

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



**IMPERMEABILIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO EN UNA PRESA DE
RELAVES EMPLEANDO INYECCIONES: APLICACIÓN, METODOLOGÍA Y
ASEGURAMIENTO DE CALIDAD**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

JUAN EDUARDO VELARDE MANRIQUE

LIMA – PERU

2009

PRÓLOGO

El autor de la presente tesis tiene estudios de ingeniería civil y experiencia en geotecnia minera, y presenta esta tesis como producto de su investigación e interés respecto a las inyecciones de lechada de cemento (grouting) para trabajos de impermeabilización del macizo rocoso en la fundación de presas de relave.

La presente tesis presenta al lector la metodología, aplicación y aseguramiento de calidad de la construcción de una cortina de inyecciones realizada en el año 2006, para la presa de relaves de la Compañía Minera Antamina S.A. en la provincia de Huari de la región Ancash.

Así mismo, la tesis muestra información teórica y práctica de los factores, parámetros y variables que están presentes en un programa de inyecciones, tales como los diferentes tipos de mezcla y dosificaciones utilizadas, las presiones de inyección, los caudales de inyección, las gráficas P-Q, las curvas de penetrabilidad, el control de los volúmenes inyectados, la supervisión y la verificación permanente del estado de la roca, dado que con la metodología y el criterio presentados en este trabajo se evita el hidrofracturamiento de la roca.

Un aporte importante de la tesis es la descripción detallada de los procedimientos de inyección en suelo y en roca que se presentan, que expone el criterio utilizado para el control de las inyecciones y las diferencias entre el método GIN y el método de control utilizando el criterio de penetrabilidad, que el autor denomina como el método GIN "modificado".

Así mismo, la tesis presenta una serie de tablas, formatos, figuras, perfiles de inyección y fotografías que ayudarán al lector como guía para la aplicación o ejecución de un trabajo de inyecciones a futuro.

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones presentadas en este trabajo exponen la efectividad del control de inyección utilizando el criterio de penetrabilidad y brindan al lector consejos a seguir en un programa de inyecciones como producto de la investigación del autor en el presente trabajo.

El Autor

AGRADECIMIENTOS

La primera mención de agradecimiento va dirigida al Ing. Grant Bonin y al Dr. Mike Jefferies, por sus valiosos aportes y sugerencias, gran paciencia e inagotable entusiasmo para el trabajo de investigación.

Un agradecimiento especial para el Ing. Germán Tello, asesor de la presente Tesis, y al Ing. Américo Bustamante por sus consejos en la elaboración de este trabajo.

Finalmente un agradecimiento especial a todos los trabajadores involucrados en la construcción de la cortina de inyección de la presa de relaves de la Compañía Minera Antamina S.A. realizada en el año 2006.

ÍNDICE

RESUMEN	I
Lista de Símbolos	III
Lista de Tablas.....	IV
Lista de Figuras	V
INTRODUCCIÓN	1
<i>Capítulo 1 GENERALIDADES</i>	<i>2</i>
1.1 General	2
1.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Metodología de Trabajo.....	3
1.4 Historia de las Inyecciones	3
1.5 Elementos para un Trabajo de Inyecciones	4
<i>Capítulo 2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....</i>	<i>5</i>
2.1 Consideraciones Generales	5
2.1.1 Anticipación de los Resultados	5
2.1.2 Inyección de Prueba.....	5
2.1.3 Profundidad de la Cortina de Inyección.....	5
2.1.4 Cortinas de Línea Simple vs. Cortinas de Múltiples Líneas	6
2.1.5 Espaciamiento de los Taladros de Inyección	6
2.1.6 Presiones de Inyección	6
2.2 Consideraciones Geológicas.....	10
2.2.1 Características Geológicas Primarias	10
2.2.2 Cavidades de Solución (Karst).....	10
<i>Capítulo 3 MATERIALES DE INYECCIÓN Y DISEÑO DE MEZCLA.....</i>	<i>11</i>
3.1 Materiales de Inyección.....	11
3.1.1 Cemento	11
3.1.2 Puzolanas.....	12
3.1.3 Bentonita	13
3.1.4 Rellenos.....	13
3.1.5 Aditivos Químicos	14
3.2 Propiedades de los Materiales	15
3.2.1 Viscosidad	15
3.2.2 Cohesión	15
3.2.3 Gravedad Específica	16
3.2.4 Decantación	16
3.2.5 Granulometría.....	17
3.3 Reología de la Lechada.....	17
3.4 Diseño de Mezcla.....	19

3.4.1	Consideraciones Generales	19
3.4.2	Relaciones Agua:Cemento.....	19
3.4.3	Lechadas con Bentonita.....	20
3.4.4	Lechadas con Arena.....	20
3.4.5	Lechadas con Fly Ash.....	20
3.4.6	Lechadas con Cemento y Arcilla	21
Capítulo 4 CONTROL DE INYECCIÓN, PRUEBAS DE AGUA Y TÉCNICAS DE INYECCIÓN 22		
4.1	Control de Inyección	22
4.1.1	Método GIN.....	22
4.1.2	Control por Penetrabilidad (Método GIN Modificado).....	26
4.2	Pruebas de Agua.....	29
4.2.1	Consideraciones Generales	29
4.2.2	Pruebas de Lugeon	30
4.2.3	Pruebas de Rutina	35
4.3	Técnicas de Inyección	35
4.3.1	Inyección Ascendente	35
4.3.2	Inyección Descendente.....	36
Capítulo 5 PRESA DE RELAVES DE ANTAMINA: BREVE DESCRIPCIÓN E INVESTIGACIÓN DE LA FUNDACIÓN..... 39		
5.1	Introducción.....	39
5.2	Breve Descripción de la Presa de Relaves de Antamina.....	39
5.2.1	Ubicación del Proyecto.....	39
5.2.2	Materiales que Conforman la Presa.....	40
5.2.3	Dimensiones y Fases de Construcción	41
5.3	Geología de la Presa de Relaves de Antamina	41
Capítulo 6 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FUNDACIÓN DE LA PRESA DE RELAVES CON FINES DE IMPERMEABILIZACIÓN..... 43		
Capítulo 7 DISEÑO Y PROGRAMA DE INYECCIÓN EN LA PRESA DE RELAVES DE ANTAMINA..... 46		
7.1	Áreas de Trabajo de Inyección.....	46
7.2	Consideraciones de Diseño	47
7.3	Programa de Inyección.....	47
7.3.1	Metodología de Trabajo	47
7.3.2	Secuencia del Trabajo.....	49
7.3.3	Diseño de Mezcla de Inyección	51
7.3.4	Modificaciones de Diseño	52
7.3.5	Procedimientos de Inyección	53
7.3.6	Progreso y Cantidades.....	54
7.3.7	Aseguramiento de Calidad de las Mezclas de Inyección.....	55
7.4	Mejoramiento Alcanzado del Terreno	56

7.4.1	Zona de Filtro – Estribo Derecho	57
7.4.2	Extensión de la Cortina y Plinto – Estribo Derecho	58
7.5	Resumen de Absorciones de Lechada	58
7.6	Examen del Plinto del Estribo Derecho.....	59
CONCLUSIONES		60
RECOMENDACIONES		63
Bibliografía		66

ANEXOS

Anexo I	Álbum Fotográfico
Anexo II	Planos y Figuras Generales
Anexo III	Mapeo del Alineamiento del Plinto
Anexo IV	Resultados de los Ensayos de Mezcla
Anexo V	Procedimientos para Inyección en Roca
Anexo VI	Perfiles del Progreso de las Inyecciones
Anexo VII	Información del Control de Calidad
Anexo VIII	Resultados de las Pruebas de Agua
Anexo IX	Gráficos Resumen de los Resultados Alcanzados
Anexo X	Resúmenes de las Absorciones de Lechada
Anexo XI	Análisis Detallado del Plinto
Anexo XII	Secciones del Análisis de Filtraciones

RESUMEN

La presente tesis tiene como principal objetivo presentar una aplicación de la metodología de inyección de lechada utilizando el criterio de penetrabilidad (método GIN modificado), presentando el análisis, investigación, aplicación y resultados de un trabajo de inyecciones realizado en nuestro país.

Asimismo, en el Capítulo 1 se presenta una bibliografía sobre la evolución de los trabajos de inyección y sus mejoras a través del tiempo, como también definiciones técnicas utilizadas en los trabajos de inyección, como son las técnicas de inyección ascendente y descendente, utilizadas ampliamente en todo trabajo de inyección.

La metodología de inyección utilizada es una modificación del método GIN denominada "Control por Penetrabilidad", la cual se basa en el monitoreo y control de la penetrabilidad mediante los parámetros de inyección, como son la presión de inyección, el caudal de inyección y el valor de la penetrabilidad. Una de las variantes de este método es el uso de varios tipos de mezcla, el uso de la curva de penetrabilidad en vez de la curva GIN para el monitoreo de la inyección, minimizando de esta manera el daño del macizo rocoso por hidrofracturamiento. Esta sección es explicada en el Capítulo 4.

En cuanto a la aplicación, en el Capítulo 5 se presenta un procedimiento de inyección para las condiciones geológicas-geotécnicas de la fundación de la presa de relaves de la mina Antamina, encontradas durante los primeros meses de trabajo, basadas en evitar el daño del macizo rocoso por hidrofracturamiento y asegurando una buena penetrabilidad.

El aseguramiento de calidad de las inyecciones, presentada en los Capítulos 6 y 7, involucró el control de calidad de los materiales, equipos de perforación, perforación de taladros exploratorios, medición de niveles piezométricos, logueo de testigos de perforación y de detritos de perforación, pruebas de agua, control de mezcla, control de la resistencia a la compresión no confinada de la lechada, control de inyección mediante monitoreo en tiempo real utilizando un software de inyecciones. Cabe mencionar que la tesis esta enfocada sólo a los trabajos realizados en el estribo derecho de la presa de relaves.

Finalmente en las conclusiones y recomendaciones se indica la eficiencia de la metodología planteada en esta tesis para el control de las inyecciones, reflejada en la impermeabilización obtenida del macizo rocoso de la fundación de la presa utilizada como aplicación y objeto de la presente tesis. El control del cierre de las inyecciones para la obtención de la impermeabilización se realizó mediante las pruebas Lugeon. El valor objetivo para asegurar el cierre alcanzado de la cortina de inyección fue de 2 UL (Unidades Lugeon). La media de las pruebas Lugeon estuvo por debajo del valor especificado, por lo que se verificó el cierre de la cortina y la buena aplicación de los trabajos de inyección.

Como parte del control y aseguramiento de la calidad de los trabajos de inyección y análisis de las inyecciones, se han elaborado histogramas, diagramas de flujo, perfiles de absorción de lechada, procedimientos de inyección en roca y en suelo propias del proyecto y un álbum fotográfico bastante ilustrativo, los cuales son presentados en los anexos de la presente tesis.

Finalmente, la tesis presenta en su contenido recomendaciones a considerar en los futuros trabajos de inyección en los cuales se presenten condiciones geológicas-geotécnicas similares a las presentadas en la fundación de la presa de relaves utilizada como aplicación.

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Presión
Q	Caudal
Pent	Penetrabilidad
Cfm	Pies cúbicos por minuto
Kg	Kilogramo
kg/m	Kilogramo por metro
L	Litro
Lpm	Litro por minuto
Lpm/m	Litro por minuto por metro
Lpm/m/bar	Litro por minuto por metro por bar
L/m	Litros por metro
UL	Unidad Lugeon
M	Metro
mL	Mililitro
Mm	Milímetro
S	Segundo
UCS	Resistencia a la compresión no confinada
MMC	Millones de metros cúbicos

LISTA DE TABLAS

Tabla 2A.	Efecto de la Bentonita en la Exudación.....	20
Tabla 2B.	Propiedades de lechadas típicas de Fly Ash con cemento.....	21
Tabla 5A	Investigación de Campo – Información de Taladro de Perforación.....	44
Tabla 5B	Investigación de Campo – Detalles de la Instalación de Piezómetro.....	45
Tabla 6A.	Recorridos Potenciales de Filtraciones y Áreas Identificadas de Trabajo en el estribo derecho.....	46
Tabla 6B	Resumen de Mezclas de Inyección Utilizadas.....	51
Tabla 6C	Resumen del Ensayo de Resistencia a la Compresión no Confinada UCS..	55
Tabla 6D	Resumen de Viscosidades Marsh Medidas	56
Tabla 6E	Resumen de Pruebas de Agua	57
Tabla 6F	Resumen de Absorciones de Lechada – Estribo Derecho	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1A: Presiones permisibles para condiciones normales de inyección (A.C. Housby, 1977).....	7
Figura 1B. Izquierda: Presiones hidrostáticas de la lechada. Centro: Peso de la roca. Derecha: Las dos comparadas.....	1
Figura 1C. Presiones hidrostáticas cuando la presión en la superficie (psi) se hace igual a la profundidad (pies).....	9
Figura 1D. Presiones hidrostáticas cuando la presión sigue la curva de condiciones de roca promedio.....	9
Figura 2A. Penetración de materiales granulares por tipo de lechada.....	12
Figura 2B. Granulometría de lechadas particulares.....	12
Figura 2C. Representación gráfica de tipos de fluidos.....	11
Figura 3A. Gráfica del desarrollo de la presión de inyección vs. el volumen de inyección.....	25
Figura 3B. Curva Penetrabilidad vs. Absorción de Lechada.....	28
Figura 3C. Curva Presión vs. Caudal de inyección.....	29
Figura 3D. Valores de Lugeon similares para cada corrida indican un flujo laminar.....	33
Figura 3E. Los valores de Lugeon simétricamente a las presiones más altas indican un flujo turbulento.....	33
Figura 3F. El valor Lugeon alto a la presión más alta indica un flujo de dilatación.....	34
Figura 3G. Los valores de Lugeon aumentan aun cuando la presión cae, indicando un lavado.....	34
Figura 3H. La disminución de los valores de Lugeon a lo largo de la prueba indica el relleno de vacíos.....	35
Figura 3I. Técnica de inyección ascendente.....	37
Figura 3J. Técnica de inyección descendente.....	38

INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene como objetivo principal mostrar al lector la metodología, aplicación y aseguramiento de calidad de la construcción de la cortina de impermeabilización realizada en el año 2006, en la presa de relaves de la Compañía Minera Antamina S.A., mediante inyecciones de lechada de cemento.

Los primeros capítulos presentan una información teórica de los factores involucrados en un trabajo de inyecciones, así como también la descripción de los materiales que se utilizan en un trabajo de inyecciones, las técnicas de inyección y las pruebas de Lugeon.

En el Capítulo 4 se explican dos métodos para el control de inyección: el método GIN y el control de inyección por penetrabilidad, que el autor lo denomina como el método GIN modificado. Este último método fue utilizado en la construcción de la cortina de impermeabilización mencionada.

Asimismo, entre los Capítulos 5 y 7 se presenta la aplicación, metodología y control de calidad del trabajo de inyecciones realizado en la presa de relaves de la mina Antamina. Es aquí donde el lector podrá observar las ventajas de utilizar el método de control por penetrabilidad (GIN modificado) para las condiciones geotécnicas propias de la fundación de la presa de relaves.

Finalmente, la tesis contiene un álbum fotográfico y anexos que describen y grafican el desarrollo de la misma.

Capítulo 1 GENERALIDADES

1.1 General

La construcción de presas de relaves, presas de agua y diques de contención en el Perú ha aumentando considerablemente en los últimos 20 años, debido a las inversiones en la minería y en el manejo de recursos hídricos en nuestro país.

La importancia de la fundación en una presa demanda el mejoramiento del terreno en donde ésta se cimienta; dentro de las alternativas para el mejoramiento del terreno se encuentran las inyecciones de lechada para la conformación de cortinas de impermeabilización.

Las cortinas de impermeabilización son necesarias para una presa de relaves porque reducen las filtraciones a través de la fundación de la presa alargando el recorrido de las mismas.

Las inyecciones en la fundación de una presa son un proceso por el cual las oquedades del medio rocoso son selladas para reducir las filtraciones y/o para reforzar la fundación. El material de inyección podría ser una suspensión de sólidos en agua (lechada aguada), una solución pura (lechada química), o una combinación de las dos. Las cortinas de inyección son construidas mediante actividades de perforación e inyección de lechada dentro de una o más filas de taladros.

1.2 Objetivos Específicos

El objeto de la presente tesis es mostrar la impermeabilización alcanzada en el macizo rocoso en una presa de relaves empleando inyecciones de lechada, mediante:

- La aplicación de inyecciones en roca y suelo.
- El uso del criterio de penetrabilidad (método GIN modificado) evitando el hidrofracturamiento del macizo rocoso.
- El aseguramiento de calidad de las inyecciones mediante los controles de inyección.
- Obtención de una permeabilidad menor a 3 unidades Lugeon del macizo rocoso.

1.3 Metodología de Trabajo

Para la realización de la tesis se utilizó como aplicación el trabajo de inyecciones realizado en la extensión de la cortina de impermeabilización en el estribo derecho de la presa de relaves de Antamina en el año 2006. Este trabajo comprende todas las etapas de interés en la realización de la presente tesis, tales como el análisis, investigación, aplicación y resultados del trabajo de inyecciones.

La ejecución del trabajo mencionado contó con la participación de profesionales, experimentados en el tema, quienes compartieron sus experiencias y conocimientos en la realización de la presente tesis.

1.4 Historia de las Inyecciones

Los proyectos de inyecciones se documentan a partir del año 1800 e inclusive antes. El desarrollo y evolución del trabajo de inyecciones se ha dado gracias a dos grandes escuelas: la escuela Europea y la escuela Americana.

El desarrollo europeo es el que más ha aportado al conocimiento actual de inyecciones. Entre los países con mayor aporte tenemos a Francia, Suiza y más recientemente Japón. A diferencia de la práctica Americana, muchos trabajos europeos han sido realizados sobre bases de diseño y construcción, lo cual dio como resultado que varias firmas tengan la capacidad para la investigación y desarrollo, diseño y construcción actual, así como la habilidad para diseñar, construir y mantener el equipo especializado utilizado.

Lo extraordinario del trabajo europeo es el uso de grandes plantas de inyección. Estas plantas son siempre equipadas con un equipo de monitoreo continuo automatizado y equipos de registro de inyección y la operación esta generalmente bajo la supervisión de un ingeniero.

Con la excepción del desarrollo de técnicas que dependan del uso de equipo masivo tales como el "jet grouting", el método europeo de inyección se mantiene igual en tiempos recientes.

El desarrollo americano, contrario a la experiencia europea, fue algo errático y principalmente logrado por contratistas pequeños y ampliamente dispersos de la especialidad. La mayoría de las inyecciones de las fundaciones en presas de

enrocado estuvieron bajo el control de una de las tres grandes agencias del gobierno federal: The U.S. Army Corps of Engineers, the U.S. Bureau of Reclamation y the Tennessee Valley Authority. Estas agencias diseñaban y supervisaban las operaciones de inyección hasta el punto que los contratistas sólo abastecían la mano de obra, equipos y materiales. Esta práctica incentivó a los pequeños contratistas por la innovación y adelanto de las nuevas tecnologías.

En la actualidad, gracias a las conferencias, cursos y seminarios especiales dados por diferentes instituciones y organizaciones europeas y americanas, se ha aumentado la interacción de varios profesionales y esto ha contribuido enormemente a un mejor entendimiento de la tecnología de inyecciones.

1.5 Elementos para un Trabajo de Inyecciones

Los elementos necesarios para un exitoso trabajo de inyecciones en la fundación de una presa incluyen un diseño que contemple las condiciones geológicas de sitio; especificaciones que permitan o faciliten modificaciones al programa de inyecciones en función a las condiciones encontradas; un contratista de inyecciones honesto, competente, cooperativo y experimentado; el uso de apropiados materiales, equipos y técnicas; un staff reconocido de inspección y un programa de aseguramiento de calidad efectivo.

La ausencia de uno o más de estos podría contribuir a costos de construcción excesivos, retrasos innecesarios y/o no anticipados, reclamos de las condiciones cambiadas, una fundación agujereada, medidas drásticas y de remediación costosas después que el embalse es colocado en servicio y en el peor de los casos la falla de una presa o reservorio.

Los trabajos de inyección, de una manera práctica, requieren que el staff de ingenieros del propietario o el consultor dirija las operaciones de las cuadrillas y equipos suministrados por un subcontratista al contratista encargado de la construcción de la presa para alcanzar los objetivos de diseño.

Capítulo 2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

2.1 Consideraciones Generales

2.1.1 Anticipación de los Resultados

En un trabajo de inyecciones el éxito de los resultados es más probable si es diseñado y realizado con bastante conocimiento y entendimiento de los factores involucrados. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos que podrían ser aplicados, el resultado del programa de inyección probablemente continuará significativamente menos previsible que cualquier otra parte del proyecto.

Por lo tanto, no existe manera precisa y adecuada para verificar con anticipación los resultados de la efectividad de una cortina de inyección. Lo que si es obligatorio y recomendable es el monitoreo de las filtraciones a través de la fundación de la presa, utilizando piezómetros y túneles de drenaje.

2.1.2 Inyección de Prueba

Las inyecciones de prueba son de gran ayuda y guía en el diseño de la cortina de inyección y de la presa. Uno de los parámetros más importantes que puede ser determinado mediante las inyecciones de prueba es la permeabilidad promedio que puede ser alcanzada por la inyección. La información obtenida ayuda a refinar el diseño de la cortina y la metodología de inyección. Los resultados podrían ser una base importante para la estimación de las cantidades de inyección y de las presiones máximas de inyección.

Es importante mencionar que, mientras que los resultados estadísticos podrían ser indicativos de la efectividad de un programa de inyección de prueba, los resultados más confiables son obtenidos cuando se realiza un taladro exploratorio a través del área inyectada.

2.1.3 Profundidad de la Cortina de Inyección

La profundidad de la cortina de inyección se selecciona generalmente en base a la geometría, siendo el principal objetivo alargar el recorrido de las filtraciones a algún valor consistente con el ancho de la base de la presa. Sin embargo, mientras que este método protege la presa de los efectos de filtración, la cantidad de filtración no necesariamente se reduciría ya que a esa profundidad tal vez las condiciones geotécnicas de la fundación sean desfavorables. Por lo

tanto, si la fundación puede desarrollar erosión interna, se deberá extender la cortina hasta una capa o zona relativamente impermeable.

En cuanto al diseño de la cortina, por lo general se considera una profundidad igual a los 2/3 de la altura final de la presa, la cual podría cambiar en función a las condiciones encontradas in situ.

2.1.4 Cortinas de Línea Simple vs. Cortinas de Múltiples Líneas

El uso de cortinas de inyección de una línea simple está en función a las condiciones geológicas favorables, a la interacción entre taladros de inyección y aquellos que no contribuyen a la desviación de los taladros de perforación. Sin embargo, tales condiciones ideales pocas veces existen en la naturaleza, por lo que utilizar una cortina de una línea podría ser una deficiente cortina de inyección. La construcción de una cortina de inyección de dos filas con taladros en ángulos opuestos tenderá a reducir la posibilidad de dejar en la fundación grandes “ventanas” sin inyectar.

2.1.5 Espaciamiento de los Taladros de Inyección

El espaciamiento entre taladros de inyección esta en función de los defectos geológicos espaciados o aislados que podrían tener un potencial para el transporte de volúmenes de agua a través de la cortina. Sin embargo, las especificaciones de inyección usualmente proporcionan una distancia de 3m como mínimo para el espaciamiento entre taladros. Así mismo, las especificaciones podrían reducir este espaciamiento en función a las absorciones de lechada. El espaciamiento de los taladros ayuda a la estimación de costos y a la programación en un trabajo de inyecciones, de tal manera que se incluya en el diseño una contingencia amplia de taladros adicionales.

2.1.6 Presiones de Inyección

2.1.6.1 Presiones Máximas Admisibles

Las presiones máximas admisibles en un trabajo de inyecciones son utilizadas para asegurar una mayor penetrabilidad en el macizo rocoso sin causar daños al mismo, tales como el hidrofracturamiento.

En forma práctica y para condiciones normales de roca, las presiones máximas admisibles son presentadas en la gráfica de la Figura 1A, generada por Justin y

Hinds en 1945 y ratificada por Housby en 1977. Este gráfico muestra presiones máximas admisibles sugeridas para varias condiciones de fundación y profundidades. Este gráfico sirve de guía para la elección de presiones máximas de inyección y/o para el aumento y reducción de las mismas al iniciar un trabajo de inyecciones.

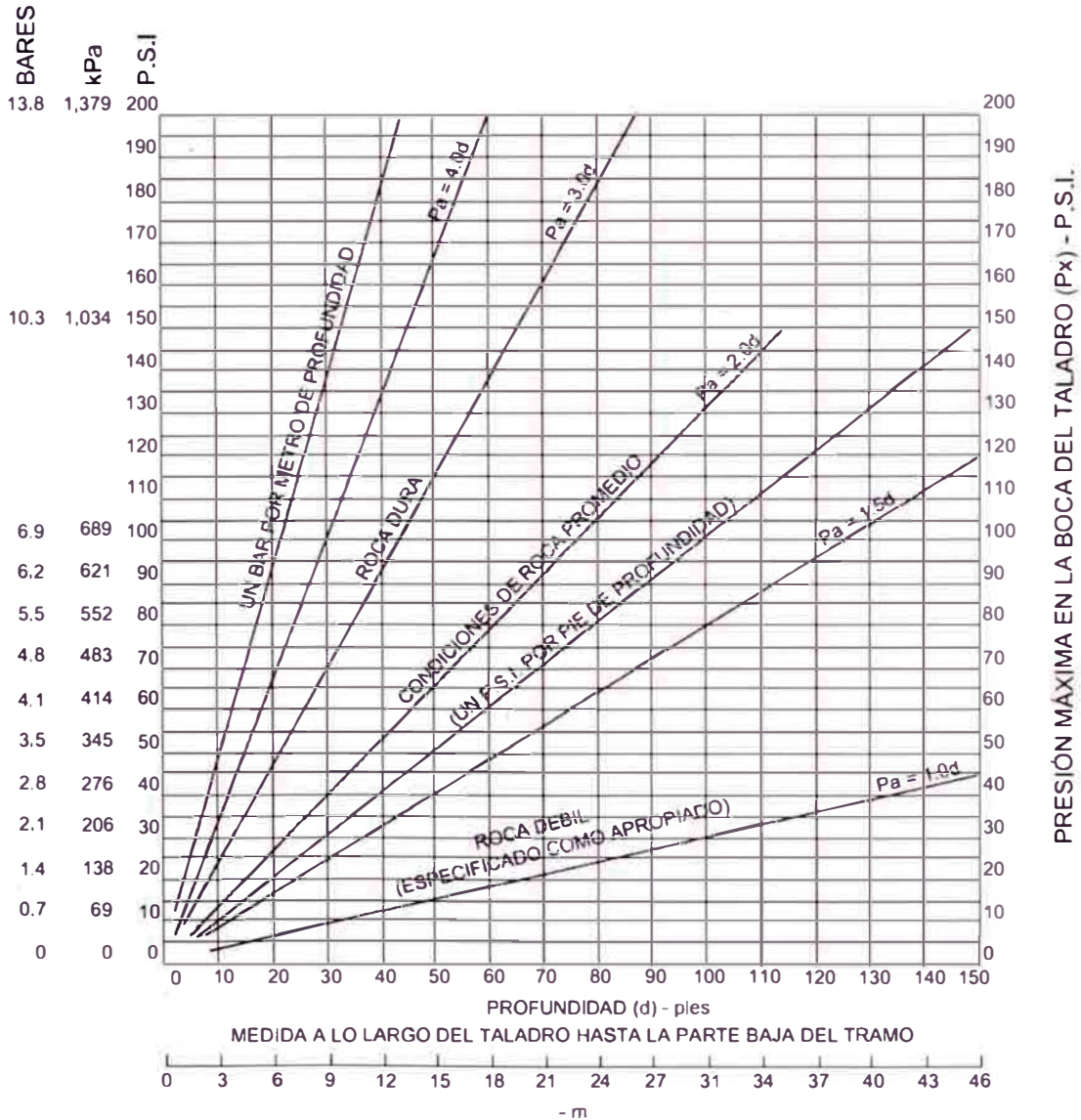


Figura 1A: Presiones permisibles para condiciones normales de inyección (A.C. Housby, 1977)

2.1.6.2 Presión de Inyección versus Peso del Macizo Rocoso

Para el presente análisis es necesario mencionar que el peso específico de la lechada varía con la dosificación agua:cemento pero para mezclas típicas

utilizadas en la inyección en roca, una aproximación conveniente es 100 lb/ft^3 (1.6 Tn/m^3) y el peso específico de la roca está alrededor de 144 lb/ft^3 (2.3 Tn/m^3).

Para definir las presiones admisibles de inyección, algunos profesionales tienen en consideración el peso de la roca que está siendo levantado por la presión de la lechada, tal como se muestra en la Figura 1B.

Realmente en una comparación no es válido considerar la roca como un "fluido" con presión hidrostática, tampoco la lechada puede ser considerada como un verdadero fluido, la lechada desarrolla una diferente distribución de presiones durante y después, en respuesta a la exudación, tixotropía y densidades. Sin embargo, para propósitos ilustrativos, la comparación es interesante.

La Figura 1C, para condiciones de roca débil, muestra que la presión de inyección en el taladro excede el peso de la roca, por lo tanto no se presenta un balance entre la presión de inyección y el peso de la roca. El exceso se debe al esfuerzo estructural de la roca y a la presencia de grietas horizontales lo suficientemente largas para que la lechada desarrolle presiones de levantamiento que excedan el peso de la roca.

Es importante mencionar que la regla práctica está basada en experiencias de muchos profesionales dedicados a la inyección, es evidente que hay mucho más para tomar en cuenta que esta forma de análisis teórico. Extendiendo los resultados de la experiencia, las presiones seguras para las condiciones de roca promedio (comparado en la Figura 1D) pueden exceder ligeramente esta regla práctica.

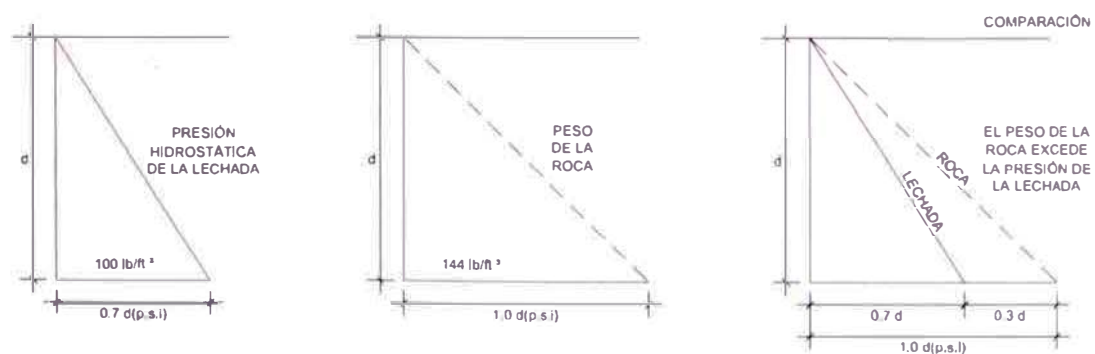


Figura 1B. Izquierda: Presiones hidrostáticas de la lechada. Centro: Peso de la roca. Derecha: Las dos comparadas

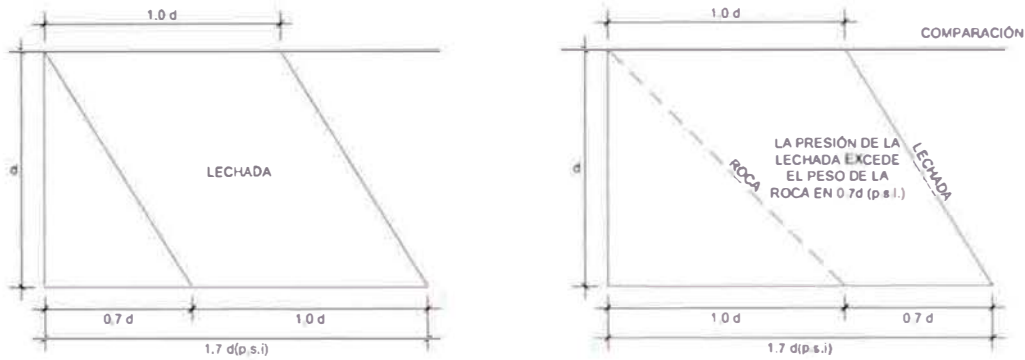


Figura 1C. Presiones hidrostáticas cuando la presión en la superficie (psi) se hace igual a la profundidad (pies).

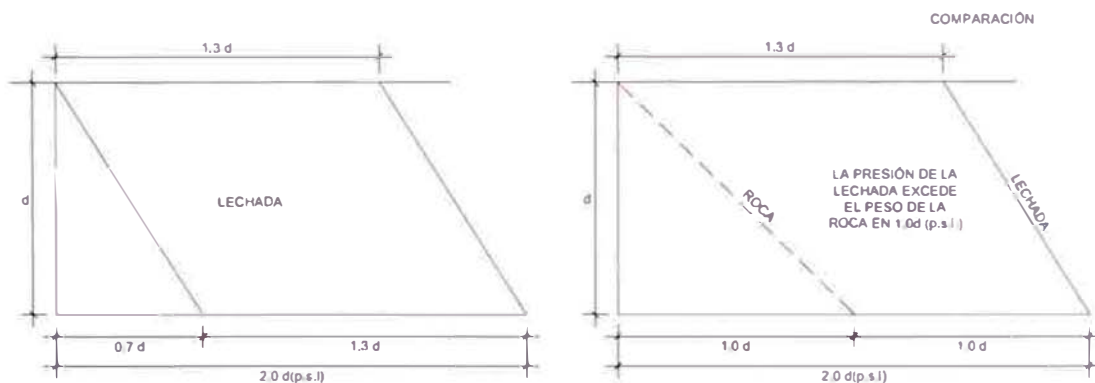


Figura 1D. Presiones hidrostáticas cuando la presión sigue la curva de condiciones de roca promedio.

La línea mostrada en el gráfico de la Figura 1B para las condiciones de roca promedio tiene la siguiente ecuación:

$$\text{Presión en la parte baja (psi)} = 2.0 \times \text{profundidad (ft)}$$

La experiencia ha demostrado que en rocas resistentes y competentes, es bastante satisfactorio utilizar presiones más altas que estas y en conformidad a la siguiente ecuación:

$$\text{Presión en la parte baja (psi)} = 3.0 \times \text{profundidad (ft)}$$

Y en algunos casos esta puede ser excedida sin mover la roca. En el otro extremo de la escala, la roca débil tiene que tener menor presión que la regla práctica, por ejemplo:

$$\text{Presión en la parte baja (psi)} = 1.5 \text{ o } 1.0 \times \text{profundidad (ft)}$$

Todas estas relaciones son mostradas en la Figura 1A.

