisión debe hacer cumplir las especificaciones técnicas y las instrucciones de campo dadas, y se programa diariamente las perforaciones e inyecciones en coordinación con el contratista, de acuerdo a evaluación de las absorciones de taladros inyectados, se realiza el control de perforación e inyección:

*Perforación:*

- Se verifica el alineamiento e inclinación de acuerdo a instrucción de campo y planos indicados. Se programan taladros de perforación en función a las absorciones y distancias máximas establecidas.

*Grouting,*

- Se verifica el lavado de los taladros perforados antes de inyectar.
- Se hace calibrar el registro y la computadora de la central de inyecciones, verificándose el caudal y la presión, cada vez que el registro se mueva de su lugar.
- Se verifica la limpieza de los equipos, antes de iniciar la inyección.
- Se controla que, los parámetros físicos de la mezcla estén dentro del rango permitido de cada tipo de mezcla inyectada ver figura 6-1.
  - Sedimentación
  - Fluidez
  - Densidad
- Se controla mediante computadora la inyección de grouting en tiempo real.

La integridad y la calidad de un programa de inyección, comienza con una planificación adecuada antes de la inyección y un conocimiento claro del procedimiento de inyección.

Se debe tener una vigilancia cuidadosa y precisa de la inyección en todo momento, observando el comportamiento durante la inyección de la lechada, así como antes de la inyección verificando que el taladro, esté bien lavado, de lo contrario se puede tener un falso rechazo.



Figura 6-1: Control de fluidez y densidad de la mezcla

Si la inyección se inicia con un mal conocimiento, y hay poca o ninguna supervisión de la inyección, es muy probable que la cortina no sea de buena calidad, ya que probablemente no cumpla con las especificaciones técnicas de inyección y los requerimientos de diseño.

#### ***Identificación de problemas***

- a) Durante la perforación de taladros
  - Material heterogéneo
  - Presencia de fallas
  - Baja presión de aire para la perforación
  - Inexperiencia del operador
  - Mal alineamiento e inclinación del taladro
- b) Durante el lavado del taladro
  - Mal lavado del taladro
  - Falso lavado del taladro, esto se da cuando no se llega a la profundidad del taladro
  - Poca presión de la bomba de agua para lavar el taladro, ya sea con línea de tubería o manguera de polietileno.

c) Durante la inyección

- Mal control de los parámetros físicos de la mezcla y por lo tanto una mala inyección
- Equipos no bien lavados
- Descalibración del caudalímetro que controla en volumen de agua para la mezcladora.
- Cemento pasado.
- Inadecuada cantidad de aditivo.
- Desgaste en la bomba de inyección.
- Válvula de regulación gastada.
- Descalibración registro y la computadora de la central de inyección
- Packer hidráulico en mal estado
- Bypass continuo
- Mal calafateo de los nipples de inyección

**6.1.1 Perforación de taladros de observación**

El correcto diseño y la perforación de los taladros para el grouting, son fundamentales para un rendimiento de calidad. Esto puede parecer fácil, pero el seguimiento de los numerosos taladros y las etapas de lechada puede ser una tarea desalentadora. Los taladros se deben perforar en la secuencia apropiada y trayectoria correcta. Cuando no hay un buen control en el alineamiento, inclinación de los taladros, y verificando que las perforaciones sean con centralizador a profundidades mayores a 15 m.

La ubicación de los taladros deben ser controlados por topografía, los cuáles identifican con una marca de pintura en la superficie, éstas marcas son codificaciones, para llevar un orden. Para distinguir entre los taladros primarios, secundarios, terciarios, cuaternarios y quinarios, se deben pintar con diferentes colores, por ejemplo, rojo para la primaria, de color amarillo para secundaria, y así sucesivamente.

Es muy fácil perder la noción del taladro de identificación, especialmente en el suelo, por lo que suele ser útil para proporcionar puntos de referencia. El equipo de perforación debe estar bien colocado y el mástil ajustado a la alineación especificada exacta antes del comienzo de la perforación.

Para asegurarse de que los taladros se perforan a la profundidad adecuada, es una buena idea dejar a un lado el número exacto de las barras de taladro necesario. Así mismo se debe evaluar durante la perforación, la recuperación de detritus, así como la recuperación de agua.

En los equipos de perforación, se debe verificar la presión de aire, ya que éste influye bastante en el avance de la perforación y la calidad de perforación del taladro.

#### **6.1.2 Materiales y mezcla de grout**

Se debe tener un control riguroso con la calidad de los materiales para la inyección, agua, cemento y aditivos.

**Cemento;** Se debe tener un control riguroso con la fecha de vencimiento del cemento, el apilado y almacenamiento, la protección al medio ambiente.

**El agua;** La supervisión debe controlar la calidad del agua, ya que el agua debe ser el mismo con el cuál se elaboró el diseño de mezclas. El control visual, es que el agua sea transparente y no tenga turbidez, así también se debe controlar la calidad del pH, que debe estar en  $7 \pm 1$ .

**Los aditivos;** se debe controlar que los aditivos cumplan con sus hojas técnicas así como la fecha de vencimiento y el estado de éstos materiales.

**La mezcla;** La supervisión controla que los parámetros físicos de la mezcla, estén dentro del rango permitido y de acuerdo al diseño de mezclas establecido, los controles se realizan a:

- Sedimentación
- Fluidez
- Densidad

Estos ensayos se realizan periódicamente, y como mínimo al inicio de cada inyección, de igual manera se debe controlar el diseño de mezclas completo una vez por semana.

#### **6.1.3 Verificación de los equipos**

Antes de iniciar los trabajos de perforación e inyección, se debe verificar la calidad de los equipos, revisando el estado de los equipos de acuerdo a la hoja técnica y en conjunto con los operadores de perforación e inyección, las barras de perforación y brocas debe verificarse su uso, o si son nuevas, los cuáles deben ser adecuados para el tipo de roca a perforar.

#### **6.1.4 Presión de inyección**

Se debe controlar la calibración del registro y la computadora de la central de inyección, verificándose la presión y el volumen; el control de la presión debe ser riguroso y no debe haber elevaciones de presión bruscas en el proceso de la inyección, ya que esto, puede producir hidrofracturamiento en la roca. Se debe hacer verificación durante la inyección,

ya que hay posibilidad que algún sensor del registro falle y se pueda estar haciendo una mala inyección.



Figura 6-2: verificación de la presión en el manómetro del registro



Figura 6-3: Verificación de la presión en el manómetro de la boca del taladro.

#### ***6.1.5 Control de la lechada durante la inyección***

Idealmente, la presión en cada etapa debe aumentar lenta y constantemente hasta llegar a la presión de rechazo. Si la presión aumenta demasiado rápida, o si sube bruscamente, el bombeo debe ser inmediatamente reducido y ajustado hasta mantener un aumento lento y uniforme. En cada taladro y cada tramo, se controla la inyección en la computadora en tiempo real, haciendo un seguimiento al monitoreo de presión y volumen ver Figura 6-4.

Es importante estar atento en el área de inyección en caso de pérdida de presión repentina, y subida de caudal, es posible que haya una fuga superficial y tengamos una falsa inyección ver Figura 6-5, zona de fugaz superficiales.

