

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



**MEJORAMIENTO DE FUNDACIÓN DE PRESAS UTILIZANDO
EL MÉTODO DE INYECCIÓN**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

WILDER JARA FERNÁNDEZ

Lima- Perú

2015

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

DEDICATORIA

A mi madre Francisca Fernández Camones el mayor ejemplo de constancia, trabajo y esfuerzo de mi familia.

AGRADECIMIENTOS

En estas líneas quiero agradecer su colaboración a todos los que han hecho posible la realización de esta Tesis.

A toda mi familia; a mi mamá, mis tíos, hermana, primos por todo el apoyo que me han dado.

A mi asesor académico M. Sc. Ing. Carlos Huamán Egoavil por su disposición en atenderme y guiarme en la ejecución de mi trabajo de grado.

A todo el equipo de ingenieros de la empresa MWH Perú S.A. por su apoyo y guía con sus experiencias formando parte en distintos proyectos.

Wilder Jara Fernández

	Pág.
RESUMEN	5
LISTA DE CUADROS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	10
INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	13
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	13
1.3 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	14
1.4 METODOLOGÍA EMPLEADA	14
1.5 HISTORIA Y PRINCIPIOS DE LA INYECCIÓN	15
1.5.1 Historia de la inyección	15
1.5.2 Principios de la inyección	16
1.5.3 Definiciones	20
CAPÍTULO II: INVESTIGACIÓN DEL TERRENO Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO	22
2.1 INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS	22
2.2 INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS	25
2.2.1 Clasificación geomecánica	25
2.2.2 Propiedades de la roca	29
2.3 INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS	32
2.4 ESTUDIO DE PERMEABILIDAD	34
2.4.1 Ensayo Lugeon	34
2.4.1.1 <i>Tipos de flujo</i>	36
2.4.2 Evaluación de los ensayos de permeabilidad	40
2.5 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA CORTINA DE INYECCIÓN	42
2.5.1 Consideraciones de los taladros	42

2.5.2	Cortinas de presas	46
2.5.2.1	<i>Posicionamiento de las cortinas</i>	47
2.5.2.2	<i>Cortinas de carácter exploratorio</i>	49
CAPÍTULO III: MATERIALES DE INYECCIÓN Y EQUIPOS		50
3.1	MATERIALES DE INYECCIÓN	50
3.1.1	Cemento	50
3.1.1.1	<i>Cemento Portland</i>	50
3.1.1.2	<i>Cemento Ultrafino</i>	51
3.1.2	Agua	53
3.1.3	Aditivos	53
3.1.4	Arena	54
3.2	EQUIPOS	55
3.2.1	Equipos de perforación	55
3.2.1.1	<i>Equipos a percusión</i>	56
3.2.1.2	<i>Equipos a rotación</i>	56
3.2.2	Equipos de inyección	57
3.2.2.1	<i>Mezcladores</i>	58
3.2.2.2	<i>Agitadores</i>	59
3.2.2.3	<i>Equipos de bombeo</i>	59
3.2.2.4	<i>Líneas de inyección</i>	60
3.2.2.5	<i>Obturadores (packers)</i>	61
3.2.3	Equipos de monitoreo	62
CAPÍTULO IV: DISEÑO DE MEZCLA Y MÉTODOS DE INYECCIÓN		65
4.1	DISEÑOS DE MEZCLA	65
4.1.1	Ensayos de laboratorio	65
4.1.2	Análisis de los resultados de las mezclas de diseño	71
4.2	MÉTODOS DE INYECCIÓN	72
4.2.1	Método tradicional	72
4.2.2	Método GIN (Grouting Intensity Number)	74
4.2.2.1	<i>Principios del método GIN</i>	74
4.2.2.2	<i>Criterios para adoptar la curva GIN de inyección</i>	75

CAPÍTULO V: TÉCNICAS DE INYECCIÓN, CONTROL DE CALIDAD Y	79
CRITERIOS DE ANÁLISIS	
5.1 TÉCNICAS DE INYECCIÓN	79
5.1.1 Inyección ascendente	79
5.1.2 Inyección descendente	81
5.1.3 Inyección con circuito	82
5.2 CONTROL DE CALIDAD	82
5.2.1 Perforación	83
5.2.2 Inyección	83
5.2.3 Verificación de equipos	84
5.2.4 Control de absorción	85
5.3 CRITERIO DE CIERRE	87
5.3.1 Criterio de permeabilidad	87
5.3.2 Criterio de toma (absorciones)	87
5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	88
CAPÍTULO VI: APLICACIÓN EN LA PRESA PALLCA DE LA CENTRAL	90
HIDROELÉCTRICA HUANZA, HUAROCHIRÍ – LIMA	
6.1 INTRODUCCIÓN	90
6.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	91
6.3 ESTUDIO E INVESTIGACIÓN DE LA PRESA CON FINES DE	92
IMPERMEABILIZACIÓN	
6.3.1 Investigación geológica	92
6.3.2 Estudio hidrogeológico	92
6.3.3 Estudio hidráulico	93
6.3.4 Taladros de investigación	93
6.4 DISEÑO DE LA CORTINA DE INYECCIÓN	96
6.5 DISEÑO DE MEZCLA Y PRESIONES DE INYECCIÓN	100
6.5.1 Diseño de mezcla	100
6.5.1.1 Ensayos de mezclas de lechada	100
6.5.1.2 Selección de la mezcla de diseño	107
6.5.2 Presiones de inyección	108
6.6 PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN	111
6.6.1 Perforación	111

6.6.2	Inyección	114
6.6.3	Control de calidad	115
6.6.4	Taladros adicionales	118
6.7	ANÁLISIS DE LA CORTINA DE INYECCIÓN	119
CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		135
7.1	CONCLUSIONES	135
7.2	RECOMENDACIONES	136
BIBLIOGRAFÍA		138
ANEXOS		140
ANEXO 01: Certificado de calidad de los materiales		141
	Certificado de calibración de los equipos	145
	Cuadro de resultados de los ensayos de compresión no confinada	149
ANEXO 02: Panel Fotográfico		159
ANEXO 03: Láminas		171

RESUMEN

El mejoramiento de fundaciones de presas mediante el método de inyecciones es uno de los temas más importantes e interesantes de la ingeniería civil y geotécnica. Los trabajos de inyecciones se fueron desarrollando a lo largo de la historia, debido a la necesidad de mejorar la resistencia del suelo mediante las inyecciones de consolidación, o impedir las filtraciones de agua a través de las fisuras del macizo rocoso en las fundaciones de grandes estructuras como las presas, mediante la inyección de impermeabilización.

Para el diseño de las cortinas de impermeabilización se realizan investigaciones comunes como: investigaciones geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas y ensayos de permeabilidad tipo Lugeon, con el fin de determinar la permeabilidad de la roca, verificando la cantidad de filtración que pasa a través de ella. En Perú se tiene poca información sobre el mejoramiento de fundaciones de presas utilizando en método de inyecciones; por ello en la presente tesis se hace hincapié en el mejoramiento de fundaciones, técnicas de inyección, diseño de inyección, diseño de mezcla de lechada y control de calidad. Además, se plasma la experiencia sobre los trabajos de inyecciones en la presa Pallca del proyecto Central Hidroeléctrica de Huanza, en la provincia de Huarochirí, Lima.

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro N°2.1: Clasificación de la calidad del macizo rocoso según RQD	26
Cuadro N°2.2: Parámetros del Sistema de Clasificación RMR	28
Cuadro N°2.3: Clasificación RMR del macizo rocoso	28
Cuadro N°2.4: Peso específico y porosidad típica	30
Cuadro N°2.5: Valores típicos de velocidad en rocas	30
Cuadro N°2.6: Resistencia a la compresión típica	32
Cuadro N°2.7: Patrones de resultados de prueba Lugeon para la obtención del valor Lugeon representativo	38
Cuadro N°2.8: Ensayo de permeabilidad tipo Lugeon en la presa Pallca – Tramo de 10 a 15 m	39
Cuadro N°3.1: Clasificación de cementos	51
Cuadro N°3.2: Huso recomendado para la arena de inyección	54
Cuadro N°5.1: Absorciones máximas	87
Cuadro N°5.2: Clasificación de absorción de lechada	88
Cuadro N°5.3: Clasificación de toma de lechada	89
Cuadro N°6.1: Cuadro resumen de los taladros de investigación 2012	93
Cuadro N°6.2: Cuadro de resultados de los ensayos de lechada	102
Cuadro N°6.3: Mezcla seleccionada para la cortina de inyección	108
Cuadro N°6.4: Presiones manométricas propuestas	108
Cuadro N°6.5: Presiones manométricas recomendadas	109
Cuadro N°6.6: Clasificación de absorción de lechada – presa Pallca	116
Cuadro N°6.7: Resumen del programa de la cortina de inyección	119

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura N°1.1: Reología de la lechada de cemento vs agua	17
Figura N°1.2: Modelo de fluido escurriendo en una fractura	19
Figura N°2.1: Cálculo del RQD	26
Figura N°2.2: Ensayo de carga puntual	31
Figura N°2.3: Esquema del ensayo Lugeon	35
Figura N°2.4: Evaluación estadística de permeabilidad	40
Figura N°2.5: Evaluación de permeabilidad del taladro IMI-30	41
Figura N°2.6: Estudio de resultados por criterios empíricos	44
Figura N°2.7: Estudio de presiones de inyección	46
Figura N°2.8: Perfil esquemático del modelo de la cortina de inyección	47
Figura N°2.9: Cortina de inyección en presa de tierra	47
Figura N°2.10: Cortina de inyección en presa con protección del talud	48
Figura N°2.11: Cortina de inyección en presa de gravedad	49
Figura N°3.1: Granulometría de los cementos de inyección	52
Figura N°3.2: Huso granulométrico recomendado	55
Figura N°3.3: Perforadora Track Drill	56
Figura N°3.4: Esquema del proceso de inyección	58
Figura N°3.5: Bomba de cavidades progresivas – presa Chuspipi	60
Figura N°3.6: Packer mecánico e hidráulico	61
Figura N°3.7: Esquema del equipo de monitoreo de inyección	62
Figura N°3.8: Gráficas del proceso de inyección	64
Figura N°4.1: Balanza de lodos tipo Baroid	66
Figura N°4.2: Cono de Marsh	67
Figura N°4.3: Placa para cohesión, ranurado @ 5mm	68
Figura N°4.4: Prueba de sedimentación	69
Figura N°4.5: Ensayo del tiempo de fraguado – Aguja Vicat	70
Figura N°4.6: Briquetas con lechada de cemento	70
Figura N°4.7: Serie de curvas límite GIN típicas sugeridas para la inyección de macizos rocosos	76
Figura N°4.8: Curva de camino de inyecciones típicas, relacionado al tipo o magnitud de la abertura del medio inyectado	76
Figura N°4.9: Proceso de inyección típico de un taladro	77

Figura N°4.10: Limitaciones del proceso de inyección	78
Figura N°4.11: Zonas típicas a donde llegarán los caminos de inyección	78
Figura N°5.1: Secuencia de inyección ascendente	80
Figura N°5.2: Secuencia de inyección descendente	81
Figura N°5.3: Toma de lechada vs valor Lugeon	86
Figura N°6.1: Mapa de ubicación geográfica del proyecto	91
Figura N°6.2: Caja de testigos con muestra del taladro IMD-19A	94
Figura N°6.3: Caja de testigos con muestra del taladro IMI-30	94
Figura N°6.4: Perforaciones de investigación con ensayos Lugeon y RQD	95
Figura N°6.5: Proyección estereográfica de estructuras geológicas estribo derecho	97
Figura N°6.6: Concentración de los polos de fallas y diaclasas estribo derecho	97
Figura N°6.7: Diagrama de roseta (Rosette Plot) estribo derecho	97
Figura N°6.8: Proyección estereográfica de estructuras geológicas estribo izquierdo	98
Figura N°6.9: Concentración de los polos de fallas y diaclasas estribo izquierdo	98
Figura N°6.10: Diagrama de roseta (Rosette Plot) estribo izquierdo	98
Figura N°6.11: Proyección estereográfica de estructuras geológicas fondo del valle	99
Figura N°6.12: Concentración de los polos de fallas y diaclasas fondo del valle	99
Figura N°6.13: Diagrama de roseta (Rosette Plot) fondo del valle	99
Figura N°6.14: Ensayo de sedimentación, cemento andino IP	103
Figura N°6.15: Ensayo de sedimentación, cemento Portland tipo I	103
Figura N°6.16: Ensayo de fluidez, cemento andino IP	104
Figura N°6.17: Ensayo de fluidez, cemento Portland tipo I	104
Figura N°6.18: Gráfica de cohesión relativa, cemento andino IP	105
Figura N°6.19: Gráfica de cohesión relativa, cemento Portland tipo I	105
Figura N°6.20: Gráfica de inyectabilidad de la mezcla, cemento andino IP	106
Figura N°6.21: Gráfica de inyectabilidad de la mezcla, cemento Portland tipo I	106
Figura N°6.22: Inyectabilidad de la mezcla seleccionada	107
Figura N°6.23: Análisis de presiones de inyección	109
Figura N°6.24: Perfil de absorción de los taladros de investigación	110
Figura N°6.25: Secuencia de inyección de impermeabilización	115
Figura N°6.26: Diagrama de flujo para el proceso de inyección	117
Figura N°6.27: Esquema de la cortina en la progresiva 0+100 a 0+110	118
Figura N°6.28: Producción de la cortina de inyección	119
Figura N°6.29: Prueba Lugeon vs Absorción de lechada	120

Figura N°6.30: Curvas de absorción de lechada por taladros	121
Figura N°6.31: Curvas de absorción de lechada de todos los taladros	122
Figura N°6.32: Distribución de frecuencia por taladros	125
Figura N°6.33: Distribución de frecuencia de todos los taladros	125
Figura N°6.34: Absorción promedio y total de estadios por taladros	126
Figura N°6.35: Ploteo de absorción de estadios en función a la profundidad	130
Figura N°6.36: Ploteo de absorción total de estadios en función a la profundidad	131
Figura N°6.37: Esquema de perfil de absorción aguas arriba de la progresiva 0+100 a 0+110	132
Figura N°6.38: Resistencia a la compresión de muestras de lechada en la cortina presa Pallca	134

LISTA SE SÍMBOLOS Y SIGLAS

η	:	Viscosidad dinámica
η_B	:	Viscosidad plástica
η'	:	Viscosidad aparente
c	:	Cohesión
c_r	:	Cohesión relativa
τ	:	Esfuerzo cortante
μm	:	Micrones
t, e	:	Abertura de fractura o fisura
q	:	Caudal
R_{max}	:	Radio máximo de penetración de la lechada
RQD	:	Índice de calidad de la roca
RMR	:	Clasificación geomecánica de Bieniawski
V_l	:	Velocidad de ondas longitudinales
V_s	:	Velocidad de ondas transversales o de corte
UL	:	Unidad Lugeon
ASTM	:	Sociedad Americana para Ensayos y Materiales
γ	:	Peso específico
GIN	:	Número de intensidad de inyección

INTRODUCCIÓN

A pesar de los logros científicos y tecnológicos más recientes, la investigación, los estudios y las nuevas mejoras de la teoría y la práctica siguen siendo necesarias y deseables para ajustarse mejor a las necesidades de la industria de la construcción en los campos de la fundación, la estabilización del macizo rocoso, túneles y construcción de estructuras de retención de agua.

La presente tesis está compuesta por siete capítulos que tratan sobre el mejoramiento de fundaciones por el método de inyección. La tesis presenta un marco teórico sobre el concepto de inyección, las técnicas existentes y la parte aplicativa, en la cual se plasma la experiencia personal lograda en la participación en diferentes proyectos de inyección.

En el Capítulo I se presenta la introducción de la tesis, explicando el planteamiento del problema, los objetivos de la investigación, los alcances de la investigación y la metodología empleada para llevar a cabo la investigación. También se hace una breve historia de la inyección, cómo fueron evolucionando y mejorando los conceptos de inyección mediante las investigaciones y experiencias obtenidas de diferentes ingenieros. Finalmente se describe los principios básicos de la inyección.

En el Capítulo II se describen las investigaciones más comunes que se realizan para el diseño de la cortina de inyección, entre ellas tenemos: (1) investigaciones geológicas mediante el reconocimiento del terreno, mapeo geológico regional y local, planos de discontinuidades, buzamientos, etc., (2) investigaciones geotécnicas mediante perforaciones diamantinas para la clasificación geomecánica de la roca, (3) investigaciones hidrogeológicas basadas en el estudio de los flujos de agua superficial y subterránea que tienen gran influencia en el tratamiento de fundaciones, (4) estudios de permeabilidad a partir de ensayos como el ensayo Lugeon, con el fin de determinar la permeabilidad de la roca verificando la cantidad de filtraciones que pasan a través de ella. También se discuten los criterios para el diseño de las cortinas de impermeabilización: número de cortinas, profundidad de los taladros, ángulo de inclinación de los taladros, espaciamiento entre taladros, etc.

En el Capítulo III se indican los materiales y equipos más comunes que se utilizan en los trabajos de inyección. Se describen los materiales como el cemento, aditivos, agua y arena, y se investigan sus propiedades físico-químicas para el buen uso en el diseño de mezcla. Se describen también los equipos de perforación, inyección y de monitoreo indicando sus ventajas en cada caso, y los métodos a utilizar de acuerdo a los requerimientos del proyecto. La buena selección de los equipos será de influencia en la planificación del trabajo de inyecciones.

En el Capítulo IV se indican las pautas para el diseño de mezcla de la lechada, describiendo cada tipo de ensayo de laboratorio realizado para determinar los parámetros de la lechada como: la sedimentación, fluidez, cohesión, densidad, resistencia y temperatura, y el análisis correspondiente de los resultados de cada ensayo. También se describe en forma sistemática los métodos de inyección: el método tradicional, que consiste en definir la presión de inyección con el uso de diferentes dosificaciones de lechada; y el método GIN (Grouting Intensity Number) que fue establecido por Lombardi y Deere en la década de los 90, y que consiste en definir la presión y volumen constante requeridas para la inyección.

En el Capítulo V se hace mención a las técnicas existentes de inyección, los controles de calidad que se debe llevar para un buen proceso de inyección, y el análisis de resultados para la toma de decisiones en el criterio de cierre.

En el Capítulo VI se hace referencia a la aplicación de la inyección en el mejoramiento de la fundación en el proyecto de la Central Hidroeléctrica de Huanza, detallando los trabajos de cortina de impermeabilización realizados en la presa Pallca.

En el Capítulo VII se presenta de manera sucinta las conclusiones derivadas del análisis de resultados en relación a las características determinadas para llevar a cabo el mejoramiento de la fundación por el método de inyección, utilizando la cortina de impermeabilización en la presa Pallca como base para formular las recomendaciones.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El poco conocimiento y experiencia sobre el mejoramiento de fundaciones de presas, mediante la cortina de impermeabilización, puede traer consigo el mal proceso de inyección, problemas de filtración, control de calidad deficiente, mala planificación, pérdidas económicas por rehacer los trabajos, etc. Estos problemas también son consecuencia de la falta de experiencia en dichos trabajos.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

- **Objetivo General**

La presente tesis tiene como objetivo contribuir al conocimiento de los procesos de inyección en macizos rocosos, para utilizarlos de una forma eficiente en futuros proyectos, mediante la revisión del análisis, diseño y construcción de la cortina de impermeabilización de la presa de agua Pallca, ubicada en el distrito de Huanza, provincia de Huarochirí, región de Lima.

- **Objetivos Específicos**

- Realizar estudios de las características geológicas y geotécnicas del macizo rocoso.
- Determinación de los parámetros de diseño y control de calidad de la cortina de inyecciones.
- Descripción del proceso de inyecciones, mediante el método tradicional utilizado en el diseño y construcción de la cortina de impermeabilización de la presa Pallca.

1.3 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

Para este trabajo se utilizó el mapeo geológico – geotécnico que se realizó a lo largo del eje de la presa Pallca, antes y durante la excavación para la cimentación de la presa.

Se utilizó datos de logueo y ensayos de permeabilidad tipo Lugeon, para el análisis de la calidad del macizo rocoso mediante información obtenida de las perforaciones de investigación.

También se utilizó datos de los ensayos de la lechada: fluidez, densidad, sedimentación, cohesión, temperatura y ensayo de compresión. Los datos obtenidos son de ensayos de laboratorio para el diseño de mezcla, y ensayos durante el proceso de inyección.

El análisis y síntesis de la información se hizo con la utilización de software convencional: AutoCAD Civil 3D, ArcGIS, Microsoft Excel y Rocscience (Dips).