2.2 Consideraciones Geológicas

2.2.1 Características Geológicas Primarias

Las características geológicas primarias son aquellas que se originan por la depositación y que podrían originar recorridos potenciales de filtración. En las rocas sedimentarias las características geológicas primarias incluyen aberturas intergranulares, planos de estratificación y grietas causadas por asentamiento diferencial. Las rocas volcánicas podrían presentar discontinuidades primarias potencialmente permeables tales como grietas de enfriamiento, depósitos de interflujo no consolidados, contactos permeables, depósitos de flujo altamente porosos y conductos de lava.

Estas características geológicas se deben identificar en la etapa de investigación previa a un trabajo de inyecciones para poder ser tratadas y superadas.

2.2.2 Cavidades de Solución (Karst)

Las cavidades de solución, conocidas también como cavernas, galerías o simplemente karst se deben a la disolución de minerales tales como la calcita, la gipsita, la anhidrita y otras sales que se encuentran en el macizo rocoso y que al contacto con el agua se disuelven y generan espacios que pueden llegar a tener grandes dimensiones.

En nuestro país es muy común la presencia de formaciones kársticas en las rocas calizas y a veces en areniscas y lutitas con alteraciones de calcita.

Debido a sus grandes dimensiones, los karst deben ser evaluados geomorfológicamente y proyectados en cuanto al consumo de lechadas de cemento ya que podrían afectar la economía del proyecto e inclusive las inyecciones podrían no ser el método más prudente.

Capítulo 3 MATERIALES DE INYECCIÓN Y DISEÑO DE MEZCLA

3.1 Materiales de Inyección

Los materiales de inyección más utilizados son el cemento, las puzolanas, los materiales arcillosos, los materiales de relleno como la arena, aditivos químicos y el agua.

3.1.1 Cemento

El cemento es el material más utilizado en los trabajos de inyección. Dependiendo de los objetivos y de las condiciones encontradas, se puede utilizar el cemento Portland y/o el cemento ultrafino.

3.1.1.1 Cemento Portland

El cemento Portland es el principal ingrediente cementante utilizado en lechadas para la fundación de las presas sobre roca. Los tipos de cemento más utilizados son el tipo I y II. Sin embargo, existe el cemento tipo III cuyo tiempo de fraguado es más rápido debido a la finura de sus granos, por lo que es empleado en donde la lechada debe penetrar las finas fracturas de la roca y en donde los problemas de derrumbe existen. Existe también el cemento portland tipo V el cual es puzolánico y de un alto grado de resistencia a los sulfatos, apropiado donde el agua subterránea agresiva está presente.

3.1.1.2 Cemento Ultrafino

El cemento ultrafino es utilizado en aplicaciones especiales donde se debe rellenar aberturas muy pequeñas en la roca con una lechada resistente y durable. Aunque el costo del cemento ultrafino es muy alto, sus características de exudación y de mayor penetrabilidad podrían reducir el número de taladros, haciéndolo útil en cuanto a costo-beneficio.

En el Perú, la empresa BASF presenta el cemento RHEOCEM 800 cuyo valor Blaine es de 800 m²/kg. Así mismo, existe el producto japonés, Nittetsu Superfine con un valor Blaine de 920 m²/kg y un tamaño de partícula promedio de 3 micrones.

El valor Blaine determina el tamaño de las partículas del cemento o su fineza. Los valores Blaine más altos representan una mayor fineza del cemento expresado en términos de metros cuadrados por kilogramo (m^2/kg).

Un nuevo producto desarrollado por la Geochemical Corporation, tiene la partícula más fina disponible en el mercado (ver Figuras 2A y 2B). Este producto, MC-100, tiene un tamaño promedio de partícula de 3 micrones y un valor Blaine de $1400 m^2/kg$.

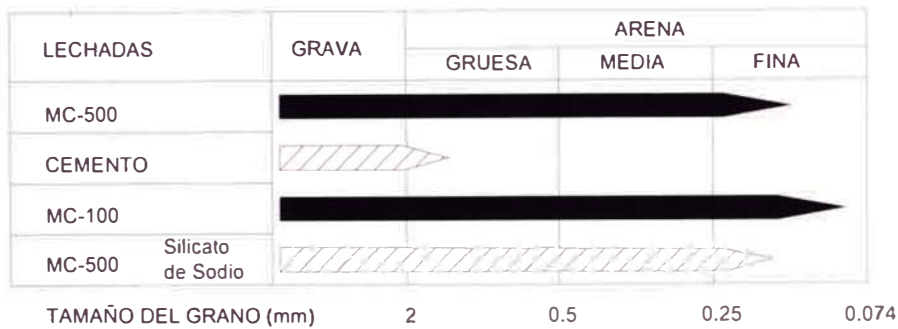


Figura 2A. Penetración de materiales granulares por tipo de lechada

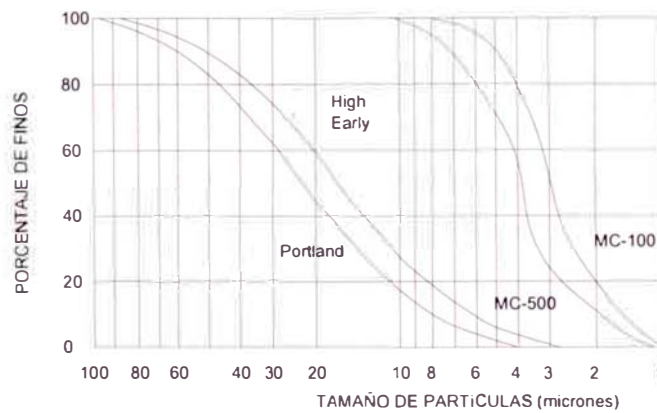


Figura 2B. Granulometría de lechadas particulares

3.1.2 Puzolanas

Las puzolanas son silicatos o aluminosilicatos que no son cementantes por si mismos, pero reaccionan con la cal y el agua para producir componentes cementantes. Debido a la reacción con la cal libre en el cemento Portland, ellos producen una lechada que es menos soluble y más resistente al ataque químico de sulfatos y de aguas de bajo pH que la lechada del cemento Portland. La

reacción trae consigo la formación de hidrosilicatos de cal que llenan más espacios en medios porosos, tales como las areniscas y las pizarras.

Las puzolanas artificiales, tales como el Fly Ash, la ceniza pulverizada y la escoria pulverizada, son ampliamente utilizadas en las inyecciones de relleno en la minería. Debido a que las puzolanas son desechos, el costo es muy bajo. Sin embargo, ello no las limita para el tipo de aplicación.

3.1.2.1 Fly Ash

El fly ash son partículas finas de cenizas producidos por la combustión de combustibles sólidos, como el carbón. A diferencia del cemento Portland, el cual es producido bajo condiciones controladas, el fly ash de diferentes fuentes podría tener significativamente diferentes propiedades físicas y químicas. Estas diferencias en las propiedades podrían ser el resultado de las variaciones en la composición del carbón, condiciones de combustión, sistemas de colección de cenizas y otras variables.

3.1.3 Bentonita

Mineralógicamente, la bentonita es una arcilla montmorillonita impura. Esta arcilla es capaz de absorber el agua en su estructura cristalina, expandiéndose en el proceso entre el 400% a 700%. La bentonita es utilizada como un constituyente menor en las lechadas de cemento y es agregada con el propósito de producir una suspensión relativamente estable. La bentonita reduce el asentamiento de las partículas de cemento en la lechada y aumenta la viscosidad y la cohesión de la lechada. Los estudios hechos por Deere y Lombardi (1985) muestran que la bentonita no sirve como lubricante, tal como se suponía anteriormente, pero limita la distancia de recorrido de la lechada.

3.1.4 Rellenos

Los rellenos son agregados a las lechadas de inyección en muchos trabajos donde las condiciones justifican su uso, en muchos casos para reducir el costo de la lechada. Entre los rellenos más utilizados tenemos a la arena y la arcilla.

3.1.4.1 Arena

La arena, debido a su rápida disponibilidad, es utilizada como material de relleno en donde existen condiciones de bastante abertura y/o donde las absorciones de lechadas son muy altas debido a la presencia de Karst.

La granulometría y angularidad de la arena utilizada son muy importantes en el diseño de lechadas altamente arenadas. En general, se prefiere las lechadas de grano fino o las arenas limosas con partículas bien redondeadas, aunque las arenas elaboradas pueden ser utilizadas satisfactoriamente. Sin embargo, la arena deberá ser utilizada solo donde existen condiciones de bastante abertura.

3.1.4.2 Arcilla

El uso de la arcilla como material de relleno en las lechadas de inyección de cemento presenta una ventaja por tener una menor sedimentación que las lechadas sólo con cemento, lo cual ayuda a alcanzar un mayor relleno de vacíos. Según la experiencia de varios autores e ingenieros, la arcilla es mejor utilizarla en aplicaciones en donde la resistencia no es una consideración importante.

3.1.5 Aditivos Químicos

Entre los aditivos químicos más utilizados en las mezclas de inyección tenemos los dispersantes y acelerantes.

3.1.5.1 Dispersantes

Los dispersantes químicos son utilizados con el propósito de reducir la tendencia de aglomeración de las partículas de cemento, aumentando la habilidad de la lechada para penetrar las fracturas. Ellos reducen significativamente la viscosidad, y por lo tanto la cohesión de lechadas relativamente gruesas. Aunque los dispersantes mejoran la penetración de las lechadas, también retardan significativamente el tiempo de fragua.

3.1.5.2 Acelerantes

Los aditivos acelerantes son utilizados en las lechadas de cemento para obtener tiempos de fragua bastante rápidos. Los acelerantes más utilizados son el cloruro de calcio, el hidróxido de sodio y el silicato de calcio entre otros.

Es importante mencionar que las dosificaciones de estos acelerantes deben ser monitoreadas constantemente en la preparación de las mezclas ya que si se utiliza concentraciones fuera del rango útil, éstas no tendrían efecto alguno en el tiempo de fragua.

3.1.5.3 Agua

El agua que se utiliza para las inyecciones deberá siempre estar libre de material orgánico y de partículas que podrían contribuir al atascamiento prematuro de los taladros. Deberá también estar libre de sustancias dañinas (no mayor a 0.1%) tales como los sulfatos. El agua que contiene cloruros no es utilizada en la práctica de la ingeniería geotécnica.

3.2 Propiedades de los Materiales

3.2.1 Viscosidad

La viscosidad describe la resistencia interna de un fluido para fluir y podría ser tomado como una medida de la fricción del fluido.

En cuanto a las unidades, la viscosidad dinámica se expresa en Pascal-segundo (Pa-s). Es bastante común, particularmente en los estándares de la ASTM, expresar la viscosidad en centipoise (cP). Sin embargo, en los trabajos de inyección la viscosidad se mide en segundos utilizando el cono de Marsh.

El ensayo con el cono de Marsh consiste en medir el tiempo que demora en fluir un volumen conocido (946ml) de lechada a través de un diámetro estándar del cono. En la práctica se utiliza como referencia la viscosidad del agua que es $26 \pm 0.5s$ a una temperatura ambiente de $21^{\circ}C$.

Es importante mencionar que la penetrabilidad de la lechada es inversamente proporcional a la viscosidad y es importante conocer la reología de la mezcla con la temperatura.

3.2.2 Cohesión

La cohesión es la fuerza de atracción que existe entre las moléculas que mantienen unidas las partículas de la lechada. Así mismo, está demostrado que la cohesión de la lechada es un factor importante en la distancia que la lechada debe penetrar.

En cuanto a los trabajos de inyección, la presión de inyección aplicada debe ser suficiente para vencer la cohesión o no se dará el flujo en toda la inyección. Así mismo, si se disminuye la dosificación de agua/cemento se incrementa la cohesión y si se le agrega un fluidificante disminuye la cohesión.

El equipo que se utiliza para medir la cohesión de la lechada es la placa de cohesión de Lombardi, desarrollada por Lombardi en 1985 cuya unidad de medida está en mm.

3.2.3 Gravedad Específica

Las partículas sólidas en una lechada se asientan a una tasa que es directamente proporcional a la diferencia entre la gravedad específica de la partícula y la gravedad específica de la lechada, (para partículas esféricas como las del fly ash, esta tasa es gobernada por la ley de Stoke) Por lo tanto, las lechadas formuladas con ingredientes de densidad baja tales como el fly ash serán más estables (menos susceptibles a la sedimentación) que si son formuladas con ingredientes más densos como la arena por ejemplo.

La gravedad específica de la lechada es de interés cuando tiende a limitar las presiones efectivas de inyección en circunstancias en donde el peso de la columna de lechada debe ser tomada en cuenta. Sin embargo, la gravedad específica de la lechada es acertada solo con propósitos de verificar que la lechada está siendo formulada apropiadamente.

El equipo que se utiliza para medir el peso unitario es la balanza de lodos.

3.2.4 Decantación

La decantación es conocida físicamente como el asentamiento de las partículas sólidas de la lechada. Las partículas sólidas individuales en una lechada estacionaria se asientan a una tasa que está relacionada a su granulometría y densidad. El porcentaje de asentamiento tiene un efecto importante en el sellado de las grietas. El agua que no se mezcla durante la inyección de la lechada, no es absorbida por la roca, y no se mantiene en su estructura cristalina en la lechada endurecida, por lo que no toma parte en la reacción química que causa el cemento al endurecer y crea posibles rutas de sedimentación en la lechada endurecida. Estas rutas de sedimentación hacen a la lechada endurecida relativamente porosa y permeable. Las lechadas que son consideradas

relativamente estables tendrán un asentamiento menor al 10%, siendo un asentamiento de 5% o menos lo más deseable después de 2 horas.

3.2.5 Granulometría

La granulometría de las partículas que conforman la lechada de cemento tiene un mayor efecto sobre la habilidad de la lechada para penetrar en materiales granulares o rocas fracturadas. El 15% de partículas más gruesas (el tamaño D_{85}) de una lechada, generalmente es considerado el factor dominante en la habilidad de la lechada para penetrar materiales granulares o para penetrar fracturas. El tamaño de la malla en la que las partículas gruesas son retenidas ha sido utilizado para definir las "proporciones de inyectabilidad" para los materiales granulares y para roca fracturada. Herndon y Lenahan (1976) presentaron la siguiente fórmula: $GR = D_{15}/D_{85}$, donde GR es la proporción de inyectabilidad para el suelo a ser inyectado, D_{15} es el 15% del tamaño del suelo a ser inyectado y D_{85} es el 85% del tamaño de las partículas de la lechada. Ellos establecieron que, en general, las lechadas de cemento Portland no pueden ser utilizadas para inyectar suelos si la proporción de inyectabilidad es menor que 11, probablemente no puede ser utilizada si es menor que 19, pero generalmente puede ser utilizada si es mayor que 24. Mitchell (1981) incorporó la investigación anterior en una proporción de inyectabilidad para roca, expresándolo en la siguiente fórmula y conclusiones:

$GR = \text{Ancho de la fisura} / (D_{95}) \text{ de la lechada}$

$GR > 5$: Inyección consistentemente posible

$GR < 2$: Inyección no posible

3.3 Reología de la Lechada

Muchos de los tratados literarios acerca de la reología de la lechada consideran a la lechada de cemento como un fluido Bingham, el cual tiene un esfuerzo cortante que debe ser vencido antes que se inicie el flujo. Sin embargo, los resultados de las investigaciones realizadas por la Atomic Energy of Canada (Lau y Crawford, 1986) indican que esto puede ser un simplismo. Se encontró que las propiedades reológicas están en función del tipo de cemento así como la relación agua:cemento y que para cualquier tipo de cemento habría un rango de modos de comportamiento.

Para el cemento de alta resistencia inicial, las conclusiones fueron: las mezclas con una relación a:c $\geq 2.5:1$ (en peso) pueden ser modeladas como un fluido Newtoniano; las mezclas con una relación a:c entre 2.5:1 y 0.75:1 se comportan como un fluido Bingham y las mezclas mas gruesas que 0.75:1 se comportan pseudo-plásticamente. Las lechadas con el cemento microfino MC-500 con relaciones a:c entre 2.5:1 y 6:1 se comportaron como fluidos Bingham y aquellos con menor relación a:c mostraron propiedades pseudo-plásticas. El comportamiento Newtoniano no fue observado en las lechadas con el cemento MC-500 (ver Figura 2C para las representaciones de los comportamientos de los fluidos referidos).

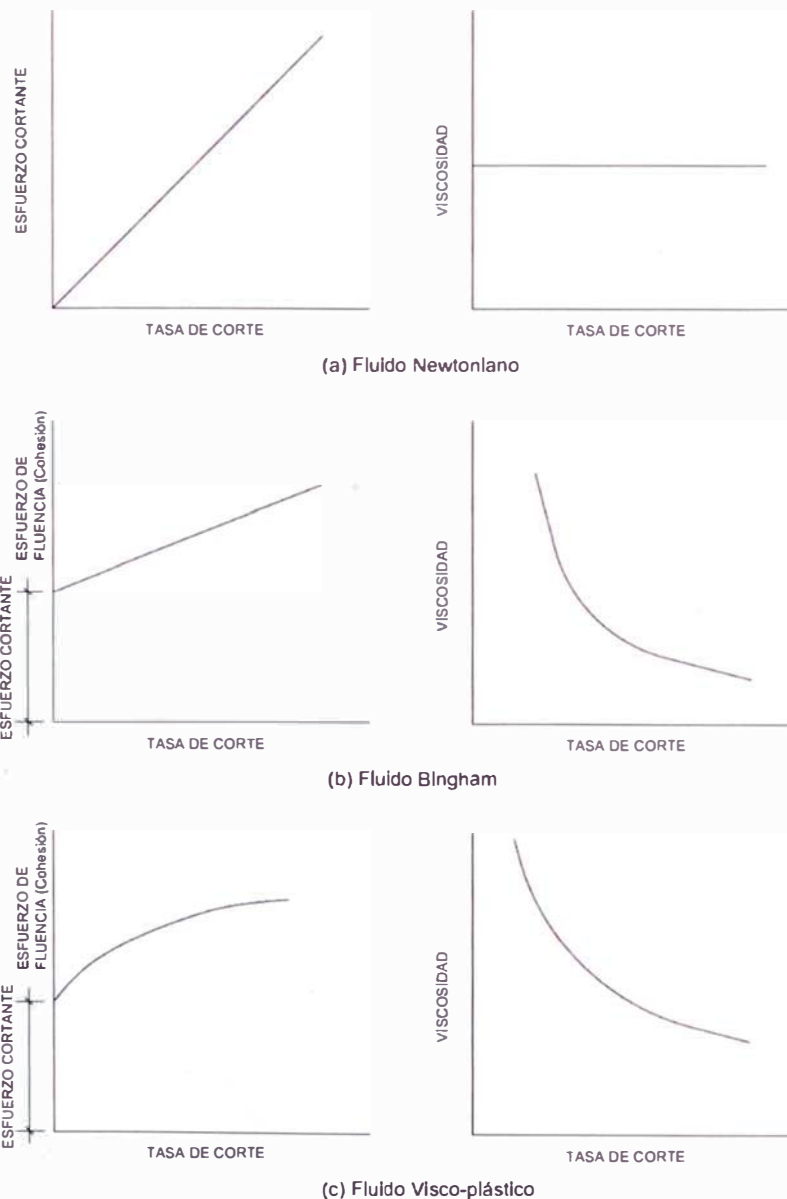


Figura 2C. Representación gráfica de tipos de fluidos.

3.4 Diseño de Mezcla

3.4.1 Consideraciones Generales

Las lechadas inyectadas con el propósito de reducir la permeabilidad de la roca fracturada son formuladas con los objetivos de alcanzar la combinación óptima de penetrabilidad, durabilidad, economía y resistencia. Las lechadas químicas son capaces de ofrecer la penetración más efectiva a cualquier presión dada, pero son más caras comparadas con el costo de la lechada con cemento.

Además, su durabilidad y/o toxicidad tienden a ser cuestionadas (a veces injustamente). Por lo tanto, la mayoría de inyecciones de la fundación de presas son realizadas con lechadas basadas en cemento. La arena podría ser un constituyente significativo en casos donde se presentan aberturas largas y continuas. El fly ash podría ser sustituido por arena como un agregado económico y podría también reemplazar parte del cemento si los tiempos de fraguado largos y la resistencia reducida son aceptables.

3.4.2 Relaciones Agua:Cemento

El diseño de mezcla de lechadas es generalmente expresado en términos de las proporciones relativas de agua y cemento. En el Perú la relación agua:cemento generalmente esta en términos de peso del cemento. El uso de relaciones en peso es deseable si la lechada contiene otros materiales aparte del agua y cemento como principales constituyentes.

La cantidad de agua requerida para la hidratación del cemento es aproximadamente 0.3:1 en peso de cemento. El agua utilizada en exceso de la cantidad necesaria para la hidratación es agregada con el propósito de hacer que la lechada sea lo suficientemente fluida para ser inyectada. Las mezclas de lechada tan delgadas como 10:1 por volumen han sido utilizadas en varios proyectos, bajo la hipótesis que las partículas de la lechada podrían ser llevadas dentro de finas fracturas, donde las partículas deberían ser depositadas y el agua en exceso sería forzada a ser desplazada. Sin embargo, los resultados de los ensayos de laboratorio han mostrado que las lechadas delgadas exhiben numerosas rutas de exudación cuando alcanzan la fragua y forman una película débil similar a la que se forma en el concreto cuando es colocado húmedo y

vibrado excesivamente. Por lo tanto, la actual tendencia internacional es utilizar lechadas relativamente gruesas.

3.4.3 Lechadas con Bentonita

El uso de la bentonita reduce la sedimentación de la lechada de cemento. Para alcanzar el mayor beneficio, la bentonita no debería entrar en contacto con la lechada de cemento hasta que se haya hidratado totalmente.

Las proporciones cuidadosas de cemento y bentonita deben estar consumadas para obtener la mezcla de lechada deseada. La información presentada por Deere (1982) indica que los siguientes resultados podrían ser obtenidos utilizando bentonita hidratada por 2 horas previas al mezclado. (Ver Tabla 2A).

Tabla 2A. Efecto de la Bentonita en la Exudación

Dosificación en Peso	Porcentaje de Sedimentación		
	0% Bentonita	2% Bentonita	4% Bentonita
Agua : Cemento			
3:1	62	40	22
2:1	52	20	6
1:1	16	3	1
0.66:1	5	0	0

3.4.4 Lechadas con Arena

La arena es utilizada en las lechadas como un relleno y es referenciada en términos del volumen relativo con respecto al agua y al cemento. Por lo tanto, una mezcla de 2:1:0.5 contendría 50lt de agua, 25lt de cemento y 12.5lt de arena. Las mezclas más gruesas, tales como 1:1:1, son comúnmente utilizadas y es preferible utilizar bentonita para ayudar a mantener la arena en suspensión. La arena debe ser agregada después que el cemento y el agua o la bentonita estén completamente mezcladas. Es preferible utilizar una mezcladora aparte para la lechada de arena y cemento.

3.4.5 Lechadas con Fly Ash

El fly ash varía substancialmente de tanda a tanda, por lo que puede requerir de ensayos para alcanzar el óptimo contenido de agua para que pueda ser bombeada. En general, las lechadas con cemento y fly ash son bombeables a dosificaciones de agua:cemento más baja que las lechadas con cemento, pero

tienen una exudación más alta (Ver Tabla 2B). Las proporciones con respecto al cemento son descritas en orden inverso comparado al uso estándar para las lechadas con arena.

Tabla 2B. Propiedades de lechadas típicas de Fly Ash con cemento

Dosificación en Peso		Viscosidad	Exudación
Fly Ash : Cemento	Agua : Sólidos	Marsh (s)	(%)
3:1	0.5:1	188.0	2.2
3:1	0.6:1	43.4	7.2
4:1	0.5:1	92.0	3.3

3.4.6 Lechadas con Cemento y Arcilla

La fracción de arcilla en las lechadas con cemento forma un gel que estabiliza el cemento, reduciendo la exudación, pero no realiza una significativa función química en el proceso final de colocación. Sin embargo, es responsable por la demora de la fragua y una baja resistencia al aplastamiento. Esta resistencia es inferida para ser suficientemente mayor que la requerida para resistir los gradientes de presión en estructuras de retención de agua (Greenwood y Raffle, 1965). Las lechadas con cemento y arcilla típicamente tienen una alta resistencia de fluencia (cohesión) en el estado de fluido, requiriendo presiones altas de inyección.

Capítulo 4 CONTROL DE INYECCIÓN, PRUEBAS DE AGUA Y TÉCNICAS DE INYECCIÓN

4.1 Control de Inyección

4.1.1 Método GIN

El método GIN "Grouting Intensity Number" (Número de Intensidad de Inyección), fue desarrollado y aplicado por G. Lombardi y D. Deere (1993), basándose en las investigaciones que efectuaron en diversas obras, en las que observaron que en macizos altamente fracturados y con alta permeabilidad, los procedimientos usuales de inyección de lechada conducían a grandes consumos, con la consecuente migración de lechada hacia fuera del área de interés para impermeabilizar y/o consolidar.

Al igual que cualquier otro método práctico, el método GIN tiene sus limitaciones. Su uso no está programado para tratamientos de suelos y tampoco es apropiado utilizarlo para inyecciones de formaciones kársticas (un criterio de volumen es más apropiado para el llenado de las cavidades kársticas). El método también está previsto principalmente para usarlo en mezclas de inyección que muestren cierta cohesión o límite elástico aparente, como por ejemplo suspensiones de relación agua:cemento estables, es decir, para cuerpos Bingham.

Los principios esenciales del método GIN se indican a continuación:

- Mezcla

- a. Se utiliza una sola mezcla para la totalidad de los trabajos de inyección (consolidación e impermeabilización) partiendo del principio que una sola mezcla puede ser la mejor.
- b. La mezcla debe tener la retracción mínima posible al fraguado, porque toda retracción se traduce luego en la formación de caminos preferenciales de circulación del agua y entonces en una mayor posibilidad futura de disolución de la lechada misma.
- c. La penetrabilidad de la mezcla en las fisuras está limitada por el diámetro de los granos de cemento en relación a la abertura de las fisuras. Es un error creer que agregando agua a la mezcla la penetrabilidad mejore (de hecho, solo el agua penetra en las fisuras finas, no el cemento).

- d. Claramente, los cementos finos y micro-finos son los más eficientes para sellar las grietas, pero lamentablemente muchas veces no están disponibles o son de un alto costo.
- e. La penetrabilidad a mayores distancias (obviamente en las fisuras suficientemente abiertas) se obtiene para la misma presión de inyección con la reducción de la cohesión y de la viscosidad de la mezcla añadiendo un superfluidificante de tipo adecuado.
- f. La definición de la mezcla debe hacerse sobre ensayos cuidadosos de laboratorio para obtener la relación agua:cemento más favorable eligiendo el tipo de superfluidificante y su dosificación más adecuada.
- g. El uso de bentonita debe evitarse en las inyecciones en roca, debido a la separación que se produce frecuentemente en la mezcla. La bentonita penetra en la fisura, y el cemento (de mayor tamaño) no ingresa.

- Curva Límite

La curva límite de la inyección se define por tres parámetros:

1. La intensidad o número GIN = $p.V$ (bar.L/m) siendo,
 p = presión (bar),
 V = Absorción de lechada por metro de taladro (L/m) o mejor (kg de cemento/m)
 $p.V$ = GIN = constante = "energía específica de inyección"
2. La presión máxima en la boca del taladro
3. La absorción máxima.

La limitación por intensidad (número GIN) evita la combinación de presiones elevadas con volúmenes de mezcla altos: es decir presiones elevadas actuando sobre grandes superficies. Se elimina así o por lo menos se reduce substancialmente, el riesgo de hidrofracturamiento y de hidrolevantamiento.

La presión máxima (p_{max}) es más bien un valor de diseño de los equipos de inyección (bombas, tuberías, obturadores, etc.). Debe ser lo suficientemente alta (2 a 3 veces la presión futura del agua en el sitio, es decir en la boca del taladro) para que al llenar el embalse las fisuras no se abran de nuevo por hidrolevantamiento.

El volumen máximo (V) elegido no es un límite fijo absoluto, sino un punto donde debe tomarse una decisión. Se trata según los casos de:

- Continuar la inyección.
- Parar la inyección para continuarla después del fraguado.
- Dar por finalizada la inyección o bien
- Darla por terminada decidiendo la perforación e inyección de otro u otros taladros en la cercanía.

También se define un valor crítico que es en general $V_{cr} = 0.5 \text{ GIN}/p_{\max}$ (L/m), también $V_{cr} = V_{\max}/20$ a $V_{\max}/10$.

Cuando en un tramo de inyección de cualquier taladro se sobrepasa este valor, se deben perforar los taladros cercanos por lo menos hasta dicha profundidad, o mejor hasta un tramo de inyección más profundo.

La selección del valor GIN depende de las condiciones geológicas y del proyecto. Debe ser elegido al inicio (por ejemplo 1500 bar.kg/m) y adaptado durante el desarrollo de los trabajos. Sin embargo deben ser evitados cambios frecuentes de los parámetros que dificultan el control y el análisis de la inyección.

Es claro que la distancia (d) entre los taladros y el valor GIN está relacionado. (d es proporcional a $\text{GIN}^{1/3}$). Ambos valores dependen obviamente de las características de la roca y del objetivo a conseguir.

La Figura 3A muestra el posible desarrollo de la presión de inyección versus el volumen inyectado. Por lo general la presión se incrementa durante el proceso de inyección, pero no paulatinamente, mientras que la toma de volumen siempre aumenta. Las irregularidades en la curva de presión se pueden explicar con frecuencia. Por ejemplo, una baja en la presión puede ser causada por una abertura de un nuevo camino de inyección o un hidrolevantamiento.

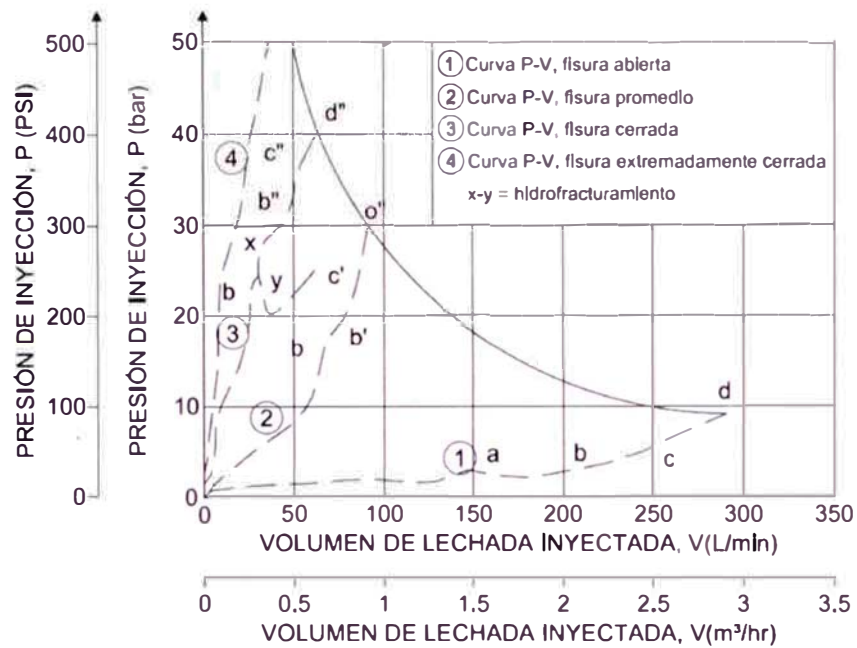


Figura 3A. Gráfica del desarrollo de la presión de inyección vs. el volumen de inyección

- Saturación de la roca

La roca seca puede absorber el agua de la mezcla, lo cual para muy rápidamente la penetrabilidad por el efecto de la fricción que se genera entre los granos de cemento, debido a la falta de lubricación que genera el agua. (Lo mismo sucede si el agua se escapa por las fisuras finas dejando atrás el cemento).

Es por lo tanto importante que la roca se encuentre saturada al momento de la inyección. Antes de empezar la inyección de lechada es necesario entonces inyectar un cierto volumen de agua en el taladro (obviamente solo en los taladros por encima del nivel freático).

- Término de la Inyección

La inyección se termina con un caudal de inyección nulo (o muy reducido) cuando el producto p.V llega al valor GIN prescrito.

En la práctica se puede sobrepasar el valor GIN fijado por ejemplo 10% y esperar algunos minutos para ver si el producto p.V final se acerca lo suficiente al valor GIN mientras que la presión baje leve y lentamente.

Obviamente la inyección se termina igualmente al llegar a la presión máxima (manteniéndola algunos minutos) o al volumen máximo (para tomar una decisión).

4.1.2 Control por Penetrabilidad (Método GIN Modificado)

Debido a la presencia de karst en el macizo rocoso a inyectar, se ha desarrollado una metodología de control de inyección basada en el método GIN cuyos parámetros de control son la penetrabilidad, la presión de inyección y el caudal de inyección. El método GIN sugiere que el control de la inyección debería utilizar un criterio de volumen y una sola mezcla. Sin embargo, este criterio es limitado o no considera los posibles problemas de hidrofracturamiento de la roca con presencia de karst así como también el uso de varios tipos de mezcla.

El control por penetrabilidad tiene como objetivo principal controlar la inyección del macizo sin tener problemas de hidrofracturamiento, asegurando la calidad del macizo y de la inyección ejecutada.

El valor de la penetrabilidad está definido como la razón entre el caudal de inyección por unidad de longitud entre la presión de inyección. La inyección es controlada por la curva de penetrabilidad vs. tiempo, la cual ayuda a definir el cierre y/o término de la inyección cuyo valor de tendencia deseable es 0.1 Lpm/m/bar.

Los principios de este método de control por penetrabilidad se indican a continuación:

- Mezcla

- a. Se utiliza varias mezclas a lo largo de los trabajos de inyección (consolidación e impermeabilización) dependiendo de las condiciones encontradas durante los trabajos de inyección.
- b. Las mezclas deben ser efectivas para todo el macizo rocoso, sin embargo se debe considerar una mezcla con arena para la presencia de una estructura kárstica.
- c. La definición de las diferentes mezclas debe hacerse con ensayos en laboratorio previo a los trabajos y verificados in situ, verificando sus propiedades de viscosidad, sedimentación, fluidez y resistencia.

- d. En el caso de utilizar una mezcla con arena, se debe definir la granulometría de la arena de tal manera que no afecte los equipos de inyección y evitando la presencia de agentes contaminantes que puedan afectar la mezcla con arena y las futuras mezclas.

- Curva de Penetrabilidad

La curva de Penetrabilidad de la inyección se define por tres parámetros:

1. La penetrabilidad = Caudal de Absorción/Presión (Lpm/m/bar)
2. El caudal de absorción máxima de la lechada por metro (Lpm/m)
3. La presión máxima en la boca del taladro (bar)

La curva de penetrabilidad (Figura 3B) permite identificar daños en la roca y/o problemas de hidrofracturamiento, así como también evita el consumo descontrolado de volúmenes de lechada debido a la presencia de cavernas kársticas, lo cual sería desfavorable económicamente al proyecto.