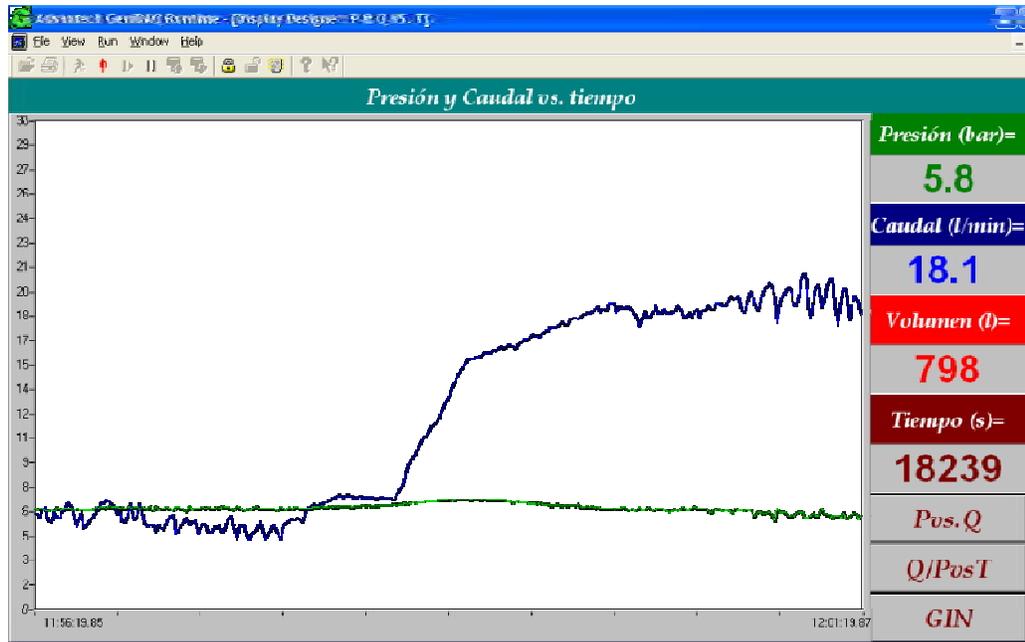


Figura 6-4: Control de la inyección en tiempo real en la computadora

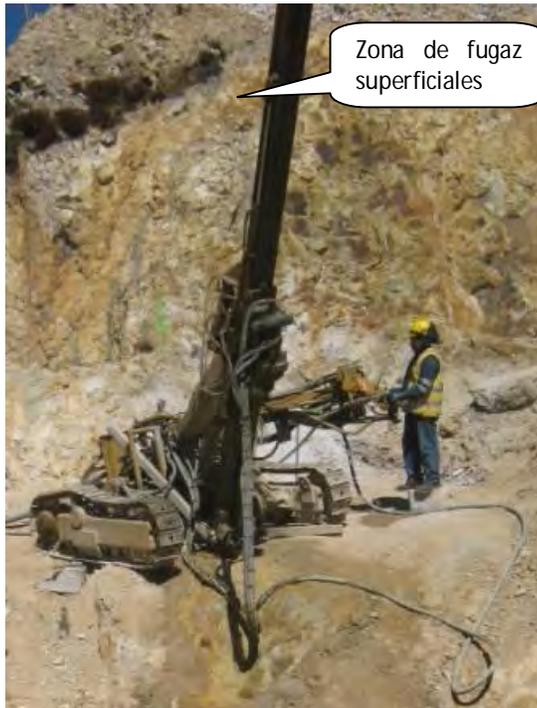


Figura 6-5: Zona de fugaz superficiales



Figura 6-6: Instalación de niple de acero para el control de inyecciones de contacto

## 6.2 ABSORCIONES, CRITERIOS DE CIERRE Y EVALUACIÓN ESTADÍSTICA

6.2.1 CONTROL DE LAS ABSORCIONES; Se realiza mediante los reportes y los informes gráficos de inyección, ver Figura 6-7 y Cuadro 6-1