1.4 METODOLOGÍA EMPLEADA

La metodología a utilizar para alcanzar cada uno de los objetivos es la siguiente:

- i. Recopilación, análisis y síntesis de la información geológica, geotécnica e hidrogeológica existente, que permita definir las características del macizo rocoso del proyecto.
- ii. Investigación teórica: métodos y técnicas de inyección, características geomecánicas y permeabilidad de la roca, comportamiento de la lechada, equipos de perforación e inyección, en general, todos los aspectos relacionados con los trabajos de inyección.
- iii. Participación directa en los trabajos de inyección. Para cumplir con este objetivo se ha participado como Supervisor de Aseguramiento de Calidad en los proyectos de:

Presa de relaves – Cerro Corona, Cajamarca

Presa de agua Pallca – Central Hidroeléctrica Huanza, Lima
Presa de agua Chuspiri – Las Bambas, Apurímac
Presa de relaves Linga – Cerro Verde, Arequipa
Sistema colector de filtraciones – Cerro Verde, Arequipa

Como resultado de ello, se obtuvieron conocimientos y criterios de construcción de la cortina de impermeabilización en las fundaciones de presas.

- iv. Discusión de los resultados obtenidos, antes y durante la inyección mediante la elaboración de cuadros y gráficos estadísticos.

1.5 HISTORIA Y PRINCIPIOS DE LA INYECCIÓN

1.5.1 HISTORIA DE LA INYECCIÓN

Las técnicas y métodos de inyección como procedimiento de construcción son poco reconocidos por los ingenieros. Estas técnicas no son muy antiguas ya que sus comienzos se fijan en Francia a principios del siglo XX.

Su inventor fue el ingeniero francés *Charles Bérigny* en 1802. Él inyectó con éxito morteros de cemento, eventualmente asociados con puzolanas, para la reparación de compuertas en varios puertos de Francia, y para la construcción de la compuerta desrripiadora en el puerto Dieppe. Como sucede a todos los precursores, le fue difícil que ingenieros conservadores admitieran esta técnica revolucionaria. Solamente le secundaron algunos ingenieros como *Thomas Hawksley* en 1876, quien utilizó las inyecciones de cemento para sellar grietas en rocas.

Con el transcurso del tiempo se fueron perfeccionando los métodos de inyección y los morteros utilizados, pero el mayor impulso en los trabajos de las inyecciones data de 1920 – 1930, época en que la construcción de ferrocarriles dio paso a la de obras hidráulicas y la inyección se transformó esencial para la construcción de presas, haciendo posible controlar las filtraciones de agua por debajo de las cimentaciones de presas.

Maurice Lugeon en los años 1933 supo utilizar un procedimiento capaz de mejorar las estructuras de los macizos rocosos. Su conocimiento en suelos permitió establecer ciertas reglas, lógicas y flexibles a la vez, que todavía siguen utilizándose hasta el momento (pruebas de obturación Lugeon). El geólogo M. Lugeon evitó hacer intervenir consideraciones matemáticas discutibles con el fin de no confiar más que en el resultado de los ensayos. Dicho de otro modo, él consideró los trabajos de inyección como un arte.

Un gran avance fue la aparición de los trabajos de *Armand Mayer* en 1938, con los trabajos de inyección con morteros de arcilla tratada, superando a los morteros de arcilla de C. Bérigny. En 1964 *Henry Cambefort* publica su obra 'Injecction des sols', una nueva contribución muy importante a la técnica de las obras públicas, indicándonos por qué medios se puede remediar la naturaleza de los terrenos cuando estos no presentan las características que permitan, sin riesgo, la edificación de las obras.

Lombardi & Deere en 1993, revolucionan la técnica con el nuevo método de inyección, llamado el método GIN (Grouting Intensity Number). Este método ha sido desarrollado producto de la información ganada por los estudios de laboratorio de la cohesión (resistencia a la fluencia), y la viscosidad dinámica de diferentes mezclas de inyectado, por medio de estudios teóricos de flujo y penetración de lechada, y por el monitoreo de campo de presiones de inyectado y absorciones (tomas).

1.5.2 PRINCIPIOS DE LA INYECCIÓN

a. *Reología de la lechada*

A diferencia de los fluidos Newtonianos, tales como agua o aceite, en donde el comportamiento reológico puede caracterizarse únicamente por el parámetro de viscosidad, una lechada de inyectado se comporta como un fluido Binghamiano durante el flujo, donde el comportamiento reológico se caracteriza por los parámetros de viscosidad y cohesión (resistencia a la fluencia); en la Figura N°1.1 se puede apreciar el comportamiento reológico de la lechada de cemento.

Mientras que ambos son parámetros de resistencia al flujo, la viscosidad gobierna la velocidad del flujo y la cohesión gobierna la distancia máxima de penetración (para un presión de inyectado aplicada dada y una apertura dada de la fisura de roca).

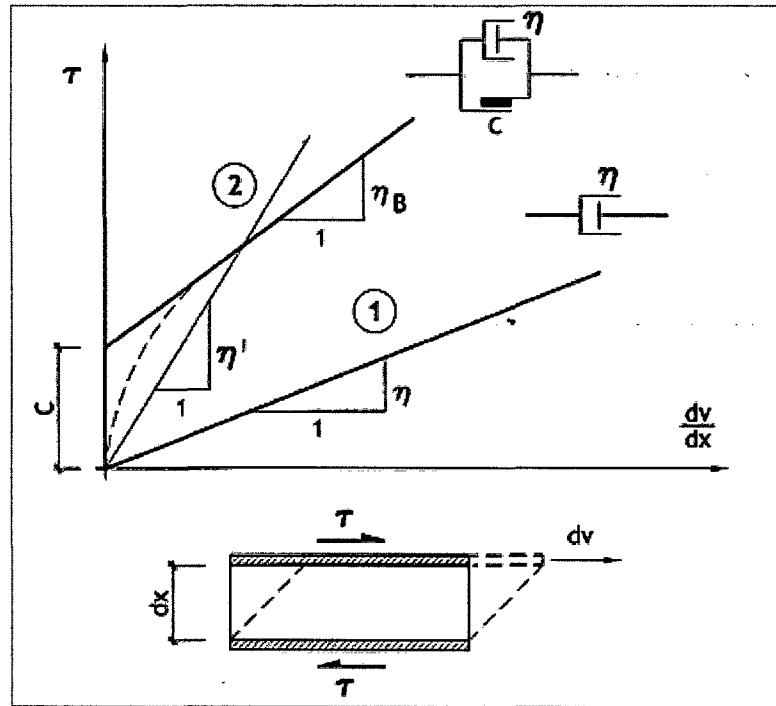


Figura N°1.1 Reología de la lechada de cemento vs agua (Lombardi, 2002)

① Fluido Newtoniano $\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx}$

② Fluido Binghamiano $\tau = c + \eta_B \cdot \frac{dv}{dx}$

Donde:

η : Viscosidad dinámica

η_B : Viscosidad plástica

η' : Viscosidad aparente

c: Cohesión

τ : Esfuerzo cortante

b. Comportamiento del flujo de la lechada en roca fracturada

El comportamiento de la lechada está condicionada inicialmente por el tipo de lechada: estable, delgada o acuosa.

Las lechadas estables son aquellas que se comportan durante el flujo como un fluido de Bingham visco-plástico que posee viscosidad y cohesión; además son aquellas que tienen en 2 horas una decantación menor al 5% (ensayo realizado en la probeta graduada de 1000 ml). El componente de viscosidad determina la velocidad con la que una inyección viaja a partir de un taladro de inyección bajo una presión aplicada y una abertura determinada de las fisuras. Sin embargo, la cohesión es la que determina la distancia final de penetración. La distancia recorrida es siempre finita. Por ello decimos que la cohesión de la mezcla tiene como función limitar la extensión de la zona inyectada, y la viscosidad va a influenciar en el tiempo necesario para finalizar la inyección.

Por otro lado, las lechadas delgadas o acuosas, son suspensiones inestables de partículas de cemento en agua y por lo tanto tienen un comportamiento errático de sedimentaciones durante el escurrimiento, por lo que este comportamiento es imposible de interpretar con las ecuaciones de flujo de Bingham o cualquier otra.

c. Penetración de la lechada

El proceso de la penetración de la lechada de cemento a presión en las fisuras de la roca depende de varios factores: geometría de las paredes de la fractura, conexiones entre fisuras, lechada, etc.

La aproximación más realista es considerar a la lechada como un fluido visco-plástico; Lombardi y Deere desarrollaron las ecuaciones que permitieron computar el radio máximo de penetración (R_{max}) en metros, el volumen máximo de mezcla (V_{max}) y la fuerza de sub-presión total (F_{max}), desarrollando un modelo de fluido escurriendo en una fractura (Figura N°1.2), llegando a las siguientes expresiones:

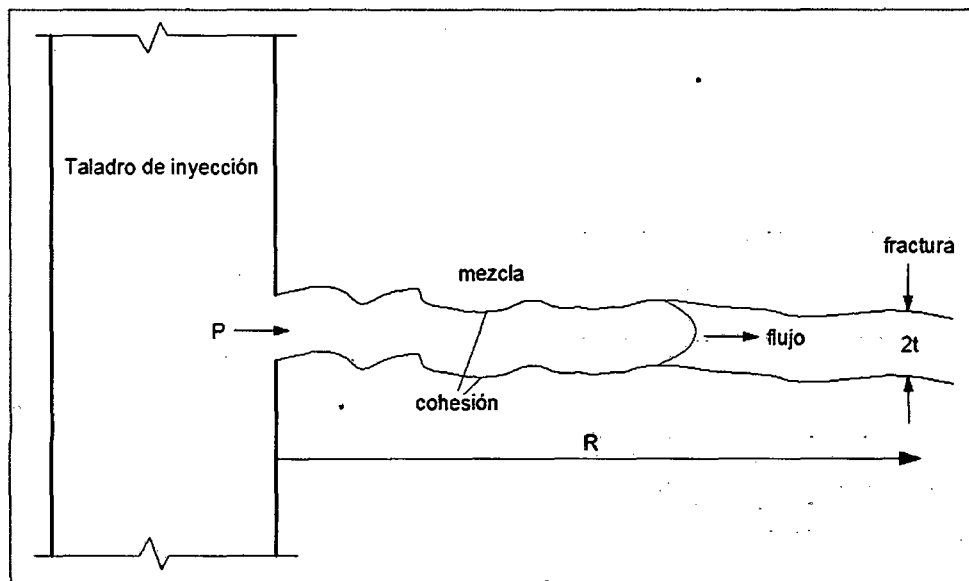


Figura N°1.2 Modelo de fluido escurriendo en una fractura

$$R_{\max} = p_{\max} \cdot \frac{t}{c}$$

$$V_{\max} = 2\pi \cdot p_{\max}^2 \cdot \frac{t^3}{c^2}$$

$$F_{\max} = \pi \cdot p_{\max}^3 \cdot \frac{t^2}{3c^2}$$

Donde:

2t: Abertura de fractura (m)

p_{\max} : Presión final máxima alcanzada (kPa)

c: Cohesión de lechada (kPa)

R_{\max} : Radio máximo (m)

V_{\max} : Volumen máximo de la mezcla (m³)

F_{\max} : Fuerza de la sub-presión total (kN)

Estas expresiones no tienen en cuenta la rugosidad de las fisuras, cambios de anchos, rellenos y erosiones, flujo turbulento en las cercanías del obstáculo y otros aspectos reales que conducen a los resultados obtenidos.

1.5.3 DEFINICIONES

a. Medios inyectables.- Los trabajos de inyección tienen por objetivo impermeabilizar o consolidar los cuerpos sólidos porosos y permeables, tales como rocas fisuradas, arenas y gravas o aluviones. Para alcanzar estos resultados se inyecta a través de las perforaciones un mortero de inyección o mezcla a una presión dada.

b. Rocas kársticas.- Las cavidades de solución, conocidas 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 a su consumo de lechada de cemento ya que podrían afectar la economía del proyecto e inclusive las inyecciones podrían no ser el método más prudente.

c. Inyección en patrón de costura.- Son inyecciones distribuidas en áreas de fallas, zonas de cizallamiento, juntas abiertas u. otras discontinuidades, mediante un patrón de agujeros diseñados para interceptar y cruzar dicha zona a diferentes profundidades seleccionadas.

d. Rechazo.- Rechazo es la no aceptación de una mezcla de lechada especificada a la presión de inyección máxima permitida; por ejemplo: la reducción del flujo de inyección a menos de 0.5 litros por minuto en mediciones consecutivas de 5 minutos a la máxima presión de inyección permisible, o la inyección de más de 100 bolsas de cemento (peso seco de cada bolsa igual a 45 kg).

e. Toma.- Es la cantidad de lechada de cemento inyectado en un tramo, esta expresado en kilogramo por metro lineal (kg/m).

- f. Etapa.-** Una etapa es un segmento o sección de una cortina de inyección de lechada de cemento a lo largo de la superficie del terreno, de no más de 45 metros de largo, que es inyectada desde una sola ubicación del agitador y bomba de inyección o desde la planta portátil de inyección de lechada de cemento.
- g. Tramo.-** Un tramo es un intervalo o segmento de una perforación inyectada, ya sea preseleccionada o seleccionada en base a la condición encontrada en la perforación, que es aislada para fines de pruebas de agua y/o inyecciones.
- h. Criterios de cierre.-** Los criterios de cierre están basados en la reducción de toma de lechada de cemento; por ejemplo, se obtendrán los criterios de cierre reduciendo la toma de lechada de cemento a 25 kg/m a la máxima presión de inyección permisible en la ubicación de la inyección de lechada de cemento (tramo).

CAPÍTULO II

INVESTIGACIÓN DEL TERRENO Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Antes de realizar el diseño de inyecciones para un proyecto nuevo es aconsejable realizar una apropiada investigación de la fundación, dicha investigación debe ser capaz de proporcionar una reducción de la incertidumbre presente en todos los trabajos de inyección, información para decidir si es viable la inyección, el tipo de lechada, el método de inyección a utilizar y la información para preparar proyectos más eficientes. Las investigaciones pueden ser muy caras, por eso algunos diseñadores prefieren una política de poca o casi ninguna investigación para realizar un diseño (en este caso los diseños se realizan en base a consideraciones y similitudes a otros proyectos), pero esto puede llegar a costar más a largo plazo, porque se puede encontrar fallas en el proceso de la inyección, conllevando a tomas de lechada excesivas y generando adicionales de los contratistas. Por ello en este capítulo se resaltarán las consideraciones e investigaciones más importantes necesarias para realizar un diseño de inyección.

2.1 INVESTIGACIONES GEOLÓGICAS

El diseño del programa de inyecciones se basa en el conocimiento del subsuelo obtenido en la etapa exploratoria y en las etapas previas de ejecución de las obras; por ende el reconocimiento geológico debe incluir la geología general de la zona con sus características tectónicas, planos de discontinuidades, buzamientos, zona de rocas muy alteradas (poca resistencia), etc.

Para obtener la información del macizo rocoso mencionada anteriormente se realizan sondeos de investigación con recuperación de testigos (perforación con diamantina). Los aspectos generales a tener en cuenta en el estudio geológico son los siguientes:

- a. Separación entre juntas abiertas.-** La separación de las fisuras y/o juntas son características de gran interés, ya que si las fisuras están muy separadas la inyección de la lechada de cemento será más fácil, a diferencia de las fisuras poco espaciadas (rocas muy fracturadas); la inyección en las rocas muy fracturadas puede tener problemas de fugas superficiales, colapsos de

los taladros, etc. Esto hace que la inyección sea más cara y posiblemente requiera de tratamientos especiales.

- b. Abertura de las fisuras.-** Las fisuras que se encuentran en el rango de abertura de 0.50mm a 6mm son fáciles de inyectar, y las fisuras mayores a 6mm son más difícil para inyectar debido a que la lechada viaja con mayor rapidez y pueden producirse tomas excesivas, debiéndose tomar medidas adecuadas para controlarla.
- c. Inclinación y buzamiento de las fisuras o discontinuidades.-** Cuando la inclinación de las fisuras se encuentra entre 0° y 60°, las perforaciones verticales interceptan bien todas las fisuras inclinadas; sin embargo, las fisuras o discontinuidades que tienen un fuerte buzamiento normalmente requieren el uso de perforaciones inclinadas para intersectar las discontinuidades en una zona razonable.
- d. Solidez del macizo rocoso.-** La solidez del macizo rocoso se puede ver en las perforaciones, si esta es buena las perforaciones se mantendrán estables sin derrumbe; en cambio en un macizo rocoso blando o fracturado, ocurrirá derrumbe en las perforaciones ocasionando en algunos casos atrapamientos de las barras de perforación. La inyección se hace más dificultosa y cara en este último caso.
- e. Presencia de rocas ígneas intrusivas y metamórficas.-** En los granitos en general se tienen familias de discontinuidades en tres direcciones, en estos la toma de las inyecciones dependerá de la abertura y continuidad de las mismas. Algunas rocas metamórficas como el gneis se comportan como el granito. En los esquistos y pizarras la toma depende de la presencia y características de las discontinuidades asociadas, que son muy variables.
- f. Presencia de rocas ígneas volcánicas o extrusivas.-** Una de las posibles características de este tipo de rocas es la estructura columnar típica en los basaltos. Otros tipos son la piedra pómez, y los piroclásticos como aglomerados y tufos. Las permeabilidades suelen ser altas por las cavidades presentadas, no obstante en algunos casos estos están rellenas lo que da

como resultado una permeabilidad baja. Por ello se debe evaluar individualmente para determinar la necesidad y efectividad de las inyecciones.

- g. Presencia de rocas solubles y kársticas.-** El alto grado de solubilidad de las rocas puede causar una alta permeabilidad y puede conducir a una estructura del tipo kárstico. Las calizas y dolomitas son los más comunes, estas se encuentran con valores de permeabilidad variables y generalmente poseen de dos a tres familias de discontinuidades. La anhidrita y el yeso son rocas débiles y solubles en el agua, tienen una variada gama de cavidades y discontinuidades. La presencia de la halita en el proyecto puede generar graves problemas como asentamiento y solubilidad con el agua subterránea, debido a que esta roca es débil y altamente soluble en agua.

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 lechada de cemento ya que podrían afectar la economía del proyecto e inclusive las inyecciones podrían no ser el método más prudente.

- h. Programa de investigación geológica.-** La ejecución de un buen programa de investigación geológica ayuda a economizar costos y tiempo para el proyecto, además la investigación del sitio debe ser lo más cuidadosa posible.

La exploración debe comenzar con el mapeo geológico regional para obtener información detallada de la zona. La formación geológica local es importante, como el sitio de la presa; se debe prestar atención no solo a la presa en sí, sino también a los estribos y la cuenca de almacenamiento para garantizar la capacidad de retención de agua (controlar las filtraciones).

Los estudios de fotografías aéreas (fotointerpretación), revelan la geología regional, mostrando reservorios de agua, y la estructura geológica, así como pueden detectar las fallas mayores.

Posteriormente se debe realizar un mapeo geológico local, el cual se debe trabajar a escala en campo y a lo largo del eje de la presa; es recomendable

explorar 10m a cada lado del eje de la presa. Este programa de exploración sirve para identificar zonas potenciales de fugas, ubicación de las fallas, orientación, buzamiento, contacto, etc. resultando en una interpretación más detallada.

De acuerdo al presupuesto del proyecto se recomienda realizar la investigación geofísica mediante los métodos de refracción sísmica y resistividad eléctrica, que son los más comunes, y determinan los tipos de suelos, profundidad de la roca y la posición de la napa freática.

El programa y tipo de perforaciones dependerá de la obra y la geología del emplazamiento, y de cada perforación se buscará extraer la mayor cantidad de información posible que sea pertinente para el proyecto.

2.2 INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS

Las investigaciones geotécnicas, realizadas mediante sondeos de recuperación de testigos, y la toma de datos de los niveles de agua, tienen como fin determinar las características del macizo rocoso.

2.2.1 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA

El macizo rocoso es un medio discontinuo, complejo, con un comportamiento geomecánico que puede ser estudiado y clasificado en función de su aptitud para distintas aplicaciones. Las clasificaciones geomecánicas aportan índices de calidad relacionados con parámetros geomecánicos del macizo, permitiendo describir numéricamente la calidad del mismo.

- a. **Índice de calidad de la roca (RQD).**- En 1967, Deere propuso un índice cuantitativo de la calidad de la roca basado en la recuperación de los núcleos con perforación diamantina, llamado índice de calidad de la roca (Rock Quality Designation), el cual se identifica por RQD (Cuadro N° 2.1), y se define como el porcentaje representativo de la sumatoria de longitudes de tramos de núcleos de barrenos de diamante que se recuperan en longitudes enteras \geq a 100 mm, dividida entre la longitud total barrenada.

$$RQD (\%) = \frac{\sum(\text{longitud de fragmentos} \geq 100\text{mm})}{\text{longitud total perforada}} \times 100\%$$

El diámetro de testigo tiene que ser igual o superior a 57.4 mm y tiene que ser perforado con un doble tubo de extracción de testigo.