La presión máxima en la boca del taladro es un valor definido en las pruebas de inyección y/o durante el desarrollo de los trabajos de inyección en los primeros taladros inyectados. Se puede definir una presión máxima basada en la curva presentada por A.C. Houlsby en 1977 (Figura 1A). Esta presión deberá ser lo suficientemente alta para evitar problemas de hidrofracturamiento en la roca.

El caudal de absorción máxima está relacionado directamente con el volumen máximo fijado por tramo de inyección. Este volumen no es un límite fijo absoluto, sin embargo es un valor en el cual se deberá tomar una decisión. Por ejemplo:

- Continuar la inyección con el mismo tipo de mezcla.
- Parar la inyección, cambiar la mezcla a una más gruesa y continuar la inyección.
- Dar por terminada la inyección, decidiendo la perforación e inyección de otros taladros cercanos.

En el caso de no encontrar una mezcla adecuada para evitar un alto volumen de absorción, se toma la decisión de utilizar una mezcla con arena para llenar rápidamente las cavernas kársticas, esperar su fraguado e iniciar la inyección con el primer tipo de mezcla utilizado.

El valor de la penetrabilidad objetivo es 0.1 Lpm/m/bar, el cual deberá ser obtenido como producto de una buena inyección que es reflejada en la curva de penetrabilidad mediante una tendencia suave hacia este valor.

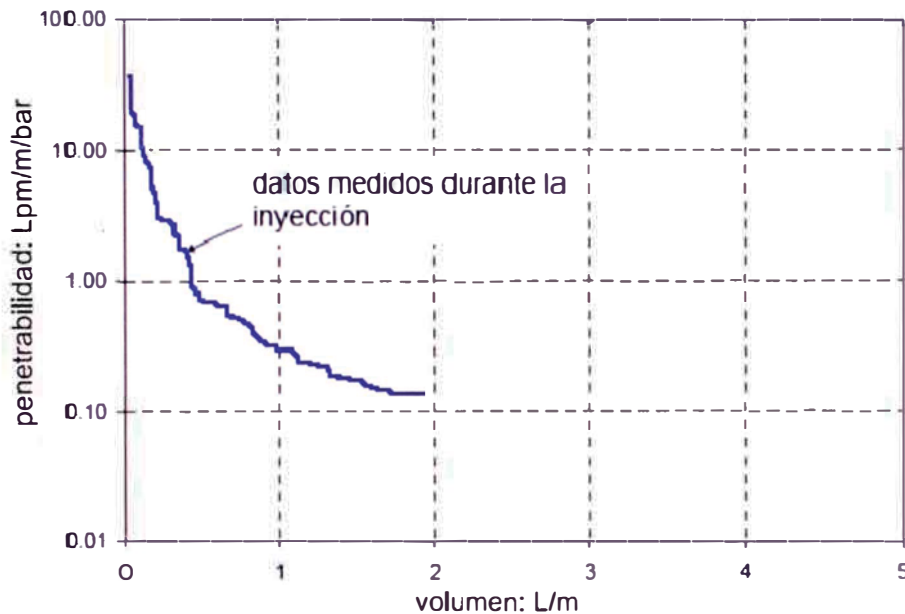


Figura 3B. Curva Penetrabilidad vs. Absorción de Lechada.

- Monitoreo del Proceso de Inyección

El monitoreo está basado en la observación en tiempo real de los parámetros de inyección presión y caudal (**P-Q**) y la curva de penetrabilidad mostradas en la pantalla de un computador.

La Figura 3C muestra la curva Presión vs. Caudal (**P-Q**), la cual es bastante útil para la toma de decisiones sobre la inyección y define la tendencia de la respuesta del terreno mediante la línea de tendencia en esta curva.

- Término de la Inyección

El término de la inyección será dado cuando el valor de penetrabilidad alcance un valor cercano o igual a 0.1 Lpm/m/bar, tal como se muestra en la Figura 3B y cuando la tendencia de la curva **P-Q** alcance el caudal máximo especificado o hasta alcanzar la máxima presión segura admisible de la roca, tal como se muestra en la Figura 3C.

Los procedimientos para el monitoreo e inyección mediante el método de control por penetrabilidad se mencionan en la sección 6.3.5, tanto en roca como en suelo.

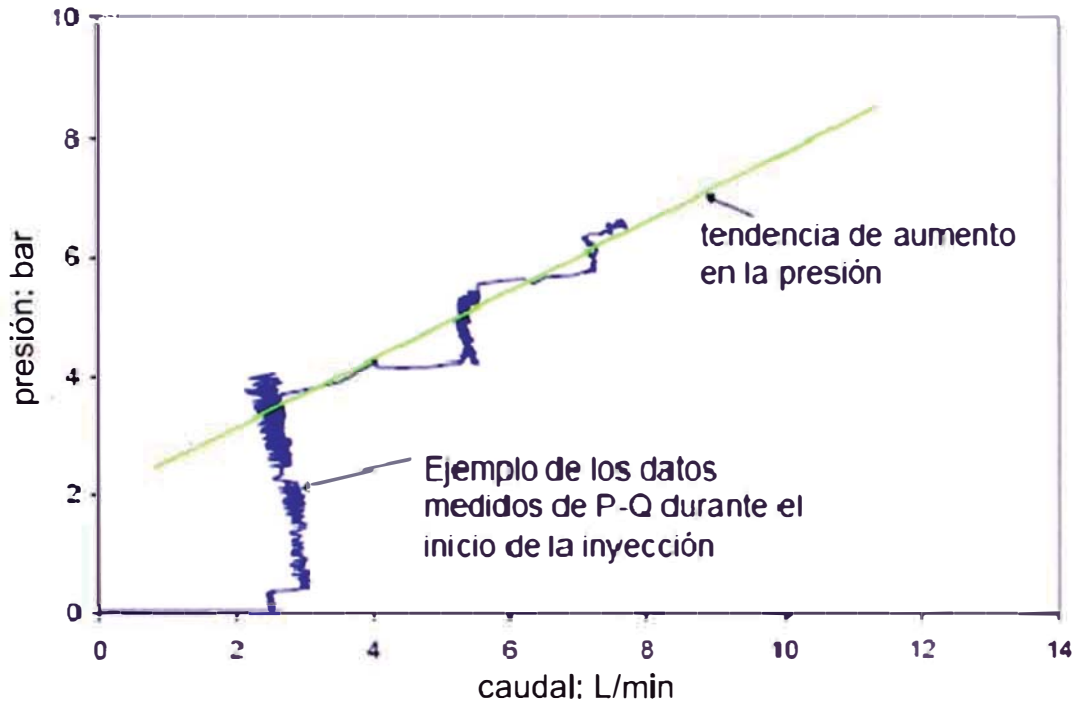


Figura 3C. Curva Presión vs. Caudal de inyección.

4.2 Pruebas de Agua

4.2.1 Consideraciones Generales

La inyección de la lechada deberá ser precedida por una prueba de agua a menos que las condiciones estén tan abiertas que estas pruebas serían inútiles y no se lograría el propósito de las mismas. Las pruebas de agua pueden ser realizadas para uno o más de los siguientes propósitos:

1. Ayudar a decidir si es o no necesaria la inyección.
2. Para conocer la presión crítica y por ende la máxima presión segura de inyección.
3. Para ayudar a deducir el tamaño relativo de la fractura.
4. Para asistir en la identificación de extrañas absorciones bajas de lechada.
5. Para valorar los efectos de la secuencia de cierre.
6. Para verificar que la permeabilidad estándar deseada ha sido alcanzada.

Los siguientes beneficios casuales también son alcanzados debido a las pruebas de agua:

1. La roca seca sobre el nivel de agua es humedecida condicionadamente, reduciendo la tendencia del agua a ser absorbida fuera de la lechada prematuramente.
2. Se verifica que los packers estén adecuadamente obturados y no exista fuga a través de la roca alrededor del packer.
3. La comunicación entre taladros puede ser identificada, permitiendo la preparación de los equipos, para múltiples conexiones.
4. La fuga superficial puede ser identificada, permitiendo potencialmente el tratamiento superficial suplementario a ser realizado antes del inicio de la inyección.

El valor de permeabilidad del macizo rocoso es medido en unidades de Lugeon (UL). El procedimiento de la prueba de Lugeon, tal como se desarrolló inicialmente, requirió la aplicación de una presión estándar de 10 bares (1,000kPa), pero ha sido modificado para acomodar el uso de un rango de presiones generalmente más aceptable (Houlsby, 1976).

4.2.2 Pruebas de Lugeon

En su forma más pura, la prueba de Lugeon trae consigo el desarrollo de cinco pruebas de agua consecutivas, cada una de 10 minutos de duración (Houlsby, 1976). La primera prueba se realiza a una presión baja, la segunda a una presión media, y la tercera a una presión pico; la cuarta prueba duplica la presión utilizada para la primera prueba y la prueba final se realiza a la misma presión utilizada en la primera prueba. Como una práctica general, la extrapolación lineal es utilizada para calcular la permeabilidad en unidades de Lugeon para cada prueba, tal como sigue:

1 UL= 1 litro/m/minuto a una presión de 10 bares, lo que se interpreta como un litro de agua absorbida por metro de longitud de prueba, por minuto a una presión de 10 bares. En términos de unidades de permeabilidad tipo velocidad, la relación calculada muy aproximada es: $1 \text{ UL} = 1.3 \times 10^{-7} \text{ m/s}$.

Para dar un sentido de proporción a la unidad de Lugeon, se puede mencionar que:

- 1 UL es el tipo de permeabilidad donde la inyección es apenas necesaria.
- 10 UL garantiza la inyección para los trabajos de reducción de filtración.
- 100 UL es el tipo de permeabilidad encontrada en lugares con juntas relativamente abiertas o en fundaciones escasamente agrietadas donde las juntas son muy abiertas.

Para calcular las unidades de Lugeon a partir de los resultados de las pruebas, la fórmula es:

$$UL = \frac{\text{litros/m/minuto} \times 10 \text{ bares}}{\text{presión actual (bares)}}$$

La presión actual de la prueba es aún menor que la definida por Lugeon de 10 bares debido a que es bastante alta para muchas condiciones de fundación. Se asume una relación de línea recta entre la presión actual y la presión de definición; lo cual no es estrictamente correcto, pero una relación más precisa no es sujeto de complicación en vista de las aproximaciones hechas cuando se utiliza los resultados de todas maneras.

4.2.2.1 Sensibilidad de la Unidad de Lugeon

La prueba de Lugeon tiene su máxima sensibilidad en situaciones de baja permeabilidad. Esto es apropiado porque aquellas son las únicas en donde las decisiones de inyección pueden ser circunstanciales y por ende necesitan una mayor certeza que cuando la permeabilidad es mayor y la inyección es obviamente necesaria.

El realismo de las unidades de Lugeon disminuye en forma logarítmica:

- En el rango de 1 a 5, cada variación de 1 UL es significativa.
- Entre 5 y 10, los incrementos significativos son alrededor de 2 UL.
- Entre 10 y 15, los incrementos significativos son alrededor de 5 UL.
- Entre 15 y 50, los incrementos significativos son alrededor de 10 UL.
- Entre 50 y 100, los incrementos significativos son alrededor de 30 UL.

Aunque la escala no tiene límite superior, arriba de 100 UL no tiene sentido distinguir aún más. Todos los valores tienen el mismo significado en términos de decisión de inyección: la inyección es muy necesaria. La práctica recomendada es citar los valores en este rango como > 100 UL sin una elaboración adicional.

Los valores de Lugeon nunca deberán ser dados en decimales. Siempre los valores calculados deberán ser redondeados al mayor número más cercano excepto para valores menores a 1 UL; cualquier valor en este rango que este arriba de cero deberá ser redondeado a 1 UL.

Es muy importante mencionar que los valores de Lugeon nunca deben ser usados sin tener alguna idea del tamaño de las grietas y el espaciamiento de las mismas para los cuales dichos valores aplican. Esto se debe a que el mismo valor de Lugeon puede ser obtenido de una simple grieta larga como de muchas otras más finas.

4.2.2.2 Tipos de Flujo

Las cinco presiones antes mencionadas pueden ser denotadas como A-B-C-B-A, para las cuales se calcula el valor de Lugeon utilizando la fórmula mencionada en la sección 4.2.2. Seguidamente los cinco valores de Lugeon son analizados para determinar el tipo de flujo. Los tipos de flujo son:

Flujo Laminar

El flujo laminar es representado gráficamente en la Figura 3D, las presiones son representadas como barras rayadas. Se puede observar la forma en la que la presión alcanza un pico en la tercera corrida y luego se reduce en un patrón simétrico. Las barras oscuras representan los valores de Lugeon calculados para cada presión respectivamente. En la figura 3D los valores de Lugeon son casi los mismos para cada una de las presiones. La razón de esto es el tipo de flujo, el cual es laminar (por ejemplo, el flujo suave a lo largo de grietas sin presencia de turbulencia) pero no exclusivamente, de hecho considerando la mezcla del tamaño de las grietas y las condiciones encontradas.

Cuando el flujo es laminar, cualquiera de los cinco valores de Lugeon puede ser aceptado como el resultado de la prueba y reportado como tal o también se puede utilizar el promedio de ellos.

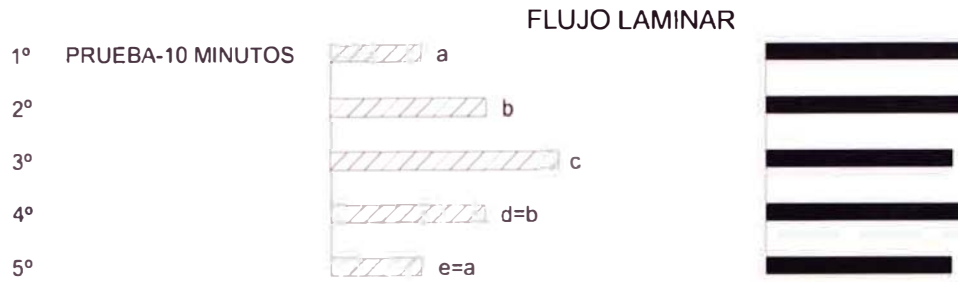


Figura 3D. Valores de Lugeon similares para cada corrida indican un flujo laminar.

Flujo Turbulento

El flujo turbulento es representado gráficamente en la Figura 3E, los valores de Lugeon para las cinco presiones no son más grandes que las mismas. Se puede observar que ocurre una distribución simétrica, el valor de Lugeon más bajo corresponde a la presión más alta, lo cual indica que es un flujo turbulento (por ejemplo, usualmente debido a un flujo rápido en grietas más anchas). Este valor más bajo deberá ser reportado como el resultado de la prueba.

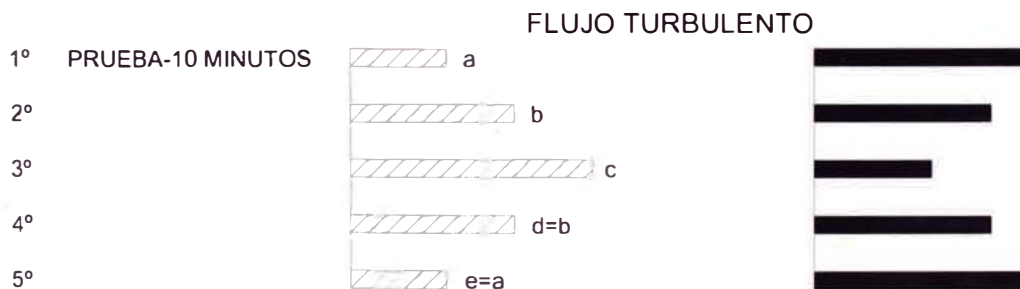


Figura 3E. Los valores de Lugeon simétricamente a las presiones más altas indican un flujo turbulento.

Flujo de Dilatación

Este tipo de flujo se representa en la Figura 3F. El patrón de los valores de Lugeon mostrados es algo contrario al flujo turbulento. La presión pico produce un valor de Lugeon más alto que los correspondientes a las presiones anteriores y posteriores. Esta presión ha sido suficiente para dilatar localmente las grietas mediante la compresión de los materiales más suaves o debido al cierre de grietas paralelas adyacentes. La dilatación ha sido temporal y por esta razón la permeabilidad reportada deberá ser la obtenida a las presiones más bajas o

alternativamente a las presiones medias, si estas son menores que las presiones bajas, indicando que el flujo turbulento ocurrió previo a la dilatación.

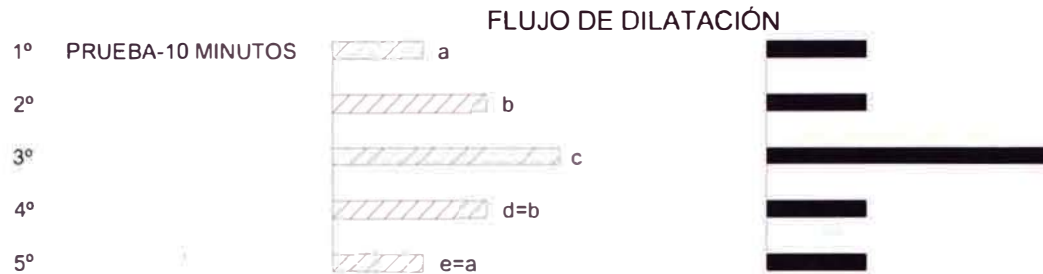


Figura 3F. El valor Lugeon alto a la presión más alta indica un flujo de dilatación.

Lavado

La Figura 3G muestra como las permeabilidades aumentan mientras la prueba se ejecuta. Las permeabilidades no decrecen cuando las presiones lo hacen. Esto indica el permanente lavado (wash-out) de los materiales rellenos en las juntas o el movimiento de la roca causado por la prueba misma, seguido por un reordenamiento donde los fragmentos de roca caen en las juntas y previenen el cierre después de la disminución de la presión. Así mismo, estas características indican que las presiones de la prueba son muy altas. La permeabilidad reportada puede ser tomada como la medida en la última corrida (a la presión baja); esto presume que la presión pico presenta alguna semejanza a una presión eventual en servicio, lo cual produciría algunos resultados similares si no fuera inyectado.

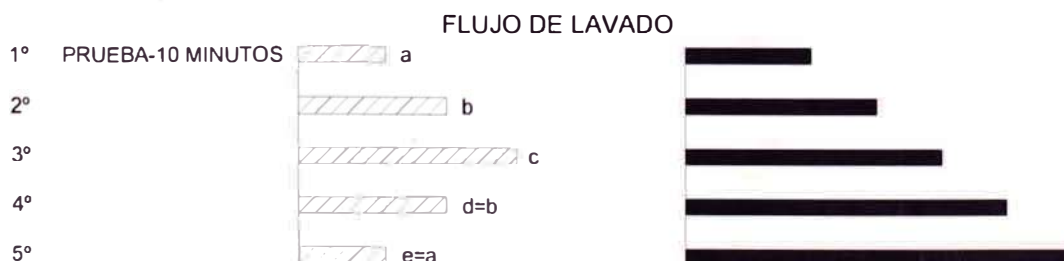


Figura 3G. Los valores de Lugeon aumentan aun cuando la presión cae, indicando un lavado.

Flujo de Relleno

La Figura 3H muestra un patrón contrario al flujo anterior. Los valores de Lugeon se están reduciendo progresivamente, indicando que los vacíos, las grietas, etc. están siendo llenados y por lo tanto el agua no puede ingresar más. La acción prudente consiste en realizar el ensayo hasta que cese la tendencia, indicando que todos los espacios vacíos han sido llenados. Inclusive una mejor acción es saturar la fundación antes de iniciar la prueba. La permeabilidad reportada deberá ser la más baja: esto es una indicación que la permeabilidad es la que ocurre una vez que se llenó los espacio vacíos.

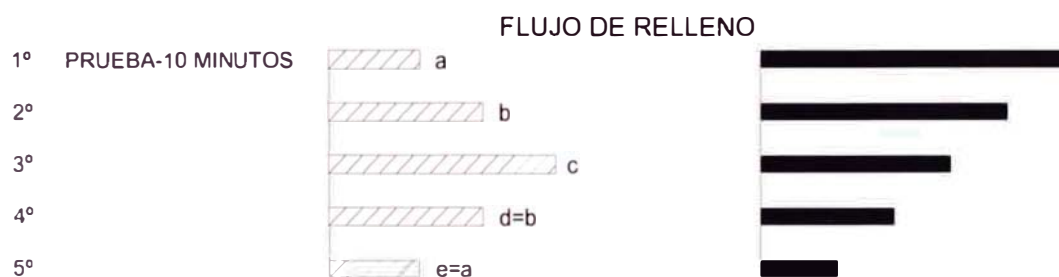


Figura 3H. La disminución de los valores de Lugeon a lo largo de la prueba indica el relleno de vacíos.

4.2.3 Pruebas de Rutina

Como una medida de rutina durante el curso del trabajo, debería ser suficiente conducir una prueba de 5 minutos que no exceda la presión de cobertura. Houlsby (1981) recomienda que se debiera realizar tres pruebas de 5 minutos. Aproximadamente resultados iguales en las tres pruebas indicarían que se ha realizado una prueba representativa. Una disminución de la absorción indicaría el llenado de vacíos y un aumento en las absorciones indicarían un lavado de los vacíos o un levantamiento de la fundación.

4.3 Técnicas de Inyección

4.3.1 Inyección Ascendente

El procedimiento de inyección más utilizado es perforar el taladro continuamente hasta la profundidad total planeada previo a las pruebas de agua y al inicio de la inyección de lechada, tal como se muestra en la Figura 3I. Luego de las pruebas de agua, la inyección empieza colocando el packer en la parte superior del tramo

de inyección más bajo. Cuando este tramo es inyectado hasta alcanzar el rechazo y la presión se haya disipado, el packer es levantado hasta alcanzar la parte superior del siguiente tramo superior; este proceso es repetido hasta el término de la longitud del taladro. Este procedimiento es generalmente aplicable cuando no hay problemas para fijar el packer y/o cuando no existen problemas de by-pass en el macizo rocoso.

4.3.2 Inyección Descendente

La inyección descendente comprende la perforación de un taladro hasta una profundidad limitada y la inyección del mismo en uno o más tramos antes de la perforación del taladro a una profundidad mayor. La lechada es usualmente lavada y retirada del taladro antes que se endurezca, para minimizar la reperfuración. Esta técnica es utilizada donde la roca cerca a la superficie es altamente fracturada o donde existe una ganancia o pérdida de agua. Dependiendo del grado de conservatismo que es deseado, los tramos más bajos pueden ser inyectados desde la superficie con altas presiones, o los tramos nuevamente perforados pueden ser aislados mediante el uso de packers. Ver Figura 3J.

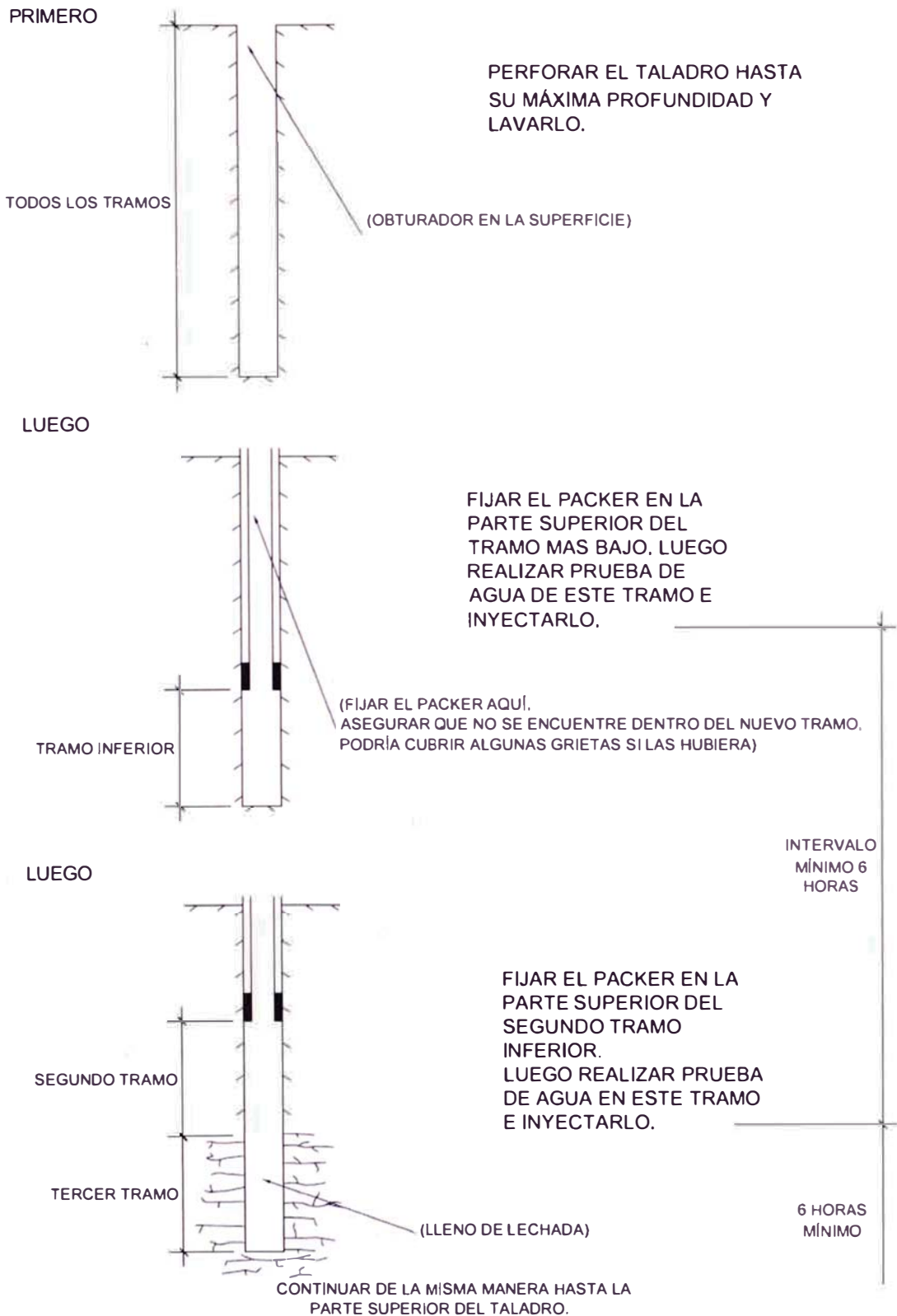


Figura 3I. Técnica de inyección ascendente

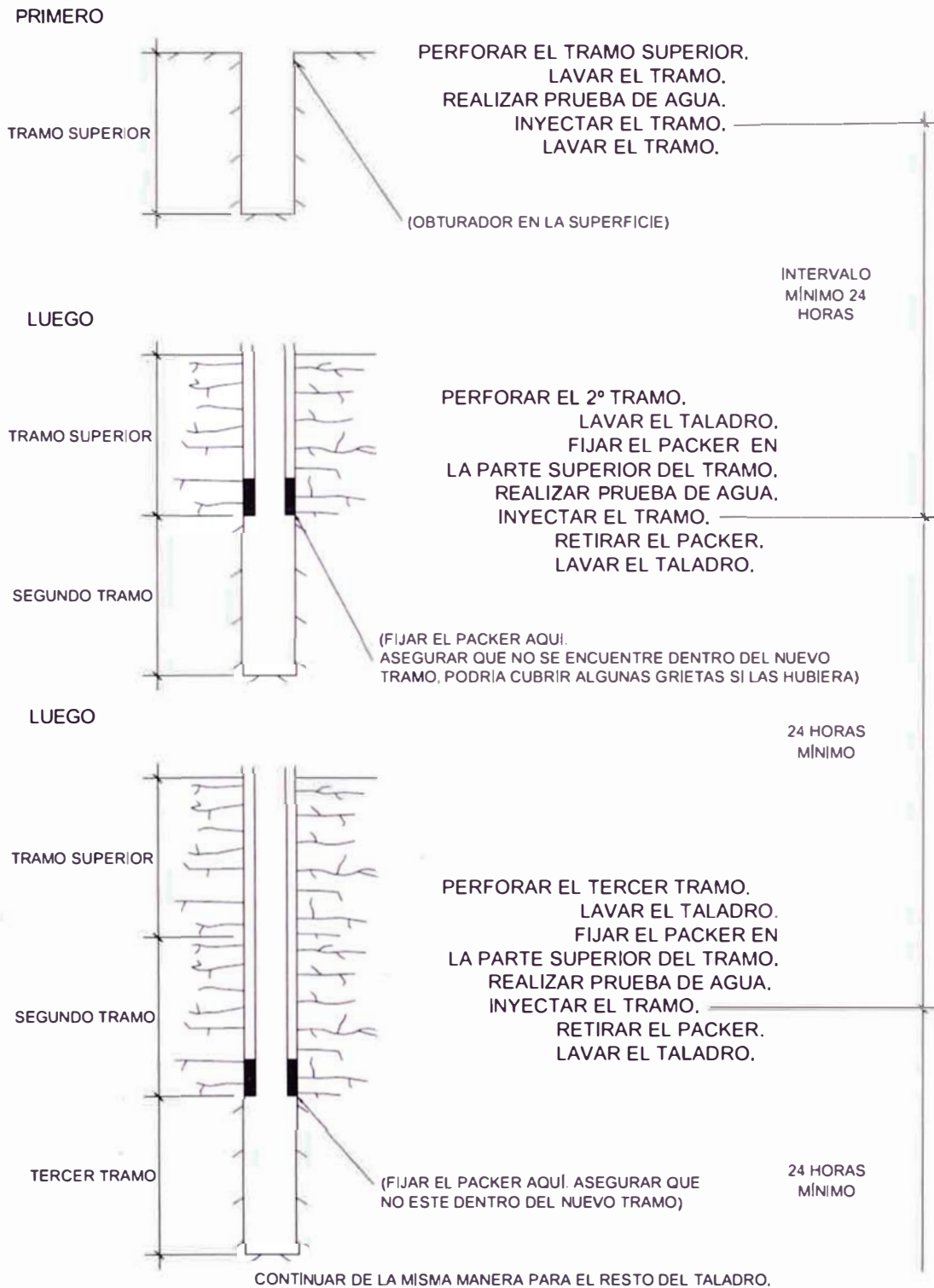


Figura 3J. Técnica de inyección descendente.

Capítulo 5 PRESA DE RELAVES DE ANTAMINA: BREVE DESCRIPCIÓN E INVESTIGACIÓN DE LA FUNDACIÓN

5.1 Introducción

La presente tesis resume las actividades de construcción y aseguramiento del control de calidad (CQA) de los trabajos realizados durante el periodo comprendido entre el 27 de Marzo y 26 de Diciembre del 2006, para los trabajos de inyecciones sobre el estribo derecho de la presa de relaves de Antamina que se realizó simultáneamente con el segundo recrecimiento de la misma.

Así mismo, la tesis resume los principales aspectos del trabajo, incluyendo el programa de investigación preliminar, el criterio de diseño de las inyecciones, la metodología de inyección y los resultados de cierre obtenidos.

A continuación se presenta una breve descripción de las características de la presa de relaves de Antamina.

5.2 Breve Descripción de la Presa de Relaves de Antamina

La presa de relaves de Antamina es una estructura de tierra, conformada y zonificada por materiales de diferente granulometría, cuya construcción ha sido diseñada para realizarse en 4 etapas. La altura final de la presa es de 240m y una longitud de cresta de 986m.

Así mismo, la presa de relaves cuenta con un plinto de concreto armado construido a lo largo de la fundación de la presa aguas arriba y una cortina de inyección que se han ido construyendo conjuntamente con las etapas de construcción y en función a las necesidades del proyecto.

5.2.1 Ubicación del Proyecto

La mina Antamina esta ubicada en la zona de los andes del Perú en el departamento de Ancash, aproximadamente a 270km al norte de Lima. Es una mina a tajo abierto, en la cual todas las instalaciones y estructuras están a las elevaciones entre 3800 a 4800 msnm. Ver Plano II-1(Anexo II).

Dentro de las instalaciones de la mina, se encuentra la presa de relaves, ubicada aguas arriba de la confluencia de las quebradas Huincush y Tucush. Ver Plano II-2 (Anexo II).

5.2.2 Materiales que Conforman la Presa

En el Plano II-3 (Anexo II) se muestra la sección típica de la presa de relaves de Antamina, donde se muestra la zonificación y los materiales que conforman la presa tal como sigue:

- **Material de Filtro (Zona 2B)**

Este material es utilizado para la construcción del talud aguas arriba del filtro y consiste en grava y arena procesada, teniendo un tamaño máximo de partícula de 75mm y capas de colocación de 0.5m.

- **Material de la Zona de Transición (Zona 3A)**

Este material es utilizado para la construcción de la transición ubicada inmediatamente aguas abajo del filtro (Zona 2B) y consiste en una mezcla de canto rodado procesado, grava y arena, teniendo un tamaño máximo de partícula de 300mm y capas de colocación de 0.5m.

- **Material de Relleno (Zona 3B)**

Este material es utilizado para la construcción del cuerpo principal en la zona aguas arriba de la presa y consiste de fragmentos resistentes de roca, teniendo un tamaño máximo de partícula de 1000mm, una resistencia a la compresión uniaxial mínima de 40MPa y no más del 60% de pérdidas durante la prueba de abrasión de Los Angeles y capas de colocación de 1.0m.

- **Material de Relleno (Zona 3C)**

Este material es utilizado para la construcción del espaldón de la zona aguas abajo del terraplén de la presa y consiste de fragmentos de roca dura con una resistencia a la compresión uniaxial mínima de 40MPa y no más del 60% de pérdidas durante la prueba de abrasión de Los Angeles, cumpliendo un tamaño máximo de partícula de 2000mm y capas de colocación de 1.0m

- **Material Curb de Concreto**

Este material es utilizado para la conformación de la cara aguas arriba de la presa y consiste de un mortero de concreto de resistencia muy baja (4MPa) ya

que su función es confinar las capas de colocación del material 2B y preparar una superficie regular para la colocación de geomembrana HDPE-60mil.

5.2.3 Dimensiones y Fases de Construcción

La construcción de la presa de relaves de Antamina ha sido diseñada en cuatro etapas: Starter Dam, Stage 1, Stage 2 y Stage 3. Esta construcción se inició con una presa de arranque (Starter Dam) hasta la cota 4015msnm, un plinto de concreto armado y una cortina de inyección hasta la cota 4010nsnm. La siguiente etapa Stage 1 alcanza la cota 4040msnm, la etapa Stage 2 alcanza la cota 4063msnm y finalmente la etapa Stage 3 alcanza la cota 4090msnm.

En el Plano II-3 (Anexo II) se muestra las dimensiones de cada fase de construcción de la presa.

5.3 Geología de la Presa de Relaves de Antamina

La presa de relaves de Antamina esta alineada a través del cauce del río Huincush, en la transición desde una garganta no muy ancha de un relieve abrupto hasta un valle abierto y ancho.

Aguas abajo de la presa, el basamento rocoso está compuesto por capas resistentes de calizas kársticas (Formación Jumasha). Aguas arriba de la presa, el basamento rocoso está compuesto de rocas sedimentarias compuestas por capas arcillosas degradables (Formación Celendín Superior).