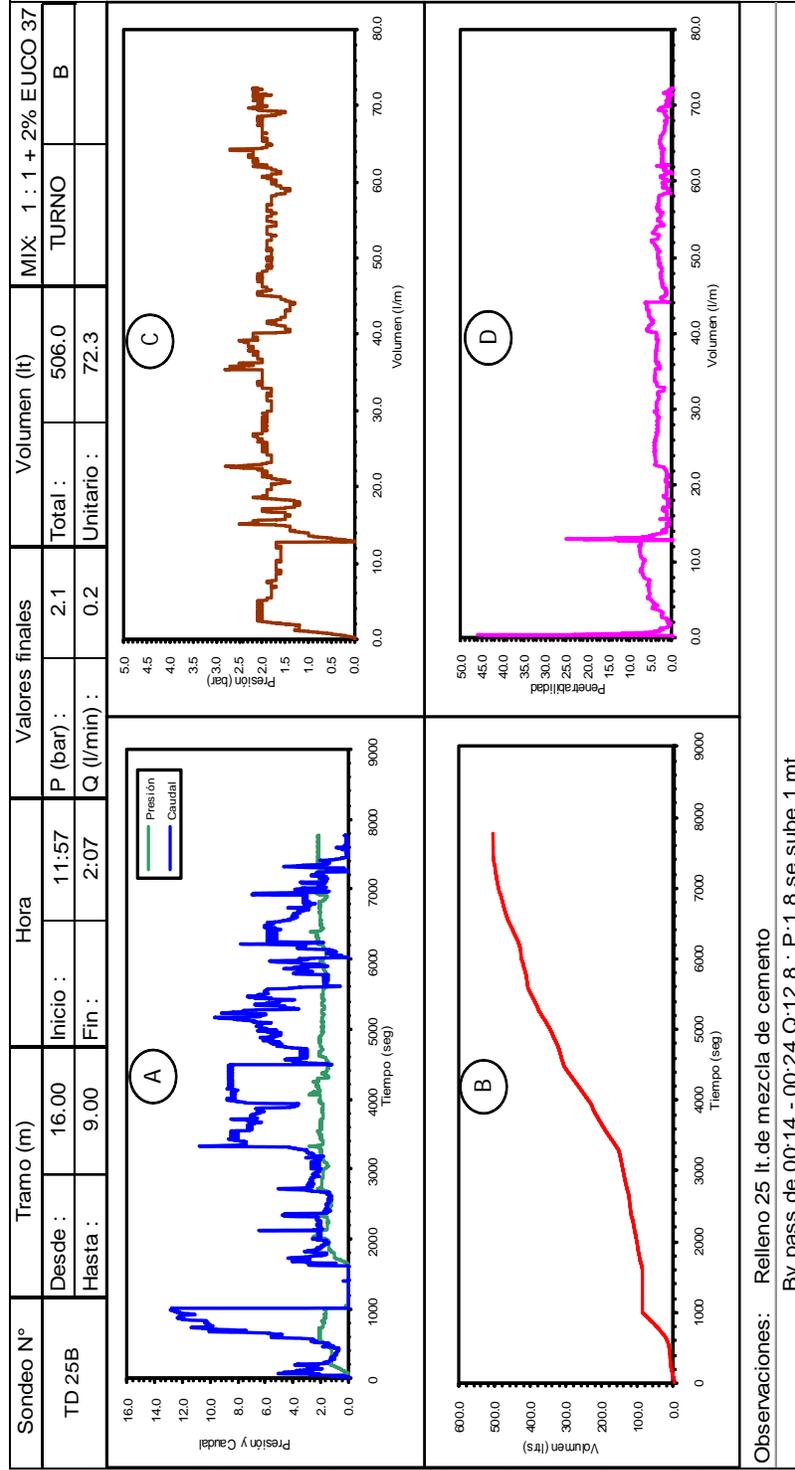


Figura 6-7: Ejemplo de control de registro grafico y de inyección

STATION	Codigo de Taladro	Long de Taladro	DATE		Hora		STAGE (m)		Length stage	MIX	VOLUMEN		RELLENO/RILL		TOMATAKE		Grout Take (Kg/m.)	Presion Final bar	Caudal Final l/min	CONTROL DE CALIDAD		
			Inicio	Final	De	A	RELLENO	Lts			Cemento (bolsas)	Cemento (kg)	Cemento (bolsas)	Cemento (kg)	Fluidez Sedim. %	Densid. gr/cm3						
PU1	PU1	35	14-Feb-11	2/14/11	2/14/11	0:30	35:00	34.70	1:1	69	6.19	123.80	6.24	124.80	3.60	# TEST	1	1	1	1	1	
		35	14-Feb-11	21:07	21:35	B	25.00	35.00	10.00	1:1	60	2.19	43.80	2.52	50.40	5.04	10.0	0.2	34.8	0.2	1.59	
		35	14-Feb-11	21:50	22:15	B	15.00	25.00	10.00	1:1	50	1.82	36.40	2.04	40.80	4.08	6.0	0.0	0.0	0.0		
		35	14-Feb-11	22:28	23:00	B	10.00	15.00	5.00	1:1	25	0.91	18.20	0.88	17.60	3.52	4.0	0.0	0.0	0.0		
		35	14-Feb-11	23:12	23:31	B	5.00	10.00	5.00	1:1	25	0.91	18.20	0.44	8.80	1.76	2.0	0.1	0.1	0.1		
		35	14-Feb-11	23:40	0:01	B	0:30	5:00	4:70	1:1	10	0.36	7.20	0.36	7.20	1.53	1.5	0.2	0.2	0.2		
PU3	PU3	35.5	15-Feb-11	2/15/11	2/15/11	0:30	35:00	34.70	1:1	608	4.66	93.20	24.15	483.00	13.92	# TEST	1	1	1	1	1	
		35.5	15-Feb-11	13:31	14:56	A	25.00	35.00	10.00	1:1	59	2.15	43.00	22.18	443.60	44.36	7.9	0.3	34.4	0.1	1.4	
		35.5	15-Feb-11	15:38	16:00	A	15.00	25.00	10.00	1:1	30	1.09	21.80	0.62	12.40	1.24	5.2	0.5	0.5	0.5		
		35.5	15-Feb-11	16:16	16:29	A	10.00	15.00	5.00	1:1	20	0.73	14.60	0.44	8.80	1.76	3.5	0.5	0.5	0.5		
		35.5	15-Feb-11	16:54	17:10	A	5.00	10.00	5.00	1:1	10	0.36	7.20	0.36	7.20	1.44	2.2	0.5	0.5	0.5		
		35.5	15-Feb-11	17:17	17:39	A	0:30	5:00	4:70	1:1	9	0.33	6.60	0.55	11.00	2.34	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	
PU5	PU5	37	15-Feb-11	2/15/11	2/15/11	0:30	37:00	36.70	1:1	300	6.56	131.20	51.12	1022.40	27.86	# TEST	3	2	3	2	3	
		37	15-Feb-11	20:42	21:20	B	27.00	37.00	10.00	1:1	60	2.19	43.80	10.95	219.00	6.2	6.2	9.9	33.9	0.1	1.38	
		37	15-Feb-11	21:20	21:57	B	27.00	37.00	10.00	0.9:1	330	0.00	0.00	12.99	259.80	7.1	7.1	10.8	38.4	0.1	1.42	
		37	15-Feb-11	21:57	22:42	B	27.00	37.00	10.00	0.8:1	304	0.00	0.00	12.99	259.80	9.5	9.5	0.0	46.1	0.1	1.49	
		37	15-Feb-11	20:42	22:42	B	27.00	37.00	10.00			2.19	43.80	36.93	738.60	73.86						
		37	15-Feb-11	23:24	0:23	B	17.00	27.00	10.00	1:1	50	1.82	36.40	10.07	201.40	20.14	6.8	0.1	0.1	0.1	0.1	
PU5	PU5	37	15-Feb-11	0:50	1:10	B	10.00	17.00	7.00	1:1	35	1.28	25.60	0.62	12.40	1.77	4.0	0.3	0.3	0.3		
		37	15-Feb-11	1:22	1:34	B	5.00	10.00	5.00	1:1	25	0.91	18.20	0.11	2.20	0.44	2.1	0.1	0.1	0.1		
		37	15-Feb-11	1:42	1:54	B	0:30	5:00	4:70	1:1	10	0.36	7.20	3.28	65.60	13.96	0.7	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
		37	15-Feb-11	2:40	2:52	B	0:30	5:00	4:70	1:1	3	0.00	0.00	0.11	2.20	0.47	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
		37	15-Feb-11	2:40	2:52	B	0:30	5:00	4:70	1:1	3	0.00	0.00	0.11	2.20	0.47	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
		37	15-Feb-11	2:40	2:52	B	0:30	5:00	4:70	1:1	3	0.00	0.00	0.11	2.20	0.47	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	

Cuadro6-1: Ejemplo de control de registros en base de datos

## 6.2.2 CRITERIOS DE CIERRE

Estos son utilizados para evaluar el estado de cierre de la cortina de inyección

### a) Criterios de permeabilidad

- Houlby (1977)<sup>1</sup> recomienda el uso de 1 a 3 unidades Lugeon, para el caso permeabilidades de  $1 \times 10^{-3}$  a  $1 \times 10^{-5}$  se recomienda uso de cemento convencional con aditivos, cuando la permeabilidad es baja, es necesario para el diseño de la cortina de la presa el uso de grout a base de cemento ultrafino, con la combinación de aditivos para minimizar la cohesión y asegurar la estabilidad.

### b) Criterios de toma (absorción)

Los criterios estándares aplicados para grout, fueron definidos por Deere (1976)<sup>2</sup> creando una simple clasificación ver tabla 6-2, en 1982 Deere, propone el uso de límites de grout de acuerdo a absorción ver Tabla 6-3

SISTEMA DE CLASIFICACION DE TOMAS DE GROUT PROPUESTA POR DEERE			
TOMA DE CEMENTO (kg/m)	COLOR	TOMA DE GROUT	CLASIFICACION
	Amarelo	0 - 12.5	MUY BAJA
	Naranja	0 - 25	BAJA
	Verde	25 - 50	MODERADAMENTE BAJA
	Cian	50 - 100	MODERADA
	Azul	100 - 200	MODERADAMENTE ALTA
	Rojo	200 - 400	ALTA
	Magenta	> de 400	MUY ALTA

Cuadro6-2: Clasificación de absorciones de Grout

CRITERIOS DE TOMA MAXIMA SUGERIDA POR DEERE		
INTERVALOS DE PROFUNDIDAD	ASORCION DE GROUT	CLASIFICACION
0 - 10	25	MUY BAJA
10 - 20	34	BAJA
20 - 30	50	MODERADAMENTE BAJA
> 30	100	MODERADA

Cuadro6-3: Absorciones máximas

En la presa de relaves La Hierba, del proyecto Cerro Corona, se usó los siguientes criterios: para la cortina aguas arriba de 0-20 m (20 kg/m) y >20m (40 kg/m), para la cortina aguas abajo de 0-30 m (20 kg/m) y > 30 m (80 kg/m).