Longitud de testigo recuperado (cm)		Recuperación modificada (cm)
25		25
5		
5		
8		
10		10
12		12
8		
10		10
15		15
10		
5		
15		15
128		Longitud Total 150 cm
Recuperación = 128/150 = 85 %		R Q D = 87/150 = 58 %

Figura N°2.1 Cálculo del RQD.

Cuadro N°2.1

Clasificación de la calidad del macizo rocoso según RQD

RQD (%)	CALIDAD
< 25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Media
75 - 90	Buena
90 - 100	Muy buena

b. Clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR).- El sistema de clasificación geomecánica (RMR_{89}) es independiente de la estructura a construir y se obtiene sumando los porcentajes o 'ratings' de cinco parámetros cuyas valoraciones máximas según Bieniawski (1989) son:

- *Resistencia compresiva uniaxial de la matriz rocosa:* se obtiene realizando ensayos de resistencia compresiva de la roca, como son el ensayo de compresión simple, o ensayos equivalentes como el ensayo de carga puntual (Point Load Index). La valoración máxima de este parámetro es 15.
- *Grado de fracturación del macizo (RQD):* tiene una valoración máxima de 20, y se obtiene mediante la evaluación de los sondeos de recuperación de diamantina.
- *Espaciado de las discontinuidades:* el parámetro considerado es la separación entre diaclasas expresado en metros, tiene una valoración máxima de 20.
- *Estado de las discontinuidades:* es el parámetro con mayor valoración, máxima de 30; el estado de las diaclasas también es evaluado mediante otros cinco sub-parámetros: abertura, persistencia, rugosidad, relleno y meteorización.
- *Condiciones hidrogeológicas:* se analiza con tres criterios de valoración; caudal, presión de agua y humedad. Tiene una valoración máxima de 15.

El RMR se obtiene de la suma total de los cinco parámetros enumerados anteriormente (ver cuadro N°2.2). Este valor se corrige con un factor de ajuste, que está en función de la orientación de las diaclasas, definido cualitativamente y que tiene valores distintos según se aplique a túneles, cimentaciones o taludes. El valor de RMR oscila entre 0 y 100, y es mayor cuanto mejor es la calidad de la roca, ver cuadro N°2.3.

Cuadro N°2.2

Parámetros del Sistema de Clasificación RMR (Bieniawski, 1989)

A. PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN								
1	Resistencia de la roca intacta (Mpa)	Ensayo de Carga Puntual	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Compresión Simple (Mpa)	
		Ensayo de Compresión Simple	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5
	Valoración		15	12	7	4	2	1
2	RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25	
	Valoración		20	17	13	8	3	
3	Espaciamiento de las discontinuidades		> 2.0 m	0.6 - 2.0 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm	
	Valoración		20	15	10	8	5	
4	Estado de las discontinuidades (ver B)		Muy rugosas, discontinuas, sin separaciones, pared de roca inalterada.	Ligeramente rugosas, aberturas < 1mm y pared ligeramente alterada.	Ligeramente rugosas, aberturas < 1mm y pared altamente alterada.	Superficies de falla o rellenos < 5 mm o aberturas 1-5 mm, continuas.	Relleno blando > 5 mm o abertura > 5 mm, continua.	
	Valoración		30	25	20	10	0	
5	Agua subterránea	Flujo por 10m de long. de tunel (lt/min)	Nulo	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125	
		(presión de agua en la Junta)/ (Esfuerzo principal mayor)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	
		Condición general	Seco	Ligeramente Húmedo	Húmedo	Goteo	Flujo	
	Valoración		15	10	7	4	0	
B. PAUTAS PARA LA CLASIFICACIÓN DEL ESTADO DE DISCONTINUIDADES								
Longitud de discontinuidades (persistencia)			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m	
Valoración			6	4	2	1	0	
Separación (abertura)			Nulo	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm	
Valoración			6	5	4	1	0	
Rugosidad			Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Liso	Muy liso	
Valoración			6	5	3	1	0	
Relleno			Nulo	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno suave < 5mm	Relleno suave > 5mm	
Valoración			6	4	2	2	0	
Meteorización			Nulo	Ligeramente meteorizada	Moderada meteorización	Altamente meteorizada	Descompuesto	
Valoración			6	5	3	1	0	
C. ORIENTACIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES RESPECTO A LA EXCAVACIÓN								
Dirección y buzamiento			Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable	
Valoración	Túneles y Minas		0	-2	-5	-10	-12	
	Fundaciones		0	-2	-7	-15	-25	
	Taludes		0	-5	-25	-50	-60	

Cuadro N°2.3

Clasificación RMR del macizo rocoso

CLASE	CALIDAD DE LA ROCA	RMR
I	Muy buena	81 - 100
II	Buena	61 - 80
III	regular	41 - 60
IV	Mala	21 - 40
V	Muy mala	< 20

c. Clasificación de Barton (Q).- Se hace una valoración de la calidad del macizo rocoso mediante el índice Q a partir de valores de diferentes parámetros.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Donde:

RQD: Índice de calidad de roca

J_n : número de familias

J_r : coeficiente de rugosidad de la junta

J_a : coeficiente de alteración de la junta

J_w : coeficiente reductor por la presencia de agua

SRF: factor reductor por tensiones en el macizo rocoso

J_n , J_r y J_a se aplican a las juntas estructurales más desfavorables.

Correlación entre la clasificación de Bieniawski (RMR) y Barton (Q)

$$RMR = 9 \ln Q + 44$$

Bieniawski (1976)

2.2.2 PROPIEDADES DE LA ROCA

Para el desarrollo del modelo geotécnico, es necesario determinar los parámetros geotécnicos del macizo rocoso que son:

- a. Porosidad.**- La porosidad (n) de un material representa un porcentaje que relaciona el volumen que ocupan los poros en un volumen unitario de la roca. En las rocas sedimentarias la porosidad pueden oscilar entre 0% a 90% y disminuye con la profundidad dependiendo del material cementante. En rocas ígneas y metamórficas la porosidad es menor al 2%, y aumenta con la meteorización (desgaste) hasta un 20% o más. Las rocas ígneas extrusivas son las menos porosas.
- b. Densidad y peso específico.**- La densidad corresponde a la masa (el peso corresponde al peso específico) por unidad de volumen, pueden relacionarse con la mineralogía y constitución de los granos que forman la roca. El rango de la variabilidad del peso específico de las rocas es mucho mayor que el de los suelos.

Cuadro N°2.4
Peso específico y porosidad típica (Goodman, 1989)

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

- c. **Velocidad de ondas sísmicas.**- Un método para determinar el grado de fisuración o meteorización de la roca utiliza la velocidad de ondas longitudinales (V_l) y ondas transversales o de corte (V_s)

Índice de calidad según Fourmaintraux (IQ %)

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

V_l^* : velocidad de ondas longitudinales en testigos cilíndricos

V_l : valor típico de velocidad de ondas longitudinales para roca sana

Cuadro N°2.5
Valores típicos de velocidad en rocas (Fourmaintraux, 1976)

Roca	V_l (m/s)
Gabro	7000
Basalto	6500 - 7000
Caliza	6000 - 6500
Dolomita	6500 - 7000
Arenisca y Cuarcita	6000
Roca Granítica	5500 - 6000

d. Resistencia a la compresión.- Parámetro geotécnico más citado, se determina directamente mediante ensayos de compresión no confinada en testigos cilíndricos, e indirectamente mediante el ensayo de carga puntual (figura N°2.2, que es realmente un ensayo de tracción). El ensayo se determina siguiendo las pautas de la norma ASTM D5731 y el ISRM, el índice de carga puntual está dado por:

$$I_s = \frac{P}{D^2}$$

Donde:

P: carga de la rotura

D: distancia entre las puntas de los conos

El valor obtenido se corrige de acuerdo al diámetro del testigo; para obtener $I_{s(50)}$ se utilizan probetas cilíndricas de 50mm, con una longitud al menos de 1.4 veces el diámetro. Una correlación entre la resistencia compresiva y el índice de carga puntual es: $\sigma_c = 24I_{s(50)}$

El cuadro N°2.6 presenta la resistencia a la compresión y densidades típicas de acuerdo al tipo de roca.

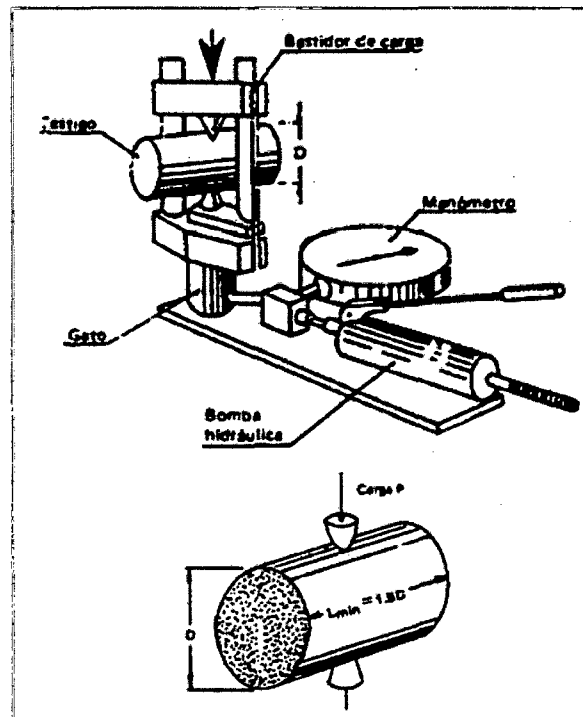


Figura N°2.2 Ensayo de carga puntual

Cuadro N° 2.6

Resistencia a la compresión típica (Goodman, 1989)

Tipo de roca	Resistencia a la compresión (Mpa)	Densidad (t/m ³)
Andesita	0.15 - 0.25	2.5 - 2.8
Arcilla	28 - 80	2.2 - 2.7
Arenisa	80 - 0.2	1.6 - 2.9
Basalto	0.2 - 0.4	2.7 - 2.8
Caliza	80 - 0.15	1.5 - 2.8
Conglomerado	0.14	2.0 - 2.7
Cuarcita	90 - 0.47	2.3 - 2.7
Dacita	120 - 500	2.5 - 2.7
Diabasa	0.16 - 0.24	2.8 - 3.1
Dolomía	36 - 0.56	2.2 - 2.9
Esquisto	10.8 - 0.23	2.7 - 2.9
Gabro	150 - 0.30	2.8 - 3.1
Gneis	0.15 - 0.30	2.5 - 2.8
Granito alterado	10.8 - 0.15	2.5 - 2.6
Granito sano	80 - 0.27	2.5 - 2.8
Grauvaca	0.20 - 0.25	2.6 - 2.7
Marga	3.50 - 0.19	2.6 - 2.7
Mármol	80 - 0.15	2.6 - 2.8
Micacita	20 - 65.3	2.4 - 3.2
Pizarra	0.20 - 0.25	2.7 - 2.8
Riolita	80 - 160	2.4 - 2.6
Traquita	0.33	2.7
Yeso	0.40 - 43	2.2 - 2.3

2.3 INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

La hidrogeología corresponde a la disciplina de la geología que investiga el agua del subsuelo, especialmente la subterránea. En alguna medida todos los proyectos de ingeniería están influenciados por el agua subsuperficial. A continuación se presenta una breve descripción de los principios involucrados y su influencia en el tratamiento de fundaciones e inyecciones.

- a. Porosidad y permeabilidad.-** En general todas las rocas poseen algún tipo de espacio de poros; no obstante para ser permeables las rocas deben tener un tamaño adecuado de fracturas para permitir el pasaje del agua. Por ejemplo, las areniscas son porosas y permeables, mientras que las lutitas suelen tener alta porosidad pero los poros están limitados a un tamaño capilar y el pasaje de agua a través de ellos es extremadamente lento. Por otro lado, si las discontinuidades permiten el pasaje de agua, esta realmente circula por ellas y no atraviesa el interior de la roca intacta.

- b. Agua freática o subterránea.-** Es la zona de saturación limitada por el nivel freático. Su profundidad y espesor varían ampliamente y pueden encontrarse en zonas continuas o en estratos diferentes. Se debe tener en cuenta que el agua está presente en el subsuelo, a veces en estado estacionario y otras en movimiento, y los estratos que contienen agua se denominan acuíferos. En función a su ubicación y la presión hidrostática, los acuíferos reciben distintos nombres y existen dos tipos: los confinados (están a mayor presión que la atmosférica), y los no-confinados (la superficie de agua está a presión atmosférica).
- c. Vertientes o afloramiento de aguas.-** es la emersión del agua a la superficie; el camino recorrido por el agua y el caudal depende de la permeabilidad y la estructura del material que el agua recorre. Algunos son influidos por las fuerzas gravitacionales y otros están bajo presión. A fin de conocer las características hidráulicas de las fuentes de agua, se realiza una evaluación estadística del caudal de agua, graficando una curva caudal vs tiempo, y nivel de agua vs tiempo.
- d. Calidad de agua.-** La calidad del agua freática depende del carácter mineralógico de la roca y de su solubilidad. El agua puede contener algunos tipos de ácidos que pueden provocar ataques contra la lechada de las inyecciones. Por ello es importante realizar ensayo físico – químicos, para evaluar la calidad del agua freática y del agua que se va a utilizar en la inyección, estos ensayos dan como resultado parámetros como: conductividad específica, alcalinidad, sólidos totales disueltos, potencial de hidrógeno, carbonatos, hidróxidos, sulfatos, nitratos, fierro y sílice.

Las inyecciones deben ser diseñadas teniendo en cuenta todas las consideraciones mencionadas anteriormente, las condiciones de agua freática durante la construcción como para el servicio de la obra, la permeabilidad del macizo rocoso, la profundidad del nivel freático, la calidad de agua, y el tipo de acuífero presente; todos estos factores se considerarán para definir las variables del proyecto y la ejecución de las inyecciones.

2.4 ESTUDIO DE PERMEABILIDAD

El buen conocimiento de la permeabilidad de las fundaciones es esencial cuando el propósito de las inyecciones es el control de las filtraciones. Estos datos de permeabilidad son muy útiles en los trabajos de inyección, realizando pruebas de agua simples (ensayos rápidos) antes o después de la inyección, para evaluar su efectividad.

La permeabilidad de un sitio debe ser descrito en términos de la cantidad de filtraciones que pasan a través de este, relacionado directamente a la presión, que varía con la profundidad, el efecto de las aguas subterráneas, la longitud y la anchura de las rutas de filtración. Las pruebas estándar de medición de la permeabilidad que más se usan en las perforaciones en roca, son los llamados ensayos Lugeon.

2.4.1 ENSAYO LUGEON

El ensayo Lugeon consiste en anotar los caudales absorbidos por el macizo rocoso, a presiones crecientes y después decrecientes, medidas en el manómetro. Siempre se utilizan cinco valores de presión en el siguiente orden: A-B-C-B-A.

Para cada una de las presiones del ciclo de prueba se espera la estabilización del flujo hasta que llegue a un valor constante, valor que se mantendrá por 10 minutos, antes de pasar al otro valor de presión establecido en el ciclo, y se reportan los siguientes datos: profundidad del tramo de prueba, diámetro de la perforación y de la tubería, presiones en el manómetro y los correspondientes caudales constantes.

El ensayo es medido en Unidades Lugeon, y se expresa de la siguiente manera:
1 UL = 1 litro/m/minuto a una presión de 10 bares, que se interpreta como un litro de agua absorbida por metro de longitud de prueba, por minuto, a una presión de 10 bares de presión manométrica. Este ensayo se realiza generalmente en tramos de 5m de longitud, durante el avance de los trabajos de perforaciones usando un solo obturador (packer), o en retroceso después de haber terminado la perforación del sondeo, usando para el efecto doble obturador, ver figura N°2.3.

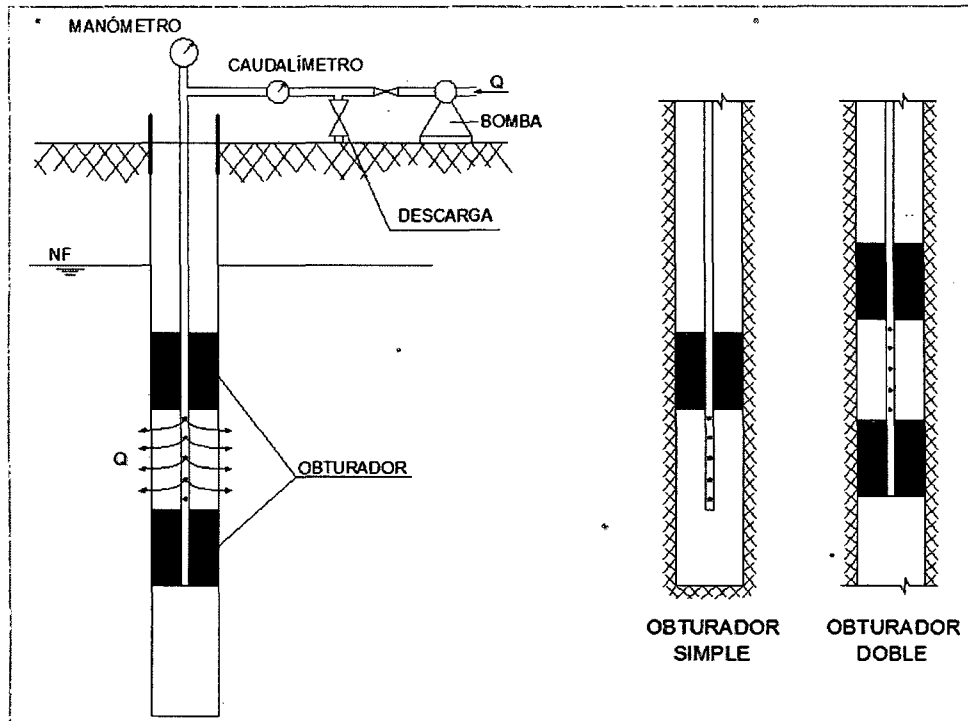


Figura N°2.3 Esquema del ensayo Lugeon

Para el cálculo de la unidad Lugeon a partir de los resultados de las pruebas, se utiliza la siguiente fórmula:

$$UL = \frac{Q \left(\frac{Lts}{min} \right)}{L(m)} \times \frac{10 (bar)}{Presión actual (bar)}$$

Se ha intentado también una correlación confiable entre las unidades Lugeon con el coeficiente de permeabilidad k de Darcy, aunque ello depende del tipo de roca (blanda o dura) y su deformabilidad, así como de la presencia de fracturas y su densidad, y de la presión manométrica del ensayo que distorsiona aún más la equivalencia entre ambas para sus valores más altos (de 5 a 10 bares). Por lo tanto el valor más razonable encontrado por los investigadores es el de aproximadamente: $1 UL = 1.3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$.

2.4.1.1 TIPOS DE FLUJO

Una vez realizadas las cinco pruebas del ensayo con las presiones mencionadas anteriormente A-B-C-B-A, se procede a realizar el procesamiento de información y el análisis correspondiente para determinar el tipo de flujo. Los tipos de flujos son:

a. Flujo laminar.- El flujo laminar es representado gráficamente en el cuadro N° 2.7 de la fila LAMINAR, donde los incrementos de presión están representados como barras rayadas. Se puede observar que en la tercera corrida la presión alcanza un máximo y luego se reduce en un patrón simétrico. Las barras oscuras representan los valores Lugeon calculados para cada presión. Se puede observar que los valores Lugeon son casi los mismos para cada una de las presiones, esto se debe a que representa a un flujo laminar (este tipo de flujo puede ser indicativo de que la roca es sana).

Cuando el flujo es laminar, cualquiera de estos cinco valores puede ser aceptado como el resultado de la prueba o también se puede utilizar como el promedio de ellos, este último se utiliza con más frecuencia.

b. Flujo turbulento.- El flujo turbulento es representado gráficamente en el cuadro N°2.7 de la fila TURBULENTO, se puede observar que los valores Lugeon para las cinco presiones de pruebas estas distribuidos simétricamente y además el valor mínimo corresponde a la presión más alta (tercera corrida), lo cual indica que es un flujo turbulento; usualmente ocurre debido a un flujo rápido en grietas más anchas.

Cuando el flujo es turbulento, el valor más bajo (mínimo) debe ser reportado como el resultado de la prueba.

c. Flujo de dilatación.- El flujo de dilatación es representado gráficamente en el cuadro N°2.7 de la fila DILATACIÓN; se puede observar que los valores Lugeon varían proporcionalmente a las presiones de agua. El valor máximo de Lugeon se observa en la tercera corrida, indicativo que el tipo de flujo es de dilatación (la presión ha sido suficiente para dilatar localmente las grietas mediante la compresión).