La presa de relaves está situada en la transición desde estratos principalmente de calizas hasta estratos arcillosos, en una unidad denominada formación Celendín Inferior. Las rocas sedimentarias en las tres formaciones buzan aguas arriba desde 40° hasta 55° y tienen un rumbo en un ángulo suavemente oblicuo hacia el alineamiento de la presa de relaves. Consecuentemente, el estribo izquierdo descansa sobre las rocas arcillosas de la Formación Celendín Superior (favorable en términos de filtración), mientras que el estribo derecho es interceptado por discontinuidades (desfavorable en términos de filtración).

La geología del basamento rocoso en el estribo derecho es presentada en los planos II-6, II-7 y II-8 (Anexo II). Las fallas inversas conjugadas (back-thrust) mostradas en los planos son interpretadas para entender la complejidad de la hidrogeología en el estribo derecho mediante las intercepciones de agua

subterránea encontradas en la intersección de los estratos de baja permeabilidad y en los detritos de falla dentro de los back-thrusts.

En base a la geología descrita anteriormente, a la presencia de karst en la roca y al aumento de las filtraciones aguas abajo de la presa de relaves observadas durante el 2004 y 2005, se consideró la extensión de la cortina de inyección en los estribos de la presa, por lo que se desarrolló un programa de investigaciones geotécnicas de la fundación de la presa.

Capítulo 6 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE LA FUNDACIÓN DE LA PRESA DE RELAVES CON FINES DE IMPERMEABILIZACIÓN

Como parte del programa de investigación de campo se ejecutaron cuatro taladros de exploración y tres taladros de verificación con recuperación de testigo, para mejorar el entendimiento de la secuencia complicada de las intercalaciones de caliza kárstica, lodolitas y limolitas, las cuales son interceptadas y cortadas por diferentes discontinuidades (backthrust) en el estribo derecho de la presa de relaves.

Así mismo, se instalaron piezómetros de cuerda vibrante en los taladros exploratorios de perforación diamantina GA06-01, GA06-02, GA06-03A y GA06-04A.

Adicionalmente, las muestras de detritos de varios taladros de inyección fueron colectados y logueados durante las operaciones de perforación e inyección para correlacionar la ubicación aproximada de las capas potenciales de caliza kárstica.

La ubicación de los taladros de investigación es mostrada en el Plano II-6 (Anexo II). El resumen de la información de la perforación y las elevaciones de los piezómetros instalados son mostrados en las Tablas 5A y 5B respectivamente.

Tabla 5A Investigación de Campo – Información de Taladro de Perforación

Taladro	Buzamiento (°)	Azimut	Prof. (m)	Coordenadas en la Boca		Cota de la Boca (msnm)	Fechas de Perforación ¹	
				E (m)	N (m)		Desde	Hasta
GA06-01	50	N050	101.00	277433.5	8944741.8	4047.7	17-Abr-06	30-Abr-06
GA06-02	50	N020	130.10	277483.1	8944749.2	4072.4	1-May-06	9-May-06
GA06-03 ^a	50	N048	260.00	277539.9	8944756.8	4099.7	5-May-06	6-Jun-06
GA06-04 ^a	50	N050	282.00	277584.0	8944781.0	4126.2	17-May-06	14-Jun-06
RP-P7v	90	-	150.00	277456.3	8944757.3	4055.7	19-Oct-06	27-Oct-06
RP-P9	50	N228	131.00	277469.9	8944758.3	4069.2	19-Sep-06	11-Oct-06
Q13-13	90	-	74.00	277425.6	8944757.1	4050.0	23-Ago-06	27-Ago-06
RP-WT1	80	N093	110.15	277440.2	8944758.4	4051.0	8-Dic-06	11-Dic-06
TB-WT2	77	N270	103.40	277428.7	8944773.1	4051.0	12-Dic-06	15-Dic-06

NOTA: (1) No incluye el tiempo requerido para instalar los piezómetros y rellenar los taladros con lechada.

Tabla 5B Investigación de Campo – Detalles de la Instalación de Piezómetro

Taladro	Número de Piezómetro	Buzamiento (°)	Azimut	Prof. (m)	Coordenadas de Instalación		Cota de la Boca (msnm)	Fecha de Instalación
					E (m)	N (m)		
GA06-01	1	50	N050	99.00	277474.4	8944790.5	3971.9	3-Jun-06
GA06-02	1	50	N020	60.00	277519.4	8944762.4	4026.4	11-May-06
	2	50	N020	129.00	277561.1	8944777.6	3973.5	11-May-06
GA06-03A	1	50	N048	225.00	277636.7	8944864.3	3927.3	10-Jun-06
	2	50	N048	120.00	277591.5	8944814.1	4007.8	10-Jun-06
GA06-04A	1	50	N050	260.00	277691.4	8944909.0	3927.0	3-Sep-06
	2	50	N050	147.00	277644.7	8944853.4	4013.5	3-Sep-06
	3	50	N050	80.00	277617.1	8944820.4	4064.9	3-Sep-06

Capítulo 7 DISEÑO Y PROGRAMA DE INYECCIÓN EN LA PRESA DE RELAVES DE ANTAMINA

Es importante mencionar que la presente tesis sólo abarca los trabajos realizados en el estribo derecho para la construcción de la cortina de impermeabilización, bajo la presa de relaves de Antamina.

7.1 Áreas de Trabajo de Inyección

En el estribo derecho, fueron enfocados dos recorridos potenciales de filtraciones. Una descripción de cada recorrido y el trabajo realizado en cada una de estas áreas se resume en la Tabla 6A. Asimismo, en el Anexo XII se presentan los perfiles del análisis de filtraciones realizado.

Tabla 6A. Recorridos Potenciales de Filtraciones y Áreas Identificadas de Trabajo en el estribo derecho.

Área de Trabajo	Descripción del recorrido de filtración	Trabajo realizado
Zona de Filtro (TAM-tubos manguito)	Filtración poco profunda a través de las zonas de filtro atrás de la pared del estribo derecho	Inyección en materiales granulares mediante tube-à-manchette (TAM) e inyección del basamento rocoso para conectar la inyección previa.
Plinto e Intercepción (Roca)	Filtración profunda a través del basamento rocoso, involucrando la conexión a sistemas de karst mediante fallas inversas y/o otras discontinuidades	Inyección del basamento rocoso a aproximadamente 120m de profundidad continuando hacia arriba del estribo derecho hasta la cresta de la presa.

En el Plano II-4 se muestran las cinco líneas (TA-TE) de inyección utilizadas en la zona de trabajo. La intercepción de la zona de filtros fue concentrada a lo largo de la línea TB, las otras líneas funcionaron como líneas de consolidación.

La cortina vertical del estribo derecho en roca sigue la línea entre el taladro P5 (del programa de inyecciones del 2005) hasta el taladro TB-P5, doblando a lo largo de la línea conector desde TB-P5 hasta RP-P1 para luego continuar hacia

arriba a lo largo del plinto del estribo derecho entre los taladros de inyección RP-P1 y RP-P12 (Ver Plano II-5).

7.2 Consideraciones de Diseño

Los análisis de los recorridos potenciales de filtraciones y la interpretación geológica del basamento rocoso en el estribo derecho indicaron que una cortina de 110m de profundidad proveerá la reducción deseada y un efectivo control de las filtraciones. A esta profundidad se contó con una conductividad hidráulica objetivo alrededor de 2×10^{-7} m/s (2 Lugeon) sobre un ancho efectivo de la cortina de inyección de 5m con una reducción del caudal por metro de sección mayor al 77%. El cuadro comparativo de reducción de filtraciones y las secciones del análisis se presentan en las Figuras XII-2, XII-3 y XII-4 (Anexo XII).

7.3 Programa de Inyección

7.3.1 Metodología de Trabajo

7.3.1.1 General

Las actividades de inyección a lo largo de la cortina del estribo derecho entre el taladro P5 hasta el taladro RP-P4v, a lo largo de la antigua cortina del programa de inyecciones del 2005 y dentro de la zona de filtros, se realizaron desde una plataforma de enrocado (rockfill) denominada "espigón", conformada tres veces debido al aumento del nivel de agua en el embalse de relaves (Fotos 3 y 4). La perforación e inyección realizada entre los taladros RP-P4v y RP-P11v, sobre el plinto del estribo derecho, se realizaron desde una serie de andamios contruidos independientemente (Foto 5).

7.3.1.2 Equipo de Perforación

La mayoría de las perforaciones se realizaron con máquinas de perforación rotoperkusiva con presión de aire. La perforadora Track Drill AP-442 se utilizó para instalar y retirar tubería de revestimiento a profundidades no mayor a 30m (Foto 10). La perforadora Mustang A-66 CB, de mayor potencia, se utilizó con mayor frecuencia en los taladros del estribo derecho ubicados sobre el espigón (Fotos 11 y 12).

Así mismo, se utilizaron las perforadoras rotoperkusivas con aire, Diamec 262 de Atlas Copco para realizar todas las perforaciones desde los andamios sobre el Plinto del estribo derecho (Foto 13). Los taladros de investigación y algunos taladros exploratorios adicionales fueron perforados con el equipo Long Year LY-38 (Foto 14).

El equipo de perforación Mustang, fue reemplazado por el equipo de perforación Diamec 282 (Foto 15) el cual tenía la misma facilidad de perforación pero no el mismo rendimiento de avance. La Diamec 282 fue utilizada para la recuperación de testigo de los taladros de confirmación RP-WT1 y TB-WT2.

7.3.1.3 Planta de Inyección, Equipo de Inyección y Monitoreo

En el estribo derecho se utilizaron tres plantas de inyección y cada una estuvo compuesta de un mezclador coloidal, un agitador con paletas y dos bombas de inyección de cavidad progresiva (Foto 16). Las bombas de cavidad progresiva utilizadas para la inyección de lechada fueron dos bombas Seepex con capacidad de 60 Lpm y 24 bares de presión (Foto 17) y dos bombas Moyno con capacidad de 40 Lpm y 30 bares de presión (Foto 18). La velocidad de rotación de las bombas se controló mediante un regulador de voltaje tipo dial desde la cabina de monitoreo de inyección (Foto 19).

El sistema computarizado utilizado involucró el uso de transductores, caudalímetros magnéticos y un software programable para producir presentaciones en tiempo real de la información. La Figura II-1 (Anexo II) muestra una ilustración de lo que se mostraba en pantalla. El sistema suministró un monitoreo electrónico de la inyección y el control en tiempo real de los parámetros de inyección (caudal, presión, penetrabilidad y volumen inyectado) lo que ayudó a detectar rápidamente la ocurrencia de hidrofracturamientos.

El aislamiento de los tramos de inyección en roca se realizó mediante obturadores (packers) inflados con nitrógeno, los cuales utilizaron gomas (bimbar) de diámetro HQ (Foto 21). En la zona de filtros se instaló tubos manguitos (TAM) dentro de cada taladro de inyección (Foto 23). Los TAM consistieron en tuberías de PVC de 50mm de diámetro con arreglos de agujeros de 5mm para la salida de la lechada durante la inyección (Foto 24). Después de la instalación, las zonas de TAM fueron aisladas usando packers con bimbar de diámetro BQ (Foto 25).

7.3.2 Secuencia del Trabajo

La secuencia del trabajo realizado se dividió en:

- Perforación, instalación e inyección utilizando tubos manguito (TAM)
- Perforación e inyección desde la plataforma de enrocado (espigón), atravesando el enrocado (rockfill) y los relaves hasta el basamento rocoso.
- Perforación e inyección del basamento rocoso desde los andamios a lo largo del plinto de concreto armado del estribo derecho.

En general, la secuencia de las inyecciones se realizó inicialmente con la inyección de todos los taladros primarios para prevenir la comunicación temprana entre taladros, para luego continuar con los taladros primarios alternos, seguidos por los taladros secundarios, terciarios y los de mayor orden, utilizando la técnica tresbolillo.

En los 60m superiores de algunos taladros se emplearon las técnicas de inyección descendente las cuales estuvieron comprendidas por la perforación de 20m a 30m, dependiendo de la estabilidad del taladro, la proximidad interpretada del fracturamiento o la presencia de zonas de pérdida de retorno de agua y finalmente la inyección ascendente del avance perforado.

7.3.2.1 Tubos Manguito en Material Granular

La instalación de los tubos manguito (TAM) se realizó en la zona de filtros mediante la colocación de un revestimiento tipo ODEX que cruzó el rockfill y el material de relave hasta un mínimo de 0.5 m dentro de la roca. Luego de la instalación del revestimiento en la roca, el tubo manguito (TAM) fue insertado en el taladro de inyección; el espacio anular entre el revestimiento y el TAM fue llenado con una lechada rica en bentonita y de baja resistencia denominada "vaina". Previo a las pruebas de agua y/o de la inyección, la "vaina" endurecida fue quebrada mediante la aplicación de una presión de inyección. Luego de este paso, el caudal y la presión de inyección disminuyeron y dichas actividades se realizaron de forma normal.

En el área de la zona de filtro, se necesitaron cinco filas (TA-TE) de taladros de inyección para crear un tapón de los materiales de la zona de filtro inyectados,

siendo la fila TB la línea en la cual la cortina de inyección se extendió dentro del basamento rocoso. Cuando se completó la inyección del basamento rocoso a lo largo de la fila TB, un TAM se instaló y se inyectó en cada taladro primario, primarios alternos y finalmente secundarios en las filas TA, TC, TD y TE.

Después de la instalación e inyección de todos los TAM terciarios a lo largo de la fila TB, se instaló la fila MF, una fila de taladros primarios y secundarios localizada un metro aguas arriba de la fila TB en la que se utilizó cemento microfino.

7.3.2.2 Actividades de Inyección del Macizo Rcoso desde el Espigón

Las plataformas de enrocado (Espigón) fueron construidas sobre la extensión de la cortina debajo de la zona de filtros a lo largo de la fila TB. Toda la perforación se realizó con revestimiento de acero, hasta aproximadamente 0.5m en roca para luego extender los taladros hasta la profundidad de diseño y realizar la inyección.

Debido a las condiciones del terreno encontradas, la ocurrencia de by-pass durante la inyección y a la pérdida de packers, se utilizaron técnicas de inyección descendente durante los 60m superiores de cada taladro e inyección ascendente para los metros restantes.

La conexión entre la nueva cortina de inyecciones y la antigua cortina, realizada durante el programa de inyecciones del 2005, se realizó mediante la inyección de taladros comprendidos entre los taladros S-9 y WT-1 de la antigua cortina (Ver Plano II-5).

7.3.2.3 Actividades de Inyección desde los Andamios

Las actividades de perforación e inyección del basamento rocoso a lo largo del plinto del estribo derecho se realizaron desde las plataformas de los andamios. Los taladros primarios alternos, los taladros secundarios, terciarios y cuaternarios fueron inyectados siguiendo el método “tresbolillo” para evitar la comunicación entre los inyectados previamente.

Basados en los derrumbes de los taladros y los packers atrapados anteriormente, la inyección descendente también fue empleada en los taladros ubicados sobre el plinto.

7.3.3 Diseño de Mezcla de Inyección

Varias mezclas fueron ensayadas en el laboratorio e in situ antes del inicio del proceso de inyección. La mezcla utilizó una combinación de agua, cemento puzolánico Tipo 1P, superplastificante Euclid Euco 37 y bentonita de baja resistencia.

Un resumen de las mezclas propuestas ensayadas in-situ, incluyendo aquellas desarrolladas empleando cemento Atlas Tipo 1P y cemento microfino Rheocem 800, es presentado en la Tabla 6B. La secuencia más detallada de los ensayos de mezcla es presentada en las Tablas IV-1 y IV-2 en el Anexo IV. El criterio para el diseño de mezclas fue utilizar una mezcla rica en cemento, un superplastificante y obtener una alta resistencia y una larga durabilidad versus la lixiviación.

Tabla 6B Resumen de Mezclas de Inyección Utilizadas

Mezcla	Relación A:C	SuperP (%)	Bentonita (%)	Delvo (%)	Celbex (%)	Arena (a:c:s)	Marsh (s)	Densidad (gr/cm ³)	Bleed (%-2 hr)
MF	1.2 : 1	4	-	2	-	-	31.5	1.54	1
A	0.7 : 1	2	-	-	-	-	31.5	1.61	2
B	0.7 : 1	-	-	-	-	-	35.0	1.62	2
C	0.7 : 1	-	0.40	-	-	-	45.0	1.64	1
D	0.7 : 1	-	0.65	-	-	-	60.0	1.72	0
E	0.7 : 1	-	1	-	-	-	160.0	1.68	0
1	4.6 : 1	2	18	-	-	-	38.0	1.22	0
2	4.0 : 1	2	18	-	-	-	43.0	1.25	0
3	3.3 : 1	2	18	-	-	-	92.0	1.28	0
4	3.3 : 1	-	18	-	-	-	112.5	1.32	0
Celbex	0.7 : 1	-	-	-	0.235	-	>180	-	0
Arenosa	0.8 : 1	-	-	-	-	0.8:1:1	>180	-	0
Vaina	2.0 : 1	-	7.5	-	-	-	125	1.29	0
Piezo	2.5 : 1	-	30	-	-	-	>180	-	0

NOTA:

1. Todos los dosajes de agregados fueron calculados con respecto al peso del cemento.

Las inyecciones se iniciaron con la Mezcla A, la cual tenía una dosificación en peso Agua:Cemento entre 0.7:1 a 0.8:1, con porcentajes de superplastificante entre 0.7% y 2.0%, con una viscosidad Marsh de 30 segundos.

El engrosamiento de la mezcla se especificó en 3 pasos (Mezcla B, C y D). La mezcla B estuvo conformada sólo por cemento con una dosificación en peso entre 0.7:1 y 0.8:1, las mezclas C y D conformadas por cemento, agua y bentonita, con viscosidades Marsh entre 45 y 60 segundos respectivamente. Una quinta mezcla (Mezcla E), con viscosidad Marsh mayor a 150 segundos, se agregó para los tramos con posible presencia de Karst y debido a la presencia de cavernas kársticas se utilizó una mezcla con arena, cemento, agua y el aditivo tixotrópico Celbex 653.

Así mismo, durante la inyección de la zona de filtros se utilizó cemento microfino Rheocem 800 con el aditivo superplastificante Rheobuild 2000 PF y el estabilizador Delvo (retardante de fragua), obteniendo así una viscosidad Marsh de 32 segundos y una sedimentación menor al 5% en un periodo de 2 horas.

7.3.4 Modificaciones de Diseño

Las modificaciones de diseño durante los trabajos de inyecciones abarcaron tanto la parte técnica como la de planificación, tales como provisión de accesos, plataformas de trabajo y bermas de seguridad. Asimismo, en el Anexo V se presenta un memorando técnico para la inyección en roca, el cual modificó el diseño inicial de las técnicas de inyección.

7.3.4.1 Estribo Derecho

Después del término de la perforación e inyección de los taladros primarios inclinados sobre el plinto del estribo derecho se tomó la decisión de cambiar a una cortina vertical. Para determinar la profundidad final de la cortina vertical en esta área, el taladro RP-P7v fue perforado con diamantina hasta la profundidad de 150m y en base al logueo de los detritos de las perforaciones de varios taladros y a las pruebas de agua se seleccionó la profundidad final de 120m (o bajo la base de la tercera posible capa de caliza kárstica encontrada).

7.3.5 Procedimientos de Inyección

7.3.5.1 Inyección en Roca empleando el Criterio de Penetrabilidad

La inyección en roca se realizó hasta que la presión objetivo de inyección sea lograda con el rechazo de la lechada, la cual fue inyectada a un caudal no mayor a 2.0 Lpm/m de la longitud del tramo, momento en el cual el caudal fue reducido para mantener la presión objetivo durante la inyección y hasta el rechazo.

Las presiones objetivo de inyección fueron determinadas a la mitad de cada tramo como 0.5bar/m de la profundidad debajo del contacto roca-suelo. El rechazo de inyección para un tramo dado fue inicialmente definido como un caudal menor a 0.5Lpm/m de la longitud del tramo por un periodo de 10 minutos.

La inyección fue iniciada con la Mezcla A y secuencialmente se engrosó la mezcla si el volumen de decisión relevante fue alcanzado y la presión de inyección fue menor al 20% de la presión objetivo para el tramo; siendo la secuencia de engrosamiento de mezcla:

- Mezcla A hasta 200L/m
- Mezcla B hasta 400L/m
- Mezcla C hasta 600L/m
- Mezcla D hasta 1000L/m

La revisión de las inyecciones de los taladros primarios TB-P1 a TB-P8 indicaron la presencia de hidrofracturamientos a presiones bajas de inyección, por lo que se creó un nuevo procedimiento de inyección en roca, detallado y mostrado en el Anexo V y en la Figura II-2 (Anexo II), la cual muestra un diagrama de flujo de los pasos a seguir; siendo los puntos principales de los procedimientos revisados:

- El uso de tramos de 10m en vez de tramos de 5m
- Aumento de la tasa de inyección y el monitoreo en tiempo real de la curva de presión de inyección en la boca del taladro vs. el caudal, inclusive hasta que la presión de rechazo es alcanzada o indicaciones obvias de daño de la masa rocosa sean observadas
- El engrosamiento progresivo de la mezcla de inyección basado en la tendencia observada de la curva de penetrabilidad (Lpm/m/bar) vs. volumen (o tiempo).

Una vez que la posible mezcla más gruesa estaba siendo inyectada, la penetrabilidad debería continuar disminuyendo en forma lineal con el rechazo de la inyección y mediante la obtención de una penetrabilidad menor a 0.1 Lpm/m/bar por un periodo de 10 minutos.

7.3.5.2 Inyección de los Materiales de la Zona de Filtro

Los volúmenes máximos a ser inyectados por tramo en suelo, se determinaron asumiendo una penetración radial en un medio poroso y homogéneo en una longitud de tramo de 1m. Las porosidades asumidas fueron aproximadamente de 10% en los materiales de la zona de filtro del estribo derecho.

Inicialmente, durante la inyección de los taladros de consolidación y los taladros primarios y secundarios de la Línea TB, las tasas de inyección parecieron ser muy altas, acompañadas de un incremento rápido de la presión, por lo que se emplearon tasas lentas de inyección permitiendo que las bombas inyecten más cemento en los materiales de filtro de una manera más eficaz.

Los procedimientos de inyección son detallados y mostrados en el Anexo V y en la Figura II-3 (Anexo II), la cual muestra un diagrama de flujo de los pasos a seguir para la inyección de material granular.

7.3.6 Progreso y Cantidades

El progreso de las actividades de inyección en todas las áreas de trabajo fue monitoreado diariamente. Cuando la inyección fue completada, el requerimiento para perforar taladros adicionales se basó en las absorciones de lechada y las presiones de rechazo alcanzadas en el nivel previo de inyección (primario, secundario, terciario, etc.)

Los volúmenes de mezcla y presiones de inyección utilizados en cada tramo de inyección están incluidos en las secciones transversales Figuras VI-1 y VI-2 en el Apéndice VI, tal como sigue:

- Figura VI-1: Zona de Filtro del estribo derecho – Filas TB y MF
- Figura VI-2: Plinto del estribo derecho y Extensión de la Cortina – Filas TB y RP

7.3.7 Aseguramiento de Calidad de las Mezclas de Inyección

La calidad de la mezcla se mantuvo gracias a la producción de mezclas de una manera repetida y fue controlada in situ mediante un muestreo regular, mediante la medición de la viscosidad Marsh (Foto 30), la densidad de la mezcla utilizando una balanza de lodos (Foto 31 y 32) y determinando el porcentaje de sedimentación después de un periodo de 2 horas (Foto 33). Esta información fue registrada al inicio de cada tramo de inyección y antes del engrosamiento de cada mezcla y si la mezcla no cumplía con lo especificado no era utilizada. Así mismo, periódicamente un conjunto de seis probetas pequeñas fueron muestreadas para determinar su resistencia a la compresión no confinada (UCS) para los 7, 14 y 28 días (Foto 34).

Un total de 144 muestras fue enviado al laboratorio para el ensayo de resistencia. Los resultados de cada ensayo son presentados en la Tabla VII-1 del Anexo VII. Los histogramas de los valores de resistencia, por mezcla de inyección, son presentados en la Figura VII-1 y resumidos en la Tabla 6C.

Tabla 6C Resumen del Ensayo de Resistencia a la Compresión no Confinada UCS

Mezcla	Número de Ensayos	UCS promedio (MPa)	Desviación Estándar (MPa)
A	64	19.1	6.01
B	32	20.0	3.63
C	15	20.3	3.79
D	8	17.7	7.86
E	3	18.0	7.93
Vaina ⁽¹⁾	8	1.7	1.96

NOTA:

1. Vaina: baja resistencia, lechada de revestimiento utilizada para rellenar el espacio anular entre la pared del taladro y el tubo manguito.
2. UCS: Resistencia a la Compresión no Confinada

Las viscosidades Marsh son presentadas en las Figuras VII-2 y VII-3 (Anexo VII), las cuales muestran la consistencia de la calidad de mezclado mediante histogramas. Las viscosidades Marsh promedio y las desviaciones estándares por mezcla son resumidas en la Tabla 6D.

Tabla 6D Resumen de Viscosidades Marsh Medidas

Mezcla	Estribo Derecho			
	Zona de Filtro		Roca	
	Viscosidad Media (s)	Desviación Estándar (s)	Viscosidad Media (s)	Desviación Estándar (s)
A	32.3	0.70	32.0	0.71
B	35.1	1.42	35.5	1.10
C	47.7	4.62	46.1	1.09
D	-	-	60.4	0.72
E	-	-	135.4	26.76
1	-	-	40.1	0.29
2	-	-	45.4	0.20
3	-	-	48.8	2.18
4	-	-	52.4	6.64
MF	31.5	0.39	-	-

NOTA:

El número de medidas obtenidas por área de trabajo y por tipo de mezcla es presentado en las Figuras VII-2 y VII-3, en el Anexo VII.

7.4 Mejoramiento Alcanzado del Terreno

Los objetivos de cierre de cada área de trabajo, tal como se mencionó previamente en la sección 7.2, fueron:

- Basamento rocoso bajo el Plinto del estribo derecho: obtener un valor medio de Lugeon de 2UL ($\sim 2 \times 10^{-7} \text{m/s}$), o con un ensayo no mayor que 4 Lugeon.
- Zona de Filtro del estribo derecho: obtener una conductividad hidráulica media de $1 \times 10^{-6} \text{m/s}$, particularmente reduciendo la permeabilidad del filtro Zona 3A y el enrocado Zona 3B.

Para determinar los resultados alcanzados se realizaron un total de 942 pruebas de agua; 353 pruebas en tramos de 5m en el macizo rocoso y 589 pruebas en tramos de 1m en los materiales granulares. Las pruebas de agua son resumidas en las Tablas VIII-1, VIII-2 y VIII-3 del Anexo VIII.

Además de las pruebas de agua, el cierre fue confirmado mediante la inspección de los registros de inyección, el cual se consideró que se había logrado si la toma de lechada por tramo inyectado fue menor que 200L/m y la penetrabilidad fue menor que 0.1Lpm/m/bar.

La Tabla 6E muestra el objetivo, la media alcanzada y las desviaciones estándar de las pruebas de agua para cada área de trabajo. Las gráficas resumen de estas pruebas de agua son presentadas de la siguiente manera en el Anexo IX:

- Figura IX-1: Zona de Filtro – Estribo Derecho
- Figura IX-2: Cortina de Extensión y Plinto – Estribo Derecho

Tabla 6E Resumen de Pruebas de Agua

Área de Trabajo en el Estribo Derecho	Objetivo	Conductividad Hidráulica Inicial			Conductividad Hidráulica alcanzada		
		Media (m/s)	σ (m/s)	Máxima (m/s)	Media (m/s)	σ (m/s)	Máxima (m/s)
ZF-Relaves	n/a	4.8×10^{-5}	5.3×10^{-5}	2.3×10^{-4}	-	-	-
ZF – Filtro 2B	n/a	4.3×10^{-5}	4.3×10^{-5}	1.5×10^{-5}	-	-	-
ZF – Filtro 3A	1×10^{-6}	3.3×10^{-5}	2.4×10^{-5}	9.7×10^{-5}	3.7×10^{-6}	3.3×10^{-6}	8.4×10^{-6}
ZF – Filtro 3B	1×10^{-6}	7.7×10^{-6}	8.9×10^{-6}	2.6×10^{-5}	5.8×10^{-7}	-	-
Plinto ^(1,2)	2UL	14.4UL	22.9UL	137.9UL	0.7UL	0.7UL	2.7UL

NOTA:

1. Resultados alcanzados mediante pruebas de agua realizadas en los taladros de verificación RP-WT1 y TB-WT2.
2. Los valores extraños obtenidos, particularmente aquellos donde las pruebas de agua estuvieron por encima del valor objetivo, pero las tomas de lechada correspondientes durante la inyección fueron <50L/m, han sido retirados de los cálculos estadísticos.

7.4.1 Zona de Filtro – Estribo Derecho

La Figura IX-1(a) resume la prueba de agua realizada por tipo de material de la zona de filtro antes de iniciar la inyección, las Figuras IX-1(b) y IX-1(c) resumen las pruebas de agua realizadas después de la inyección de los taladros secundarios a lo largo de la fila TB y de los taladros terciarios a lo largo de la fila MF, respectivamente. La conductividad hidráulica promedio del filtro Zona 3A y del enrocado Zona 3B disminuyó de 3×10^{-5} m/s a 4×10^{-6} m/s y de 8×10^{-6} m/s a 6×10^{-7} m/s, respectivamente.

7.4.2 Extensión de la Cortina y Plinto – Estribo Derecho

En la Figura IX-2(a), la prueba de agua en los taladros primarios muestra que la región de inyección no era tan permeable, aunque había pocos tramos con permeabilidades mayores a 100 UL a profundidades poco profundas. Esto es reconocido más como un patrón de liberación de esfuerzo que como Karst. Sin embargo, muchas de estas pruebas de agua fueron limitadas por la capacidad de la bomba del contratista. Tanto así, que es común que en los tramos observados, la conductividad hidráulica es sobre-estimada.

Tal como se esperaba, el cierre no fue alcanzado en varios tramos de los taladros primarios. Estas respuestas del terreno han sido indicadas en la Figura IX-2(a) en “rojo”. Sin embargo, las Figuras IX-2(b) y IX-2(c) muestran los resultados de las pruebas de agua en los taladros terciarios y de mayor orden, demostrando el logro de la conductividad hidráulica objetivo (<2UL).

El cierre alcanzado también fue confirmado mediante la perforación y prueba de agua de los taladros RP-WT1 y TB-WT2, con un valor promedio de 0.7UL y un valor máximo de 2.7UL correspondiente al tramo comprendido entre 96m y 110m, en el taladro RP-WT1.

7.5 Resumen de Absorciones de Lechada

Las absorciones de lechada para cada área de trabajo han sido resumidas en la Tabla 6F y son presentadas en el Anexo X. Estas absorciones ilustran el progreso del trabajo entre taladros primarios a secundarios y entre secundarios a taladros de mayor orden.

Tabla 6F Resumen de Absorciones de Lechada – Estribo Derecho

Área de Trabajo	Consolidación		Línea Central de la Cortina					Línea MF (cemento microfino)		
	Prim. (kg/m)	Sec. (kg/m)	Incl. (kg/m)	Prim. (kg/m)	Sec. (kg/m)	Terc. (kg/m)	Cuat. (kg/m)	Prim. (kg/m)	Sec. (kg/m)	Terc. (kg/m)
Zona de Filtro	221	294	-	133	107	297	-	340	281	459
Plinto de Concreto	-	-	80	126	46	35	32	-	-	-

7.6 Examen del Plinto del Estribo Derecho

El objetivo principal de la inyección en esta área fue reducir el flujo en las rutas de las filtraciones creadas por la interacción de la estructura geológica (fallas inversas) y rocas calcáreas de alta permeabilidad (karst y calizas kársticas).

La presencia de fallas inversas en el estribo derecho ha sido reconocida en numerosas ocasiones durante los trabajos de investigación realizadas en esta zona. Las fallas inversas se presentan en la superficie en intervalos espaciados (Foto 35).

La solubilidad kárstica de la superficie superior de la caliza fue expuesta cuando la cobertura (topsoil) fue limpiada para la construcción del plinto (Figura 36). La menor disolución fue observada dentro de los taladros de exploración (con diamantina) y más notablemente en el taladro RP-P7v (Foto 37).

Al término de la inyección, algunos tramos terciarios y cuaternarios mostraron absorciones más altas que las esperadas debido a anomalías durante la inyección que fueron definidas como: (1) un periodo substancial de inyección con un alto caudal y con un desarrollo de una pequeña contrapresión (substancial inclusive siendo 30-40 minutos o más para los tramos primarios); y (2) también con penetrabilidad > 5.0 Lpm/m/bar. Estos tramos con anomalías fueron descompuestos en:

- **Como Karst**, en los que durante la inyección desarrollaron una reducción en la tendencia de la penetrabilidad con el tramo, siendo llevado hasta el rechazo dentro de los límites de volumen establecidos y a una penetrabilidad < 0.2 Lpm/m/bar, mediante el uso de la secuencia de engrosamiento establecida.
- **Karst**, en los que durante la inyección desarrolló un mínimo de presión, inclusive con la lechada semi-crema dental (Mezcla E) y la inyección siendo terminada sobre el límite superior de volumen.

El Plano II-8 (Anexo II) muestra una sección vertical de la cortina y el plinto del estribo derecho, combinando la geología interpretada, la profundidad inferida del nivel de agua y superponiendo las absorciones sobre el patrón de respuesta del terreno. Las respuestas “como kársticas” y “kársticas” son mostradas como tramos sombreados de color naranja y rojo respectivamente.

CONCLUSIONES

- Los elementos necesarios para un exitoso trabajo de inyecciones abarcan un diseño que contemple las condiciones geológicas de sitio, especificaciones que permitan o faciliten modificaciones al programa de inyecciones, un contratista de inyecciones honesto y experimentado, el uso de apropiados materiales, equipos y técnicas, un staff reconocido de inspección y un programa de aseguramiento de calidad efectivo.
- Es recomendable conducir un programa de inyecciones de prueba en el sitio antes de concluir el diseño de la cortina y de la presa, para determinar parámetros de diseño importantes como la permeabilidad promedio que puede ser alcanzada por la inyección.
- Las pruebas de agua en los taladros son útiles durante el trabajo de inyecciones ya que indican cuánto ha sido reducida la permeabilidad.
- La prueba de Lugeon tiene su máxima sensibilidad en situaciones de baja permeabilidad. Esto es apropiado porque aquellas son las únicas en donde las decisiones de inyección pueden ser circunstanciales y por ende necesitan una mayor certeza que cuando la permeabilidad es mayor y la inyección es obviamente necesaria.
- Los valores Lugeon nunca deben ser usados sin tener alguna idea del tamaño de las grietas y el espaciamiento de las mismas para los cuales dichos valores aplican, ya que el mismo valor puede ser obtenido de una simple grieta larga como de muchas otras más finas.
- La profundidad de la cortina de inyección generalmente es seleccionada en base a la geometría, siendo el principal objetivo alargar el recorrido de las filtraciones a algún valor consistente con el ancho de la base de la presa. En el terreno de las calizas kársticas el criterio es extender la cortina hasta una zona relativamente impermeable.
- El cemento Portland ordinariamente es el principal ingrediente cementante utilizado en lechadas para la fundación de las presas sobre roca y el cemento microfino es utilizado en aplicaciones especiales donde aberturas muy pequeñas deben ser rellenadas con una lechada fuerte y durable.