<sup>1</sup>Dam Foundation Grouting, Kenneth D. Weaver, (2007) pag. 382

<sup>2</sup>Dam Foundation Grouting, Kenneth D. Weaver, (2007) pag. 384

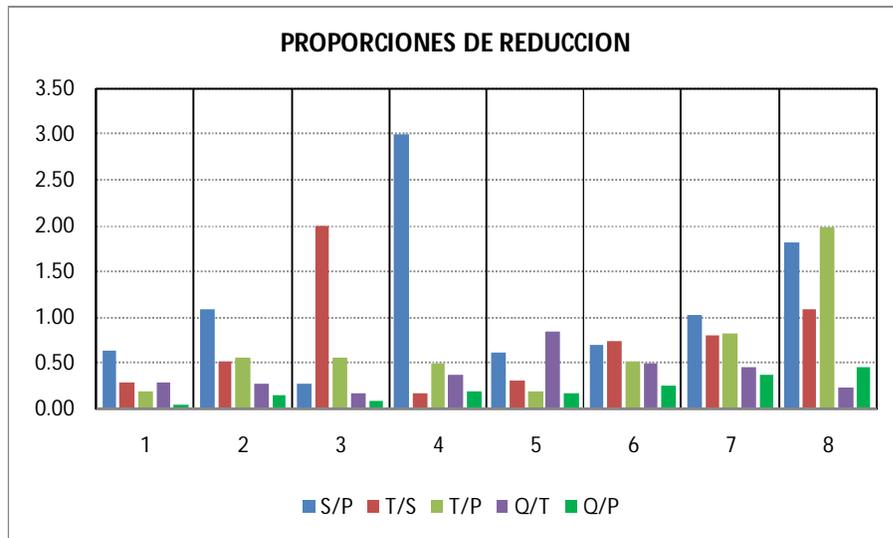
### 6.2.3 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA

Los procedimientos estadísticos usados para revisar la evaluación de los datos obtenidos durante el proceso del programa de la cortina de inyección. En general, éste método tiene un potencial aplicable durante la construcción de segmentos de la cortina completada, se examina estadio por estadio y se realiza un análisis de los datos evaluando los estadios que se ha inyectado y se culminó rechazando a presión máxima y caudal máximo.

#### a) Reducción de proporciones

	ESTADIOS (m)		PROMEDIOS DE TOMAS (kg/m)					PROPORCIONES DE REDUCCION				
			P	S	T	Q	QN	S/P	T/S	T/P	Q/T	Q/P
1	0.9	3	324	208	60	18	8	0.64	0.29	0.19	0.30	0.06
2	3	6.1	87	94	48	13	8	1.08	0.51	0.55	0.27	0.15
3	6.1	9.1	150	42	84	14	8	0.28	2.00	0.56	0.17	0.09
4	9.1	12.2	143	428	71	27	8	2.99	0.17	0.50	0.38	0.19
5	12.2	15.2	102	64	20	17	4	0.63	0.31	0.20	0.85	0.17
6	15.2	18.3	55	38	28	14	4	0.69	0.74	0.51	0.50	0.25
7	18.3	21.3	38	39	31	14	4	1.03	0.79	0.82	0.45	0.37
8	21.3	24.4	43	78	85	20	0	1.81	1.09	1.98	0.24	0.47

P= PRIMARIOS, S=SECUNDARIOS, T=TERCIARIOS, Q=CUATERNARIOS, QN=QUINARIOS



Cuadro 6-4: Proporciones de reducción

#### b) Sumatoria de curvas

En la sumatoria de curvas se hace una comparación y evaluación de las tomas de grout, éste consiste en generar gráficos de series semi logarítmicos, acumulando los porcentajes de los intervalos en el eje (X) y colocando los parámetros de las tomas de 1 kg/m a 1000 kg/m contra el eje (Y) que es en porcentaje. Una comparación de las curvas se puede observar en los figuras 6-8 y 6-9.

Ejemplos de sumatoria de curvas en la presa La Hierba proyecto Cerro Corona, los cuáles se detallan en los cuadros siguientes.