- Quando el flujo es de dilatación, el valor más bajo (mínimo) debe ser reportado como el resultado de la prueba.
- d. Lavado.-** En el cuadro N°2.7 de la fila EROSIÓN, se observa que los valores Lugeon aumentan mientras las pruebas se ejecutan. Los valores Lugeon no disminuyen cuando las presiones lo hacen, esto indica el lavado permanente de los materiales rellenos en las fisuras o discontinuidades. Estas características indican que las presiones de prueba son muy altas y el valor de la última corrida debe ser reportada como el resultado de la prueba.
- e. Flujo de relleno.-** El flujo de relleno es representado gráficamente en el cuadro N°2.7 de la fila RELLENO, se observa que los valores Lugeon disminuyen a medida que avanza la prueba, indicando que los vacíos, fisuras, etc. están siendo llenadas y por lo tanto el agua no puede ingresar más.

Para tener un dato real se recomienda realizar el ensayo hasta que cese la tendencia, indicando que todos los espacios vacíos han sido llenados. Inclusive un procedimiento sería saturar la fundación antes de iniciar la prueba. El valor reportado debe ser el más bajo (última corrida), esto indica que la permeabilidad ocurre una vez llenado los espacios vacíos.

En el cuadro N°2.8, se observa el formato para el ensayo de permeabilidad tipo Lugeon. En la parte superior (fila 1) se registra los datos del proyecto, datos del taladro, fecha del ensayo, tramo del ensayo, etc. En la segunda fila se observa los datos ingresados como: altura del manómetro, profundidad del nivel freático, inclinación del taladro, etc. En la tercera fila se observa los datos de caudal y presión para los 5 estadios ensayados y también se observa la gráfica de la unidad Lugeon. En la parte inferior del formato (fila 4) se observa la curva de interpretación (p_{ef} vs Q) y cuando de observaciones y/o comentarios.

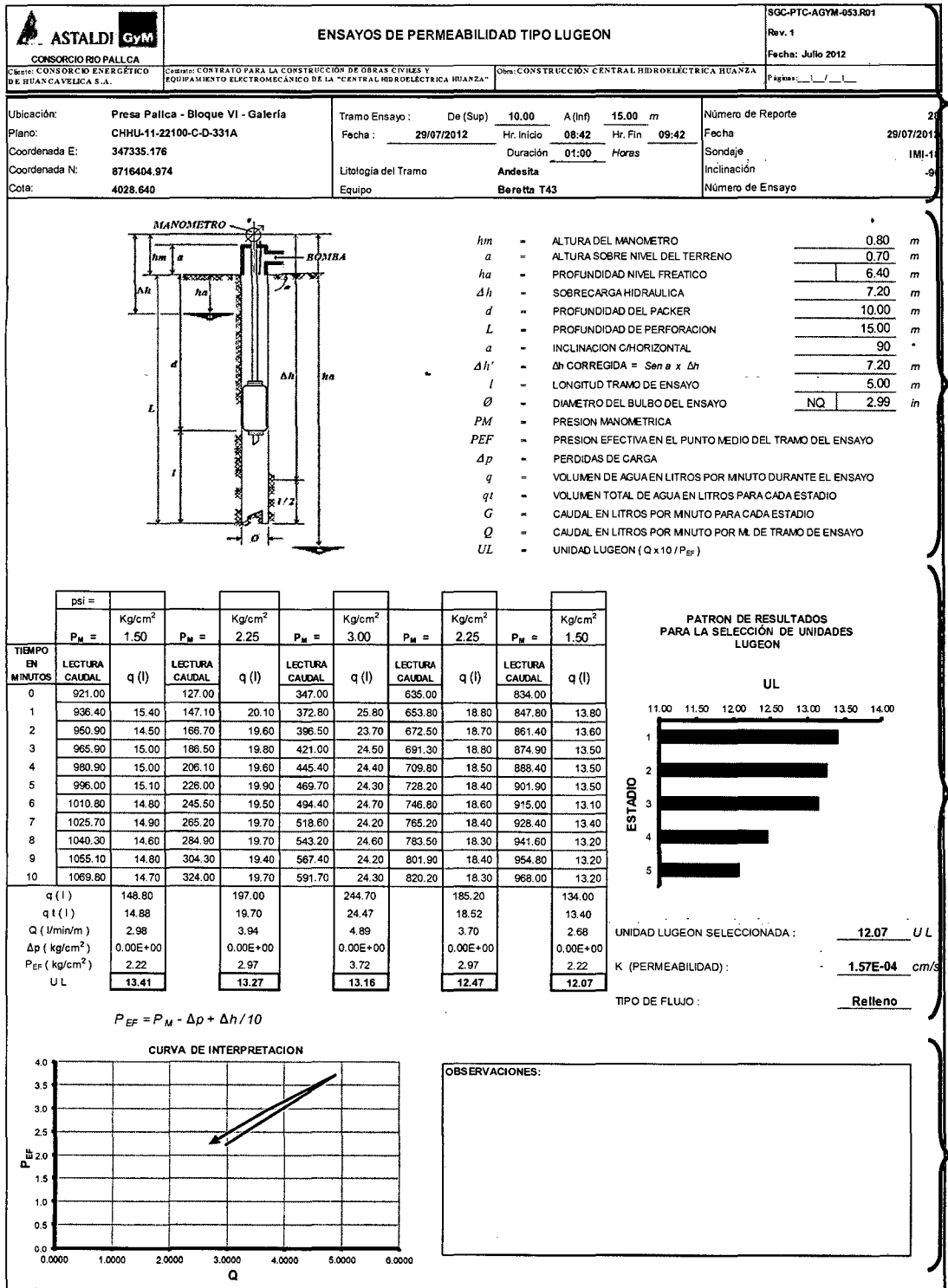
Cuadro N° 2.7
Patrones de resultados de prueba Lugeon para la obtención del valor Lugeon representativo (Houlsby, 1976)

TIPO DE FLUJO	PRESIONES DE PRUEBA	PATRONES LUGEON	INTERPRETACIÓN DE LOS PATRONES	VALOR A USAR COMO UNIDAD LUGEON
LAMINAR	1ra	1ra	Los 5 valores Lugeon son aproximadamente iguales.	Se usa el promedio de los 5 valores Lugeon.
	2da	2da		
	3ra	3ra		
	4ta	4ta		
	5ta	5ta		
TURBULENTO	1ra	1ra	Los valores Lugeon disminuyen a medida que aumenta la presión de agua. El valor Lugeon más bajo ocurre en la presión máxima.	Se usa el valor Lugeon para la presión máxima (3ra etapa).
	2da	2da		
	3ra	3ra		
	4ta	4ta		
	5ta	5ta		
DILATACIÓN	1ra	1ra	Los valores Lugeon varían proporcionalmente a las presiones de agua. El valor Lugeon máximo ocurre en la presión máxima.	Se usa los valores Lugeon para presiones mínimas o medias (1ra, 2da, 4ta y 5ta etapa).
	2da	2da		
	3ra	3ra		
	4ta	4ta		
	5ta	5ta		
EROSIÓN	1ra	1ra	Los valores Lugeon aumentan a medida que se realiza la prueba. Los rellenos de las discontinuidades se lavan progresivamente por el agua.	Se usa el Valor Lugeon más alto (5ta etapa).
	2da	2da		
	3ra	3ra		
	4ta	4ta		
	5ta	5ta		
RELLENO	1ra	1ra	Los valores Lugeon disminuyen a medida que se realiza la prueba.	Se usa el Valor Lugeon más bajo (5ta etapa).
	2da	2da		
	3ra	3ra		
	4ta	4ta		
	5ta	5ta		

Una vez elegido el valor Lugeon representativo, Houlsby (1976) recomienda clasificar el valor Lugeon de la siguiente manera:

VALOR LUGEON (UL)	CLASIFICACIÓN
0 - 1	Muy favorable
1 - 3	Favorable
3 - 10	Desfavorable
> 10	Muy desfavorable

Cuadro N° 2.8
Ensayo de permeabilidad tipo Lugeon en la presa Palca – Tramo de 10 a 15m



2.4.2 EVALUACIÓN DE LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

La evaluación de los ensayos de permeabilidad consiste en interpretar los datos de la prueba Lugeon, de una manera fácil y entendible. Para ello se usa como apoyo el análisis estadístico planteando todos los resultados de las pruebas realizadas en las perforaciones y además es fundamental la experiencia adquirida en los trabajos de inyecciones.

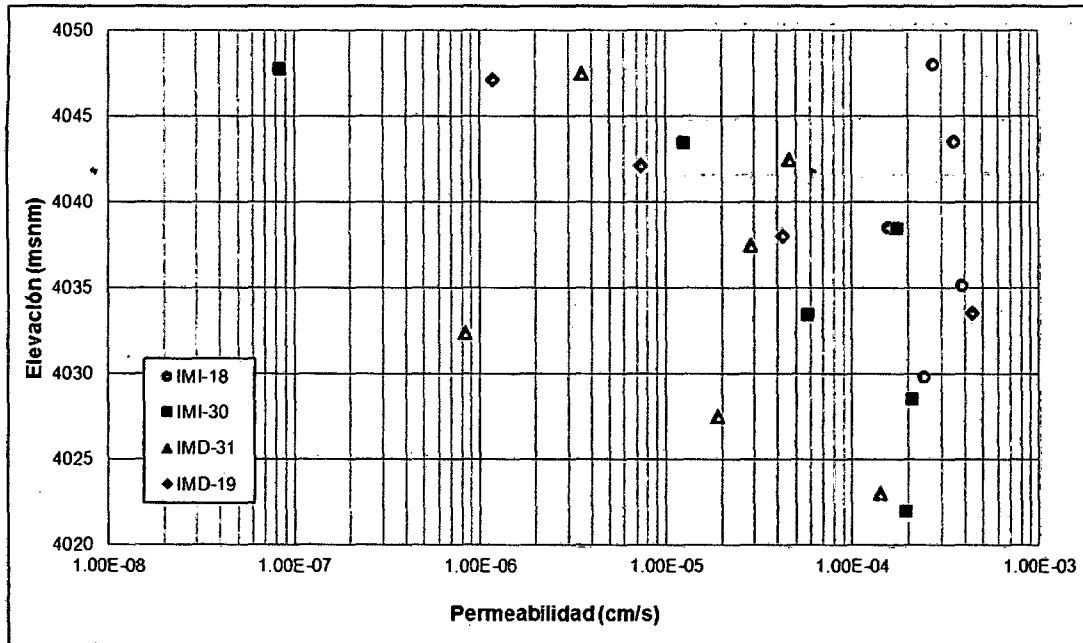


Figura N°2.4 Evaluación estadística de permeabilidad

En la figura N°2.4, se observa la evaluación estadística de permeabilidad de todas las perforaciones de prueba realizadas en la presa Pallca – Huanza, en la cual se aprecia que entre la cota 4020 a 4040 la fundación es permeable y para mayor detalle se puede apreciar que el taladro IMI-18 tiene mayor permeabilidad en toda la profundidad de la perforación, cuyo valor de permeabilidad está entre 1×10^{-4} cm/s y 1×10^{-3} cm/s.

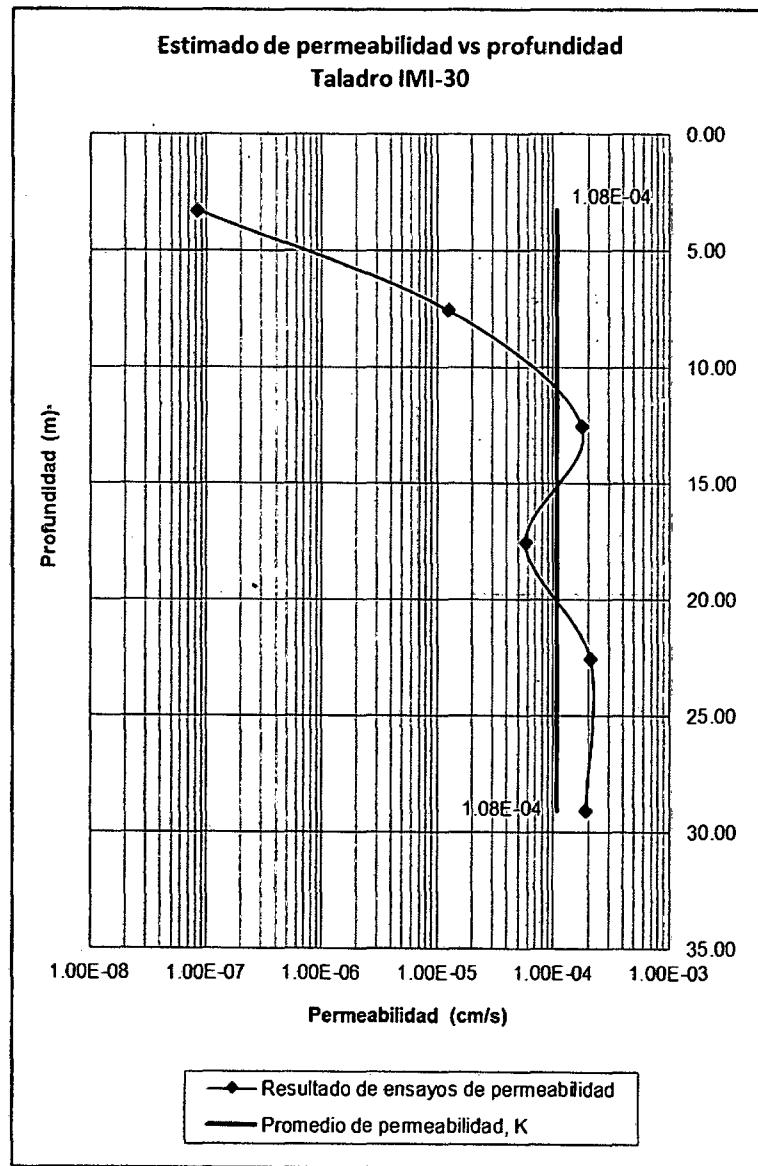


Figura N°2.5 Evaluación de permeabilidad del taladro IMI-30

A diferencia de la figura anterior, en la figura N°2.5 se muestra el análisis de un solo taladro (IMI-30); esta evaluación estadística consiste en un análisis minucioso e individual de cada perforación, en el cual se aprecia que el taladro IMI-30 tiene baja permeabilidad en el tramo de 0 a 10m de profundidad, pero la permeabilidad crece con la profundidad, en esta zona se ha identificado fracturas rellenas de material morrenico.

2.5 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE LA CORTINA DE INYECCIÓN

2.5.1 CONSIDERACIONES DE LOS TALADROS

El diseñador con experiencia deberá decidir el tipo de perforación, y el ángulo de inclinación de la perforación, luego de la inspección del sitio, si las fisuras son visibles en los afloramientos o la fundación está limpia (luego del retiro de material suelto o topsoil). Es decir se utilizará la información geológica para decidir la ubicación, diámetro, espaciamiento y profundidad de las perforaciones, como se describe con más detalle a continuación:

- a. **Ubicación.-** La ubicación del taladro se determinará por el tipo de obra a inyectar, las condiciones geológicas y el objetivo del tratamiento, estos factores influirán para la decisión en el diseño.
- b. **Diámetro.-** La selección del diámetro de la perforación dependerá del tipo de roca a perforar y de la profundidad e inclinación de la perforación. En el diseño generalmente se especifica el mínimo (por costo de perforación).

Una roca buena con fracturas espaciadas puede ser perforada con el menor diámetro (por ejemplo, perforación con la línea NQ 50 mm). Las perforaciones que requieren mayor diámetro son rocas de mala calidad, debido a que pueden tener tendencia a formar cavidades, existencia de fracturas rellenas con material no consolidado, problemas de derrumbe, etc. Al realizar perforaciones de mayor diámetro se permite una limpieza adecuada de éstas, debido a que se puede colocar tuberías de lavado a suficiente distancia de la pared para remover los detritos de la perforación sin generar atrapamiento de las tuberías.

- c. **Espaciamiento.-** El diseñador deberá tener criterio en el espaciamiento de los taladros de acuerdo a las investigaciones, debido a que la superficie de la cortina presentará pendientes (laderas) para las que se recomienda mantener una distribución horizontal constante. La distancia entre las perforaciones primarias no debe ser muy corta para evitar conexiones entre ellas y tampoco debe ser muy grande; lo que se busca es el espacio óptimo para seguir una

secuencia adecuada en los taladros de orden superior (según el criterio del diseñador con la experiencia adquirida). En la mayoría de obras de cortinas de impermeabilización se ha utilizado el espaciamiento de los taladros primarios de 6 m a 12 m (esto dependerá de la geología y permeabilidad del sitio).

Una práctica aconsejable es la perforación previa de sondajes primarios cada 4 con extracción de testigos y a una profundidad de $0.75H$ (carga hidráulica del embalse) lo que permitirá la caracterización del macizo en el plano de la cortina.

- d. Profundidad (D).**- Dependerá de la carga hidrostática que sufrirá la fundación a ser tratada. Debe ser lo suficientemente grande como para minimizar las filtraciones y fuerzas de subpresión a valores aceptables, en caso de ser posible se llegarán hasta un manto de roca relativamente impermeable.

Algunos autores proponen una regla general para el cálculo de las profundidades (criterios empíricos) en función a la carga de agua de la presa (H), tales como:

- U.S. Bureau of Reclamation (U.S.A)
 $D = H/3 + C$, donde $C = 8$ a 25 m, la elección del valor "C" dependerá de la geología de la fundación.
- ATLAS COPCO, 1999 (U.S.A)
 $D = 3H/4$
- The Indian Standard, 1993 (India)
 $D = 2H/3 + 8$
- Ewert, 2003
 $D = H$
- A.J.SCHLEISS,H. POUGATSCH; 2011 (Suiza)
 $D = 2H/3$

- Ridas, 2007 (Sueco)

H < 30 m	min: D = 10 m
	máx.: D = 20 m
H > 30 m	min: D = H/3
	máx.: D = 2H/3

Estos criterios empíricos no son una regla general a usar, porque el diseño de la profundidad de inyección dependerá del tipo de obra a realizar, de la geología de la zona, de la importancia de la fuga, entre muchos factores más que influyen directamente en el diseño. Para tomar todas estas consideraciones y criterios son importante las investigaciones mencionadas en este capítulo. En la figura N°2.6 se puede observar la variación de las profundidades de la cortina de inyección de acuerdo a cada metodología (criterios empíricos).

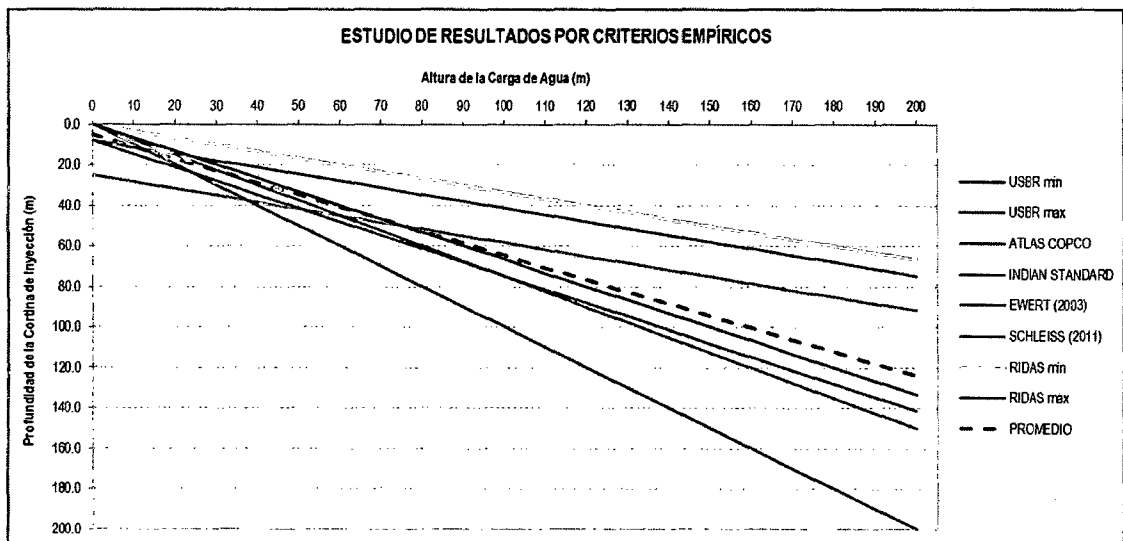


Figura N°2.6 Estudio de resultados por criterios empíricos

e. Dirección.- El objetivo de la inyección es cortar tantas grietas o discontinuidades como sea posible por lo que debe elegirse la dirección apropiada. Ésta también estará influenciada por las características de los equipos a usar y su esquema de trabajo. Las cortinas de impermeabilización de las presas dependerán del tipo de cierre elegido y en general se inclinan contra los estribos para la inyección del contacto estribo-cierre. Así, en las presas de gravedad las inyecciones suelen ser inclinadas hacia aguas arriba (para separarlas de las de drenaje), en las presas de enrocado o material

suelto suelen ser verticales en correspondencia con el núcleo impermeable de la presa.

f. Presión de inyección.- La presión de inyección está condicionada por la resistencia de la roca. Es el segundo factor que influye en la absorción de la lechada, por ello se debe tener presente las siguientes consideraciones: (1) Si se utiliza presiones muy altas, las lechadas viajan innecesariamente por las juntas, ocasionando hidrofracturamiento, lavado de los rellenos en fracturas, levantamiento en la fundación, por ende costos elevados. (2) Si se utiliza presiones muy bajas, la lechada de inyección no se llenará completamente en las fallas y fisuras y la cortina de inyección no reducirá las fugas y no alargará la ruta de filtración a través de la roca madre, por ende ocasionará un costo elevado en el tratamiento adicional para corregir la situación.