- La bentonita es utilizada en menor proporción en las lechadas de cemento con el propósito de producir una suspensión relativamente estable. La bentonita reduce el asentamiento de las partículas de cemento en la lechada y aumenta la viscosidad y la cohesión de la misma.
- Las mezclas con arena son utilizadas sólo donde existan condiciones de bastante abertura tales como las cavernas kársticas; cumpliendo una granulometría especificada, debido al mantenimiento de los equipos de inyección.
- La penetración de la lechada es inversamente proporcional a la viscosidad de la lechada.
- La sedimentación de las partículas en una mezcla de lechada tiene un efecto importante en el sellado de las grietas.
- Las lechadas consideradas relativamente estables tienen un asentamiento menor al 10%, siendo un asentamiento de 5% o menos lo más deseable en periodo de 2 horas.
- El uso del método GIN no está programado para tratamientos de suelos y tampoco es apropiado utilizarlo para inyecciones de formaciones kársticas.
- La selección del valor GIN depende de las condiciones geológicas y del proyecto. Debe ser elegido al inicio y adaptado durante el desarrollo de los trabajos y esta dado para una sola dosificación de mezcla de inyección.
- La inyección de roca con presencia de karst debe considerar un criterio por penetrabilidad y no un criterio de energía de inyección como considera el método GIN.
- El control por penetrabilidad de la inyección, a diferencia del método GIN, considera el uso de varias mezclas, evitando así el consumo desmedido de lechada. Las mezclas deben ser efectivas para todo el macizo rocoso y se debe considerar una mezcla con arena para la presencia de una estructura kárstica.
- El monitoreo de inyección se basa en la observación en tiempo real de los parámetros de inyección: Presión - Caudal (P-Q) y la curva de penetrabilidad.

En cuanto a los resultados alcanzados en la aplicación de la metodología de inyección presentada en esta tesis, tenemos que:

- Se finalizó la construcción de una cortina de inyección a través del sistema de filtro de la presa de relaves de Antamina en el estribo derecho, empleando las técnicas de inyección con tubos manguitos (tube-à-manchette). La conductividad hidráulica promedio del filtro Zona 3A y del enrocado Zona 3B disminuyó en un orden de magnitud desde 3×10^{-5} m/s a 4×10^{-6} m/s y de 8×10^{-6} m/s a 6×10^{-7} m/s respectivamente.
- En general, se alcanzó una conductividad hidráulica promedio de 0.7 UL (7×10^{-8} m/s) a lo largo del estribo derecho, en la cortina de extensión y en el plinto de concreto, a una profundidad vertical de 100m a 120m.
- La ventaja más notoria del control de inyección por penetrabilidad, respecto al método GIN, fue el monitoreo controlado de los problemas de hidrofracturamiento en el macizo rocoso.
- El valor de la penetrabilidad alcanzada en todos los taladros de inyección estuvo alrededor de 0.1 Lpm/m/bar, lo cual aseguró una buena inyección del macizo rocoso.
- Para condiciones geológicas similares a las presentadas en la aplicación (presencia de cavidades kársticas), el uso del control de inyección por penetrabilidad fue muy óptimo.

RECOMENDACIONES

Las siguientes secciones han sido elaboradas con la finalidad de mejorar los equipos a ser utilizados y los procedimientos de inyección a ser implementados en un trabajo de inyecciones, basados en la aplicación en la presa de relaves de Antamina.

- **Control por Penetrabilidad**

Para condiciones geológicas similares presentadas en la aplicación de la tesis (presencia de cavidades kársticas), se recomienda utilizar el control por penetrabilidad para los trabajos de inyección a futuro. Considerando un valor objetivo de 0.1 Lpm/m/bar, asegurando así un buen cierre en la cortina de inyección.

Asimismo, se recomienda el monitoreo continuo de las variables P-Q durante la inyección para llegar a el valor objetivo de penetrabilidad, sin causar daños en la roca (hidrofracturamiento).

- **Aseguramiento de Calidad (CQA) Para un Trabajo de Inyecciones**

Para los trabajos de aseguramiento de calidad en un trabajo de inyecciones, se recomienda realizar un control exhaustivo de los equipos y dispositivos que se utilizan durante las inyecciones, tales como caudalímetros, barómetros y transductores eléctricos. Asimismo, se debe realizar un chequeo constante de la calidad de los obturadores (packers) para evitar las fugas de lechada de cemento durante la inyección y también las pérdidas de los mismos.

El personal que realice los trabajos de inyección debe estar familiarizado con los equipos y maniobras que se emplean durante la inyección. Asimismo, el supervisor de las inyecciones debe tener una experiencia suficiente en inyecciones para lograr un buen control de las mismas y evitar atrasos y ampliaciones de plazo por falta de decisiones operativas.

Se recomienda considerar las modificaciones de diseño dentro de un programa de inyecciones, por lo que durante el desarrollo de los trabajos de inyección éstas ayudan a afinar y mejorar el diseño de la cortina de inyección, tal como se vio en la aplicación de la tesis respecto a la inclinación de la cortina y a la profundidad de la misma.

- **Mejoramiento de Equipos**

- **Andamios**

La construcción y el proceso de aprobación de los andamios tomaron aproximadamente 12 semanas. Adicionalmente, el ancho necesario del andamio forzó el corte de la geomembrana sobre la cara de la presa de relaves para excavar la cimentación e instalar los anclajes mecánicos para las placas de la base de los andamios.

Basados en estas dificultades encontradas, se recomienda que los programas de inyección deben ser realizados desde una plataforma de trabajo montada sobre rieles la cual puede ser jalada desde un sistema de winches anclado en la parte superior e inferior del plinto de concreto armado.

- **Perforadoras y Compresoras de Aire**

Es importante que los equipos de perforación tengan la potencia necesaria para perforar y retirar tuberías de revestimiento a profundidades hasta 1.5 veces la profundidad propuesta del taladro.

Las compresoras de aire deben tener una salida de presión lo suficientemente alta para retirar tuberías de revestimiento, ya que de lo contrario el personal de perforación deberá ayudar para evitar la pérdida de tuberías de perforación. Se recomienda una salida de presión mayor a 12 bares y un volumen mínimo de aire de 600 ft³/min.

- **Bombas de Inyección**

Las bombas especificadas se desempeñaron adecuadamente sin embargo fueron limitadas por la tasa de inyección. Por tal razón, se recomienda utilizar bombas con tasas altas de inyección para asegurar vencer las presiones negativas (artesianismo) del terreno.

- **Longitud del Tramo de Inyección**

La longitud especificada del tramo de inyección puede ser aumentada durante el programa de inyecciones, tal como ocurrió en la presa de relaves de Antamina, en la cual se modificó la longitud de inyección de 5m a 10m.

Este aumento debe ser monitoreado para verificar su eficiencia durante la inyección. Los resultados obtenidos con la longitud aumentada fueron eficientes, ayudando a reducir la cantidad de packers hasta en un 30% e incrementando las tazas de producción.

Acercándose al término de un programa de inyecciones, cuando las absorciones en los taladros de mayor orden son menores que en los taladros primarios y secundarios, los beneficios de los tramos aumentados se hacen más evidentes y aceleran la secuencia de "Chequeo" final de la inyección realizada.

- **Uso de Mezclas de Baja Densidad**

Cuando la inyección se realizó sobre el nivel de agua, utilizando un transductor de presión en la boca del taladro, se observó que el peso propio de la columna de lechada sobre el tramo era suficiente para abrir hidráulicamente de manera innecesaria discontinuidades existentes antes de desarrollar una contrapresión en la boca del taladro. Para aliviar este problema, se desarrollaron una serie de mezclas de baja densidad. Estas mezclas utilizaron una concentración de bentonita por peso de cemento de aproximadamente 18%, empezando con una dosificación agua:cemento de 4.6:1, aumentando la viscosidad y disminuyendo la dosificación de agua:cemento.

BIBLIOGRAFÍA

- A.C. Houlsby, Construction and Design of Cement Grouting, John Wiley & Sons, Inc. 1990.
- Bruce, Glossary of Grouting Terminology, ASCE, ISSN 1090-0241, 2005.
- Dawn Shuttle, Vafa Rombough and Grant Bonin, IMPACT OF GROUT RHEOLOGY ON GIN, UBC – Canada, 2005.
- Friedrich – Kart Ewert, Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1985.
- G. Lombardi, European Grouting Techniques for Rock Foundations, Dams in Europe & USSR, 1990
- G. Lombardi, Grouting of Rock with Cement Mixes, Fontvieille-Minusio, July 1999
- G. Lombardi, Selecting the Grouting Intensity, The International Journal on Hydropower & Dams, 1996
- G. Lombardi y D. Deere, Diseño y Control del Inyectado Empleando el Principio GIN, Tomado de Water Power & Dam Construction, de Junio de 1993.
- Ken Weaver, Dam Foundation Grouting, American Society of Civil Engineers, 1991.
- Novatecna, High Technology in jet grouting, Special Publication, Novatecna Consolidacoes e Construcoes S/A, Sao Paulo, Brazil, 1988.
- R. Bremen, The Use of Additives in Cement Grouts, The International Journal on Hydropower & Dams, 1997.
- V. Rombough – G. Bonin – D. Shuttle, Penetrability Control of GIN Mixes During Fractured Rock Grouting, Golder Associates Ltd., 2004.

**ANEXO I
(ALBUM FOTOGRAFICO)**

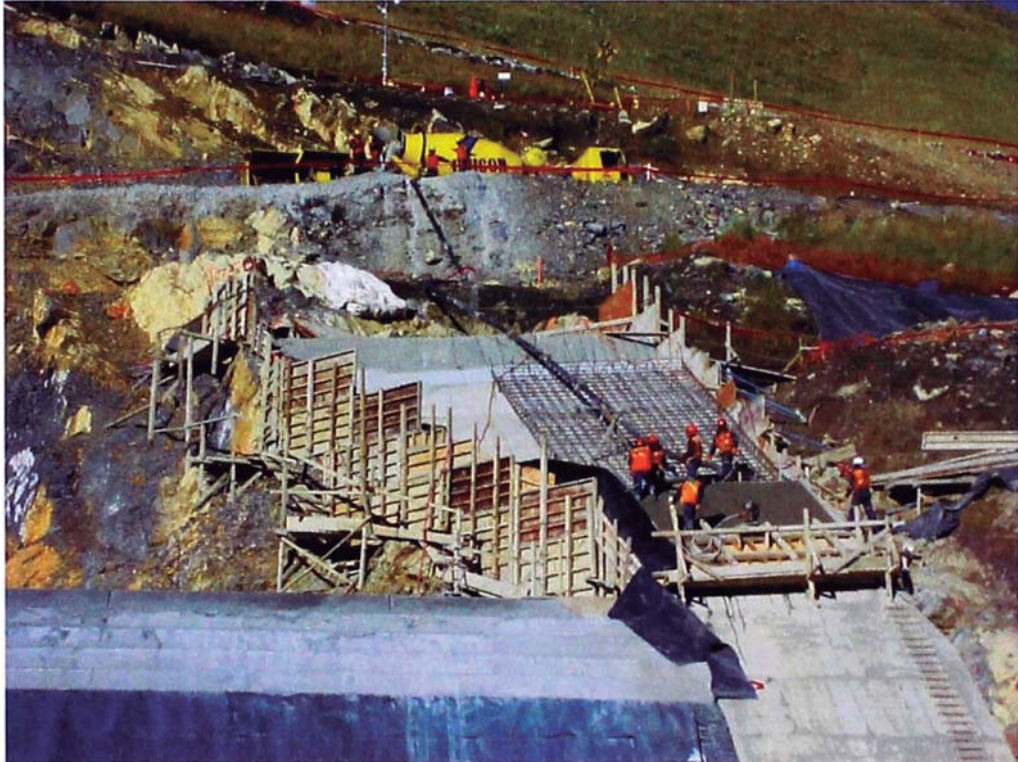


Foto 1: Construcción del Plinto reforzado en el estribo derecho.



Foto 2: Construcción del Plinto reforzado en el estribo izquierdo.



Foto 3: Estribo Derecho. Extensión y construcción de la plataforma de trabajo "Espigón". Intercepción de la zona de Filtro y extensión de la cortina.



Foto 4: Vista del plinto del estribo derecho y de la plataforma de trabajo "Espigón", desde la cresta de la presa de relaves.



Foto 5: Perforación e inyección sobre el plinto del estribo derecho realizado desde andamios anclados independientemente.



Foto 6: Camión con grúa tipo HIAB utilizado para la movilización de materiales hacia y desde el patio de depósito sobre el estribo izquierdo.



Foto 7: Planta móvil de iluminación utilizada durante el turno noche.

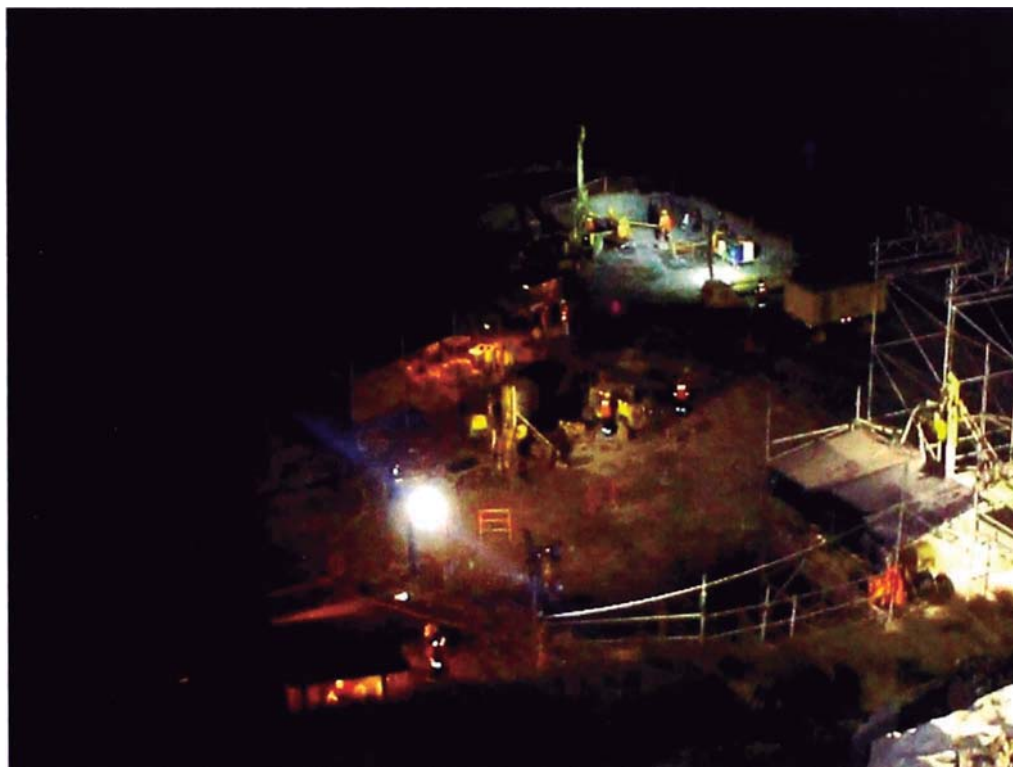


Foto 8: Perforación e inyección en el estribo derecho durante el turno noche.



Foto 9: Perforación con el equipo RocDrill AP-442 durante el turno noche.



Foto 10: Equipo de perforación Atlas Copco Track Drill AP-442.

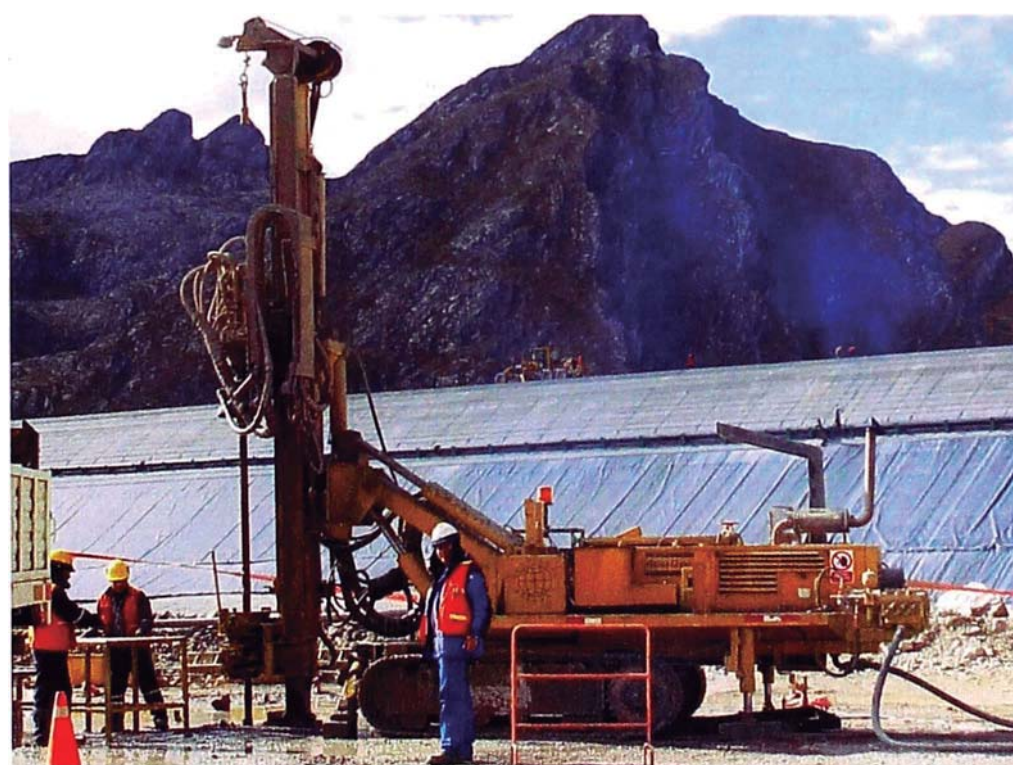


Foto 11: Equipo de perforación Atlas Copco Mustang A-66 CB.



Foto 12: Perforadora Atlas Copco Mustang A-66 CB, perforación del taladro de inyección desde la plataforma de trabajo "Espigón" en el estribo derecho.



Foto 13: Perforadora de peso liviano Atlas Copco Diamec 262. Perforación desde la plataforma de andamios sobre el plinto en el estribo derecho.



Foto 14: Perforadora Longyear LY-38. Perforación diamantina con recuperación de testigos del taladro exploratorio GA06-01.



Foto 15: Perforadora Atlas Copco Diamec 282 (reemplazó a la perforadora Mustang por los últimos tres meses del programa de inyecciones).



Foto 16: Planta de Inyección, comprende mezcladora coloidal Atlas Copco Cemix 402, agitador Cemag 401 y bomba de cavidad progresiva.

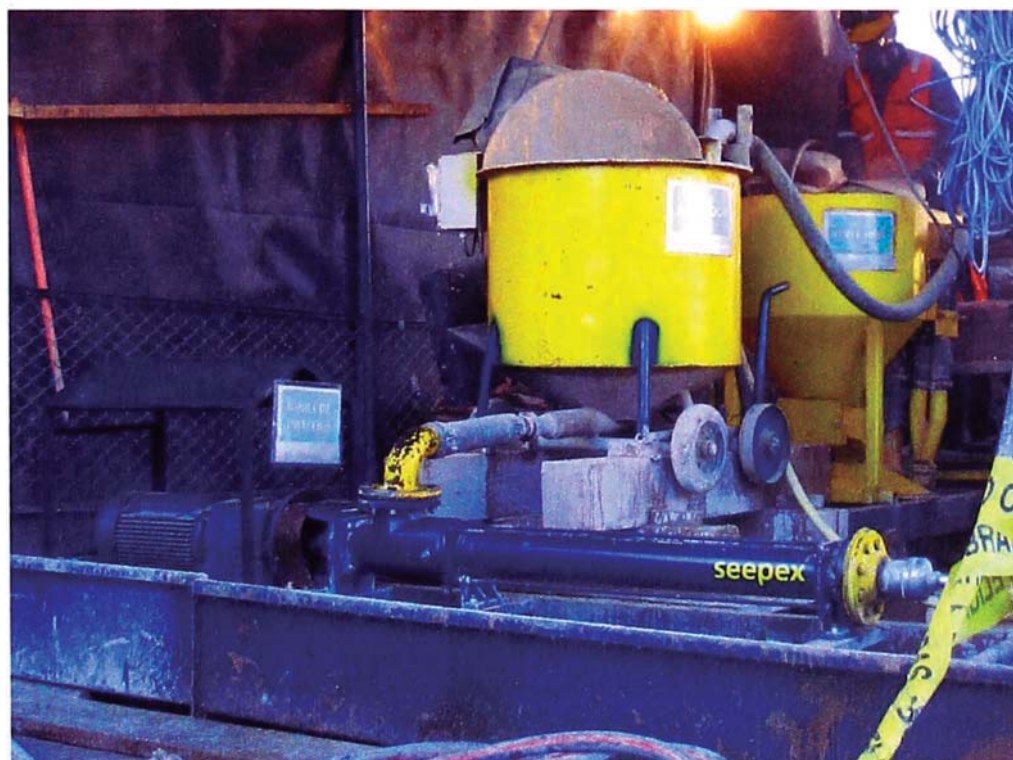


Foto 17: Bomba de inyección de cavidad progresiva Seepex RF 8012.

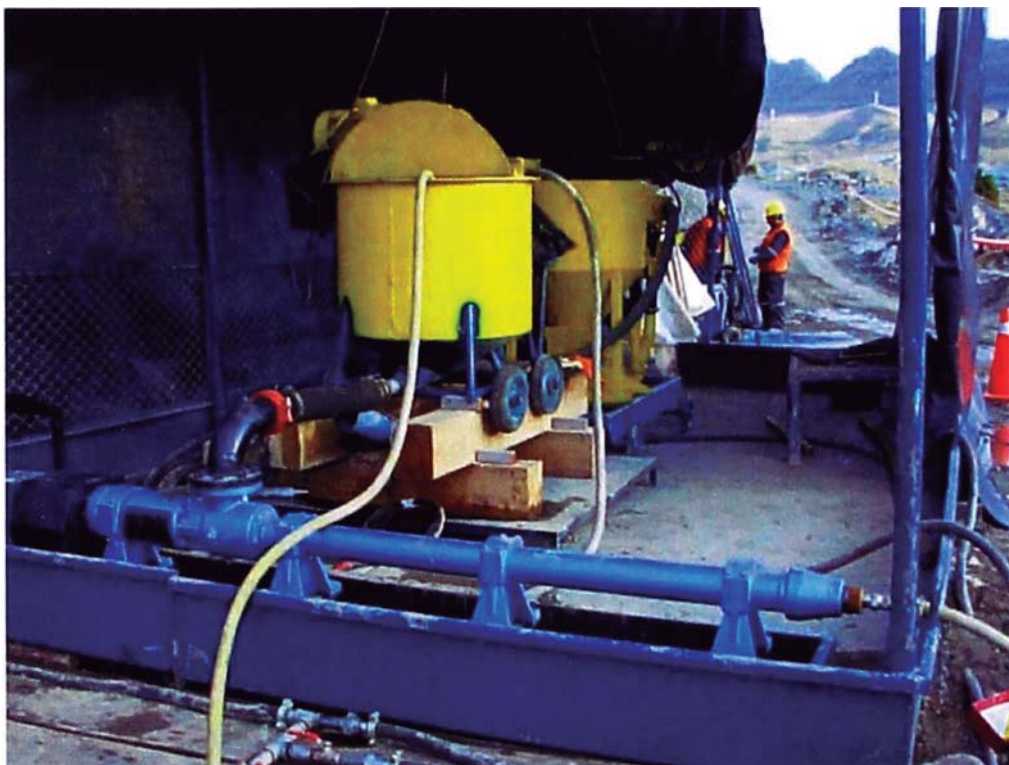


Foto 18: Bomba de inyección Moyno 6M6-CDQ-3A, de cavidad progresiva



Foto 19: Regulador de Voltaje tipo dial (regula velocidad/RPM) de la bomba de inyección y Computadora de campo para la dirección y monitoreo en tiempo real del proceso de inyección.

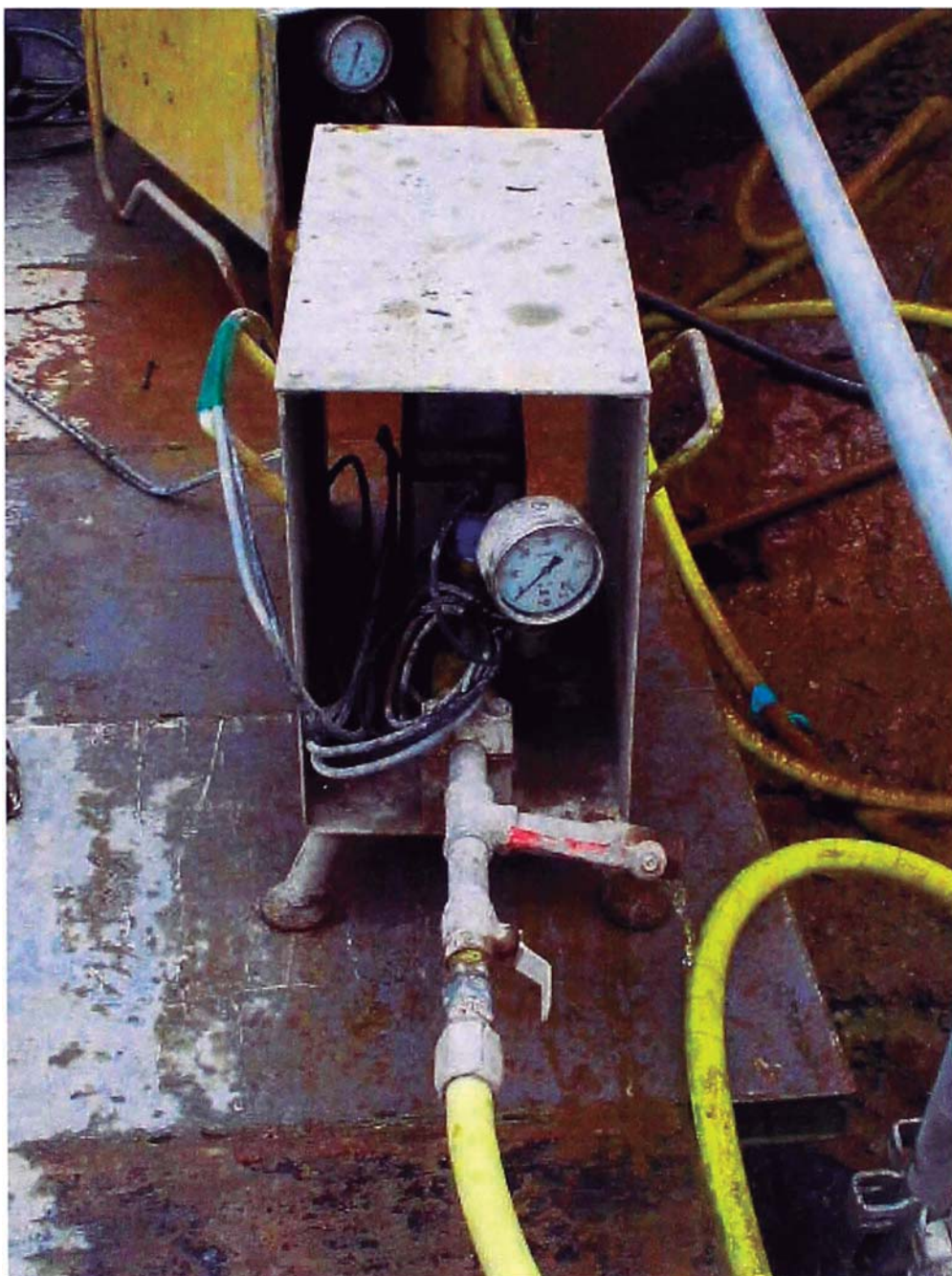


Foto 20: Transductor de presión y caudalímetro magnético para la adquisición de la presión y caudal en tiempo real para controlar el proceso de inyección; árbol de inyección típicamente comprendido por una línea simple de inyección (con línea sin retorno hacia el agitador).



Foto 21: Obturadores Simple y Doble de diámetro HQ inflados con nitrógeno para aislar tramos específicos durante las inyecciones y pruebas de agua.



Foto 22: Instalación y desinstalación de obturadores dentro y fuera de los taladros de inyección con asistencia de un trípode.



Foto 23: TAM (tubos manguitos) a ser instalados dentro de los taladros de inyección para los propósitos de inyección de suelos o rocas con fracturas muy a extremadamente cerradas.



Foto 24: Puertos de salida de mezcla del Tubo Manguito cubiertos con caucho, comprendidos por un arreglo de huecos de 5 mm de diámetro espaciados en intervalos de 50 cm a lo largo del tubo manguito.

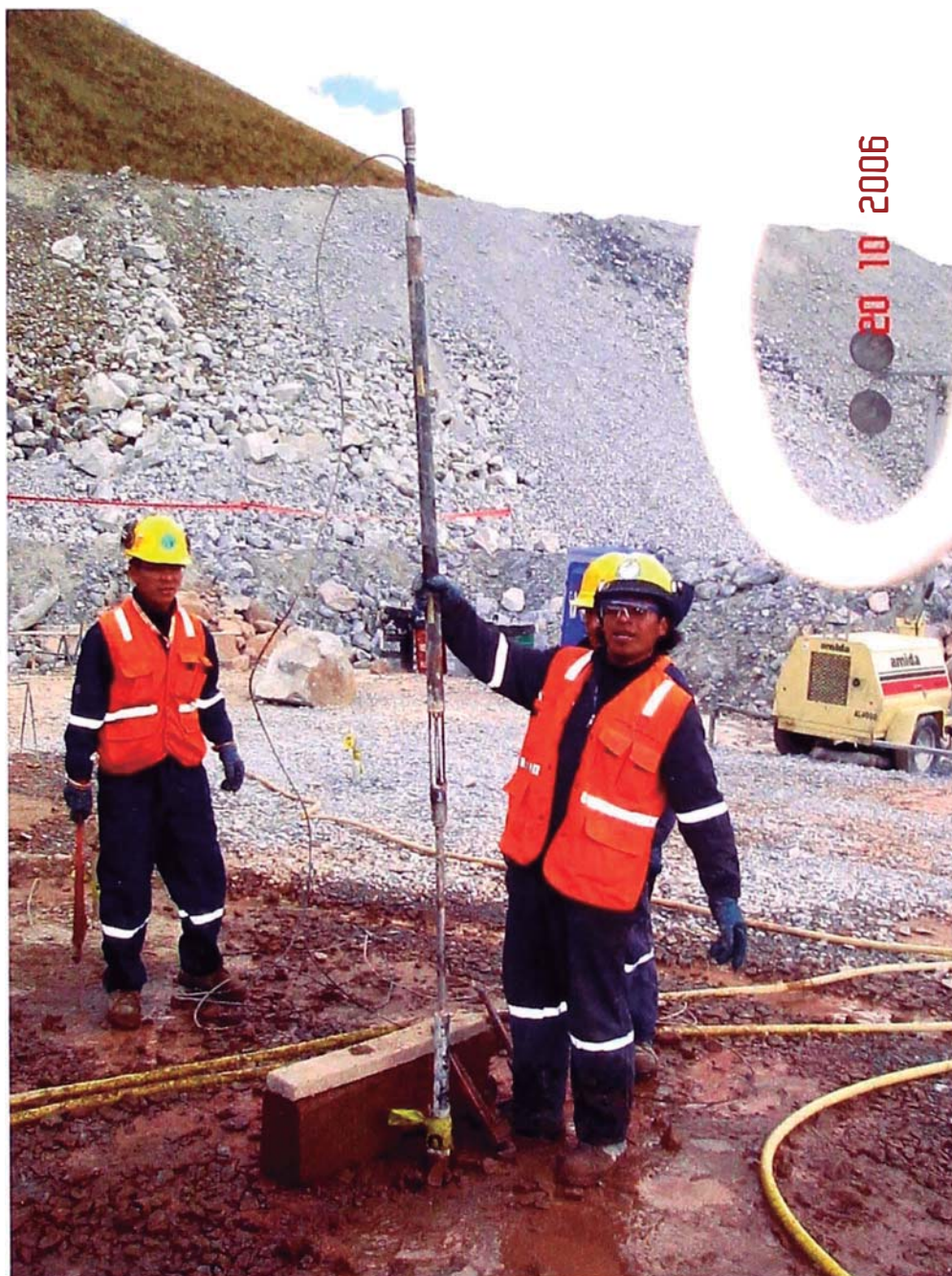


Foto 25: Arreglo del obturador doble de diámetro BQ para el aislamiento de los intervalos de inyección dentro del tubo manguito.



Foto 26: Caudalímetro de ½" de diámetro para medir el volumen de agua en la preparación de mezcla



Foto 27: Medición cuidadosa del Superplastificante Euco 37 usando una probeta graduada de 1000 ml.



Foto 28: Adición del cemento puzolánico Atlas tipo 1P dentro del mezclador coloidal. Notar el uso de un respirador particular.



Foto 29: Balanza para el control del peso de la bentonita Quick-Gel.



Foto 30: Control de calidad de la viscosidad de la mezcla utilizando el cono de Marsh.



Foto 31: Control de calidad de la densidad de mezcla, utilizando la balanza de lodos.

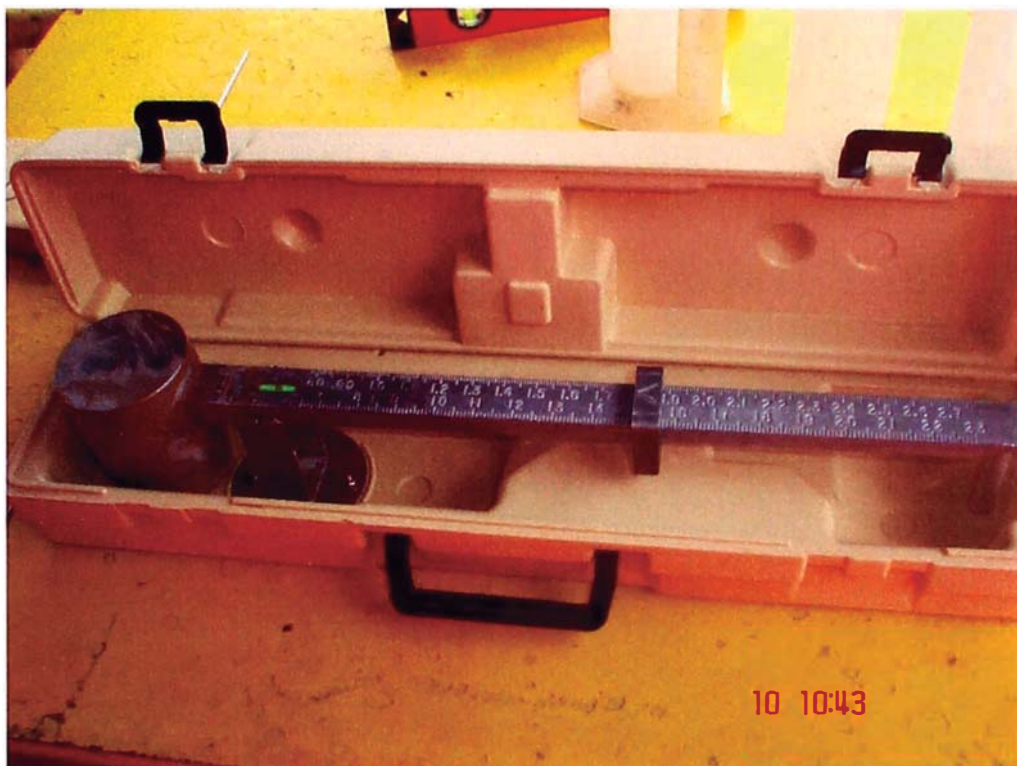


Foto 32: Detalle de la balanza de lodos FANN.