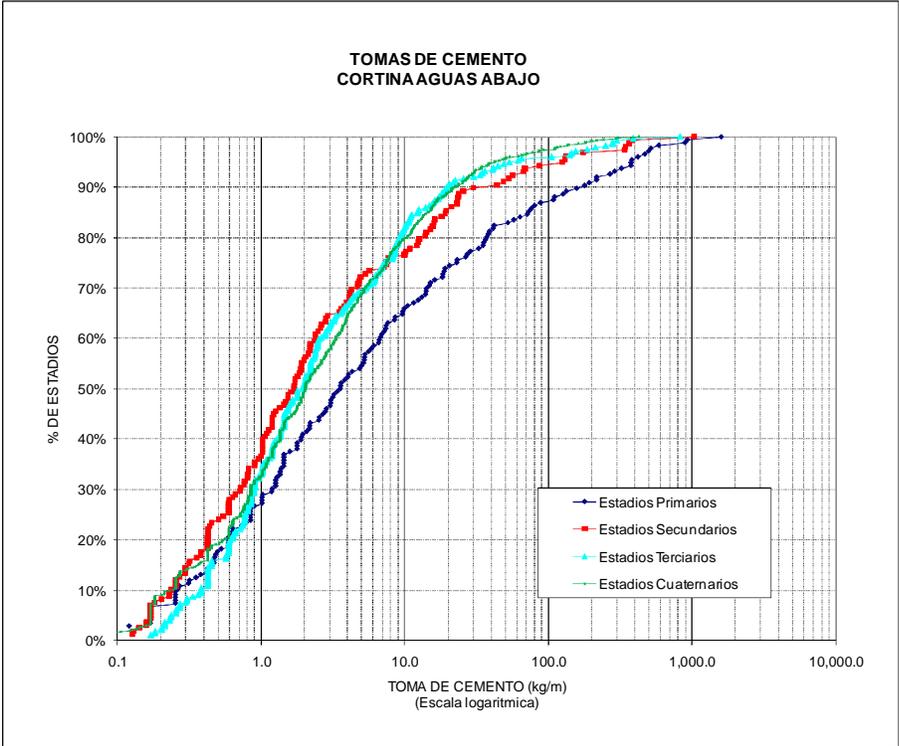


Figura 6-8: Sumatoria de curvas en la cortina aguas abajo

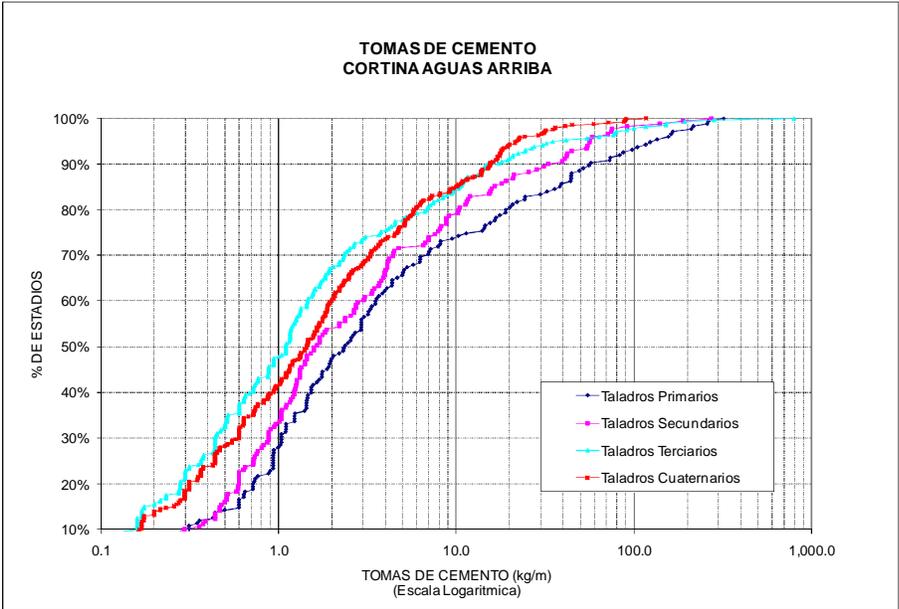


Figura 6-9: Sumatoria de curvas en la cortina aguas arriba

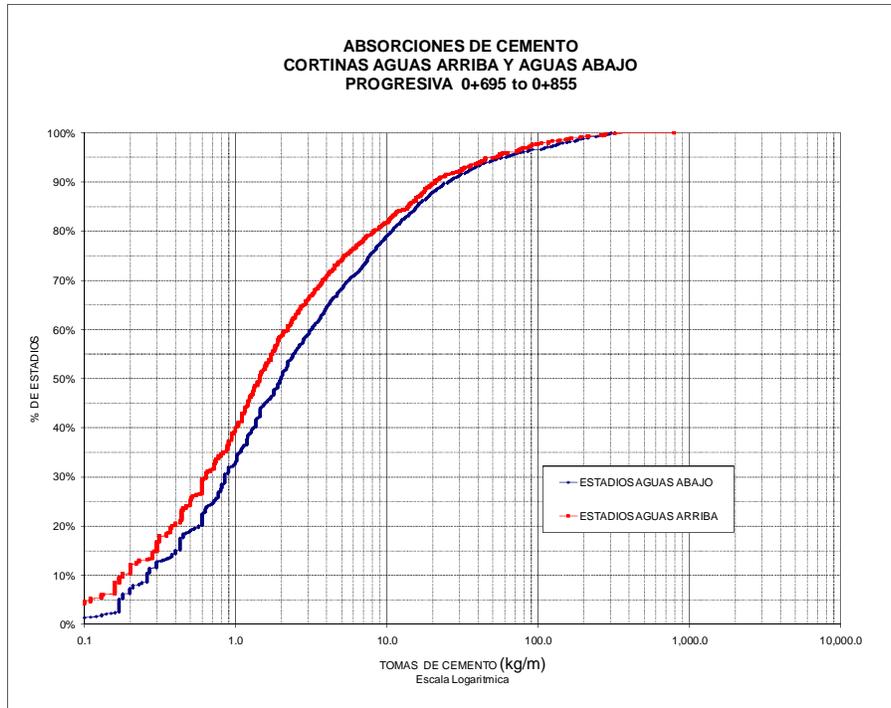


Figura 6-10: Sumatoria de curvas en ambas cortinas aguas abajo y aguas arriba

*c) La distribución de frecuencias*

Los histogramas de frecuencia son, basados en la clasificación de toma promulgada por Deere (1976)<sup>3</sup>, con éstos histogramas podemos comparar, como está la absorción de los taladros de un tramo o varios tramos o estadios de taladros primarios, secundarios, terciarios y cuaternarios ver Figuras 6-11 y 6-12

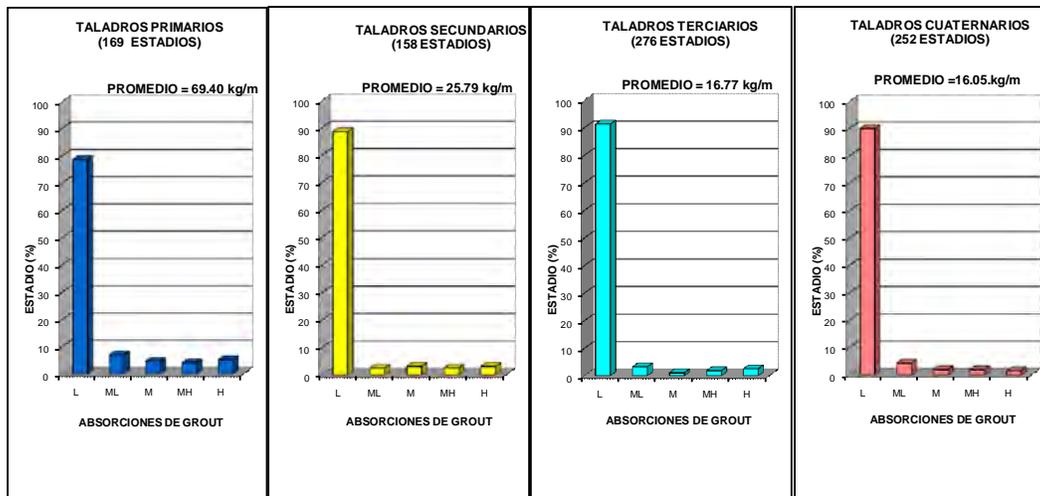


Figura 6-11: Histograma de absorciones de la cortina aguas debajo de la presa La Hierba

<sup>3</sup>Dam Foundation Grouting, Kenneth D. Weaver, (2007) pag. 389

**CLASIFICACION DE LAS ABSORCIONES DE GROUT**

L = LOW  
 ML = MODERATELY LOW  
 M = MODERATE  
 MH = MODERATELY HIGH  
 H = HIGH

0-25 kg/m  
 26-50 kg/m  
 51-100 kg/m  
 101-200 kg/m  
 >200 kg/m

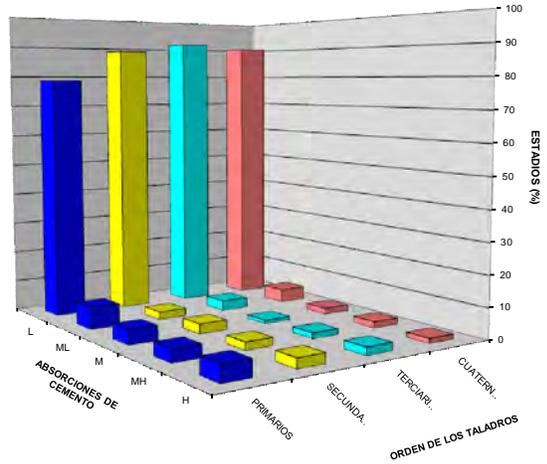
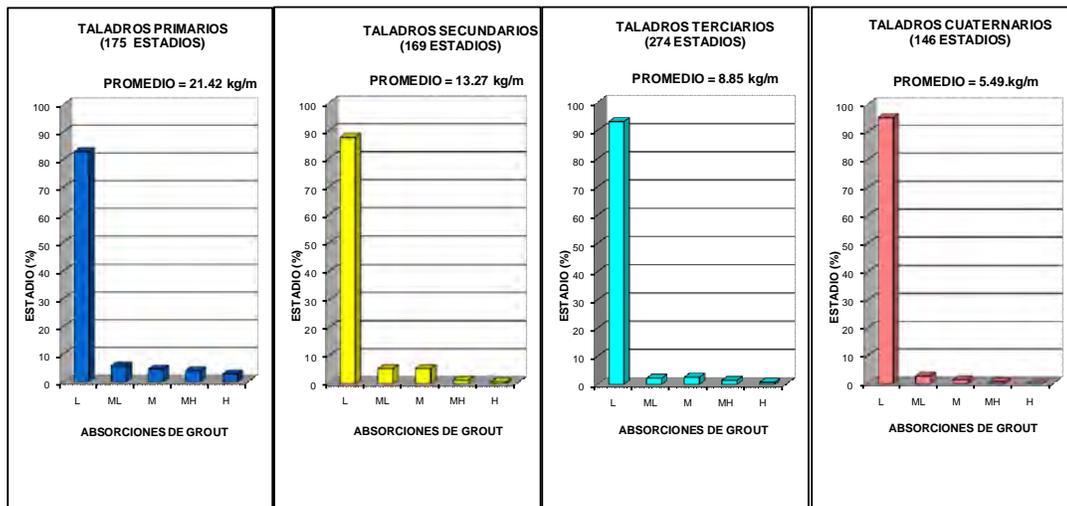