Existen diferentes reglas empíricas para la utilización de las presiones tales como:

- U.S.A
 $P = 0.25xD$, donde D = profundidad en metros y presión en bar
- Europa
 $P = D$, donde D = profundidad en metros y presión en bar
- Islandia
 $P = P_{\min} + 0.3xD$, donde $P_{\min} = 4.5$ bar para una mezcla de 1.5

Estos criterios empíricos no son del todo una regla general a usar, por lo tanto la elección de la presión de inyección es extremadamente importante y su elección dependerá de las investigaciones y tipo de obra a realizar. En la figura N°2.7 se puede observar la variación de las presiones de inyección de acuerdo a cada metodología (criterios empíricos).

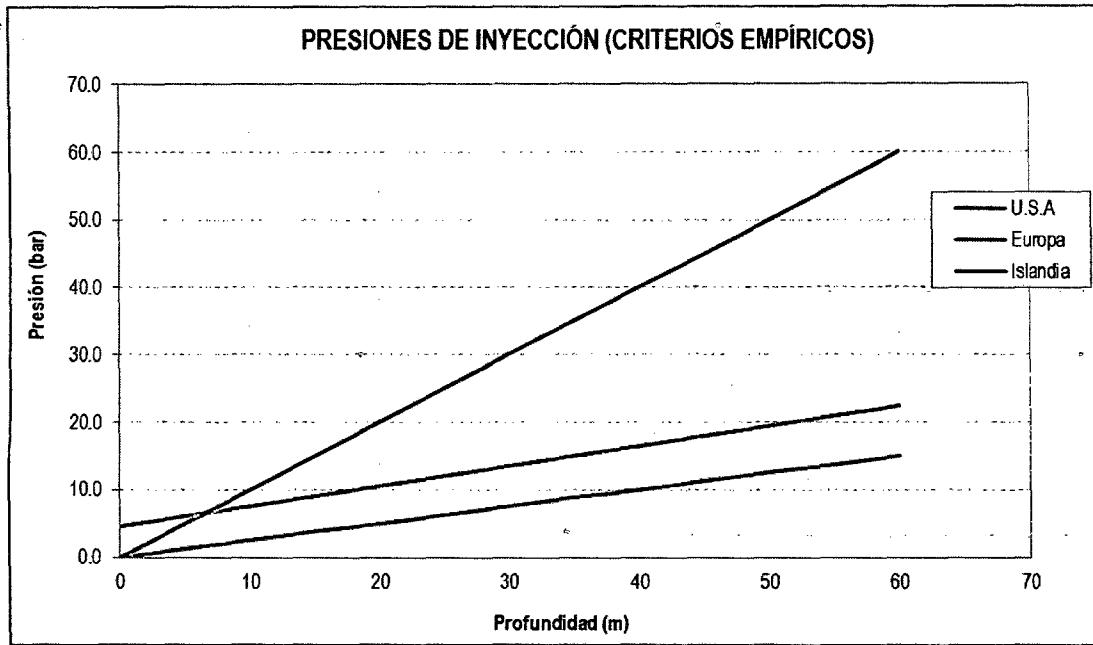


Figura N°2.7 Estudio de presiones de inyección

2.5.2 CORTINAS DE PRESAS

Hay muchas discusiones sobre si es factible realizar una sola fila de cortina o varias filas de cortinas de impermeabilización, pero eso dependerá mucho de la condición del sitio del proyecto, de la experiencia del diseñador, costo de la obra, etcétera. Houlsby recomienda que 'los espacios entre filas deben ser entre 1.0 a 1.5 m, o más cerca'. En caso de realizarse más cerca, se debe tener cuidado en los espaciamientos de las filas evitando el congestionamiento de las perforaciones, por ello la planificación del trabajo debe elaborarse cuidadosamente para reducir al mínimo los retrasos.

Se recomienda cerrar primero (inyectar) las filas exteriores en cada área antes de comenzar con la fila interior de las cortinas, este criterio permite una inyección adecuada en la fundación sellando casi en su totalidad las fisuras y/o discontinuidades.

En la figura N°2.8 se muestra un perfil esquemático de 3 filas de cortina de impermeabilización (aguas arriba, aguas abajo y central).

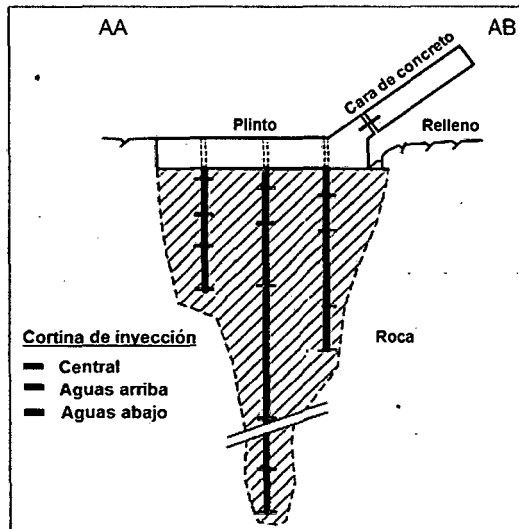


Figura N°2.8 Perfil esquemático AA (aguas arriba) – AB (aguas abajo) donde se muestra el modelo de la cortina de inyección (modificado de Lombardi 2003)

2.5.1.1 POSICIONAMIENTO DE LAS CORTINAS

La posición de las cortinas en presas de almacenamiento varía, dependiendo del tipo de presa, la geología, criterio del diseñador, etcétera.

a. Presas de tierra.- En las presas de tierra con núcleos de material impermeable (arcillas), la cortina de inyección se colocará en el eje del núcleo o aguas arriba del eje. Houslby recomienda colocar la cortina aguas arriba a $1/3$ de la distancia entre la línea central (eje del núcleo) y el pie aguas arriba del núcleo. Si la base de la presa es muy débil (rocas muy alteradas) se realizará un tratamiento con cortinas de inyección de consolidación, mejorando así la capacidad portante de la base.

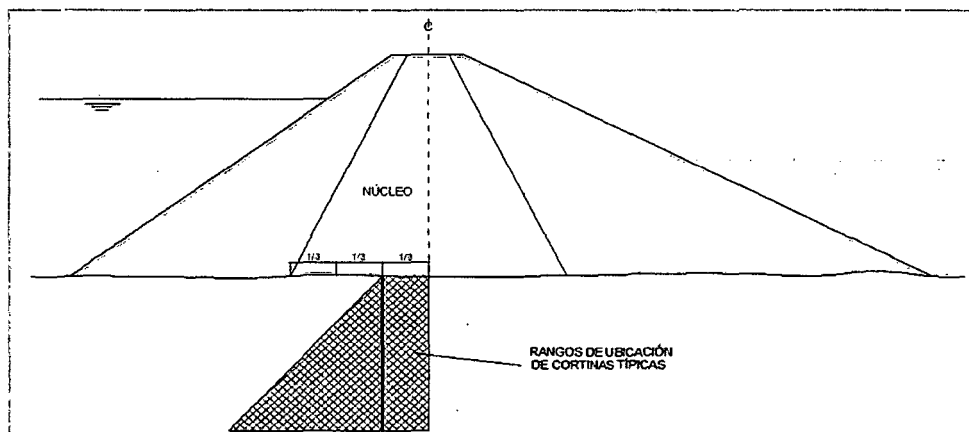


Figura N°2.9 Cortina de inyección en presa de tierra

b. Presas con protección aguas arriba del talud.- La protección del talud aguas arriba de la presa, actúa como una barrera contra el agua y puede ser de concreto, asfalto o geomembrana. El terraplén es permeable, por lo tanto, la cortina de inyección tiene que estar en la unión entre la protección del talud y la fundación. Una losa de concreto a lo largo del eje de la cortina (plinto) proporciona una tapa adecuada para la cortina.

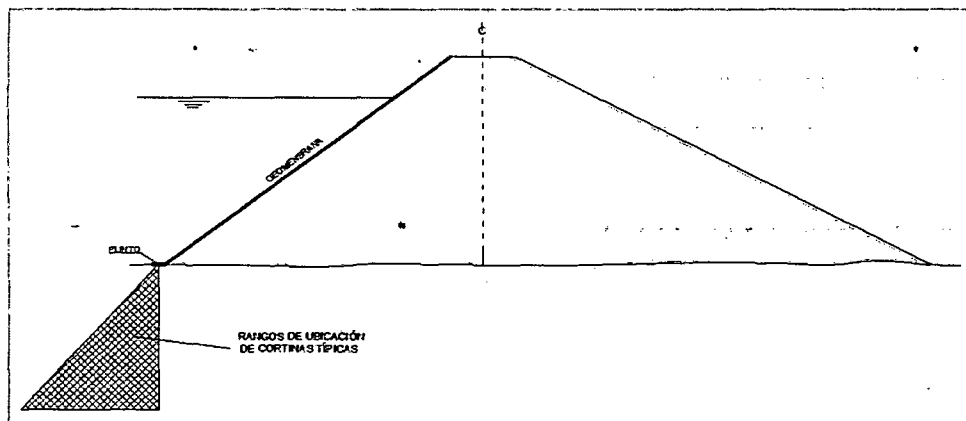


Figura N°2.10 Cortina de inyección en presa con protección del talud

c. Presas de gravedad con concreto.- En las presas de gravedad la cortina se ubicará aguas arriba del eje de la presa. El procedimiento constructivo varía dependiendo del tipo de planificación y los más utilizados son:

- Hacer la inyección de la cortina desde la superficie de la roca antes de construir el dique, esto se hará si la planificación lo permite sin interrumpir las construcciones.
- Realizar la inyección desde la galería, este método es el más usado.
- Hacer la inyección desde la cresta (pequeñas presas), también el más costoso.

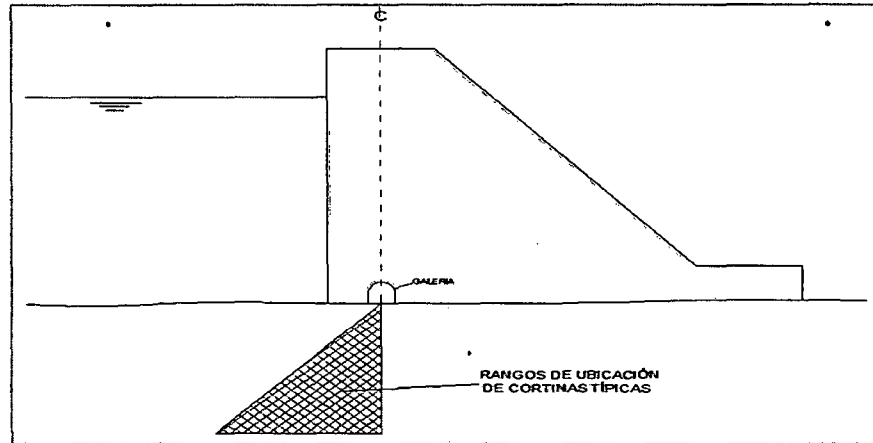


Figura N°2.11 Cortina de inyección en presa de gravedad

2.5.1.2 CORTINAS DE CARÁCTER EXPLORATORIO

En el diseño de una cortina de inyección de carácter exploratorio para la recolección de datos, es necesario decidir qué tan profundo se puede hacer y a qué distancia. En las zonas donde las permeabilidades son bajas se puede hacer cortinas de baja profundidad de tan solo uno o dos etapas, o en casos de tener permeabilidades altas las profundidades de la perforación deben ser iguales a la columna de agua de la presa.

La planificación se realiza con un trazo preliminar, dibujando la alineación en perfil, mostrando la información geológica y la permeabilidad correspondiente. Si es posible anticipar el trazo del terreno de fundación, así como las estructuras que afectarán a las posiciones de las perforaciones de inyección. Al plasmar los datos geológicos en el perfil de la cortina en el dibujo, este no debe ser sobrecargado, solo debe contener lo esencial. Los datos de permeabilidad por lo general son de mayor importancia y se deben mostrar claramente uno a cada lado de los taladros, trazando con precisión.

Con la información de los taladros exploratorios, se establece el dimensionamiento de los taladros, se decide sobre la profundidad de la etapa, haciéndola lo más uniforme posible, de preferencia siguiendo el perfil de la superficie; cabe mencionar que las profundidades propuestas pueden ser modificadas en campo de acuerdo a los problemas presentados.

CAPÍTULO III

MATERIALES DE INYECCIÓN Y EQUIPOS

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

Es el principal material para la mezcla de inyección; el tipo de cemento a utilizar dependerá del tamaño de las fisuras a tratar, del lugar de obra, y muchos componentes más. Se utiliza cemento Portland y cemento ultra-fino, los cuales detallaremos a continuación.

3.1.1.1 CEMENTO PORTLAND

El cemento Portland es el principal ingrediente cementante utilizado en lechadas para los trabajos de mejoramiento de las fundaciones de 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 fracturas finas de la roca y en donde existen problemas de derrumbe. 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 está presente.

Se fabrican diferentes tipos de cemento Portland para satisfacer a varios requisitos físicos y químicos en las construcciones a realizar. La norma C150 "Especificación estándar para cemento Portland" de la American Society for Testing and Materials (ASTM), designa ocho tipos de cementos Portland, como se presenta en el cuadro N°3.1.

Cuadro N°3.1
Clasificación de cementos (ASTM C150)

TIPO	NOMBRE	APLICACIÓN
I	Normal	Uso general, donde no se requiere otro tipo de cemento
IA	Normal	Uso general, con incorporación de aire
II	Moderado	Uso general, y específicamente cuando se desea un moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos.
IIA	Moderado	Tiene la misma aplicación del Tipo II, pero con incorporación de aire
III	Alta resistencia	Cuando se requiera alta resistencia inicial
IIIA	Alta resistencia	Tiene la misma aplicación del Tipo III, pero con incorporación de aire
IV	Bajo calor de hidratación	Cuando se requiera obtener un bajo calor de hidratación
V	Resistencia a la acción de los sulfatos	Cuando las estructuras se exponen a alto contenido de los sulfatos

Algunos ejemplos donde se ha utilizado el cemento Portland:

- En el proyecto de la Central Hidroeléctrica Huanza – Presa Pallca, se ha utilizado el cemento Andino Portland tipo I, en sacos de 42.5 kg.
- En el proyecto mina Las Bambas – Presa Chuspiri, se ha utilizado el cemento Yura Portland tipo IP, en sacos de 42.5 kg.

La ubicación y/o el radio de influencia de las plantas cementeras con respecto a la ubicación del proyecto son fundamentales en la elección del cemento que se va utilizar en los trabajos de inyección, y el tipo de cemento dependerá de las investigaciones geomecánicas e hidrogeológicas de la fundación.

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 elevado y es importado desde otros países, sus características de exudación y de mayor penetrabilidad podrían reducir el número de taladros, mejorando la relación costo – beneficio.

Las partículas de cemento son más pequeñas que 20 μm de diámetro y 50% de las partículas son menores que 5 μm de diámetro, su finura Blaine normalmente excede a 800 m^2/kg . Estos cementos muy finos consisten en cemento Portland, escoria granulada de alto horno y adiciones de minerales.

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

En el proyecto de la presa de relaves de la mina Cerro Corona de la minera GoldFields, el cemento utilizado es del tipo Ultrafino US Grout, en sacos de 20 kg.

En la figura N°3.1 se puede observar la distribución granulométrica de los diferentes tipos de cemento que se pueden utilizar para las inyecciones. Se aprecia que los cementos normales deben tener como máximo 100 μm de diámetro, y como mínimo el 90% de las partículas deben ser menores a 50 μm de diámetro. Los cementos ultrafinos deben tener como máximo 20 μm de diámetro, y como mínimo el 90% de las partículas deben ser menores a 15 μm de diámetro.

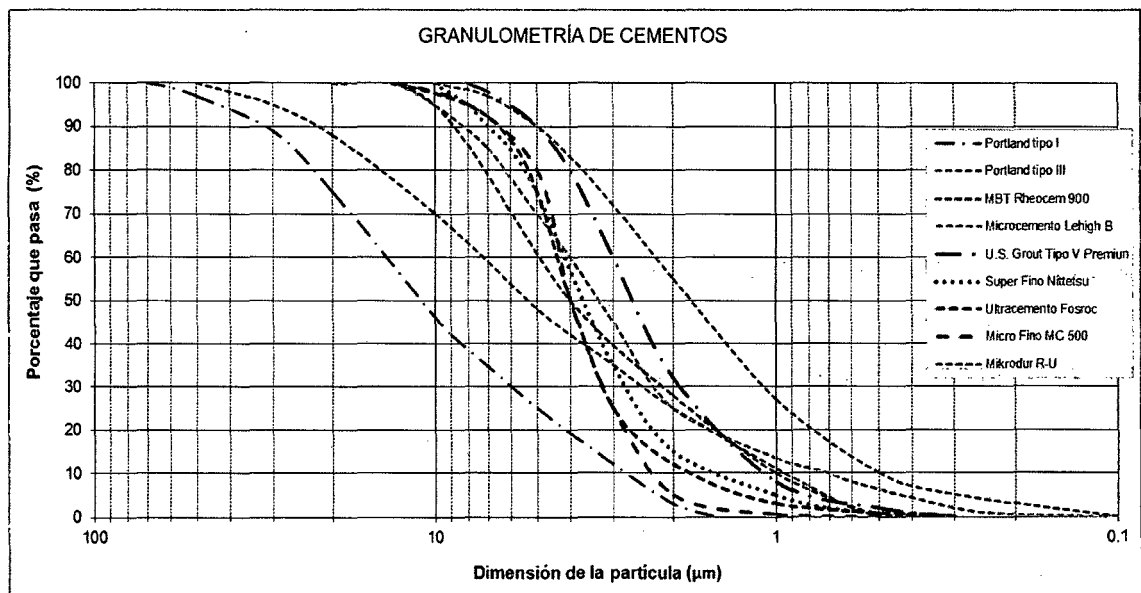


Figura N°3.1 Granulometría de los Cementos de Inyección (James Warner, 2004)

3.1.2 AGUA

El agua deberá estar libre de impurezas y sólidos en suspensión. El agua potable es generalmente aceptada como agua de la mezcla, pero el agua del emplazamiento de la obra puede ser ensayada para verificar su posibilidad de uso. Es recomendable que la temperatura del agua no sea menor a 4°C (40°F) ni mayor a 24°C (75°F) y el pH debe estar en el rango de 7 ± 1 .

En la presa Chuspiri del proyecto las Bambas, se ha tenido las siguientes consideraciones para el agua de la mezcla: sólidos totales en suspensión del tipo limos y arcillas tolerables hasta 2 000 ppm en el agua para la mezcla de lechadas. Las concentraciones de cloruro y sulfato de sodio son aceptables hasta una concentración máxima en el agua de mezcla de 20 000 ppm y 10 000 ppm, respectivamente. El contenido de materia orgánica hasta 40 ppm es aceptable en el agua de mezcla. El pH del agua deberá estar comprendido entre 6,5 y 8,5.

3.1.3 ADITIVOS

Los aditivos incluidos en la mezcla de inyección tienen la función de reducir el agua de exudación, reducir su viscosidad y cohesión, y así mejorar su penetrabilidad.

Se suelen usar aditivos acelerantes, retardantes, fluidificantes, u otros. El tipo de aditivo a usar dependerá de la evaluación previa del diseñador.