Foto 33: Ensayo de Sedimentación. Decantación del agua libre en la parte superior de una probeta graduada de 1000 ml.



Foto 34: Testigos de mezclas tomados para la determinación de la resistencia a la compresión no confinada (UCS).

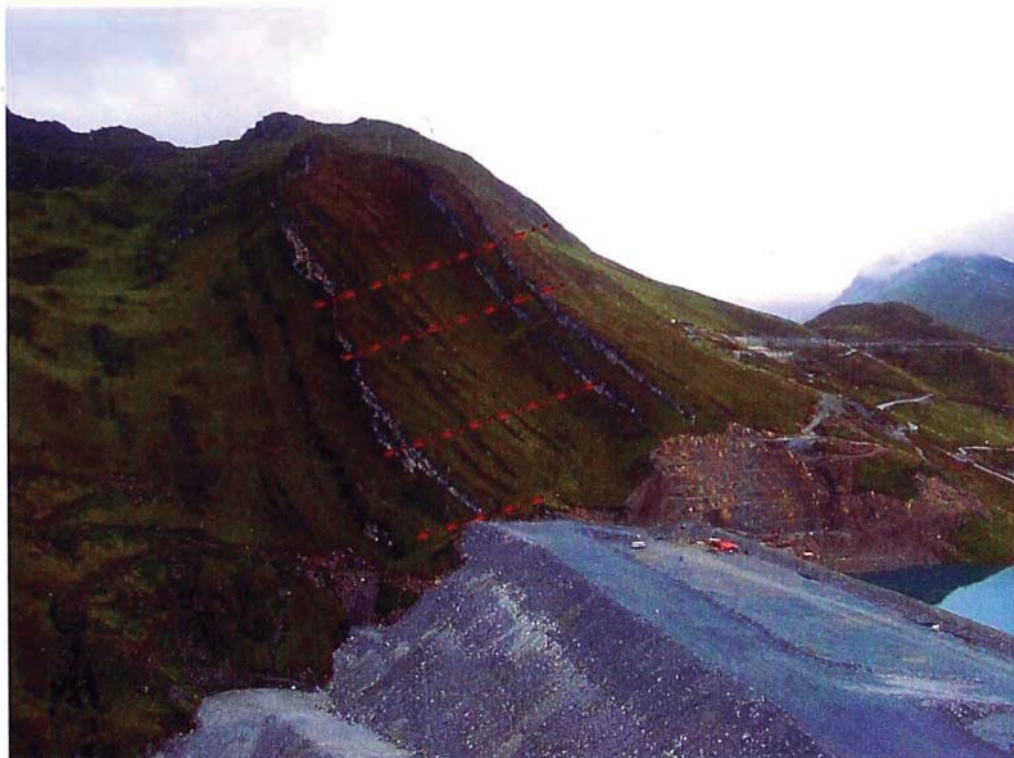


Foto 35: Backthrusts dentro de la Formación Celendin Superior.

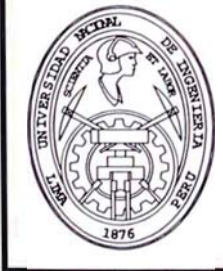
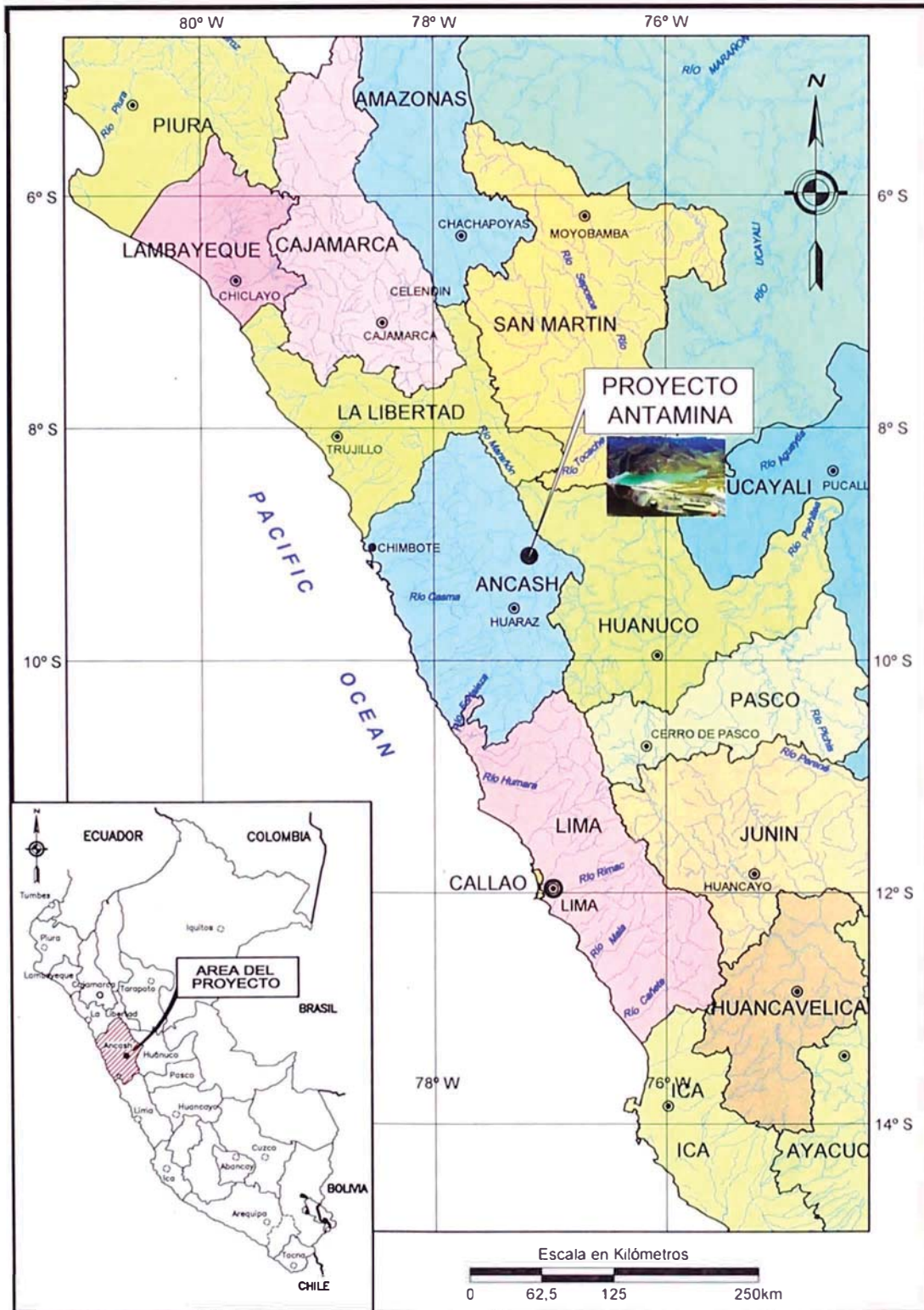


Foto 36: Condiciones Kársticas en el Plinto del Estribo Derecho.



Foto 37: Testigo del taladro RP-P7v (profundidad 97.5 m aprox.); notar la cavidad de disolución de 10 mm de diámetro y oxidación (indicativo de flujo de agua subterránea).

ANEXO II
(PLANOS Y FIGURAS GENERALES)



TESIS
"IMPERMEABILIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO EN UNA PRESA DE RELAVES EMPLEANDO INYECCIONES: APLICACIÓN, METODOLOGÍA Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD"
 FACULTAD INGENIERÍA CIVIL
 AUTOR JUAN VELARDE M.
 FECHA FEBRERO, 2009

UBICACIÓN DEL PROYECTO

PLANO II-1

VER:

PLANO II-2

PLANO II-3

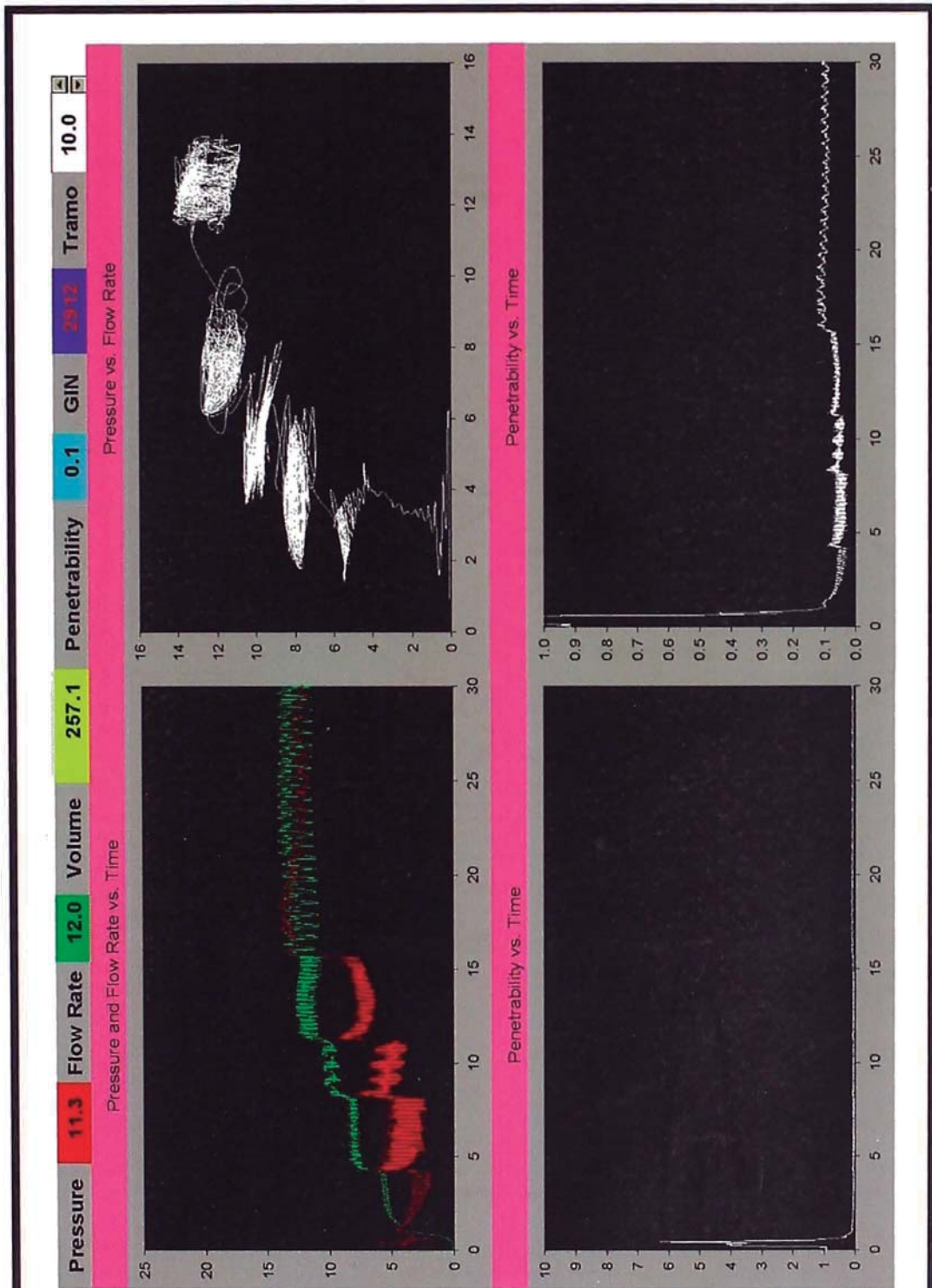
PLANO II-4

PLANO II-5

PLANO II-6

PLANO II-7

PLANO II-8



TESIS
 "IMPERMEABILIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO EN UNA PRESA DE RELAVES EMPLEANDO INYECCIONES: APLICACIÓN, METODOLOGÍA Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD"

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL
 AUTOR JUAN VELARDE M.
 FECHA FEBRERO, 2009

CAPTURA DE PANTALLA DEL MONITOREO DE INYECCION EN TIEMPO REAL

FIGURA II-1

VER:
FIGURA II-2
FIGURA II-3

ANEXO III
(MAPEO DEL ALINEAMIENTO DEL PLINTO)

VER:
PLANO III-1

ANEXO IV
(RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE MEZCLA)

TABLA IV-2: Resultados de Ensayos de Mezcla con Rheocem 800

Fecha	w:c + Rheobuild + Delvo	Agua (l)	Rheocem (Kg)	Rheobuild		Delvo		Fluidez (seg)	Densidad (gr/cc)	Sedimentación (%)		Fragua (horas)		Roturas UCS (MPa)			Observaciones
				(%)	(ml)	(%)	(ml)			1 hora	2 horas	Inicio	Final	7 días	14 días	28 días	
ENSAYOS EN LABORATORIO																	
17-Nov-06	1:1 + 1% R	1.4	1.4	1.0	11.2	-	-	31.00	1.52	-	6.0	2:00	-	9.7	16.2	18.0	Volumen aditivos no se ha disminuido al volumen de agua
17-Nov-06	1:1 + 2% R	1.2	1.2	2.0	19.5			30.00	1.52	-	1.0	1:30	3:40	6.5	9.2	9.6	Volumen aditivos no se ha disminuido al volumen de agua
17-Nov-06	1:1 + 2% R + 0.5% D	1.2	1.2	2.0	19.5	0.5	5.7	30.00	1.52	-	6.0	1:25	1:55	4.2	14.3	14.8	Volumen aditivos no se ha disminuido al volumen de agua
17-Nov-06	1:1 + 2% R + 1% D	1.2	1.2	2.0	19.5	1.0	11.1	30.00	1.52	-	6.0	1:20	2:15	6.6	11.6	11.9	Volumen aditivos no se ha disminuido al volumen de agua
17-Nov-06	1:1 + 2% R + 2% D	1.158	1.2	2.0	19.5	2.0	22.5	30.00	1.52	-	6.0	1:40	2:20	4.5	12.5	14.1	Volumen aditivos disminuido al volumen de agua
17-Nov-06	1:1 + 2% R + 3% D	1.143	1.2	2.0	19.5	3.0	38.4	31.00	1.52	-	6.0	2:40	-	0.3	4.5	8.7	Volumen aditivos disminuido al volumen de agua
ENSAYOS IN-SITU																	
18-Nov-06	1:1 + 2% R + 2.5% D	23.9	25.0	2.0	400.0	2.5	580.0	31.10	1.45	-	9.5	-	-	0.7	1.6	2.4	Volumen aditivos disminuido al volumen de agua
18-Nov-06	1:1 + 2% R + 3% D	23.9	25.0	2.0	400.0	3.0	700.0	30.10	1.45	-	8.0	-	-	0.7	1.4	1.8	Volumen aditivos disminuido al volumen de agua
18-Nov-06	1:1 + 3% R + 2.5% D	23.8	25.0	3.0	605.0	2.5	580.0	32.90	1.54	-	1.6	-	-	7.7	13.1	14.0	Volumen aditivos disminuido al volumen de agua
18-Nov-06	1:1 + 3% R + 3% D	23.8	25.0	3.0	605.0	3.0	700.0	33.50	1.55	-	2.4	-	-	10.4	19.5	21.5	Volumen aditivos disminuido al volumen de agua
19-Nov-06	0.8:1 + 2% R + 1% D	20.0	25.0	2.0	403.0	1.0	234.0	36.10	-	-	1.6	1:30	-	9.5	19.6	20.1	Volumen aditivos no se ha disminuido al volumen de agua
19-Nov-06	1:1 + 3% R + 1% D	25.0	25.0	3.0	605.0	1.0	234.0	32.70	1.58	-	3.2	2:55	-	11.2	13.5	14.6	Volumen aditivos no se ha disminuido al volumen de agua
21-Nov-06	1:1 + 4% R + 2% D	25.0	25.0	4.0	813.0	2.0	423.0	36.20	1.56	-	1.0	1:30	2:20	7.6	16.8	19.5	
22-Nov-06	1:1.2 + 4% R + 1% D	30.0	25.0	4.0	813.0	2.0	423.0	30.50	1.48	1.0	2.0	1:30	2:10	6.9	12.1	12.9	
22-Nov-06	1.2:1 + 4% R + 2% D	27.0	25.0	4.0	813.0	2.0	423.0	31.35	1.54	0.5	1.0	1:35	2:05	4.9	5.9	6.8	

ANEXO V
(PROCEDIMIENTOS PARA INYECCIÓN EN ROCA)

MEMORANDO TÉCNICO

RE: PROCEDIMIENTO REVISADO PARA LA INYECCIÓN EN ROCA PARA LA EXTENSIÓN DE LA CORTINA PROFUNDA E INYECCIÓN DEL RELLENO DE LA PRESA DE RELAVES DE ANTAMINA

INTRODUCCIÓN

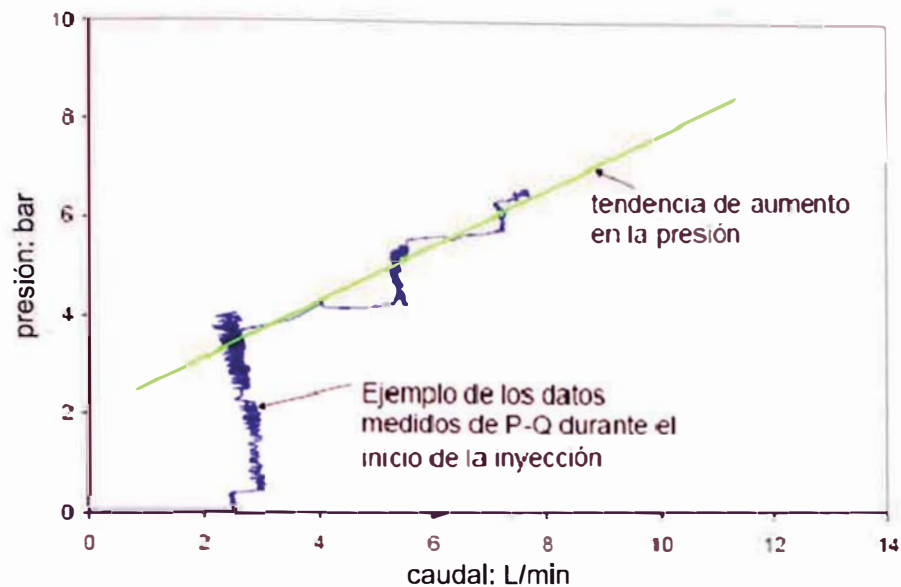
La revisión de los registros de las inyecciones en los taladros primarios TB-P1 a TB-P8 en el espigón del estribo derecho de la presa, ha mostrado que la roca es más débil de lo esperado, se han encontrado extensos hidrofracturamientos a presiones de inyección bastante bajas (ver figura al final de este memorando técnico). Asimismo, el cambio de una mezcla hacia la siguiente durante una situación de alta toma puede optimizarse, buscando incrementar la eficiencia del trabajo. Estos factores han llevado a la revisión de los procedimientos de inyección, objeto de este memorando técnico.

Se reconoce que el excelente equipo de bombeo Moyno y el excelente sistema computarizado de control de datos movilizado por el contratista, hacen posible la revisión de este procedimiento.

PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN REVISADO

- Todos los tramos de inyección serán de 10 m, a menos que se instruya de otro modo.
 - El procedimiento revisado esta basado en la observación de los parámetros de inyección en la pantalla de la computadora, durante la inyección. No se permitirá la iniciación de una inyección cualquiera si la computadora no esta trabajando en óptimas condiciones. La gráfica P-Q y la gráfica de Penetrabilidad deben estar visibles en todo momento para los supervisores y el personal que controla la inyección, en las escalas apropiadas.
1. Iniciar la inyección usando la Mezcla A con un caudal de aproximadamente 3 litros/min durante cinco minutos.

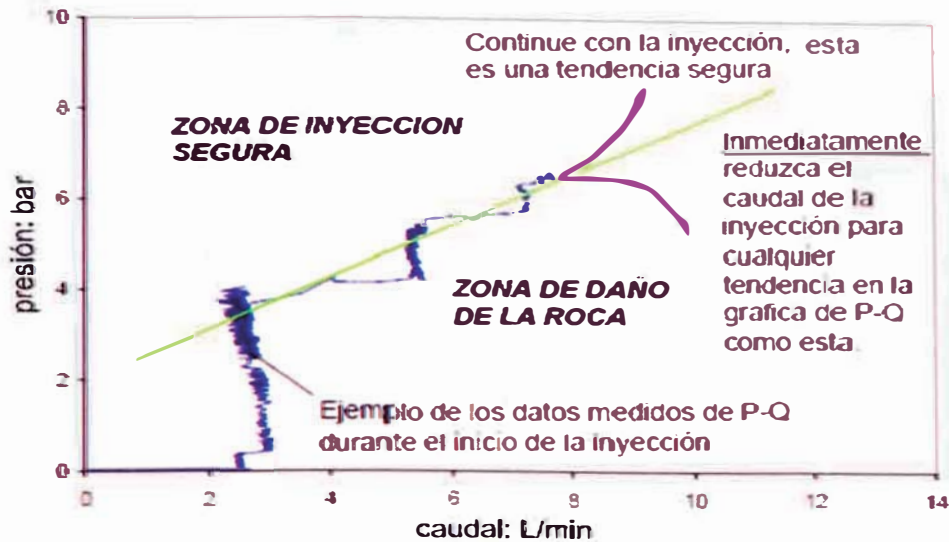
- Incrementar el caudal de inyección a 6 litros/min y esperar hasta que la presión se estabilice en el gráfico $P-Q$ de la computadora de control (alrededor de 2 a 5 minutos). Los datos medidos ya estabilizados en los puntos de 3 litros/min y 6 litros/min definen la línea de seguridad aproximadamente recta, como se muestra en la siguiente figura:



- Continuar incrementando el caudal de inyección en tramos de 3 litros/min, monitoreando la respuesta de terreno en todo momento en el gráfico $P-Q$ de la computadora. **Decisión:**

- **Si** los datos medidos de $P-Q$ como avance de inyección *permanecen en la zona segura*, continuar aumentando el flujo de inyección con incrementos de 3 litros/min.
- **Si** los datos medidos de $P-Q$ se mueven dentro de *la zona de daño de roca*, **inmediatamente se debe reducir** el caudal de inyección hasta conseguir que los datos medidos regresen a la zona segura de inyección (esto usualmente requiere una reducción de la presión al 90% de aquella con la que se presentó la desviación a la zona de daño de la roca).

Estas trayectorias alternativas sobre el gráfico $P-Q$ se muestran en la siguiente figura:



La pantalla no mostrará la “línea de tendencia segura”, por lo tanto deberá usarse el borde de una hoja de cuaderno o una regla para decidir el límite de la zona segura sobre la pantalla del computador e identificar las desviaciones de la misma.

Luego se deberá continuar incrementando la tasa de inyección hasta alcanzar el flujo máximo especificado de aproximadamente 20 litros/min, o hasta alcanzar la máxima presión segura admisible de la roca.

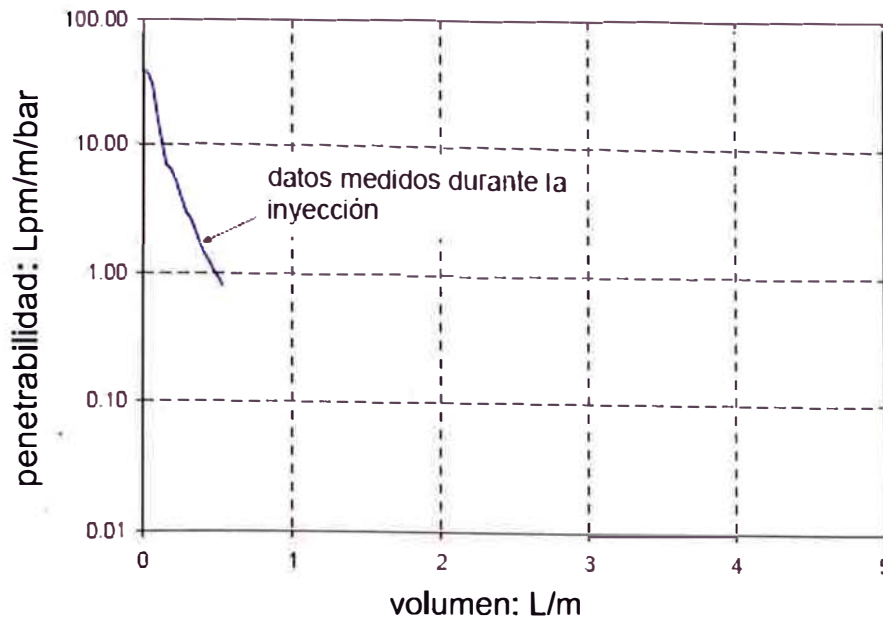
4. Luego continuar monitoreando el progreso de la inyección en el gráfico *Penetrabilidad-Volumen* que también se muestra en la pantalla de la computadora. Hay dos situaciones posibles:

Caso (a) – la inyección se está moviendo hacia el rechazo y se está empleando la mezcla correcta.

Caso (b) – la presente lechada no es lo suficientemente gruesa y se requiere un cambio a la siguiente mezcla de la secuencia especificada para las mezclas.

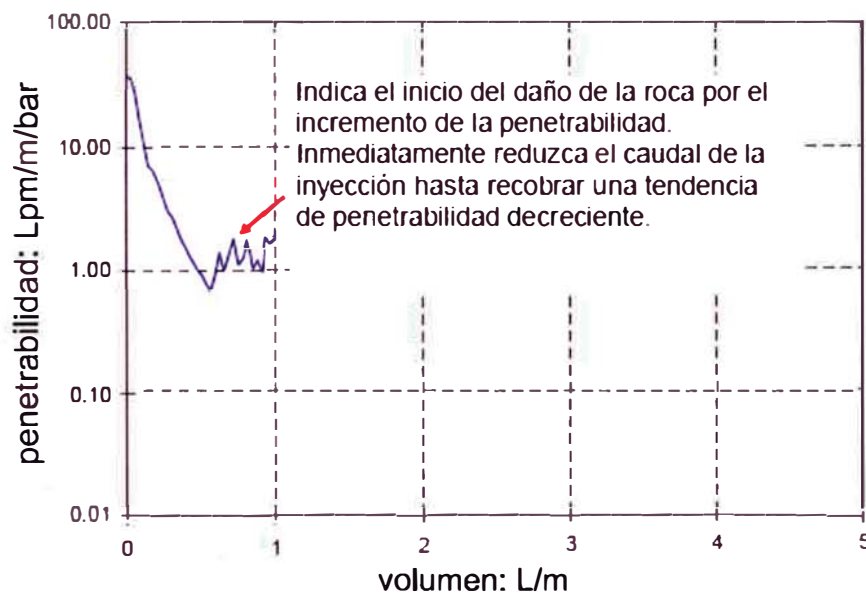
Estas dos situaciones se explican a continuación.

5. **Caso (a).** Si la penetrabilidad de la mezcla muestra un decrecimiento suave de la penetrabilidad con el incremento del volumen inyectado, no se requiere cambiar de mezcla, por ejemplo:



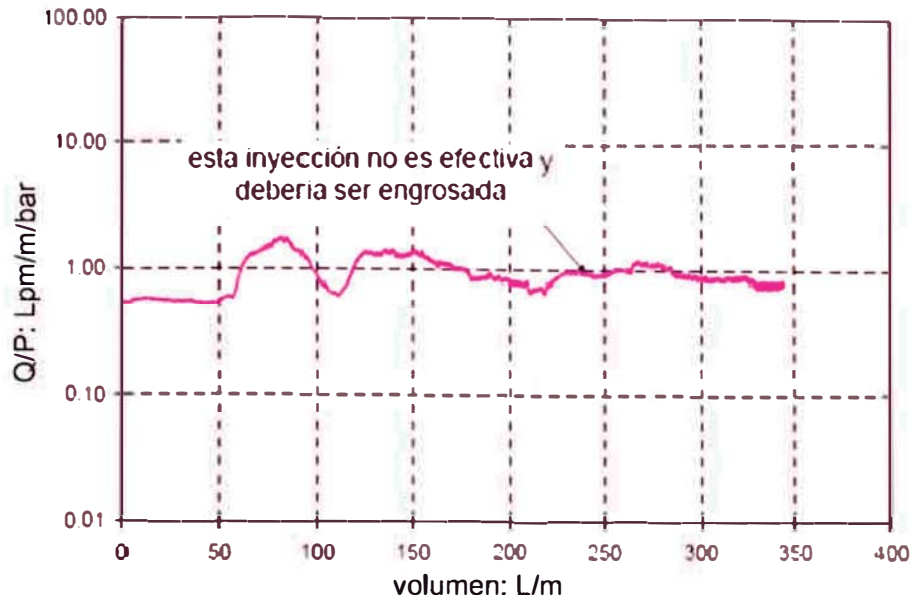
Para este caso, continuar la inyección de la lechada hasta que la penetrabilidad llegue a ser < 0.1 litros/min/m/bar, lo cual constituye *el rechazo y la terminación de la inyección para el tramo*.

Aun con una trayectoria de inyección como la mostrada arriba, se necesita cuidado para evitar el daño de la roca. Puesto que las presiones se pueden incrementar durante una inyección, se pueden presentar daños en la roca aun teniendo la inyección en la zona segura del gráfico P-Q. Este daño se puede detectar tan pronto como se incrementa la penetrabilidad en la roca, por ejemplo:



Si la penetrabilidad se incrementa, se debe inmediatamente disminuir la velocidad de bombeo de inyección para recuperar la tendencia de disminución de la penetrabilidad. Puede ser necesario reducir el flujo varias veces hasta llegar al rechazo en <0.1 litros/min/m/bar.

6. **Caso (b).** Si la lechada que se esta inyectando es muy delgada para el tipo de roca (viscosidad baja en el cono Marsh), esta se mostrara sobre el grafico como una inyección con penetrabilidad casi constante, por ejemplo:



Debido a que toma algún tiempo obtener la respuesta del terreno a la inyección de una mezcla dada, se deberá inyectar un mínimo de 400 litros de mezcla en cada etapa antes de decidir si se debe cambiar a una mezcla más gruesa.

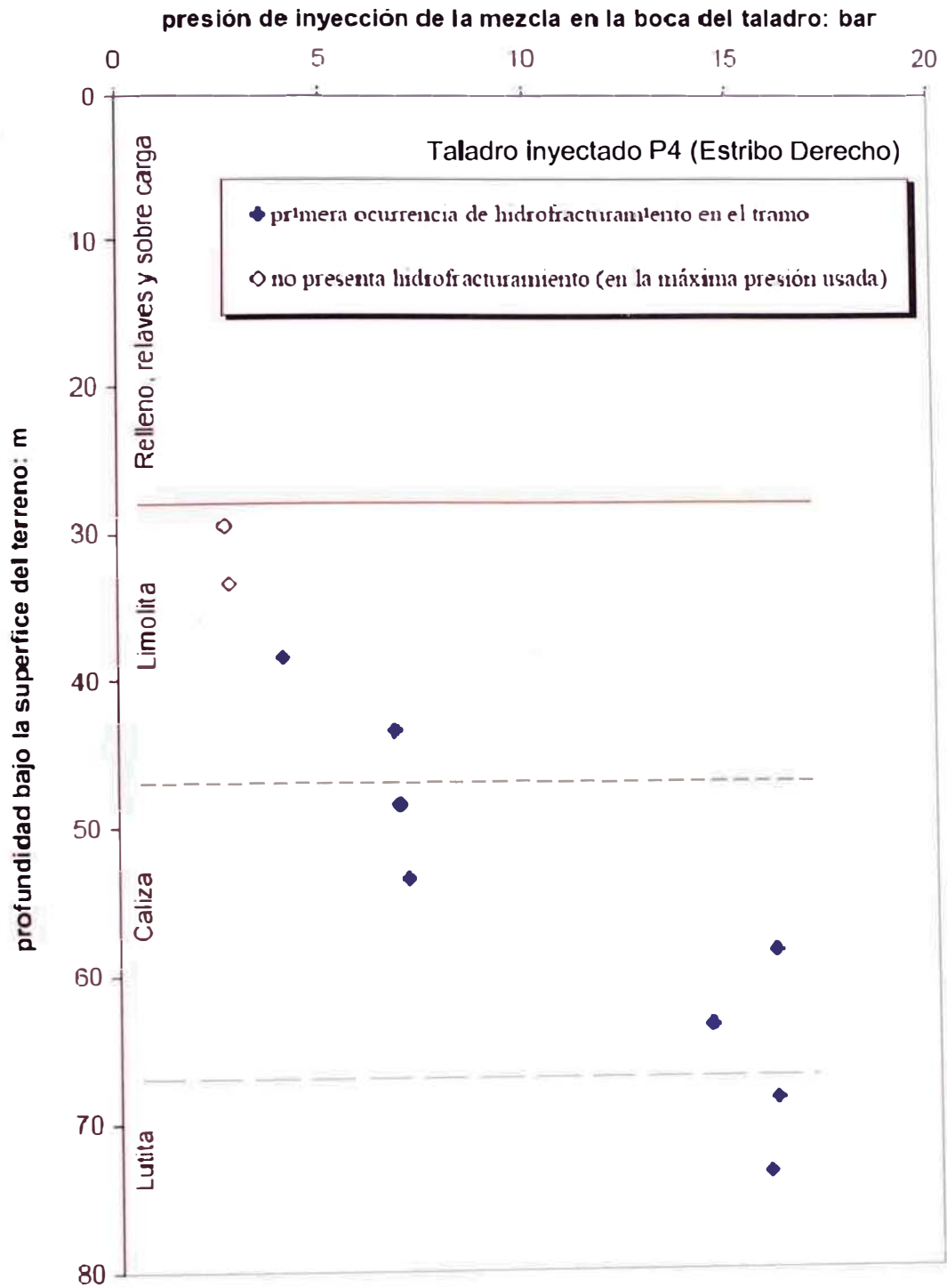
Si de acuerdo con lo anterior, se requiere el engrosamiento de una mezcla, los cambios de la mezcla se realizarán en la siguiente secuencia:

- Si se esta inyectando con la Mezcla A, cambiar a Mezcla B
- Si se esta inyectando con la Mezcla B, cambiar a Mezcla C
- Si se esta inyectando con la Mezcla C, cambiar a Mezcla D

Después de cambiar a la nueva mezcla, continúe la inyección y regrese al Paso 4 en la gráfica de Penetrabilidad, para determinar si la nueva mezcla es efectiva.