Figura 6-12: Histogramas de la cortina aguas abajo tridimensional



**CLASIFICACION DE LAS ABSORCIONES DE GROUT**

L = LOW  
 ML = MODERATELY LOW  
 M = MODERATE  
 MH = MODERATELY HIGH  
 H = HIGH

0-25 kg/m  
 26-50 kg/m  
 51-100 kg/m  
 101-200 kg/m  
 >200 kg/m

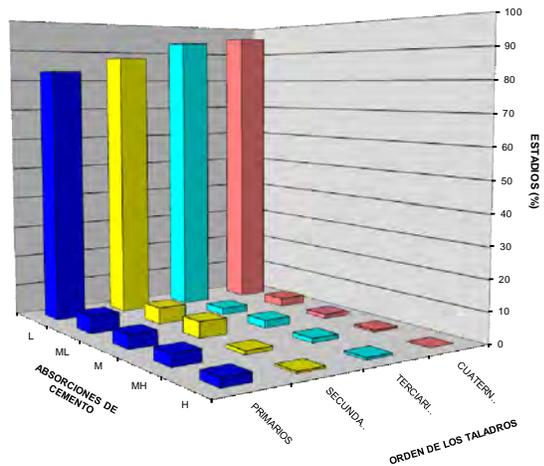
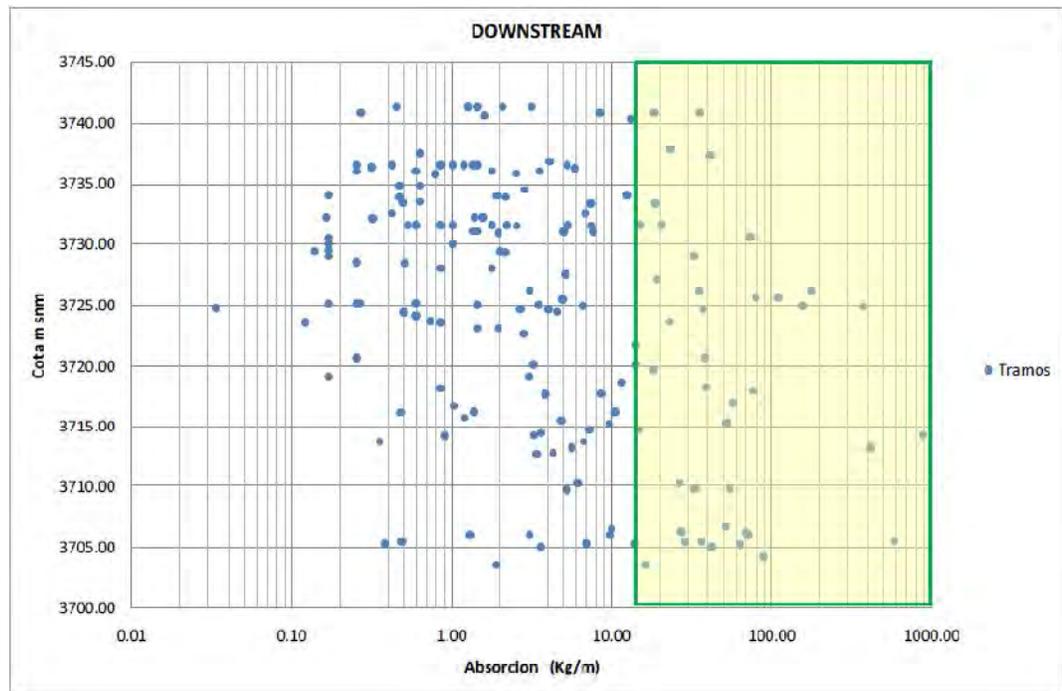


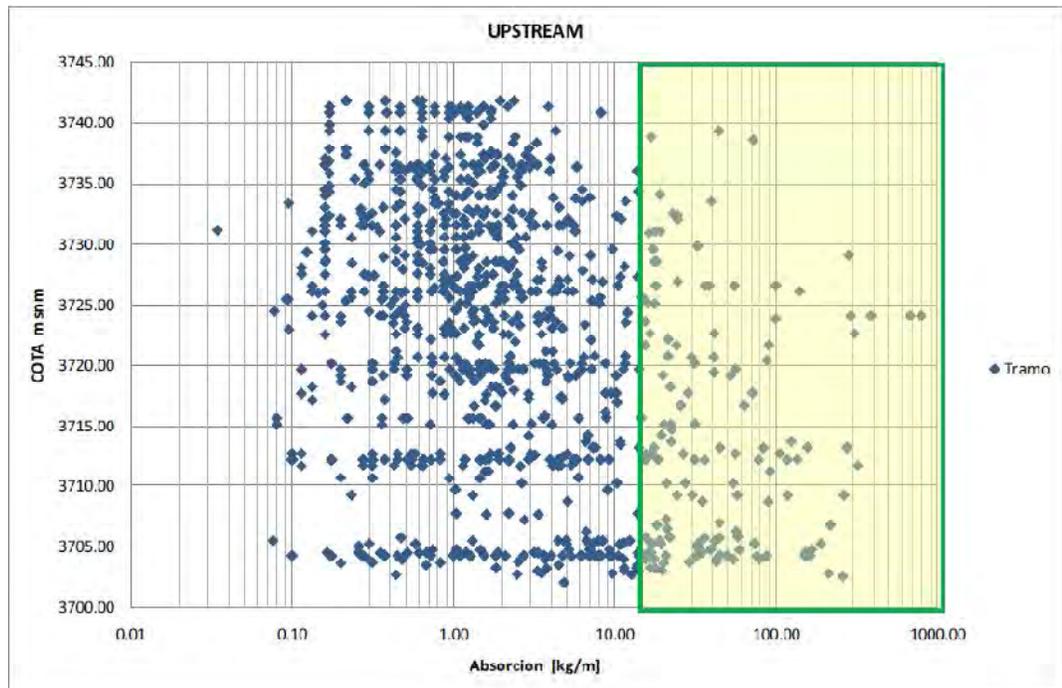
Figura 6-13: Histogramas de la cortina aguas arriba