- **Aditivos acelerantes.-** Los acelerantes son aditivos que permiten acelerar el fraguado y/o el desarrollo de la resistencia de una mezcla. Son productos que intervienen en el proceso de hidratación del cemento.
- **Aditivos retardantes.-** Los aditivos retardadores de fraguado se emplean para retrasar el tiempo de fraguado de una mezcla.
- **Aditivos fluidificantes.-** Los aditivos fluidificantes, comúnmente llamados reductores de agua, son aditivos que, por sus características, pueden producir las siguientes funciones: aumentar la trabajabilidad para un mismo contenido

de agua sin producir segregación, o disminuir el contenido de agua para la misma trabajabilidad.

Algunos ejemplos donde se han utilizado diferentes tipos de aditivos para la preparación de la lechada, son los proyectos de la presa de relaves de la mina Cerro Verde, la presa de agua de la mina Las Bambas, la Central Hidroeléctrica Huanza, y la presa de relaves de la mina Cerro Corona:

Superplastificantes Euco 37, densidad 1,19 g/cm³.

Plastificante Rheobuild 1000, densidad 1,21 g/cm³.

Hiperplastificante Rheobuild, densidad 1,24 g/cm³.

Estabilizador, retardante Delvo®crete, densidad 1,06 g/cm³.

3.1.4 ARENA

La calidad de la arena que se utilice en la inyección deberá concordar con los requerimientos de la ASTM C33 y estar formada por fragmentos de rocas duras, densas y durables, libres de películas superficiales, y la cantidad de impurezas orgánicas en proporción con el total debe ser pequeña. Se recomienda que la gradación de la arena sea como se muestra en el cuadro N°3.2.

Cuadro N°3.2
 Huso Recomendado para la Arena de Inyección

TAMAÑO DE LA MALLA		% QUE PASA
SI (mm)	Norma EE.UU	
2.380	No. 8	100
1.180	No. 16	95 – 100
0.600	No. 30	60 – 85
0.300	No. 50	20 – 50
0.150	No. 100	10 – 30
0.075	No. 200	0 – 5

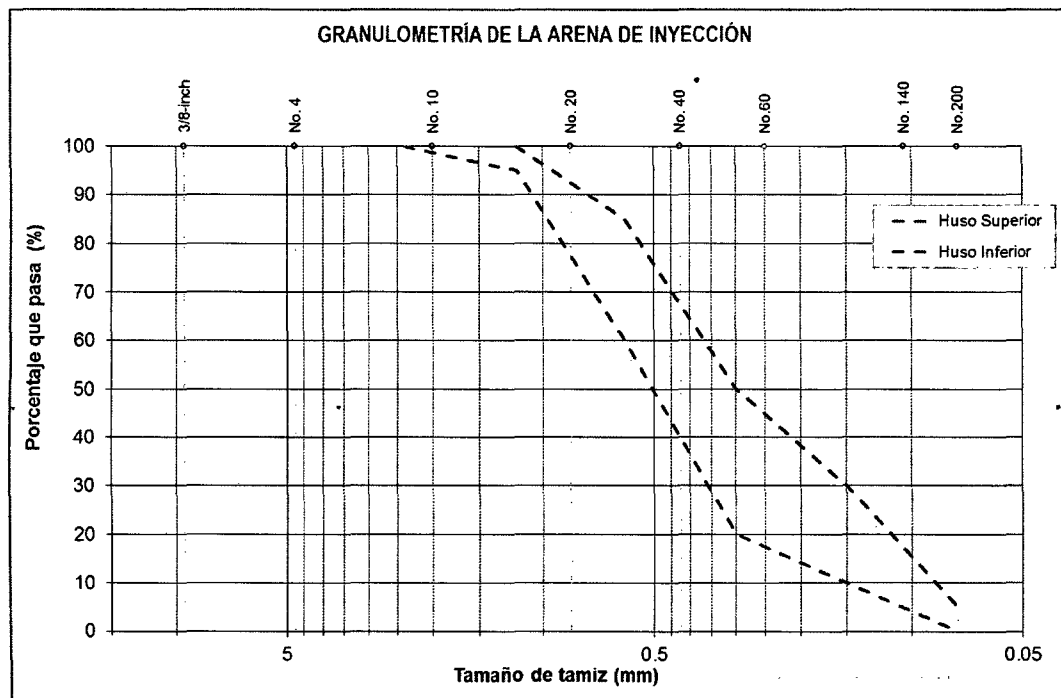


Figura N°3.2 Huso granulométrico recomendado

En la figura N°3.2 se puede observar la banda inferior y superior de la granulometría de la arena recomendada para las inyecciones. Es muy importante la experiencia del ingeniero para decidir qué tipo de granulometría de la arena se debe utilizar en las inyecciones, esto dependerá mucho la finalidad de la inyección y el tipo de aberturas.

3.2 EQUIPOS

3.2.1 EQUIPOS DE PERFORACIÓN

Los equipos de perforación se seleccionarán en función de las características del trabajo a realizar: diámetro de la perforación, profundidad, inclinación, ubicación de las perforaciones, número de perforaciones y condiciones geomecánicas del macizo a perforar. El reconocimiento del lugar de trabajo es fundamental, porque se requerirán equipos diferentes para inyecciones desde la superficie, estribos, túneles o galerías, permitiendo así una buena planificación y optimización de la economía del proyecto.

3.2.1.1 EQUIPOS A PERCUSIÓN

La perforación a percusión se realiza por la acción del martilleo del taladro que es acompañada por un movimiento de rotación ligera. Se utiliza un vástago hueco que lleva acoplada en su extremo una broca intercambiable. Este vástago se fija a las barras de perforación donde actúa como un pistón operando hidráulicamente o con aire comprimido (el caudal de aire suministrado por el compresor es de 5 m³/min, valor referencial). Se ingresa aire o agua por las barras de perforación para remover el detritus, se recomienda utilizar agua en perforaciones cerradas (túneles, galerías, etc.) para disminuir la generación de polvo. En el mercado existen diferentes tipos de brocas, la selección debe basarse en el tipo de roca y las características del taladro. En la figura N°3.3 se muestra la maquinaria a percusión modelo Track Drill.

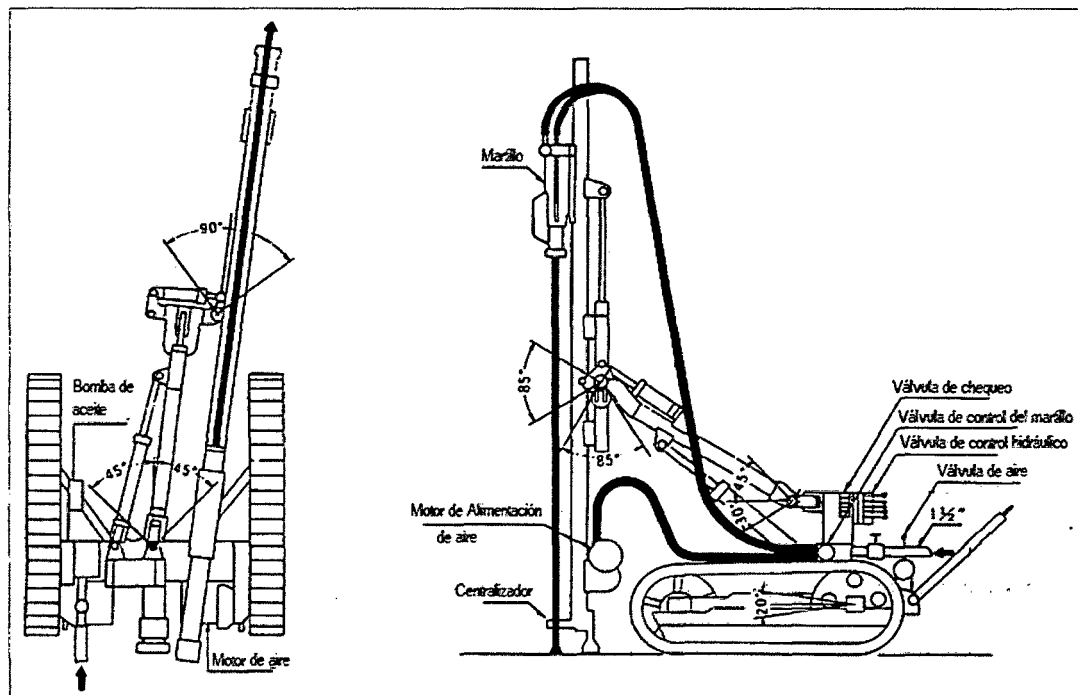


Figura N°3.3 Perforadora Track Drill

3.2.1.2 EQUIPOS A ROTACIÓN

La perforación a rotación, también conocida como perforación diamantina con recuperación de muestras, consiste en cortar y/o recuperar los testigos cilíndricos de rocas o suelos que se atraviesan con los sondeos, con el fin de proporcionar información de perfil litológico y geológico del subsuelo en la profundidad a

explorar, si es lo que se busca, de lo contrario no se recuperan las muestras y solo se procederá a seguir profundizando.

En este caso la perforación se realiza por la rotación de las barras de perforación que en su extremo inferior tienen acopladas una broca; un motor genera la rotación de las barras y la presión sobre las brocas es generada hidráulicamente o mecánicamente. Las brocas a utilizar se seleccionan en función del tipo de macizo a perforar, los tipos más comunes son:

- a. **Brocas de diamante.**- las brocas tienen dientes de diamante colocados de acuerdo al diseño del fabricante. Pueden ser de tipo "corona" que son usadas cuando se requiere perforaciones con recuperación de testigos, esta broca consiste en un cilindro con la parte central hueca y los dientes están en la parte externa del cilindro de tal manera que al perforar queda la corona en el interior; el otro tipo es de tipo "tapón", que pueden ser cóncavos o del tipo piloto en el cual hay un elemento que sobresale donde están los dientes de diamante de menor diámetro que el extremo de la broca (usada en rocas resistentes).
- b. **Brocas tricono.**- se trata de brocas formadas por varios conos convergentes (en general tres o cuatro) cada uno con dientes que rotan durante la excavación. Se utiliza para perforaciones sin recuperación de muestra.

3.2.2 EQUIPOS DE INYECCIÓN

Los equipos básicos que se requiere para realizar las inyecciones de cemento son: el mezclador, agitador, bomba de inyección, manómetros, caudalímetros, líneas de inyección, obturadores.

En el mezclador se añaden los materiales de la lechada, primero el agua, luego el cemento y al final el aditivo, todos ellos son mezclados como mínimo 2 min, posteriormente la mezcla es impulsada al agitador donde se batirá lentamente. El propósito de este equipo es mantener agitada la mezcla durante el proceso de inyección y se recomienda que la mezcla no esté más de 2 horas en el agitador. Ésta será sometida a presión por medio de una bomba e introducida en el medio a tratar, la lechada recorrerá por las líneas de inyección llegando a cada punto de la

perforación a inyectar. Se recomienda instalar una línea de retorno desde el punto de inyección hacia al agitador para tener una circulación constante de la lechada; además, se debe tener instalado un manómetro en la boca de taladro para medir el tiempo de disipación y desobturar el packer al culminar la inyección, como se muestra en la figura N°3.4.

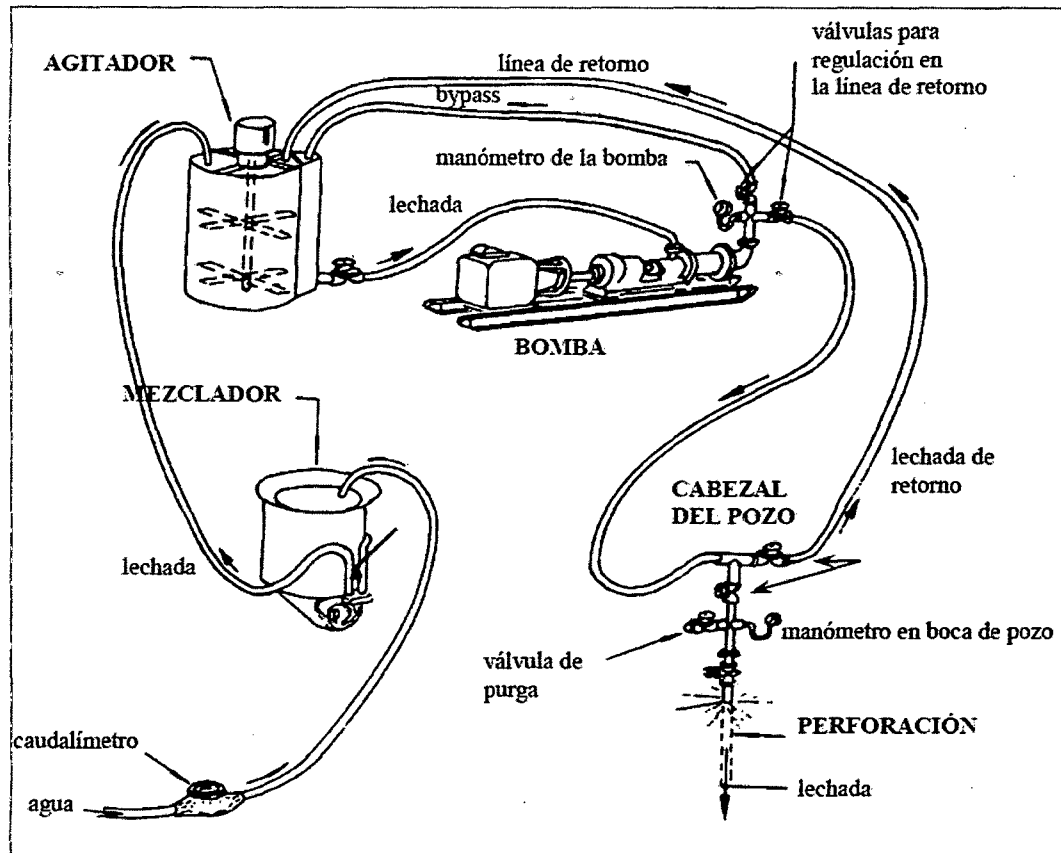


Figura N°3.4 Esquema del proceso de inyección

3.2.2.1 MEZCLADORES

Los equipos mezcladores deben suministrar una mezcla homogénea durante el periodo de tiempo necesario (mínimo 2 min) permitiendo un amasado homogéneo de la mezcla. Por ello se recomienda utilizar máquinas que trabajen a altas velocidades, como mínimo 1500 rpm, y adicionalmente deben tener una tolva (cernidor) en la parte superior, que logre separar las partículas individuales del cemento. El mezclador deberá tener instalado un caudalímetro para medir con precisión la cantidad de agua a ingresar. Esta característica de los mezcladores

hace que la mezcla producida tenga una gran estabilidad, con mejor penetración y mayor duración para los trayectos largos:

3.2.2.2 AGITADORES

El tanque agitador tiene la función de mantener siempre disponible un volumen importante de mezcla lista para la inyección. Suele tener de dos a tres veces el volumen de los mezcladores, y tiene un sistema de paletas que giran lentamente para mantener las propiedades de la mezcla; una velocidad de funcionamiento alrededor de 100 rpm es generalmente adecuada.

Las paletas están en un eje vertical, y la paleta más baja casi debe llegar al fondo del agitador para minimizar la sedimentación de la lechada. Una vez terminadas las inyecciones es recomendable lavar los tanques agitadores y las paletas a fondo, para evitar la acumulación de capas de lechada antigua. Si estas capas de lechada caen en el proceso de la inyección, se pueden producir problemas de taponamiento en las líneas de inyección, y como resultado se obtendrá un falso registro de las tomas. Aunque el volumen inyectado será controlado por el computador, el agitador deberá estar calibrado en litros, para que actúe como un segundo verificador del volumen inyectado.

3.2.2.3 EQUIPOS DE BOMBEO

Los equipos de bombeo deben ser capaces de impulsar la mezcla al pozo de inyección por la característica de la lechada que es un fluido viscoso. Los equipos de bombeo más utilizados para los trabajos de inyección son los que funcionan a aire comprimido con velocidad variable, otros tipos son los de velocidad constante que funcionan con energía eléctrica o combustible (en general más transportables y especialmente útiles para inyecciones en galerías o túneles).

- *Bombas de pistón.*- Hay una gran variedad de bombas de este tipo, desde las manuales mono pistón hasta las de doble pistón operadas por cilindros neumáticos o electro-hidráulicos. Los dos pistones buscan atenuar el efecto pulsante de estos equipos y funcionan a aire comprimido con velocidad variable. Por ejemplo se tienen bombas tipo Peroni y Moyno.

- *Bombas de cavidades progresivas.*- El componente principal es el rotor atornillado, que rota helicoidalmente forzando a la lechada a escurrir; funcionan a aire comprimido con velocidad variable. Este tipo de bomba se ha utilizado en el proyecto Las Bambas, en la construcción de la cortina de consolidación e impermeabilización de la presa de agua Chuspiri, ver figura N°3.5.

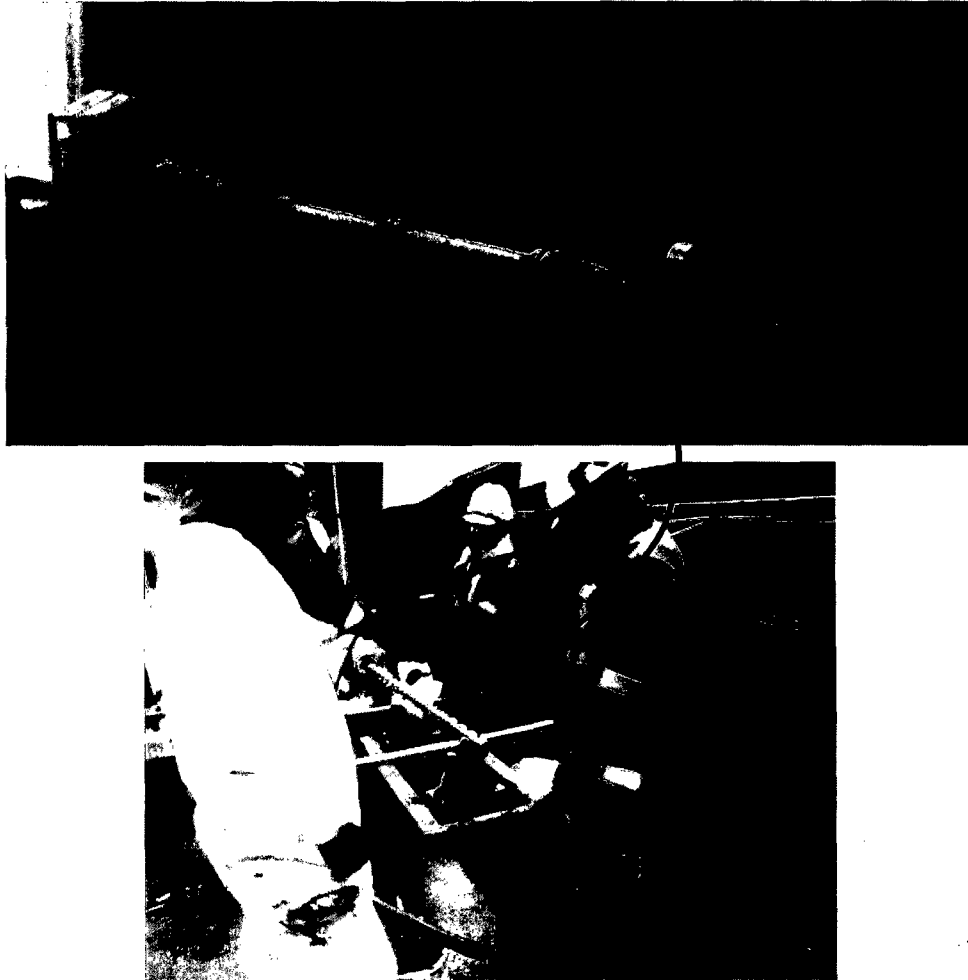


Figura N°3.5 Bomba de cavidades progresivas – Presa Chuspiri (Proyecto Las Bambas).

3.2.2.4 LÍNEAS DE INYECCIÓN

Las líneas de inyección son mangueras de caucho reforzado con diámetros internos variables entre 1" y 2". Las líneas de inyección van desde la salida de la bomba hasta la cabeza del taladro. Es recomendable utilizar dos líneas de inyección para crear un sistema con una línea de retorno, ver figura N°3.4.

Las líneas terminan en la cabeza del pozo, que mínimamente dispone de una válvula reguladora de presión, válvulas para seleccionar la inyección o circulación, un manómetro, y una válvula de limpieza.

3.2.2.5 OBTURADORES (PACKERS)

El obturador o packer permite aislar un tramo de la perforación y proceder a la inyección o al ensayo previsto; los taladros deben inyectarse por tramos cortos (generalmente tramos de 5 m). Existen dos tipos de packers: packer mecánico y packer hidráulico, ver figura N°3.6.