7. Se espera que las cuatro mezclas A-D sean efectivas para toda la roca de la cortina, excepto para la presencia de karsts en el estribo derecho. *Si se alcanza una toma de 4000 litros y no declina la penetrabilidad utilizando la Mezcla D, continuar inyectando e informar de inmediato al gerente de inyecciones para instrucciones adicionales.* Esta situación probablemente se deba a la presencia de una estructura kárstica, que puede requerir un cambio a mezcla con arena y una mayor cantidad de inyección adicional.

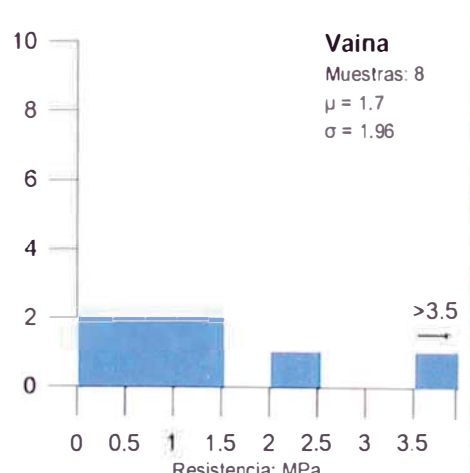
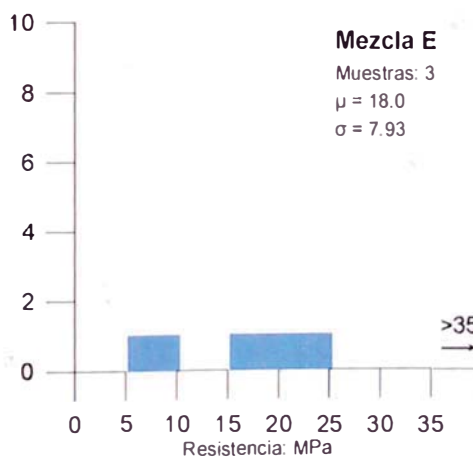
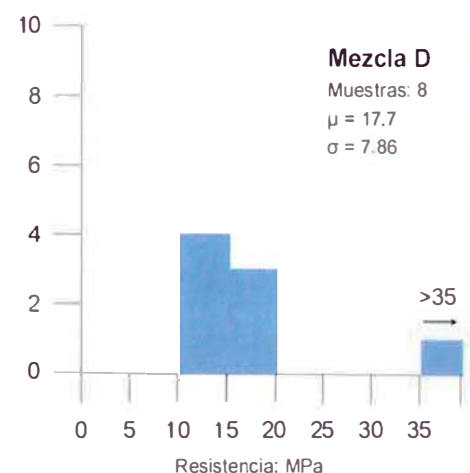
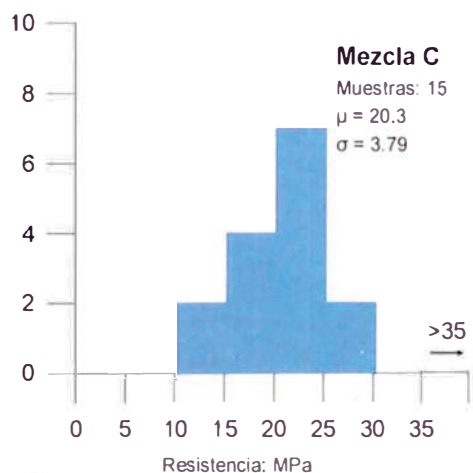
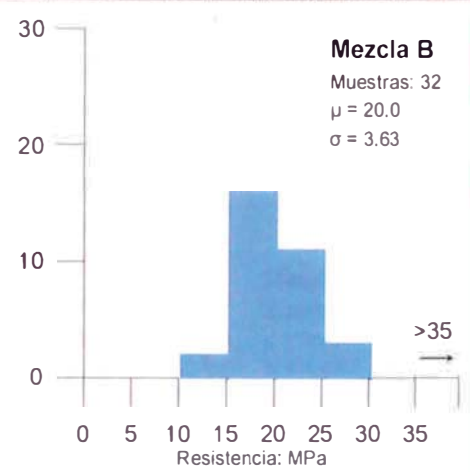
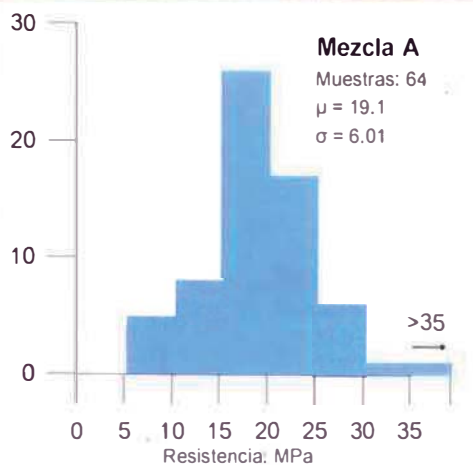
Gráfica sólo para información:



ANEXO VI
(PERFILES DEL PROGRESO DE LAS INYECCIONES)

VER:
FIGURA VI-1
FIGURA VI-2

ANEXO VII
(INFORMACIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD)



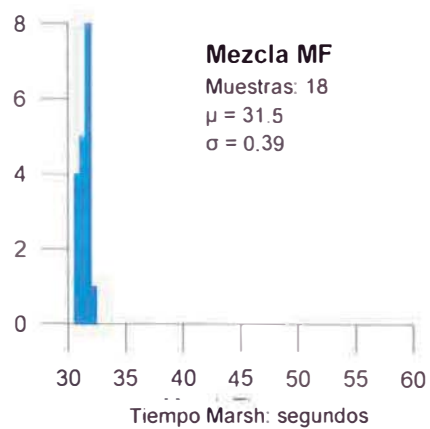
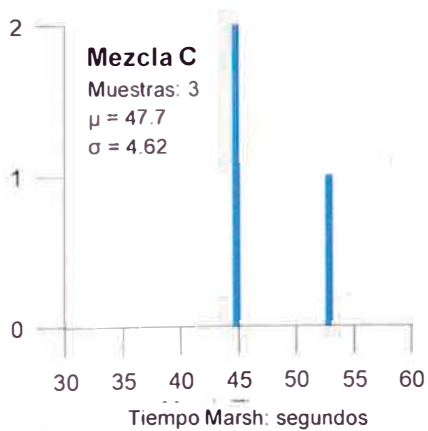
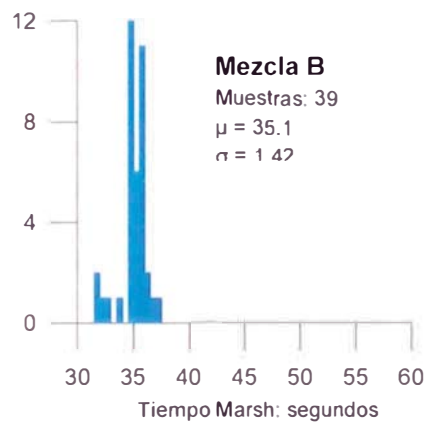
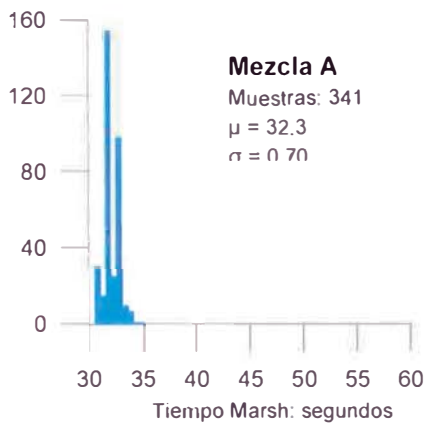
μ : Valor promedio
 σ : Desviación estándar



TESIS
 "IMPERMEABILIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO EN UNA PRESA DE RELAVES EMPLEANDO INYECCIONES: APLICACIÓN, METODOLOGÍA Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD"
 FACULTAD INGENIERÍA CIVIL
 AUTOR JUAN VELARDE M.
 FECHA FEBRERO, 2009

ASEGURAMIENTO DE CALIDAD DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTENCIA DE LAS MEZCLAS

FIGURA VII-1



μ : Valor promedio
 σ : Desviación estándar

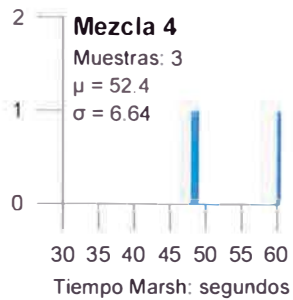
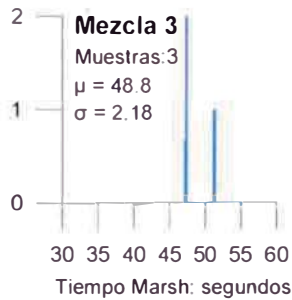
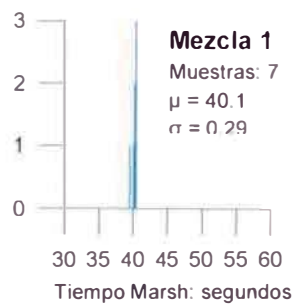
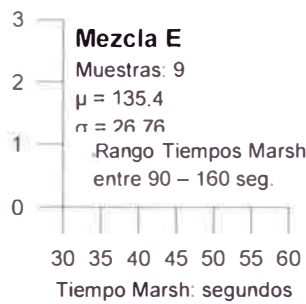
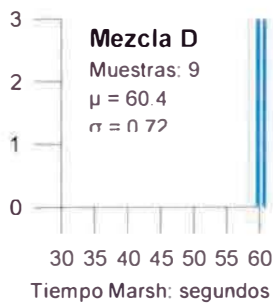
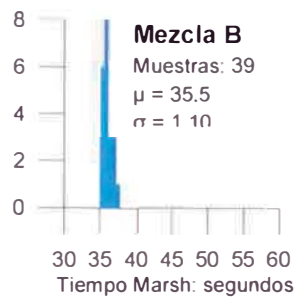
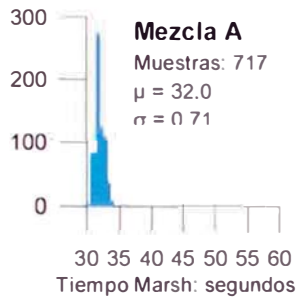


TESIS
 "IMPERMEABILIZACIÓN
 DEL MACIZO ROCOSO EN
 UNA PRESA DE RELAVES
 EMPLEANDO INYECCIONES:
 APLICACIÓN, METODOLOGÍA Y
 ASEGURAMIENTO DE CALIDAD"

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL
 AUTOR JUAN VELARDE M.
 FECHA FEBRERO, 2009

**ASEGURAMIENTO DE CALIDAD
 DE TIEMPOS MARSH-TUBOS
 MANGUITO**

FIGURA VII-2



μ : Valor promedio
 σ : Desviación estándar



TESIS
 "IMPERMEABILIZACIÓN
 DEL MACIZO ROCOSO EN
 UNA PRESA DE RELAVES
 EMPLEANDO INYECCIONES:
 APLICACIÓN, METODOLOGÍA Y
 ASEGURAMIENTO DE CALIDAD"

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL
 AUTOR JUAN VELARDE M.
 FECHA FEBRERO, 2009

**ASEGURAMIENTO DE CALIDAD
 DE TIEMPOS MARSH-CORTINA
 DE INYECCIÓN EN ROCA**

FIGURA VII-3

ANEXO VIII
(RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE AGUA)

TABLA VIII-1: Resumen de Pruebas de Agua – Zona de Filtro, TAM Estribo Derecho

Fila	Taladro	Tipo	PRUEBAS DE AGUA					ANÁLISIS		Prof. Ploteo (m)	
			Fecha (d/m/a)	Tramo		UL	K (m/sec)	Toma Alta (S/N)	Material		
				Desde (m)	Hasta (m)						
TB	TB-T88	TAM	27-Aug-06	12.5	13.5	3.5	1.8E-06	N	RX	-10.5	
		TAM	27-Aug-06	11.5	12.5	6.0	3.1E-06	N	RX	-9.5	
		TAM	27-Aug-06	10.5	11.5	4.5	2.3E-06	N	3A	-8.5	
		TAM	27-Aug-06	9.5	10.5	19.3	9.9E-06	N	3A	-7.5	
		TAM	27-Aug-06	8.5	9.5	31.1	1.6E-05	N	3A	-6.5	
		TAM	27-Aug-06	7.5	8.5	39.4	2.0E-05	N	3A	-5.5	
		TAM	27-Aug-06	6.5	7.5	95.4	4.9E-05	N	3A	-4.5	
		TAM	27-Aug-06	5.5	6.5	184.7	9.5E-05	N	3A	-3.5	
		TAM	27-Aug-06	4.5	5.5	347.0	1.8E-04	N	2B	-2.5	
		TAM	27-Aug-06	3.5	4.5	393.2	2.0E-04	N	2B	-1.5	
		TAM	27-Aug-06	2.5	3.5	352.1	1.8E-04	N	2B	-0.5	
		TAM	27-Aug-06	1.5	2.5	272.9	1.4E-04	-	TA	0.5	
TC	TC-P6	TAM	29-Jul-06	15.5	16.5	10.2	5.2E-06	N	RX	-5.5	
		TAM	29-Jul-06	14.5	15.5	38.8	2.0E-05	S	3A	-4.5	
		TAM	29-Jul-06	13.5	14.5	59.9	3.1E-05	N	3A	-3.5	
		TAM	29-Jul-06	12.5	13.5	48.7	2.5E-05	N	2B	-2.5	
		TAM	29-Jul-06	11.5	12.5	41.4	2.1E-05	N	2B	-1.5	
		TAM	29-Jul-06	10.5	11.5	41.1	2.1E-05	N	2B	-0.5	
		TAM	29-Jul-06	9.5	10.5	50.8	2.6E-05	N	TA	0.5	
		TAM	29-Jul-06	8.5	9.5	51.3	2.6E-05	N	TA	1.5	
		TAM	29-Jul-06	7.5	8.5	32.2	1.6E-05	N	TA	2.5	
		TAM	29-Jul-06	6.5	7.5	40.0	2.0E-05	N	TA	3.5	
		TAM	29-Jul-06	5.5	6.5	40.6	2.1E-05	N	TA	4.5	
		TAM	29-Jul-06	12.8	13.8	44.1	2.3E-05	N	RX	-12.5	
	TAM	29-Jul-06	11.8	12.8	49.9	2.6E-05	N	RX	-11.5		
	TAM	29-Jul-06	10.8	11.8	16.8	8.6E-06	N	RX	-10.5		
	TAM	29-Jul-06	9.8	10.8	19.0	9.7E-06	N	RX	-9.5		
	TAM	29-Jul-06	8.8	9.8	22.9	1.2E-05	N	RX	-8.5		
	TAM	29-Jul-06	7.8	8.8	23.1	1.2E-05	N	3A	-7.5		
	TAM	29-Jul-06	6.8	7.8	46.7	2.4E-05	N	3A	-6.5		
	TAM	29-Jul-06	5.8	6.8	47.3	2.4E-05	N	3A	-5.5		
	TAM	29-Jul-06	4.8	5.8	72.2	3.7E-05	N	3A	-4.5		
	TAM	29-Jul-06	3.8	4.8	93.0	4.8E-05	N	2B	-3.5		
	TAM	29-Jul-06	2.8	3.8	96.1	4.9E-05	N	2B	-2.5		
	TD	TD-S5	TAM	1-Aug-06	16.9	17.9	6.2	3.2E-06	N	RX	-3.5
			TAM	1-Aug-06	15.9	16.9	0.4	2.0E-07	N	2B	-2.5
TAM			1-Aug-06	14.9	15.9	14.6	7.5E-06	N	2B	-1.5	
TAM			1-Aug-06	13.9	14.9	33.1	1.7E-05	N	2B	-0.5	
TAM			1-Aug-06	12.9	13.9	13.1	6.7E-06	N	TA	0.5	
TAM			1-Aug-06	11.9	12.9	96.0	4.9E-05	N	TA	1.5	
TAM			1-Aug-06	9.9	10.9	11.3	5.8E-06	-	TA	2.5	
TAM			1-Aug-06	8.9	9.9	69.0	3.5E-05	-	TA	3.5	
TAM			1-Aug-06	7.9	8.9	6.2	3.2E-06	-	TA	4.5	
TAM			1-Aug-06	6.9	7.9	199.9	1.0E-04	-	TA	5.5	
TAM			1-Aug-06	5.9	6.9	134.8	6.9E-05	-	TA	6.5	
TAM			1-Aug-06	4.9	5.9	167.3	8.6E-05	-	TA	7.5	
TAM		1-Aug-06	3.9	4.9	128.5	6.6E-05	-	TA	8.5		
TAM		2-Aug-06	10.15	11.15	70.3	3.6E-05	N	3A	-4.5		
TAM		2-Aug-06	9.15	10.15	62.3	3.2E-05	N	3A	-3.5		
TAM		2-Aug-06	8.15	9.15	120.3	6.2E-05	N	2B	-2.5		
TAM		2-Aug-06	7.15	8.15	100.8	5.2E-05	N	2B	-1.5		
TAM		2-Aug-06	6.15	7.15	160.5	8.2E-05	N	2B	-0.5		
TAM		2-Aug-06	5.15	6.15	210.7	1.1E-04	N	TA	0.5		
TAM		2-Aug-06	4.15	5.15	190.9	9.8E-05	-	TA	1.5		
TAM		2-Aug-06	3.15	4.15	195.7	1.0E-04	-	TA	2.5		

TABLA VIII-2: Resumen de Pruebas de Agua – Extensión de Cortina y Plinto Derecho

Fila	Taladro	Tipo	PRUEBAS DE AGUA					ANÁLISIS		
			Fecha (d/m/a)	Tramo		UL	K (m/sec)	Lavado o Limitado (S/N)	Cierre (S/N)	
				Desde (m)	Hasta (m)					
TB	TB-S1	Roca	28-Jul-06	88	93	0.7	9.0E-08	N	S	
		Roca	28-Jul-06	83	88	0.4	4.6E-08	N	S	
		Roca	28-Jul-06	78	83	39.9	5.2E-06	S	S	
		Roca	28-Jul-06	73	78	0.6	8.1E-08	N	S	
		Roca	28-Jul-06	68	73	0.7	8.7E-08	N	S	
		Roca	28-Jul-06	63	68	4.2	5.5E-07	N	S	
		Roca	28-Jul-06	58	63	2.8	3.6E-07	N	S	
		Roca	28-Jul-06	53	58	1.8	2.3E-07	N	S	
		Roca	28-Jul-06	48	53	0.2	2.9E-08	N	S	
		Roca	28-Jul-06	43	48	0.05	6.5E-09	N	S	
			Roca	28-Jul-06	38	43	0.05	6.5E-09	N	S
		TB-S2	Roca	20-Jul-06	93	98	2.7	3.5E-07	S	S
			Roca	20-Jul-06	88	93	3.6	4.7E-07	N	S
			Roca	20-Jul-06	83	88	0.3	4.4E-08	N	S
			Roca	20-Jul-06	78	83	0.8	1.0E-07	N	S
			Roca	20-Jul-06	73	78	0.05	6.5E-09	N	S
			Roca	20-Jul-06	68	73	0.09	1.2E-08	N	S
			Roca	20-Jul-06	63	68	22.0	2.9E-06	N	S
			Roca	20-Jul-06	58	63	10.5	1.4E-06	N	S
			Roca	20-Jul-06	53	58	18.3	2.4E-06	N	S
			Roca	20-Jul-06	48	53	--	--	--	S
			Roca	20-Jul-06	43	48	0.01	1.3E-09	N	S
		TB-S3	Roca	8-Aug-06	85	90	0.05	6.5E-09	N	S
			Roca	3-Aug-06	65	70	0.3	4.4E-08	S	S
			Roca	31-Jul-06	50	65	0.09	1.2E-08	N	S
			Roca	30-Jul-06	45	55	4.4	5.7E-07	S	N
			Roca	30-Jul-06	35	45	13.1	1.7E-06	N	N
		TB-S4	Roca	19-Jul-06	71	76	0.03	3.9E-09	N	S
			Roca	19-Jul-06	66	71	0.08	1.0E-08	N	S
			Roca	19-Jul-06	61	66	0.06	7.8E-09	N	S
			Roca	19-Jul-06	56	61	0.1	1.3E-08	N	S
			Roca	19-Jul-06	51	56	0.1	1.6E-08	N	S
			Roca	19-Jul-06	46	51	0.1	1.7E-08	N	S
			Roca	19-Jul-06	41	46	0.3	3.5E-08	N	S
			Roca	19-Jul-06	36	41	5.9	7.7E-07	N	S
			Roca	19-Jul-06	29.5	36	2.9	3.8E-07	N	S
	TB	TB-T0-1	Roca	27-Nov-06	100	110	0.08	1.0E-08	N	S
			Roca	26-Nov-06	95	100	0.2	2.9E-08	N	S
Roca			26-Nov-06	90	95	0.6	7.8E-08	N	S	
Roca			26-Nov-06	85	90	3.3	4.3E-07	N	S	
Roca			26-Nov-06	80	85	3.9	5.1E-07	N	S	
Roca			26-Nov-06	75	80	4.4	5.7E-07	N	S	
Roca			26-Nov-06	70	75	1.1	1.4E-07	N	S	
Roca			27-Nov-06	65	70	0.1	1.4E-08	N	S	
Roca			27-Nov-06	60	65	0.7	9.6E-08	N	S	
Roca			27-Nov-06	55	60	3.7	4.8E-07	N	S	
Roca			27-Nov-06	50	55	0.3	3.6E-08	N	S	
Roca			27-Nov-06	45	50	2.3	3.0E-07	N	S	
Roca			27-Nov-06	40	45	1.4	1.8E-07	N	S	

TABLA VIII-2: Resumen de Pruebas de Agua – Extensión de Cortina y Plinto Derecho

Fila	Taladro	Tipo	PRUEBAS DE AGUA					ANÁLISIS		
			Fecha (d/m/a)	Tramo		UL	K (m/sec)	Lavado o Limitado (S/N)	Cierre (S/N)	
				Desde (m)	Hasta (m)					
TB	TB-T22	Roca	29-Aug-06	92	97	0.3	3.9E-08	N	S	
		Roca	29-Aug-06	87	92	0.4	5.5E-08	N	S	
		Roca	29-Aug-06	82	87	0.2	3.1E-08	S	S	
		Roca	29-Aug-06	77	82	1.4	1.8E-07	N	S	
		Roca	29-Aug-06	72.5	77.5	3.1	4.0E-07	N	S	
		Roca	29-Aug-06	68	73	6.2	8.1E-07	N	S	
		Roca	29-Aug-06	63.5	68.5	3.6	4.7E-07	N	S	
		Roca	29-Aug-06	59	64	3.6	4.7E-07	N	S	
		Roca	29-Aug-06	54.5	59.5	4.9	6.4E-07	S	S	
		Roca	29-Aug-06	50	55	1.5	2.0E-07	N	S	
		Roca	29-Aug-06	45.5	50.5	5.9	7.7E-07	N	S	
		Roca	29-Aug-06	41	46	0.06	7.8E-09	N	S	
		Roca	29-Aug-06	38	43	1.0	1.3E-07	N	S	
		TB-T44	Roca	30-Aug-06	76	81	0.01	1.3E-09	N	S
	Roca		29-Aug-06	71.5	76.5	1.2	1.6E-07	N	S	
	Roca		29-Aug-06	67	72	0.4	5.2E-08	N	S	
	Roca		29-Aug-06	62.5	67.5	0.09	1.2E-08	N	S	
	Roca		29-Aug-06	58	63	0.05	6.5E-09	N	S	
	Roca		29-Aug-06	53.5	58.5	0.1	1.4E-08	N	S	
	Roca		29-Aug-06	49	54	1.4	1.8E-07	N	S	
	TB-T59-9	Roca	13-Nov-06	83	90	1.4	1.8E-07	N	S	
Roca		12-Nov-06	73	83	0.3	3.6E-08	N	S		
Roca		12-Nov-06	63	73	0.7	8.8E-08	N	S		
Roca		12-Nov-06	53	63	0.1	1.7E-08	S	S		
Roca		10-Nov-06	42.5	53	0.0	2.6E-09	N	S		
Roca		8-Nov-06	32.5	43.5	0.1	1.0E-08	N	S		
Roca		8-Nov-06	22.5	32.5	0.6	7.8E-08	N	S		
	TB-Q4-44	Roca	16-Oct-06	63	68	0.3	3.5E-08	N	S	
Roca		16-Oct-06	58	63	0.5	6.9E-08	N	S		
Roca		16-Oct-06	53	58	0.5	6.8E-08	N	S		
Roca		16-Oct-06	48	53	0.5	5.9E-08	N	S		
Roca		16-Oct-06	43	48	6.6	8.6E-07	N	S		
Roca		16-Oct-06	38	43	5.3	6.9E-07	N	S		
	TB-Q44-4	Roca	17-Oct-06	38	43	3.6	4.7E-07	N	S	
Roca		17-Oct-06	33	38	19.8	2.6E-06	S	S		
Roca		17-Oct-06	28	33	30.6	4.0E-06	N	S		
Roca		17-Oct-06	25	30	0.7	9.4E-08	N	S		
	TB-WT2	Roca	14-Dec-06	94	103.4	0.2	2.6E-08	N	S	
Roca		14-Dec-06	84	94	0.3	4.4E-08	N	S		
Roca		14-Dec-06	74	84	0.1	1.4E-08	N	S		
Roca		14-Dec-06	64	74	0.2	2.6E-08	N	S		
Roca		13-Dec-06	54	64	1.2	1.6E-07	N	S		
Roca		13-Dec-06	44	54	0.6	7.8E-08	N	S		
Roca		13-Dec-06	34	44	1.1	1.4E-07	N	S		
Roca		12-Dec-06	25	34	8.6	1.1E-06	S	S		

TABLA VIII-2: Resumen de Pruebas de Agua – Extensión de Cortina y Plinto Derecho

Fila	Taladro	Tipo	PRUEBAS DE AGUA				ANÁLISIS			
			Fecha (d/m/a)	Tramo		UL	K (m/sec)	Lavado o Limitado (S/N)	Cierre (S/N)	
				Desde (m)	Hasta (m)					
RP	RP-P5V	Roca	19-Oct-06	115	120	16.0	2.1E-06	S	S	
		Roca	18-Oct-06	110	115	16.3	2.1E-06	S	S	
		Roca	18-Oct-06	106	111	16.5	2.1E-06	S	S	
		Roca	18-Oct-06	102	107	16.7	2.2E-06	S	S	
		Roca	18-Oct-06	98	103	16.9	2.2E-06	S	S	
		Roca	18-Oct-06	94	99	17.2	2.2E-06	S	S	
		Roca	18-Oct-06	81	86	15.6	2.0E-06	S	S	
		Roca	18-Oct-06	76	81	0.5	6.5E-08	N	S	
		Roca	18-Oct-06	71	76	0.7	9.1E-08	N	S	
		Roca	18-Oct-06	66	71	0.7	9.1E-08	N	S	
		Roca	18-Oct-06	61	66	5.8	7.5E-07	N	S	
		Roca	18-Oct-06	56	61	3.7	4.8E-07	N	S	
		Roca	18-Oct-06	51	56	3.2	4.2E-07	N	S	
		Roca	18-Oct-06	46	51	4.0	5.2E-07	N	S	
		Roca	19-Oct-06	42	47	2.7	3.5E-07	N	S	
		Roca	18-Oct-06	32	42	10.1	1.3E-06	S	N	
	Roca	18-Oct-06	22	32	10.9	1.4E-06	S	N		
		RP-P7V	Roca	20-Oct-06	8 45	18 45	19.9	2.6E-06	S	S
	Roca		21-Oct-06	28.5	38.5	0.4	4.9E-08	N	S	
	Roca		21-Oct-06	18.5	28.5	11.4	1.5E-06	S	N	
	Roca		22-Oct-06	38.5	48.5	6.1	7.9E-07	S	N	
	Roca		23-Oct-06	58.5	68.5	1.0	1.3E-07	N	S	
	Roca		23-Oct-06	48.5	58.5	6.1	7.9E-07	S	N	
	Roca		24-Oct-06	98.5	108.5	7.7	1.0E-06	S	N	
	Roca		24-Oct-06	88.5	98.5	6.6	8.6E-07	S	N	
	Roca		24-Oct-06	78.5	88.5	2.1	2.7E-07	N	S	
	Roca		24-Oct-06	68.5	78.5	0.6	7.5E-08	N	S	
	Roca		25-Oct-06	118.5	128.5	3.1	4.0E-07	S	S	
	Roca		25-Oct-06	108.5	118.5	3.0	3.9E-07	S	S	
	Roca		26-Oct-06	138.5	150	2.5	3.3E-07	S	S	
	Roca	26-Oct-06	128.5	138.5	1.6	2.1E-07	S	S		
		RP-P8V	Roca	17-Oct-06	33	38	21.7	2.8E-06	S	S
	Roca		17-Oct-06	28	33	25.8	3.4E-06	S	N	
	Roca		17-Oct-06	23	28	29.1	3.8E-06	S	N	
	RP	RP-P9	Roca	18-Sep-06	2.5	8.5	51.9	6.7E-06	S	N
			Roca	20-Sep-06	14.0	20.5	4.1	5.3E-07	S	N
			Roca	20-Sep-06	8.0	14.0	20.3	2.6E-06	S	N
Roca			21-Sep-06	20.5	26.5	3.2	4.2E-07	S	N	
Roca			23-Sep-06	34.5	38.5	30.0	3.9E-06	S	S	
Roca			23-Sep-06	24.5	32.5	3.0	3.9E-07	S	N	
Roca			25-Sep-06	38.0	44.5	0.2	2.6E-08	N	S	
Roca			27-Sep-06	49.5	55.5	24.8	3.2E-06	S	S	
Roca			27-Sep-06	44.5	50.5	24.8	3.2E-06	S	S	
Roca			28-Sep-06	60.5	64.5	28.9	3.8E-06	S	S	
Roca			28-Sep-06	55.0	61.5	17.5	2.3E-06	S	S	
Roca			29-Sep-06	69.0	74.5	16.3	2.1E-06	S	N	
Roca			29-Sep-06	64.5	69.5	12.4	1.6E-06	S	N	
Roca			1-Oct-06	74.0	80.0	1.3	1.7E-07	N	S	
Roca			2-Oct-06	90.5	97.0	0.5	6.8E-08	N	S	
Roca			2-Oct-06	86.5	91.0	2.4	3.1E-07	N	S	
Roca			2-Oct-06	79.5	86.0	0.8	1.1E-07	S	S	
Roca			8-Oct-06	107.0	115.0	0.9	1.1E-07	N	N	
Roca			8-Oct-06	102.5	109.0	0.2	2.9E-08	N	S	
Roca			8-Oct-06	96.5	103.0	0.8	9.8E-08	N	S	
Roca	10-Oct-06	126.5	131.0	1.1	1.4E-07	N	S			
Roca	10-Oct-06	120.5	127.0	0.6	7.2E-08	N	S			
Roca	10-Oct-06	114.5	121.0	0.4	5.3E-08	N	S			

TABLA VIII-2: Resumen de Pruebas de Agua – Extensión de Cortina y Plinto Derecho

Fila	Taladro	Tipo	PRUEBAS DE AGUA					ANÁLISIS	
			Fecha (d/m/a)	Tramo		UL	K (m/sec)	Lavado o Limitado (S/N)	Cierre (S/N)
				Desde (m)	Hasta (m)				
RP	RP-P9V	Roca	20-Oct-06	17	22	4.2	5.5E-07	N	N
		Roca	20-Oct-06	12	17	85.1	1.1E-05	S	N
		Roca	20-Oct-06	7	12	85.0	1.1E-05	S	S
		Roca	20-Oct-06	2	7	137.9	1.8E-05	S	S
		Roca	21-Oct-06	37	42	42.2	5.5E-06	S	N
		Roca	21-Oct-06	32	37	20.5	2.7E-06	N	N
		Roca	21-Oct-06	27	32	0.05	6.5E-09	N	N
		Roca	21-Oct-06	22	27	12.7	1.7E-06	S	N
		Roca	24-Oct-06	52	62	7.1	9.2E-07	S	N
		Roca	24-Oct-06	42	52	--	--	--	S
	RP-S8	Roca	15-Dec-06	112	120	0.2	2.3E-08	N	S
		Roca	15-Dec-06	102	112	0.02	2.6E-09	N	S
		Roca	15-Dec-06	92	102	0.4	4.6E-08	N	S
		Roca	14-Dec-06	82	92	0.2	2.3E-08	N	S
		Roca	14-Dec-06	72	82	7.1	9.2E-07	N	S
		Roca	14-Dec-06	62	72	7.3	9.4E-07	N	S
		Roca	13-Dec-06	52	62	0.1	1.7E-08	N	S
		Roca	12-Dec-06	42	52	0.1	1.4E-08	N	S
		Roca	12-Dec-06	32	42	0.7	8.5E-08	N	S
		Roca	11-Dec-06	22	32	1.1	1.5E-07	S	S
		Roca	10-Dec-06	12	22	5.5	7.2E-07	N	S
		Roca	10-Dec-06	2	12	2.7	3.5E-07	N	S
		RP-T1-1	Roca	25-Nov-06	110	120	0.3	4.3E-08	N
	Roca		24-Nov-06	105	110	0.6	7.2E-08	N	S
	Roca		24-Nov-06	100	105	0.4	5.2E-08	N	S
	Roca		24-Nov-06	95	100	0.2	3.1E-08	N	S
	Roca		24-Nov-06	90	95	0.2	2.7E-08	N	S
	Roca		24-Nov-06	85	90	0.2	2.7E-08	N	S
	Roca		25-Nov-06	80	85	0.2	3.1E-08	N	S
	Roca		25-Nov-06	75	80	0.3	3.3E-08	N	S
	Roca		25-Nov-06	70	75	0.2	3.1E-08	N	S
	Roca		25-Nov-06	65	70	0.3	3.4E-08	N	S
	Roca		25-Nov-06	60	65	0.3	3.8E-08	N	S
	Roca		21-Nov-06	49	59	0.09	1.2E-08	N	S
	Roca	21-Nov-06	39	49	0.09	1.2E-08	N	S	
Roca	19-Nov-06	29	39	0.5	6.2E-08	N	S		
Roca	19-Nov-06	18	29	3.0	3.9E-07	N	S		
Roca	18-Nov-06	19	29	17.0	2.2E-06	S	S		
Roca	18-Nov-06	9	19	1.2	1.6E-07	S	N		
	RP-T4-5	Roca	1-Dec-06	15	25	0.3	4.2E-08	N	S
		Roca	1-Dec-06	10	15	0.7	9.1E-08	N	N
		Roca	1-Dec-06	5	10	3.6	4.7E-07	N	N
		Roca	2-Dec-06	30	35	0.5	6.5E-08	N	S
		Roca	2-Dec-06	25	30	1.1	1.5E-07	N	S
		Roca	3-Dec-06	35	45	1.0	1.3E-07	N	S
		Roca	4-Dec-06	65	75	0.2	2.9E-08	N	S
		Roca	4-Dec-06	55	65	0.3	4.2E-08	N	S
		Roca	4-Dec-06	45	55	1.3	1.7E-07	N	S
		Roca	6-Dec-06	112	122	2.0	2.5E-07	N	N
		Roca	6-Dec-06	102	112	0.1	1.7E-08	N	S
		Roca	6-Dec-06	92	102	0.2	2.7E-08	N	S
		Roca	6-Dec-06	82	92	0.01	1.3E-09	N	S
		Roca	6-Dec-06	72	82	0.01	1.3E-09	N	S