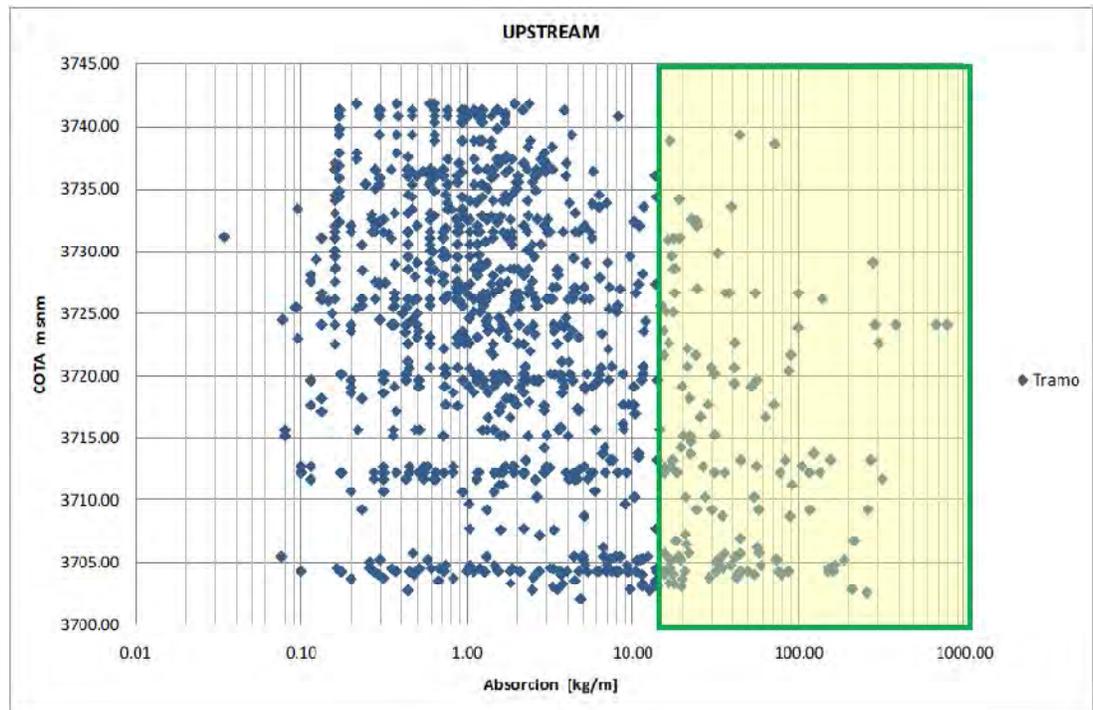
e) *Evaluación Logarítmica*



Cuadro 6-5: Ejemplo de evaluación logarítmica para la cortina aguas abajo presa La Hierba, proyecto Cerro Corona



Cuadro 6-6: Ejemplo de evaluación logarítmica para la cortina aguas arriba presa La Hierba, proyecto Cerro Corona



Cuadro 6-7: Ejemplo de evaluación logarítmica para la cortina aguas arriba absorciones mayores a 15 kg/m, presa La Hierba, proyecto Cerro Corona.

## CONCLUSIONES

- Las inyecciones de grouting en la cortina de la fundación es un proceso mediante el cual, se sellan las fisuras o porosidades impermeabilizando y consolidando la zona de cortina, para esto, es importante tener claro los conceptos y definiciones, de los procedimientos de diseño, y construcción de cortinas de grouting.
- Antes de cualquier diseño de cortina se debe entender el tipo de proyecto en el cuál se realizarán las cortinas de inyección, así mismo, revisar la información existente y elaborar un programa de investigación del sitio, realizando investigaciones geológicas y geotécnicas mediante perforaciones de exploración, con recuperación de testigos y ensayos de pruebas de agua. De igual manera se evaluará la calidad del agua subterránea y la calidad de agua para los diseños de mezclas.
- Los ensayos de permeabilidad en las rocas fisuradas, cumplen un papel muy importante, para el diseño de mezclas de la inyección, para lo cuál se tiene que tener buen conocimiento de los procedimientos de estos ensayos de Lugeon o Lefranc, las presiones de las pruebas y tramos definidos.
- Es muy importante el conocimiento de la calidad de agua subterránea de la zona donde se construirá la cortina de inyecciones, para la elección de los materiales de los diseños de mezclas de la inyección.
- El agua que se utilizará, en los diseños de mezclas, debe ser el mismo que se empleara, en las cortinas de inyección, esta agua debe cumplir con los parámetros máximos de calidad de agua para grouting.
- Para el diseño de mezclas de grouting, se debe verificar: los equipos de laboratorio, materiales, y el personal técnico que elaborará estas pruebas debe contar, con experiencia; personal capacitado y con experiencia deberá evaluar las propiedades de los materiales, ya sea cemento y aditivos, controlar los ensayos de mezclas en el laboratorio los cuáles son: densidad, fluidez, cohesión, sedimentación, tiempo de fraguado, temperatura y resistencia a la compresión. Luego de tener varios ensayos realizados, se debe realizar la evaluación de estas mezclas, y decidir que mezclas se usarán en la construcción de las cortinas de inyección, de acuerdo al método de inyección elegido.
- Las presiones para las inyecciones son evaluadas de acuerdo a la altura de la presa, la evaluación: geológica, geotécnica y hidrogeológica; los ensayos de pruebas de agua influyen bastante en la toma de decisión de las presiones que se usarán en las cortinas de inyección generalmente varían en el rango de 0.25 a 1.0 bar/m.

- Las lechadas de cemento tienen limitaciones de materiales y operación; estas limitaciones en los materiales son: tamaño y geometría de las fisuras, tamaño de las partículas de cemento, presencia de minerales en el agua o en los materiales de fundación, asentamiento de las partículas de cemento suspendidas en la lechada. Y las limitaciones de operación: generación de excesivas presiones de inyección, el cual produce hidrofracturamiento, uso de equipos no apropiados, deficiente espaciamiento y orientación de los taladros.
- De los dos métodos de inyección planteados en esta tesis; convencional y GIN , el que más se ha usado en diferentes proyectos mineros en el Perú, es el método convencional, ya que permite usar varias mezclas, tiene limitaciones de volumen y presiones de rechazo, se puede usar en cualquier tipo de roca incluso en material heterogéneo.
- El diseño de una o varias cortinas está en función a la permeabilidad de la zona, en proyectos mineros en el Perú generalmente en las presas de relaves se ha realizado una sola cortina, pero en las presas de agua 3 cortinas con su grout cap. La altura de los taladros generalmente es un tercio de la altura de la presa mas una constante, esto varía de acuerdo a la geología y permeabilidad. El espaciamiento y la inclinación de los taladros está en función de la geología (evaluación del RQD) y la permeabilidad.
- Las inyecciones en suelos granulares, hace que la resistencia del material al corte aumente, agregando cohesión al suelo a su vez gane impermeabilización, para comprobar el mejoramiento del suelo realizar ensayos triaxiales.
- La estimación de cantidades; perforación y de cemento es muy importante para los costos en los trabajos de inyección, el contratista evaluará sus rendimientos de perforación e inyección para esas cantidades estimadas.
- Para el uso de la técnica de Jet Grouting; se debe seleccionar el tipo de mezcla, la presión, la velocidad de flujo, diámetro aproximado de la columna de mezcla suelo cemento, geometría de tratamiento y parámetros que regulan la aplicación práctica.
- El control de calidad de las cortinas de grouting; es muy importante, ya que evalúa la perforación, materiales y equipos, controla las mezclas diseñadas, controla la inyección en tiempo real y evalúa las absorciones de las cortinas de grouting en función a los criterios de cierre.
- Para el diseño de mezclas usado en el proyecto Cerro Corona (Presa Las Hierbas), se realizó una batería de más de 30 ensayos con cemento tipo MS Pacasmayo, con el objetivo de buscar las mezclas más apropiadas en función a fluidez, densidad, sedimentación, fragua y cohesión, las mezclas más usadas fueron: a:c:aditivo(Euco37),

1:1+2%, 0.8:1+2%, 0.7:1+2%, 0.6:1+2%, 0.5:1+2%, para este proyecto solo se usaron 2 cortinas de inyección con profundidades hasta 45 m y los ángulos de inclinación de 15 grados por la gran cantidad de fracturación y permeabilidades altas entre  $10E-2$  y  $10E-3$  cm/seg. Hasta profundidades de 40 m.