- a. **Packer mecánico.**- Este tipo de packer es utilizado para sellar el último tramo de la inyección, es colocado a unos centímetros debajo de la boca del taladro. Está constituido por una celda de caucho gruesa, la cual se expande contra las paredes con una compresión longitudinal usando manualmente un tornillo en la superficie.
- b. **Packer hidráulico.**- Tiene un cuerpo de aluminio o acero inoxidable y en la parte central una celda de caucho reforzado que es la que se expande con el aire comprimido y lo sella contra las paredes de perforación, aunque estas sean irregulares. La presión de inflado debe ser alta para evitar la fuga de la lechada.



Figura N°3.6 Izquierda: Packer mecánico, derecha: Packer hidráulico

3.2.3 EQUIPOS DE MONITOREO

El monitoreo constante es muy eficaz durante los trabajos de perforación e inyección, permitiendo un avance efectivo de lo programado. Con el transcurso de los años se han ido desarrollando sistemas computarizados para registrar el control de las inyecciones, creando un software que permite visualizar en una PC las curvas de presión, volumen y caudal en tiempo real. Esto ayudará eficazmente en el control de cierre y se podrá apreciar mejor el comportamiento de las inyecciones.

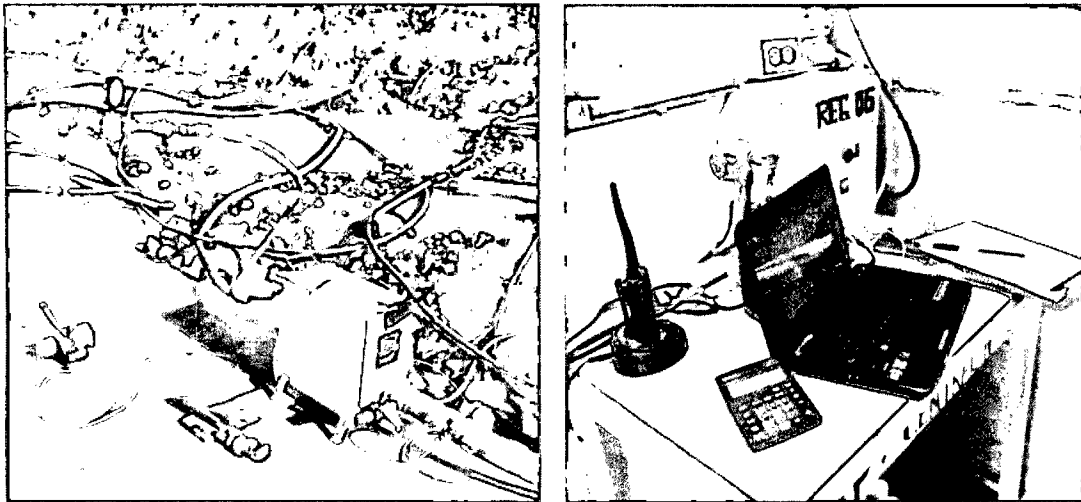


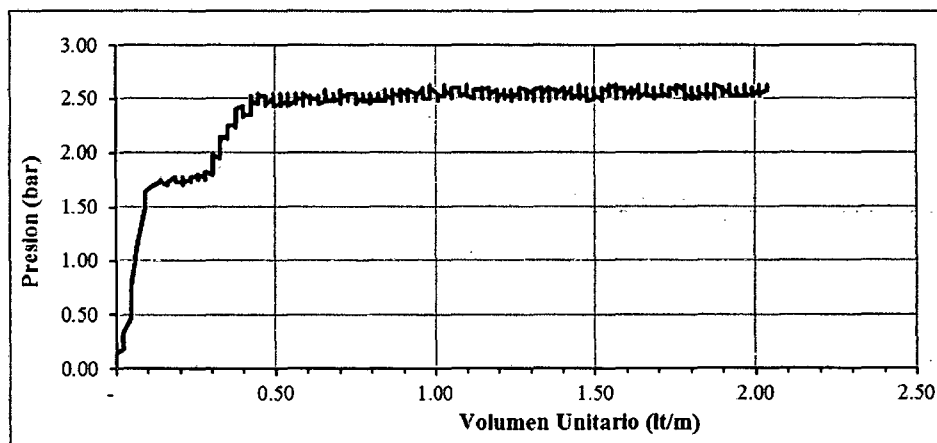
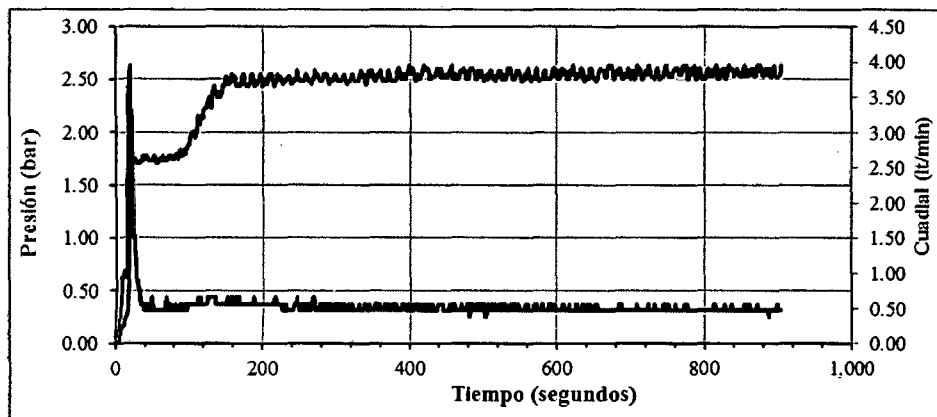
Figura N°3.7 Esquema del equipo de monitoreo de inyección

En la figura N°3.7 se puede apreciar el esquema del equipo de monitoreo de inyección; en la figura de la izquierda se observa la caja de registro en la misma cota que la perforación (boca de taladro), mostrando las lecturas de presión y caudal en tiempo real. Adicionalmente se cuenta con un manómetro instalado en la boca del taladro, cuya función principal será el monitoreo de la disipación después del inyectado y el control de la presión para desobturar el packer. En la figura de la derecha se tiene un variador, el cual tiene como función almacenar datos de la inyección (presión, caudal y volumen de lechada en tiempo real) y del regulador de presión. Los datos almacenados son enviados a la PC donde se tiene instalado el software y se podrá apreciar las gráficas del proceso de inyección como se muestra en la figura N°3.8.

Dado al alto nivel digital alcanzado por los equipos de hoy, ninguna actividad de inyección de lechada deberá llevarse a cabo sin un seguimiento en tiempo real, y un registro completo de los parámetros principales; los controles más importantes son:

- La presión (bar) vs tiempo (s)
- El caudal (l/min) vs tiempo (s)
- Volumen total (l) vs tiempo (s)
- La presión (bar) vs volumen unitario (l/m)
- La penetrabilidad (Q/P) vs tiempo (s)

La interpretación en tiempo real de estas funciones es importante pues permite entender el comportamiento de la inyección. Es muy importante la experiencia para la toma de decisiones ante algún problema en el transcurso de la inyección, cuando se presenten problemas de hidrofracturamiento, fugas, taponamientos, remoción de rellenos, etc.



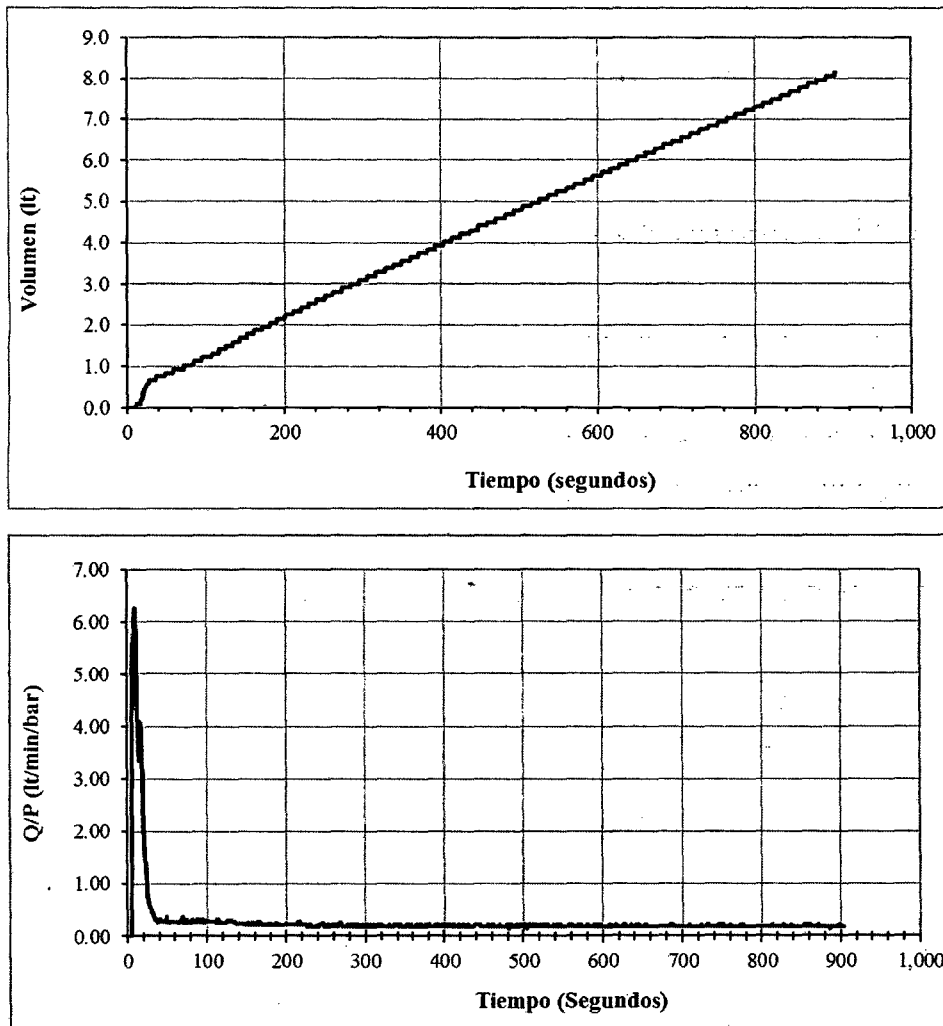


Figura N°3.8 Gráficas del proceso de inyección

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE MEZCLA Y MÉTODOS DE INYECCIÓN

4.1 DISEÑOS DE MEZCLA

El diseño de la mezcla de inyección tiene la finalidad de encontrar la relación óptima agua: cemento para la lechada que será utilizada en la inyección de los taladros; se utilizan ensayos de laboratorio, para determinar el comportamiento y propiedades de la lechada en estado fresco y endurecido.

4.1.1 ENSAYOS DE LABORATORIO

Inicialmente se lleva a cabo una serie de ensayos de laboratorio con diferentes dosificaciones de mezclas de lechada, con una relación agua: cemento (por peso) que varía de 0.7:1 a 1:1. La dosificación puede variar en función del tipo de tratamiento a realizar y el cemento utilizado debe cumplir con los requerimientos del diseño. Los ensayos realizados para la evaluación del diseño de mezcla de lechada son: peso unitario de la lechada, viscosidad aparente del embudo Marsh, cohesión, tiempos iniciales y finales del fraguado, sedimentación a las dos horas y resistencia a la compresión a los 7 y 28 días.

a. Densidad.- De acuerdo a la norma ASTM D4380, la balanza de lodos tipo Baroid es el instrumento que se utiliza generalmente para este método de ensayo, ver figura N°4.1. Se debe tener presente el siguiente procedimiento para un correcto ensayo:

- Colocar el instrumento en una mesa horizontal y a nivel.
- Llenar el vaso limpio y seco con la suspensión a ensayar, colocar la tapa en la copa y girar la tapa hasta que se asiente firmemente. Asegurarse de expulsar a través del agujero de la tapa el aire o gas atrapado.
- Lavar o limpiar el exceso de suspensión desde el exterior de la copa.
- Colocar el brazo graduado en el soporte del instrumento y equilibrar moviendo el soporte a lo largo del brazo graduado. Cuando el nivel de burbuja esté en el centro será indicativo de la horizontalidad del instrumento.

- La densidad de la lechada se leerá en el brazo graduado después de su equilibrio.
- Limpie y seque el instrumento a fondo después de cada uso.

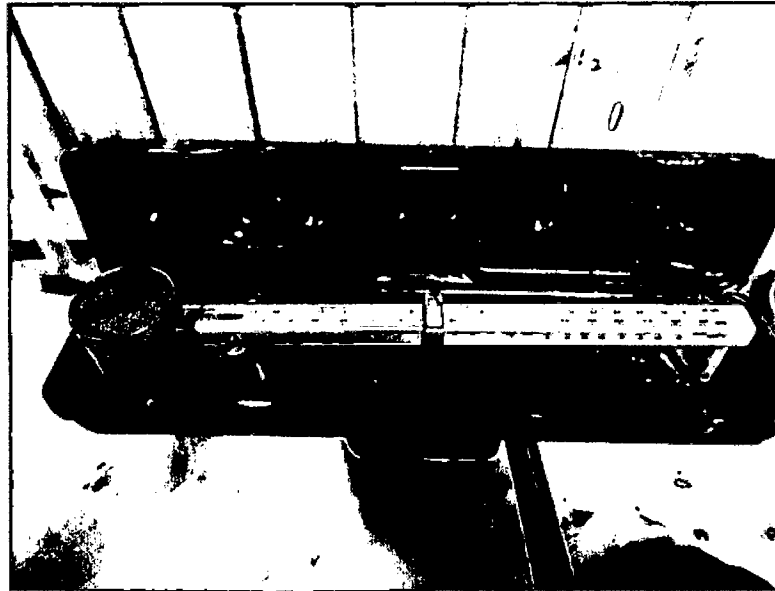


Figura N°4.1 Balanza de lodos tipo Baroid

b. Fluidez.- Conocida también como la viscosidad de embudo Marsh o cono Marsh, según la norma ASTM D6910; este método de ensayo proporciona una medida indirecta de la viscosidad de suspensiones de la mezcla, mediante un embudo (Marsh Funnel) y una taza graduada de dimensiones específicas, ver figura N°4.2. El procedimiento correcto del ensayo es el siguiente:

- Verificar que el embudo Marsh y la taza estén limpias y secas.
- Tapar con un dedo el orificio del embudo Marsh y llenar la lechada en el embudo.
- Colocar en posición vertical el embudo sobre la taza graduada, retirar el dedo y empezar la medida del tiempo con el cronómetro.
- Medir el tiempo que toma la suspensión para llenar la taza graduada para los 946 ml (1 cuarto de galón) de línea.
- Determinar la temperatura de la suspensión para propósitos de comparación.



Figura N°4.2 Cono de Marsh

- c. **Cohesión.-** Para medir de forma sencilla la cohesión, Lombardi (1993) detalla la utilización de una placa de acero rugosa. Esta pieza es de 100 mm por 100 mm por un espesor de alrededor de 1.5mm, ver figura N°4.3, que se pesa antes y después de sumergirla por unos segundos en la mezcla de inyectado. La diferencia de peso, dividida entre el área de ambos lados da el parámetro de cohesión en unidades de resistencia al esfuerzo cortante. Es conveniente dividir la cohesión "C" entre el peso unitario de la lechada " γ ", expresando la cohesión relativa como $C_r = C / \gamma$, que es la que normalmente se reporta. Se da generalmente en mm, y los valores típicos con aditivos son de 0.08 a 0.15mm. Es de interés notar que el valor de C_r es de hecho el espesor de la lechada de cemento, que se adhiere a cada lado de la placa de cohesión. La placa de cohesión debe ser suficientemente rugosa, cortando pequeñas ranuras que se intersectan sobre una superficie, de manera que la adhesión a la superficie del acero sea mayor que la cohesión entre la capa superficial de la lechada adherida y el resto de la lechada; de otra manera la lechada se deslizará de la placa.

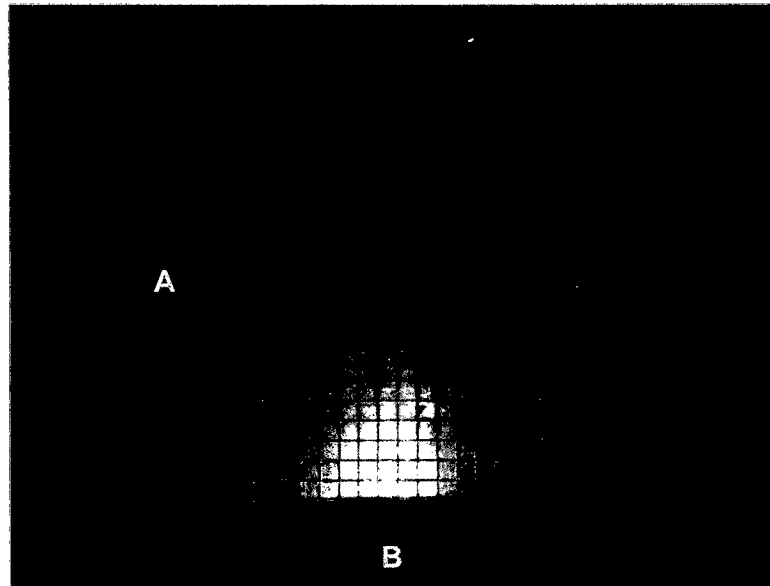


Figura N°4.3 Placa para cohesión, ranurado @ 5mm

Mediante la siguiente formula empírica se calcula la cohesión relativa de la lechada:

$$C = \frac{\delta_w}{2 \cdot A \cdot B}$$

$$C_r = \frac{C}{\gamma}$$

A,B: Dimensiones de la placa

C: Cohesión de la lechada

δ_w : Peso de la lechada adherida

γ : Peso específico de la lechada

C_r : Cohesión relativa

d. Sedimentación.- De acuerdo a la norma ASTM C243, el ensayo de sedimentación se realiza en una probeta graduada de 1000 ml, y consiste en medir el volumen de agua libre que queda después de 2 horas de reposo, ver figura N°4.4.

El porcentaje de sedimentación que presenta cada mezcla proporciona indicaciones muy instructivas; se debe tener en consideración que a mayor

volumen de agua libre que tenga una mezcla después de sedimentarse, mayor será el riesgo de exudación.

La experiencia en los trabajos de inyecciones indica que una mezcla estable es una que tiene menos de 5% de sedimentación.



Figura N°4.4 Prueba de sedimentación

- e. **Tiempo de fraguado.**- La norma ASTM C191 establece la determinación del tiempo de fraguado de la lechada con el uso del aparato Aguja de Vicat. Las pruebas de penetración periódicas se desarrollan en una pasta moldeada, permitiendo que la aguja de Vicat de 1mm se asiente sobre la pasta, ver figura N°4.5. El tiempo inicial del fraguado se obtiene calculando el tiempo transcurrido entre el contacto inicial de cemento y agua, y el momento en que la penetración es de 25mm. El tiempo final del fraguado se obtiene calculando el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento y agua, y el momento en que la aguja de Vicat ya no se hunde visiblemente en la pasta.

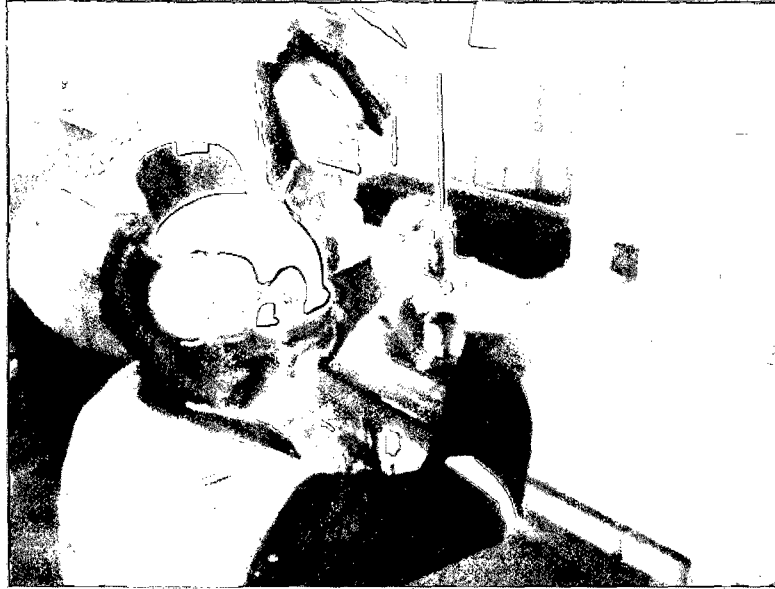


Figura N°4.5 Ensayo del tiempo de fraguado – Aguja Vicat

f. Resistencia a la compresión.- Para la obtención de la resistencia a la compresión de la lechada de cemento hidráulico, se realiza el ensayo en briquetas, siguiendo las pautas de la norma ASTM C349. El procedimiento para la toma de muestras y ensayos de testigos es similar al del concreto, solo que los testigos son de menor tamaño, ver figura N°4.6.