TABLA VIII-2: Resumen de Pruebas de Agua – Extensión de Cortina y Plinto Derecho

Fila	Taladro	Tipo	PRUEBAS DE AGUA					ANÁLISIS	
			Fecha (d/m/a)	Tramo		UL	K (m/sec)	Lavado o Limitado (S/N)	Cierre (S/N)
				Desde (m)	Hasta (m)				
RP	RP-T5-6	Roca	19-Nov-06	32	42	0.1	1.4E-08	N	S
		Roca	19-Nov-06	22	32	0.5	7.0E-08	N	S
		Roca	18-Nov-06	12	22	0.6	7.4E-08	N	S
		Roca	18-Nov-06	2	12	0.7	8.6E-08	N	S
	RP-T6-6	Roca	24-Nov-06	52	62	0.9	1.2E-07	N	S
		Roca	24-Nov-06	47	52	0.5	6.0E-08	N	S
		Roca	24-Nov-06	42	47	0.4	5.5E-08	N	S
		Roca	24-Nov-06	37	42	0.5	5.9E-08	N	S
		Roca	24-Nov-06	32	37	1.3	1.6E-07	N	S
		Roca	24-Nov-06	27	32	0.4	5.1E-08	N	S
		Roca	24-Nov-06	22	27	0.7	9.2E-08	N	S
		Roca	24-Nov-06	12	22	0.9	1.1E-07	N	S
	RP-T6-7	Roca	19-Nov-06	12	22	0.4	5.2E-08	N	S
		Roca	19-Nov-06	2	12	9.9	1.3E-06	N	S
	RP-T7-7	Roca	27-Nov-06	16	26	0.2	2.1E-08	N	S
		Roca	27-Nov-06	6	16	4.3	5.5E-07	S	S
		Roca	28-Nov-06	26	36	0.5	6.8E-08	N	S
		Roca	29-Nov-06	46	56	0.2	2.9E-08	N	S
		Roca	29-Nov-06	36	46	1.1	1.4E-07	N	N
		Roca	30-Nov-06	66	76	0.02	2.6E-09	N	S
Roca		30-Nov-06	56	66	0.6	7.9E-08	N	S	
Roca		1-Dec-06	110	120	5.7	7.4E-07	S	S	
Roca		1-Dec-06	106	116	5.8	7.5E-07	S	S	
Roca		1-Dec-06	96	106	0.1	1.3E-08	N	S	
Roca		1-Dec-06	86	96	0.08	1.0E-08	N	S	
Roca		1-Dec-06	76	86	0.03	3.9E-09	N	S	
RP-T7-8		Roca	20-Nov-06	22	32	2.4	3.1E-07	N	S
RP-T8-9	Roca	18-Dec-06	22	32	3.6	4.7E-07	S	S	
	Roca	18-Dec-06	12	22	0.7	9.5E-08	N	S	
	Roca	18-Dec-06	2	12	0.6	7.9E-08	N	S	
	Roca	19-Dec-06	72	82	1.6	2.1E-07	N	S	
	Roca	19-Dec-06	62	72	1.4	1.8E-07	N	S	
	Roca	19-Dec-06	52	62	0.7	8.8E-08	N	S	
	Roca	19-Dec-06	42	52	0.3	4.2E-08	N	S	
	Roca	19-Dec-06	32	42	0.4	5.7E-08	N	S	
	Roca	20-Dec-06	92	100	0.2	2.1E-08	N	S	
RP-T9-9	Roca	22-Dec-06	82	92	0.5	7.0E-08	N	S	
RP-T9-9	Roca	22-Dec-06	72	80	1.1	1.4E-07	N	S	
	Roca	22-Dec-06	62	72	1.1	1.5E-07	N	S	
	Roca	22-Dec-06	52	62	0.1	1.7E-08	N	S	
	Roca	22-Dec-06	42	52	0.2	2.2E-08	N	S	
	Roca	21-Dec-06	32	42	0.2	2.0E-08	N	S	
	Roca	21-Dec-06	22	32	0.5	6.8E-08	N	S	
	Roca	21-Dec-06	12	22	0.5	6.1E-08	N	S	
	Roca	21-Dec-06	2	12	0.8	1.1E-07	N	S	

TABLA VIII-2: Resumen de Pruebas de Agua – Extensión de Cortina y Plinto Derecho

Fila	Taladro	Tipo	PRUEBAS DE AGUA					ANÁLISIS	
			Fecha (d/m/a)	Tramo		UL	K (m/sec)	Lavado o Limitado (S/N)	Cierre (S/N)
				Desde (m)	Hasta (m)				
RP	RP-Q1-11	Roca	7-Dec-06	26	36	0.02	2.6E-09	S	S
		Roca	7-Dec-06	16	26	0.03	3.9E-09	S	N
		Roca	7-Dec-06	6	16	0.08	1.0E-08	S	S
	RP-Q11-1	Roca	5-Dec-06	36	42	0.1	1.3E-08	N	N
		Roca	4-Dec-06	26	36	0.1	1.8E-08	N	N
		Roca	3-Dec-06	16	26	0.1	1.8E-08	N	S
		Roca	3-Dec-06	6	16	0.7	8.8E-08	N	N
	RP-Q7-77	Roca	8-Dec-06	45	52	0.1	1.8E-08	N	S
		Roca	8-Dec-06	35	45	0.1	1.6E-08	N	S
		Roca	8-Dec-06	25	35	0.1	1.2E-08	N	S
		Roca	8-Dec-06	15	25	0.8	1.0E-07	N	S
		Roca	7-Dec-06	5	15	1.6	2.1E-07	N	S
	RP-Q77-7	Roca	6-Dec-06	45	55	0.2	2.7E-08	N	S
		Roca	6-Dec-06	35	45	0.2	2.6E-08	N	S
		Roca	6-Dec-06	25	35	0.07	9.1E-09	N	S
		Roca	6-Dec-06	15	25	2.3	3.0E-07	N	S
		Roca	5-Dec-06	5	15	0.2	3.1E-08	N	S
	RP-Q7-78	Roca	3-Dec-06	14	24	21.8	2.8E-06	N	S
		Roca	3-Dec-06	4	14	46.9	6.1E-06	S	S
		Roca	4-Dec-06	34	44	0.3	3.9E-08	N	S
		Roca	5-Dec-06	45	55	0.6	7.4E-08	N	S
		Roca	5-Dec-06	24	34	0.3	3.9E-08	N	S
	RP-WT1	Roca	11-Dec-06	96	110	2.7	3.5E-07	N	S
		Roca	10-Dec-06	86	96	0.5	7.0E-08	N	S
		Roca	10-Dec-06	76	86	0.1	1.0E-08	N	S
		Roca	10-Dec-06	66	76	0.1	9.1E-09	N	S
		Roca	10-Dec-06	56	66	0.6	7.2E-08	N	S
Roca		10-Dec-06	46	56	1.7	2.2E-07	N	S	
Roca		9-Dec-06	36	46	0.6	7.8E-08	N	S	
Roca		9-Dec-06	26	36	0.6	8.3E-08	N	S	
Roca		9-Dec-06	16	26	0.3	3.3E-08	N	S	
Roca	9-Dec-06	6.1	16	69.0	9.0E-06	S	S		

TABLA VIII-2: Resumen de Pruebas de Agua – Extensión de Cortina y Plinto Derecho

Fila	Taladro	Tipo	PRUEBAS DE AGUA					ANÁLISIS	
			Fecha (d/m/a)	Tramo		UL	K (m/sec)	Lavado o Limitado (S/N)	Cierre (S/N)
				Desde (m)	Hasta (m)				
2005	Q13-13	Roca	27-Aug-06	63.5	74.0	0.0	1.3E-09	N	S
		Roca	27-Aug-06	53.5	64.0	6.1	8.0E-07	N	S
		Roca	27-Aug-06	44.0	54.0	0.4	5.3E-08	N	S
		Roca	26-Aug-06	33.5	44.5	0.5	6.2E-08	N	S
		Roca	26-Aug-06	23.5	34.0	1.0	1.3E-07	N	S
		Roca	25-Aug-06	13.5	24.0	1.2	1.6E-07	N	S
	Q1212-12	Roca	20-Oct-06	12.0	17.0	100.2	1.3E-05	S	S
		Roca	20-Oct-06	14.0	19.0	32.7	4.3E-06	N	S
		Roca	20-Oct-06	19.0	24.0	0.5	6.5E-08	N	S
		Roca	20-Oct-06	24.0	29.0	1.3	1.7E-07	N	S
		Roca	20-Oct-06	29.0	34.0	102.4	1.3E-05	S	S
		Roca	20-Oct-06	34.0	39.0	101.3	1.3E-05	S	S
		Roca	20-Oct-06	39.0	44.0	0.4	5.2E-08	N	S
		Roca	20-Oct-06	44.0	49.0	0.5	6.5E-08	N	S
		Roca	20-Oct-06	49.0	54.0	0.3	3.9E-08	N	S
		Roca	20-Oct-06	54.0	59.0	7.5	9.8E-07	N	S
		Roca	20-Oct-06	59.0	64.0	5.2	6.8E-07	N	N
		Roca	20-Oct-06	64.0	69.0	0.5	6.5E-08	N	N
		Roca	20-Oct-06	69.0	74.0	16.9	2.2E-06	S	S
		Roca	21-Oct-06	74.0	79.0	3.8	4.9E-07	N	S
	Q1322-22	Roca	12-Nov-06	11.5	22.5	0.3	3.9E-08	N	S
		Roca	13-Nov-06	22.5	32.5	0.2	2.0E-08	N	S
		Roca	16-Nov-06	60.0	70.0	0.03	3.9E-09	N	S

NOTA:

- 1) El Washout o los ensayos limitados se refieren a aquellas pruebas de agua donde el máximo valor Lugeon medido fue limitado por la capacidad de bombeo de la bomba utilizada para llevar a cabo el ensayo.
- 2) El cierre se refiere a aquellos tramos donde la absorción de inyección fue < 200 L/m por longitud de tramo, y la penetrabilidad alcanzada fue < 0.1 Lpm/m/bar.

ANEXO IX
(GRÁFICOS RESUMEN DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS)

VER:
FIGURA IX-1
FIGURA IX-2

ANEXO X
(RESÚMENES DE LAS ABSORCIONES DE LECHADA)

VER:

TABLA X-1 - (PLANO N°1)

TABLA X-1 - (PLANO N°2)

TABLA X-2 - (PLANO N°3)

ANEXO XI
(ANÁLISIS DETALLADO DEL PLINTO)

TABLA XI-1: Resumen de Pruebas Lugeon en Taladros Primarios – Plinto del Estribo Derecho

Taladro	Intervalo			Análisis	Valor Lugeon		Profundidad a nivel de agua		Boca-Taladro	Elev.-Agua ⁽³⁾
	Desde (m)	A (m)	Pto-Medio (m)		Por Formato	Detallado	Por Formato ⁽¹⁾	Detallado ⁽²⁾		
RP-P5V	22.00	32.00	27.00	Limitado ⁽⁴⁾	10.9	27.9	28.75	27.00	4048.5	4022
	32.00	42.00	37.00	Limitado ⁽⁴⁾	10.1	6.5	28.75	37.00	4048.5	4012
	42.00	47.00	44.50	5 Etapas	2.7	2.4	40.00	45.20	4048.5	4003
	46.00	51.00	48.50	5 Etapas	4.0	2.9	40.00	50.80	4048.5	3998
	51.00	56.00	53.50	5 Etapas	3.2	4.1	40.00	43.70	4048.5	4005
	56.00	61.00	58.50	5 Etapas	3.7	3.1	40.00	64.00	4048.5	3985
	61.00	66.00	63.50	5 Etapas	5.8	5.0	40.00	52.60	4048.5	3996
	66.00	71.00	68.50	5 Etapas	0.7	0.6	40.00	76.20	4048.5	3972
	71.00	76.00	73.50	5 Etapas	0.7	0.5	40.00	92.00	4048.5	3957
	76.00	81.00	78.50	5 Etapas	0.5	0.4	40.00	81.40	4048.5	3967
	81.00	86.00	83.50	Limitado ⁽⁴⁾	15.6	10.0	40.00	83.50	4048.5	3965
	94.00	99.00	96.50	Limitado ⁽⁴⁾	17.2	7.3	35.00	96.50	4048.5	3952
	98.00	103.00	100.50	Limitado ⁽⁴⁾	16.9	7.2	35.00	100.50	4048.5	3948
	102.00	107.00	104.50	Limitado ⁽⁴⁾	16.7	6.9	35.00	104.50	4048.5	3944
	106.00	111.00	108.50	Limitado ⁽⁴⁾	16.5	6.4	35.00	108.50	4048.5	3940
110.00	115.00	112.50	Limitado ⁽⁴⁾	16.3	5.5	35.00	112.50	4048.5	3936	
115.00	120.00	117.50	Limitado ⁽⁴⁾	16.0	6.4	40.00	117.50	4048.5	3931	
RP-P7-V	8.45	18.45	13.45	Limitado ⁽⁴⁾	19.9	27.4	dry	13.45	4055.7	4042
	18.50	28.50	23.50	Limitado ⁽⁴⁾	11.4	29.7	dry	23.50	4055.7	4032
	28.50	38.50	33.50	5 Etapas	0.4	1.1	33.30	0.00	4055.7	4056
	38.50	48.50	43.50	Limitado ⁽⁴⁾	6.1	6.6	43.80	43.50	4055.7	4012
	48.50	58.50	53.50	Limitado ⁽⁴⁾	6.1	5.4	43.50	53.50	4055.7	4002
	58.50	68.50	63.50	5 Etapas	1.0	4.4	40.60	8.10	4055.7	4048
	68.50	78.50	73.50	5 Etapas	0.6	1.8	41.00	14.00	4055.7	4042
	78.50	88.50	83.50	5 Etapas	2.1	1.2	48.40	101.20	4055.7	3955
	88.50	98.50	93.50	Limitado ⁽⁴⁾	6.6	4.1	48.40	93.50	4055.7	3962
	98.50	108.50	103.50	Limitado ⁽⁴⁾	7.7	5.4	90.00	103.50	4055.7	3952
	108.50	118.50	113.50	Limitado ⁽⁴⁾	3.0	4.0	113.00	113.50	4055.7	3942
	118.50	128.75	123.63	Limitado ⁽⁴⁾	3.1	3.0	106.80	123.63	4055.7	3932
	128.50	138.50	133.50	5 Etapas	1.6	4.0	114.00	36.70	4055.7	4019
	138.50	150.00	144.25	Limitado ⁽⁴⁾	2.5	2.4	116.80	144.25	4055.7	3911
RP-P9V	2.00	7.00	4.50	Limitado ⁽⁴⁾	137.9	158.7	dry	4.50	4064.8	4060
	7.00	12.00	9.50	Limitado ⁽⁴⁾	85.0	93.2	8.20	9.50	4064.8	4055
	12.00	17.00	14.50	Limitado ⁽⁴⁾	85.1	62.1	8.20	14.50	4064.8	4050
	17.00	22.00	19.50	5 Etapas	4.2	9.8	8.20	0.00	4064.8	4065
	22.00	27.00	24.50	Limitado ⁽⁴⁾	12.7	15.0	17.50	24.50	4064.8	4040
	27.00	32.00	29.50	5 Etapas	0.1	0.2	17.50	0.00	4064.8	4065
	32.00	37.00	34.50	Limitado ⁽⁴⁾	20.5	30.6	17.50	34.50	4064.8	4030
	37.00	42.00	39.50	Limitado ⁽⁴⁾	42.2	44.0	17.50	39.50	4064.8	4025
	52.00	67.00	59.50	Limitado ⁽⁴⁾	7.1	16.5	56.30	59.50	4064.8	4005

NOTAS:

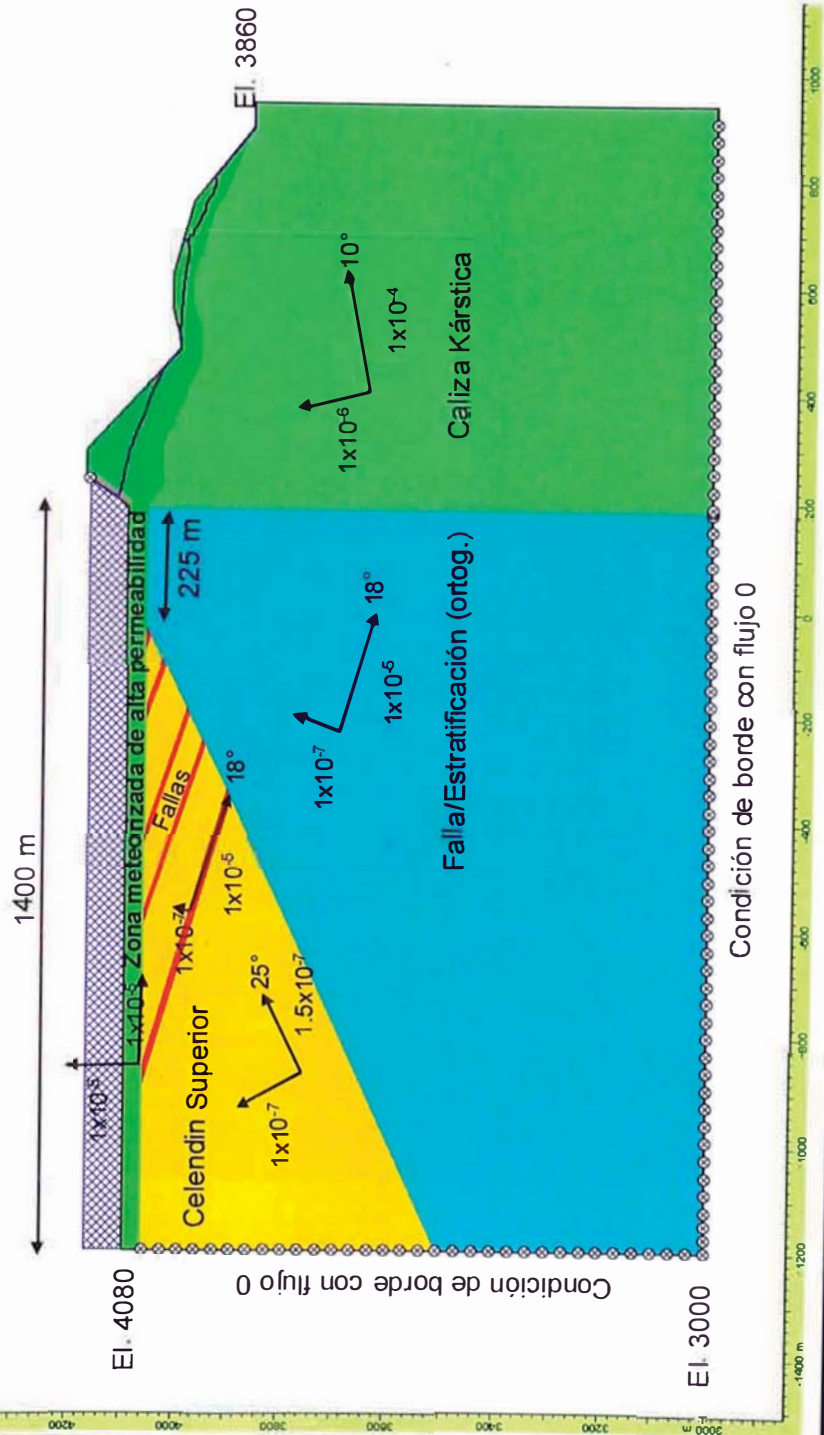
- 1) La Profundidad del nivel de agua extrapolado se basó en las mediciones obtenidas por el contratista antes de realizar las pruebas de agua.
- 2) Profundidad del nivel de agua calculado a partir de los registros electrónicos. El nivel de agua se obtuvo después del obturador inflado. Por tanto, estas profundidades de nivel de agua podrían ser más indicativas de la cabeza de agua experimentada sobre el intervalo de prueba.
- 3) Elevación del nivel de agua basada en análisis detallados.
- 4) Información limitada por la capacidad de la bomba, el valor lugeon estimado es un límite inferior.

VER:
FIGURA XI-1 (PLANO N°4)

ANEXO XII
(SECCIONES DEL ANÁLISIS DE FILTRACIONES)

Modelo Base

Nota: Todas las conductividades hidráulicas en m/s



TESIS
 "IMPERMEABILIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO EN UNA PRESA DE RELAVES EMPLEANDO INYECCIONES: APLICACIÓN, METODOLOGÍA Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD"

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL

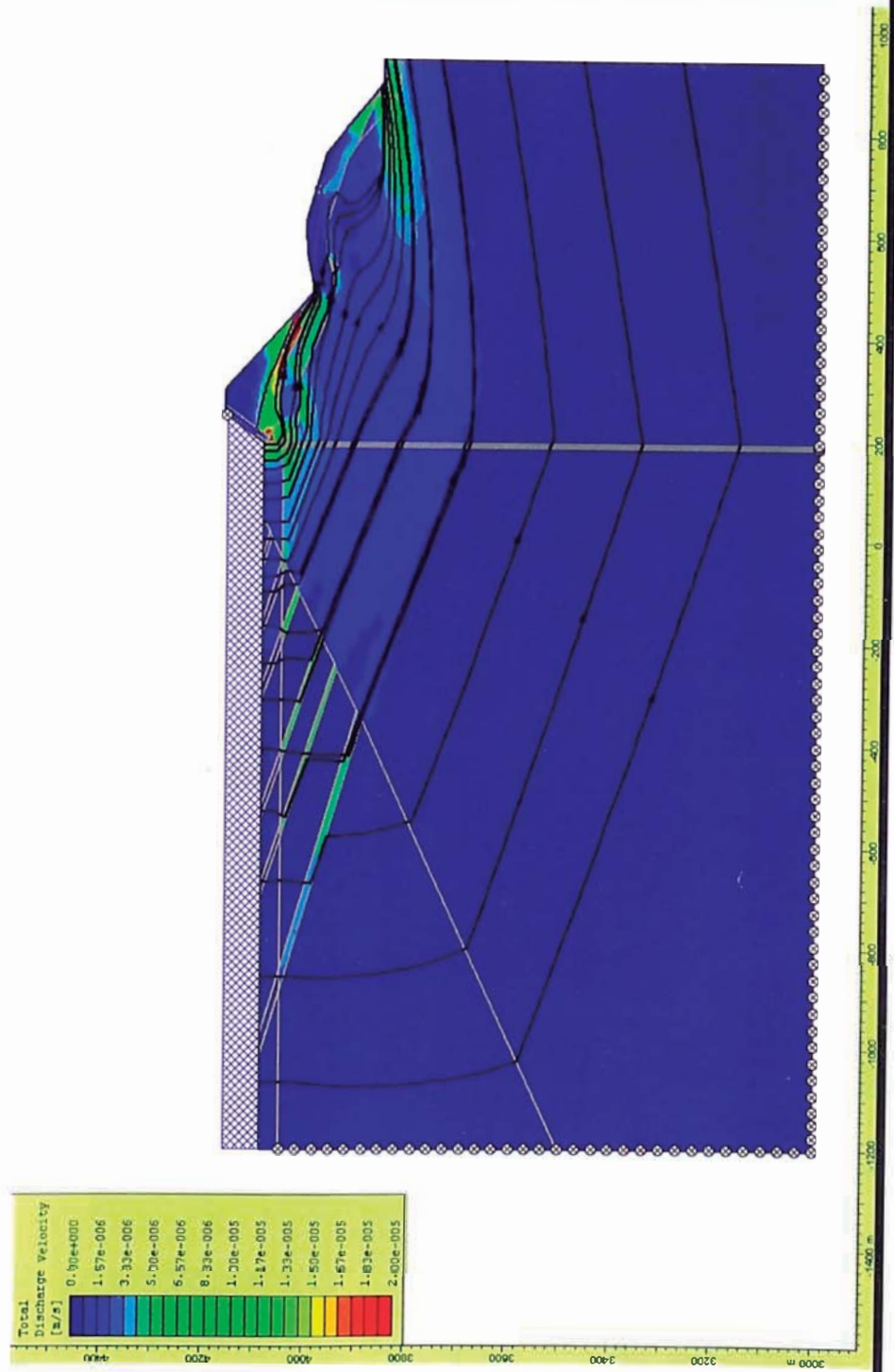
AUTOR JUAN VELARDE M.

FECHA FEBRERO, 2009

**ANÁLISIS DE FILTRACIÓN
 MODELO BASE**

FIGURA XII-1

Condiciones de flujo base sin cortina de inyección



TESIS
 "IMPERMEABILIZACIÓN
 DEL MACIZO ROCOSO EN
 UNA PRESA DE RELAVES
 EMPLEANDO INYECCIONES:
 APLICACIÓN, METODOLOGÍA Y
 ASEGURAMIENTO DE CALIDAD"

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL

AUTOR JUAN VELARDE M.

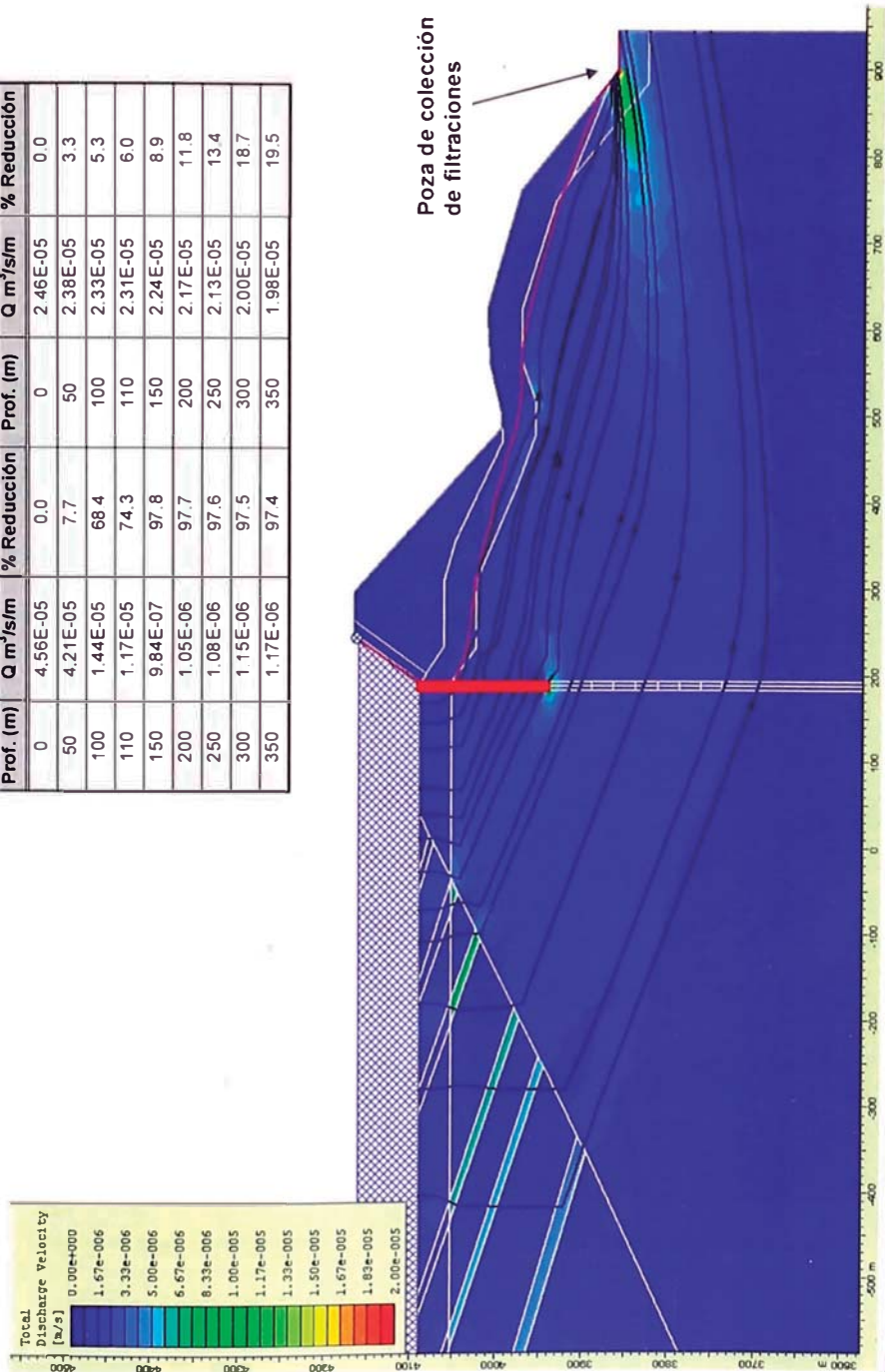
FECHA FEBRERO, 2009

**ANÁLISIS DE FILTRACIÓN
 CONDICIONES DE FLUJO
 SIN CORTINA DE INYECCIÓN**

FIGURA XII-2

Condiciones de flujo con cortina de inyección ($k=2 \times 10^{-7}$ m/s)

Pie de la Presa		Poza de Colección de filtraciones			
Prof. (m)	Q m ³ /s/m	% Reducción	Prof. (m)	Q m ³ /s/m	% Reducción
0	4.56E-05	0.0	0	2.46E-05	0.0
50	4.21E-05	7.7	50	2.38E-05	3.3
100	1.44E-05	68.4	100	2.33E-05	5.3
110	1.17E-05	74.3	110	2.31E-05	6.0
150	9.84E-07	97.8	150	2.24E-05	8.9
200	1.05E-06	97.7	200	2.17E-05	11.8
250	1.08E-06	97.6	250	2.13E-05	13.4
300	1.15E-06	97.5	300	2.00E-05	18.7
350	1.17E-06	97.4	350	1.98E-05	19.5



TESIS
 "IMPERMEABILIZACIÓN
 DEL MACIZO ROCOSO EN
 UNA PRESA DE RELAVES
 EMPLEANDO INYECCIONES:
 APLICACIÓN, METODOLOGÍA Y
 ASEGURAMIENTO DE CALIDAD"

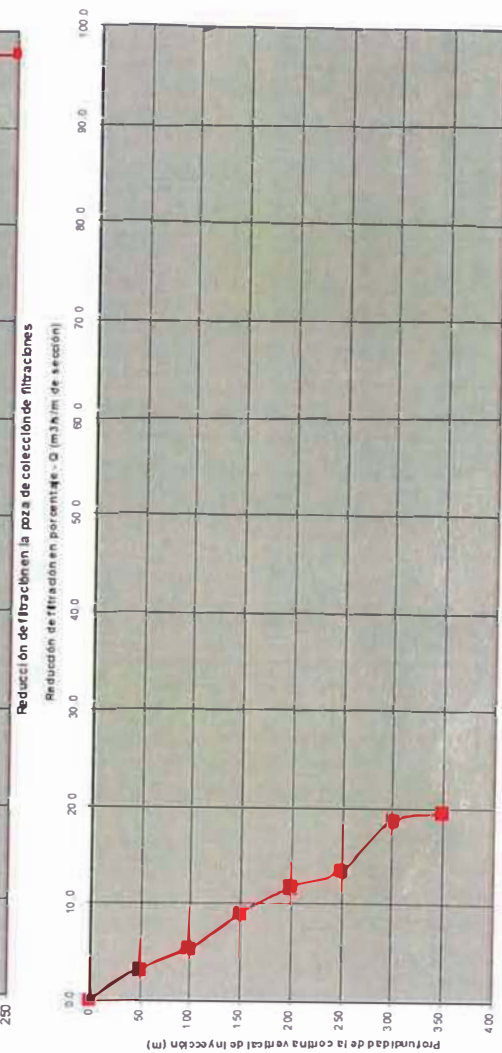
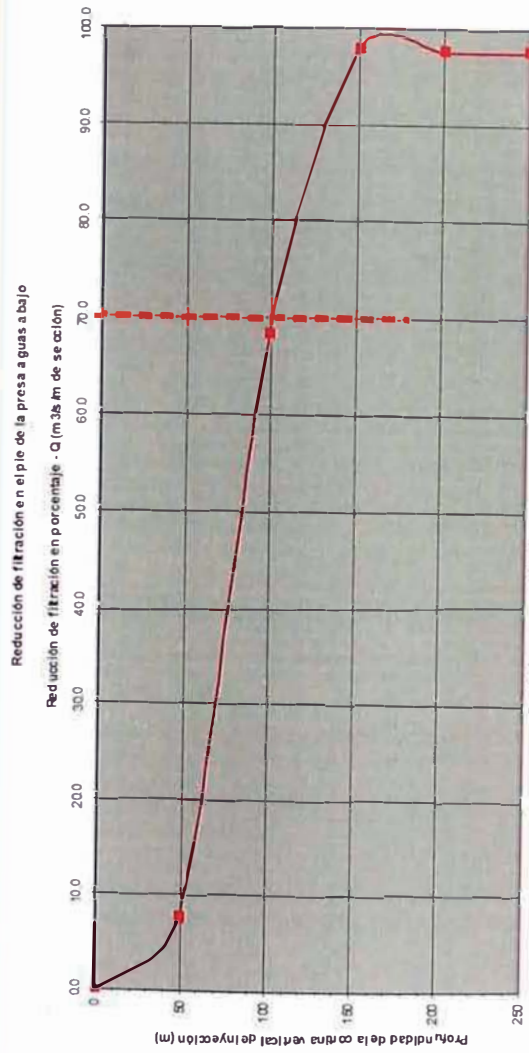
FACULTAD INGENIERÍA CIVIL

AUTOR JUAN VELARDE M.

FECHA FEBRERO, 2009

ANÁLISIS DE FILTRACIÓN
 CONDICIONES DE FLUJO
 CON CORTINA DE INYECCIÓN

FIGURA XII-3



TESIS
 "IMPERMEABILIZACIÓN
 DEL MACIZO ROCOSO EN
 UNA PRESA DE RELAVES
 EMPLEANDO INYECCIONES:
 APLICACIÓN, METODOLOGÍA Y
 ASEGURAMIENTO DE CALIDAD"

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL

AUTOR JUAN VELARDE M.

FECHA FEBRERO, 2009

**REDUCCIÓN DE FILTRACIONES
 AL PIE DE LA PRESA Y EN LA POZA
 DE COLECCIÓN DE FILTRACIONES**

FIGURA XII-4