- En el proyecto Cerro Verde (Presa Huayrondo), se construyó el groutcap, y luego se realizaron 2 cortinas aguas abajo y aguas arriba del eje de la presa, la inclinación es de 20 a 30 grados con la vertical, y la orientación es la línea central de la presa, el espaciamiento de los taladros primarios cada 6 m secundarios cada 3 m terciarios cada 1.5 m cuaternarios y quinaros de acuerdo a la necesidad, el diámetro del taladro es de 7.5 cm. Calidad del agua contiene lo siguiente: Cu = 2.57 g/l, Solución acida = 3.40 g/l, pH=1.81, Resistencia Eléctrica = 371 mV, Ppm = 28, Fe = 5.2 g/l. La mezcla usada con cemento Yura Portland Tipo I, 0.67:1 + 1.5%, 0.5:1 + 2%, 0.5:1; estas mezclas no reaccionan ante los ácidos y la calidad de agua, Cemento ultrafinó (Rheocem y aditivo rehobuil); 1:1+2%.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda para proyectos futuros en cortinas de inyecciones y controlar los flujos de agua, la investigación preliminar del terreno cubriendo (la permeabilidad, la distribución de fisuras, el contenido de sales del terreno y del agua subterránea), luego de las investigaciones preliminares, elaborar los diseños de mezclas, y realizar inyecciones de prueba por lo menos en 3 taladros a lo largo del eje de la presa para determinar la presión de inyección de las mezclas a usar.
- En excavaciones subterráneas en donde la estabilización del techo y paredes laterales es clave en proyectos donde el agua se convierte en un problema crítico de resolver. Normalmente se suele aplicar únicamente en aquellas zonas donde existan grandes cantidades de filtraciones y que puedan dar lugar a un caudal importante. La técnica consiste en perforar una serie de sondeos que crucen la zona de filtración y realizar entonces la inyección. El fluido puede ser de varios tipos, aunque todos con características comunes de fraguado rápido. Entre los más destacados resaltan las lechadas de cemento con arena y dependiendo probablemente aditivo (acelerante) donde tienen la propiedad de fraguar rápidamente consiguiendo una gran expansión. El otro tipo de inyección son la químicas, con las que frecuentemente se usan compuestos de isocianato de un solo componente, añadiéndose a la inyección, una cierta cantidad de este producto catalizador. Estos sistemas reaccionan con el agua muy rápidamente, formándose una espuma que aumenta su volumen en un 30 a 40 % el cual hace que se selle la filtración.
- En taludes de roca, se recomienda para la técnica de grouting. Ejecutar un tratamiento del terreno por inyecciones existen 4 parámetros principales que se tendrá que determinar con detalle estos son:
  - ✓ Volumen de la mezcla a inyectar en cada zona
  - ✓ Presiones de inyección
  - ✓ Caudal de inyección
  - ✓ Tiempo de inyección

Radio de acción, Espaciamiento entre taladros, Esquema de sondeos, etc.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

- 1) American Society for Testing and Materials:
  - a. ASTM C 150 – Especificaciones Estándar para Cemento Pórtland.
  - b. ASTM C 940 - Expansión y Purga de Mortero de Cemento para concreto Precolocado- Agregado en el Laboratorio.
- 2) American Petroleum Institute API RP 13B, Procedimientos Estándar para Pruebas Fluidos de Perforaciones, Sección 1, Densidad (Peso del Lodo) y Sección 2, Viscosidad y Resistencia del Material Gelatinoso.
- 3) U.S. Army Corps of Engineers CRD-C 614 – Métodos de Prueba para Tiempo de Fraguado de Mezclas de Mortero de Cemento.
  - a. ASTM C 33, Especificación para Agregados de Concreto (*Specification for Concrete Aggregates*);
  - b. ASTM C 39, Método de ensayo para Resistencia a la Compresión de Especímenes de Concreto Cilíndricos (*Test Method for compressive Strength of cylindrical Concrete Specimens*);
  - c. ASTM C 150, Especificación para Cemento Portland (*Specification for Portland Cement*);
- 4) ASTM C 204, Método de Ensayo para Finura del Cemento Portland mediante Aparato de Permeabilidad de Aire (*Test Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus*);
- 5) ASTM D 2113, Método para Perforación de Testigos con Diamante para Investigación en el Sitio (*Method for Diamond Core Drilling for Site Investigation*).
- 6) ASTM D 1785, Especificación para Tubería Plástica de Cloruro de Polivinilo (PVC), Schedule 40, 80 y 120 (*Specification for Poly Vinyl Chloride (PVC) Plastic Pipe, Schedule 40, 80 and 120*),
- 7) Kizilbach Massrouf Dr. Ing., (2006-2008), Ing. principal de MWH, apuntes en los proyectos de Cerro Verde: Presa de Relaves (seepage) y Presa Huayrondo para filtraciones, en el proyecto Cerro Corona Presa las Gordas y LVU
- 8) Jaramillo Carlos, (2005), apuntes de campo (MWH)
- 9) U.S. Army Corps of Engineers (EM-1110-2-3606) 1984
- 10) Engineering geology field manual (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation) 2005
- 11) Cambefort Henri 1968, Inyección de Suelos primera edición
- 12) Warner James 2004, Practical Handbook of Grouting (soil, rock, and structures) James Warner, P.E. 2004

- 13) Carrillo Eliana 2005, Inyecciones de Suelos.
- 14) Lombardi, G. Deere, D. 1993, Diseño y Control del Inyectado empleando el principio GIN (Water Power and Dams Construction).
- 15) Francisco J. Tsao Santin(2008), Mejoramiento de suelos con la técnica de Jet Grouting
- 16) Houlsby, 1990, Construction and design of cement grouting a guide to grouting in rock foundation,
- 17) Kenenet D. Weaver y Donal A. Bruce, Ph. D. 2007, Dam foundation grouting
- 18) Riley Donal, 2010, Apuntes sobre inyecciones en rocas, en el proyecto Cerro Corona, Presa las Aguilas y LVU las Aguilas.
- 19) Francisco J. Tsao Santín, 2008Mejora de suelos con la técnica de Jet Grouting,
- 20) Giordano, Pablo tratamiento de fundaciones – inyecciones
- 21) U.S. Army Corps of Engineers. Engineer Manual 1110-2-3506. 1984, “Grouting Technology”