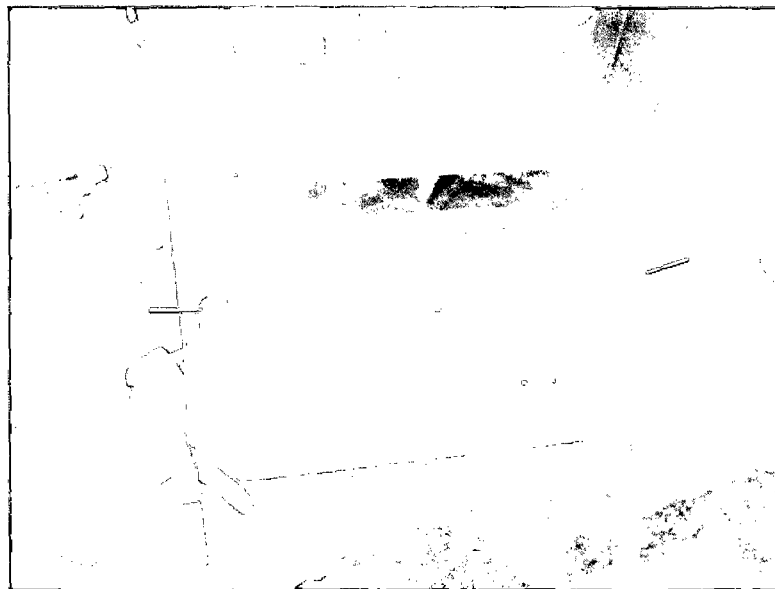


Figura N°4.6 Briquetas con lechada de cemento

Para la ejecución de los ensayos en laboratorio se usan los siguientes equipos: Balanza de lodos, cono de Marsh, aguja de Vicat, probetas y pipetas graduadas, moldes de briquetas, balanza digital de 250 g, termómetro de aguja, licuadora y cronómetro.

Los materiales que se utilizan en la mezcla de lechada comúnmente son; cemento, agua y aditivo; más detalles se presentan el Capítulo 3, ítem 3.1 materiales de inyección.

4.1.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS MEZCLAS DE DISEÑO

Los resultados de los ensayos de laboratorio deben registrarse adecuadamente, controlar los datos minuciosamente sin alterar ningún dato, porque esto influirá mucho en la elaboración de los gráficos para el análisis. Las curvas típicas que se elaboran para el análisis son: gráficos de fluidez, sedimentación, cohesión e inyectabilidad.

- a. **Gráfico de fluidez.**- Permiten analizar los cambios en la fluidez con respecto al tipo de mezcla.
- b. **Gráfico de sedimentación.**- Permite analizar la estabilidad de la mezcla, siendo el parámetro utilizado la variación de sedimentación en función a la relación a/c.
- c. **Gráfico de cohesión.**- Se analiza el cambio de la resistencia al corte de la lechada (considerándolo como un fluido tipo Binghamiano). Este gráfico tiene mucha importancia en la verificación de la penetrabilidad de la mezcla.
- d. **Gráfico de inyectabilidad.**- El gráfico muestra la relación entre la viscosidad de la mezcla y su estabilidad. Se recomienda utilizar mezclas más fluidas con mayor estabilidad de la lechada.

4.2 MÉTODOS DE INYECCIÓN

Los métodos de inyección se fueron desarrollando con el tiempo, estos métodos se desarrollan en base a la experiencia y ensayos en laboratorio. El método más común es el "Método tradicional", y en la década del 90 Lombardi y Deere establecen el método GIN; a continuación describiremos los dos métodos:

4.2.1 MÉTODO TRADICIONAL

El método tradicional de inyección consiste en definir una presión de inyección y el uso de diferentes dosificaciones de lechada, por ejemplo, lechadas con relaciones agua: cemento sucesivamente menores (1:1, 0.9:1, 0.8:1, 0.7:1). Los cambios de mezcla tienen lugar a determinados volúmenes de lechada tomados por la perforación. La cohesión de estas mezclas aumenta progresivamente y por lo tanto, la resistencia a fluir y penetrar de la mezcla, por lo que siguiendo estos pasos, se va a detener el proceso de inyección en algún punto. Se utiliza en todo tipo de roca.

Tomemos como ejemplo el siguiente criterio:

- Se define el tramo a inyectar, por ejemplo 5 m.
- Se define la presión de inyección máxima $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0.25 \text{ a } 0.5 \times z[\text{m}]$; usual en USA; los europeos van hasta $1 \times z[\text{m}]$, es decir grandes presiones con mezclas muy fluidas $> 6:1$, considerando que abren las fisuras durante la inyección y luego se cierran "expulsando" el exceso de agua.
- Se eligen los distintos tipos de mezcla a utilizar. Hay muchos criterios para elegir la mezcla inicial en base a los ensayos previos de agua, anchos de fisuras y otros, pero siempre se requiere la experiencia del sitio. Para cada una de ellas se definen las absorciones máximas, volúmenes máximos acumulados, y las absorciones finales máximas para cerrar (se dice que se obtiene el "rechazo")
- Definidas estas variables para cada mezcla, se procede de manera tal que si no cumple en cada etapa cualquiera de las tres condiciones o no se llega a la presión máxima, se pasa a la mezcla siguiente más espesa. Por ejemplo:

Aplicación en el proyecto Cerro Corona, presa de relaves Las Hierbas (estribo derecho, diciembre 2011)

La selección de diferentes dosificaciones se ha realizado de acuerdo a la calidad del macizo rocoso, del estribo derecho de la presa de relaves Las Hierbas.

Los diseños de mezcla seleccionados son: 1:1, 0.9:1, 0.8:1, 0.7:1, y el cemento a utilizar fue cemento Ultrafino.

Los cambios de mezclas son cada 50 l/m y caudal final = 0.

Tramo de inyección 10 a 15 m, tramo de 5 m.

- $P_{max} = 0.30 \text{ bar/m} \times 15\text{m} = 4.5 \text{ bar}$

- Mezcla inicial: 1:1

Volumen inyectado acumulado = 250 l, presión final = 0 bar, caudal final = 8.7 l/min, se pasa a otra mezcla.

- Mezcla: 0.9:1

Volumen inyectado acumulado = 500 l, presión final = 1.2 bar, caudal final = 14.5 l/min, se pasa a otra mezcla.

- Mezcla: 0.8:1

Volumen inyectado acumulado = 705 l, presión final = 4.5 bar, caudal final = 0 l/min

4.2.2 MÉTODO GIN (GROUTING INTENSITY NUMBER)

4.2.2.1 PRINCIPIOS DEL MÉTODO GIN

Lombardi y Deere (1993) establecieron el concepto de Número de Intensidad de Inyección (Grouting Intensity Number) en base a los resultados obtenidos a partir de ensayos de laboratorio sobre la cohesión (resistencia a la fluencia), la viscosidad dinámica de diferentes composiciones de mezclas de inyección, los estudios teóricos de flujo y penetración de lechada, y el monitoreo en campo de las presiones de inyección y absorción (tomas).

Las características únicas del método son:

- Se utiliza una sola dosificación de mezcla de inyección estable para todo el proceso, esta será definida en las pruebas de laboratorio y se podrá utilizar con aditivo superplastificante para incrementar su penetrabilidad.
- Bombeo de la lechada a una velocidad constante, baja a mediana, en función al tiempo, a una presión que se incrementa gradualmente conforme la lechada penetra más profundamente las fracturas de la roca.
- El monitoreo de la presión, la velocidad de flujo, el volumen inyectado y la penetrabilidad contra el tiempo, en tiempo real, por medio de gráficos en una computadora PC.
- La terminación de una trayectoria de inyectado, registrada sobre el diagrama de presión contra el volumen total (por metro de intervalo inyectado) interseca a una de las curvas de volumen limitante, presión limitante o intensidad de inyectado limitante como queda dado por la curva hiperbólica seleccionada de GIN.

El cálculo del valor de GIN, se determina en función de varios factores:

Para juntas de apertura constante

$$\text{Radio de alcance: } R = \frac{p-p}{2c}$$

$$\text{Volumen de toma: } V = \pi R^2 \cdot e$$

De la definición: $GIN = p \cdot V$

Entonces se obtiene para las juntas reales:

$$GIN = p \cdot V = 2\pi \cdot n \cdot k_p \cdot k_v \cdot c \cdot R^3$$

Dónde:

GIN: Número de Intensidad de Inyección

c: Cohesión de la mezcla (kPa)

R: Radio de alcance (m)

p: Presión de inyección final (kPa)

V: Volumen de toma (m³)

e: Abertura de juntas (m)

n: Número de juntas principales

k_p : coeficiente para considerar las pérdidas de presión debido a la rugosidad de las paredes de roca y la variación de la abertura de las juntas.

k_v : coeficiente para considerar el aumento de volumen debido a las ondulaciones, así como a las variaciones de la abertura de las juntas.

Entonces:

$$R = \sqrt[5]{GIN}$$

$$R = R_t \cdot \sqrt[5]{GIN/GIN_t}$$

Dónde:

R_t , GIN_t : son valores de ensayo

4.2.2.2 CRITERIOS PARA ADOPTAR LA CURVA GIN DE INYECCIÓN

Los valores de inyección GIN, cuando son representados en un gráfico presión vs volumen, forman una curva hiperbólica. Cuanto mayor es la intensidad de inyección o el valor GIN, la curva se forma a mayor distancia del origen. La combinación de una curva GIN con las curvas límites de volumen y presión, produce una envolvente límite, compuesta para inyecciones, tal como se muestra en las figuras N°4.7 y 4.8.

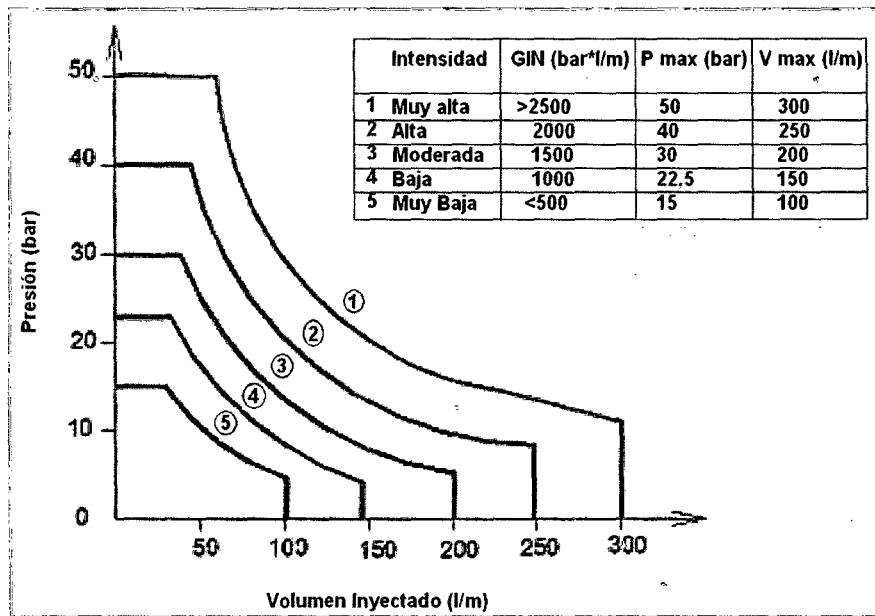


Figura N°4.7 Serie de curvas límite GIN típicas sugeridas para la inyección de macizos rocosos (Modificado Lombardi, 1993)

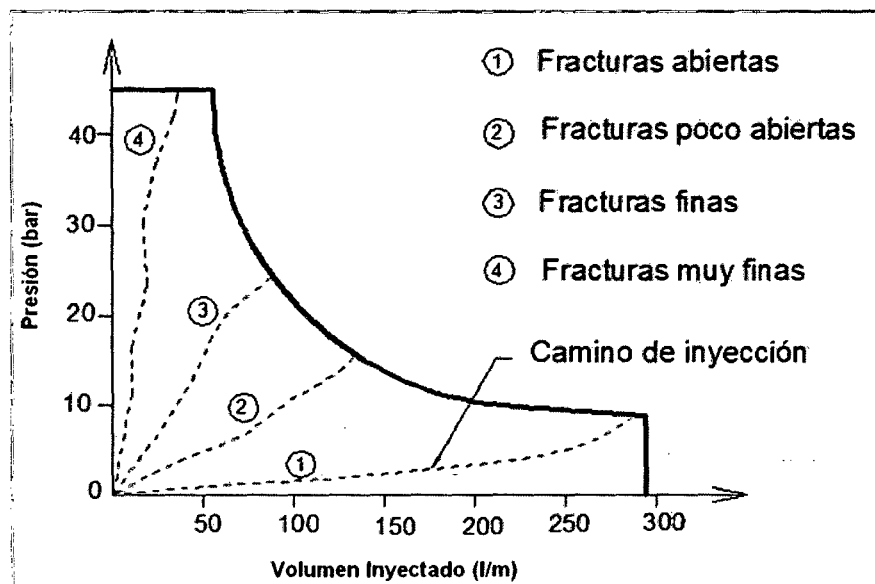


Figura N°4.8 Curva de camino de inyecciones típicas, relacionado al tipo o magnitud de la abertura del medio inyectado (Modificado Lombardi, 1993)

Otro criterio que se debe usar para calificar si una determinada inyección se realiza satisfactoriamente o no, se basa en la correspondencia entre el punto de la llegada del camino de inyección, y la respectiva curva de penetrabilidad. Tal como se muestra en la figura N°4.9.

La intersección del camino GIN con la curva (punto F) debe coincidir en la curva de la penetrabilidad con el punto de llegada de la absorción final (V_f) hacia el eje X. En el caso de que dicha curva no llegue al eje X, indica que la inyección no ha sido totalmente completada.

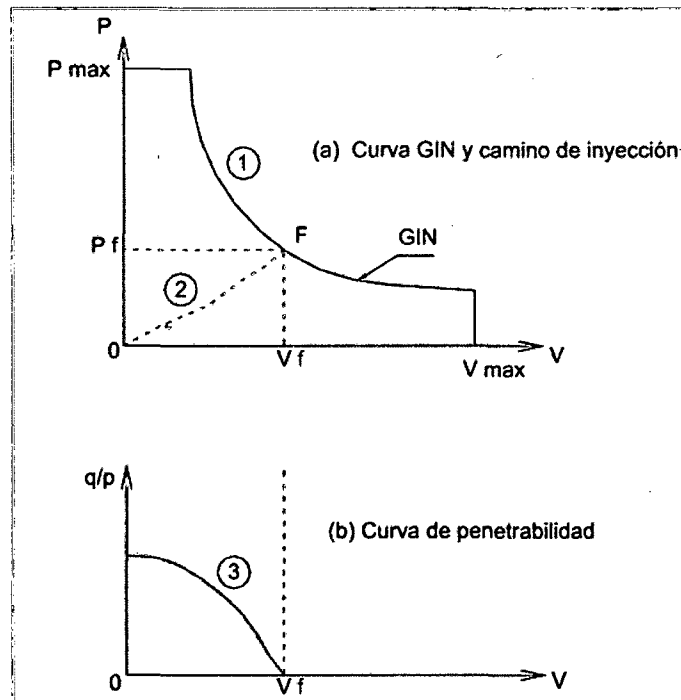


Figura N°4.9 Proceso de inyección de un taladro (típico), en donde (1) Curva limite, presión x volumen inyectado; (2) Camino de inyección; (3) Curva de penetrabilidad, (q/p) x volumen inyectado; P_f : Presión final de inyección; V_f : Volumen inyectado.

Durante el proceso de inyección, el valor de intensidad se alcanzará en cualquier instante. Esto conduce a la definición de “intensidad de inyección”, que se utiliza para limitar el proceso de inyección. El resultado principal es evitar la ocurrencia simultánea de altas presiones y altas tomas de lechada, ya que combinados ambos factores, conducen a la zona de peligro por hidrofracturamiento; la aplicación más inmediata de este concepto para realizar un buen proceso de inyección es tener en cuenta: la presión máxima, el límite de volumen y la intensidad máxima.

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

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

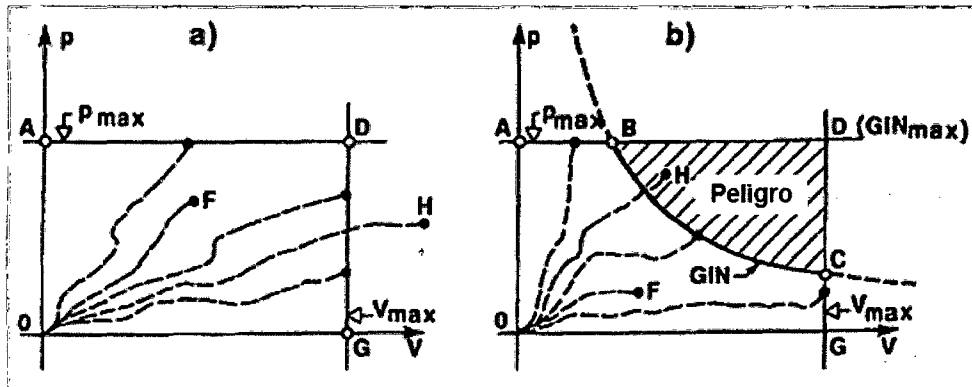


Figura N°4.10 Limitaciones del proceso de inyección

- a) Método tradicional, límite ADG b) Método GIN, límite ABCG
 P = presión máxima V = volumen máximo de toma
 GIN = límite de curva ($P \times V = \text{const.}$); en el extremo superior existe peligro de hidrofracturamiento. La lechada en las trayectorias F y H no está permitida.

En base a la posición del camino de inyección y una vez completada toda la serie de inyecciones desde primarias, secundarias y terciarios, hasta las de comprobación, se agrupan los puntos de llegada para identificar la concentración de los diferentes tipos de inyección como se muestra en la figura N°4.11.

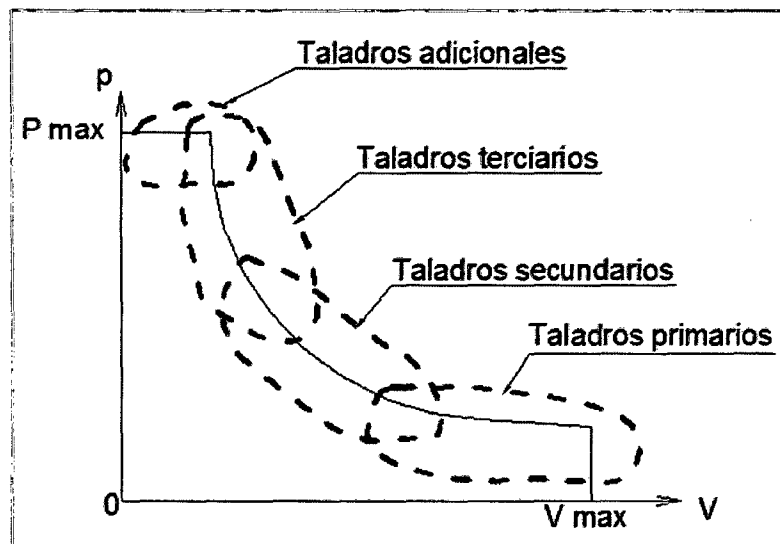


Figura N°4.11 Zonas típicas a donde llegarán los caminos de inyección

CAPÍTULO V

TÉCNICAS DE INYECCIÓN, CONTROL DE CALIDAD Y CRITERIOS DE ANÁLISIS

5.1 TÉCNICAS DE INYECCIÓN

Existen varias técnicas de inyección que combinan equipos y secuencias para lograr un adecuado tratamiento. Sin embargo, en general la presencia de condiciones heterogéneas en el emplazamiento de la obra hace que se combinen utilizando varios de ellos a distintas profundidades o sectores de la obra. Un caso usual es encontrar derrumbes durante la perforación del pozo, lo que exige detener la misma y realizar una inyección antes de seguir perforando. Las técnicas de inyección más utilizadas son las siguientes:

5.1.1 INYECCIÓN ASCENDENTE

La perforación se realiza a la profundidad total y luego utilizando el packer se aísla del pozo requerido y se trabaja en ella. La inyección se realiza en forma ascendente en los distintos tramos del pozo, se coloca el packer en la parte superior del tramo a ser inyectado, se infla en packer (obturar) y se procede a inyectar. Una vez finalizada la inyección se mueve el packer a la nueva posición (se debe esperar que baje la presión antes de desobturar el packer), y así llegar al tramo superior, como se muestra en la figura N°5.1.

Se aplica en terrenos estables (poco fracturados) y permite realizar la perforación en toda su longitud, entonces la inyección se realiza a partir del fondo hacia arriba, avanzando en tramos de 5 m de longitud (recomendado por experiencia de otros proyectos). Es el método más económico porque permite un flujo adecuado de la maquinaria, equipos y mano de obra.

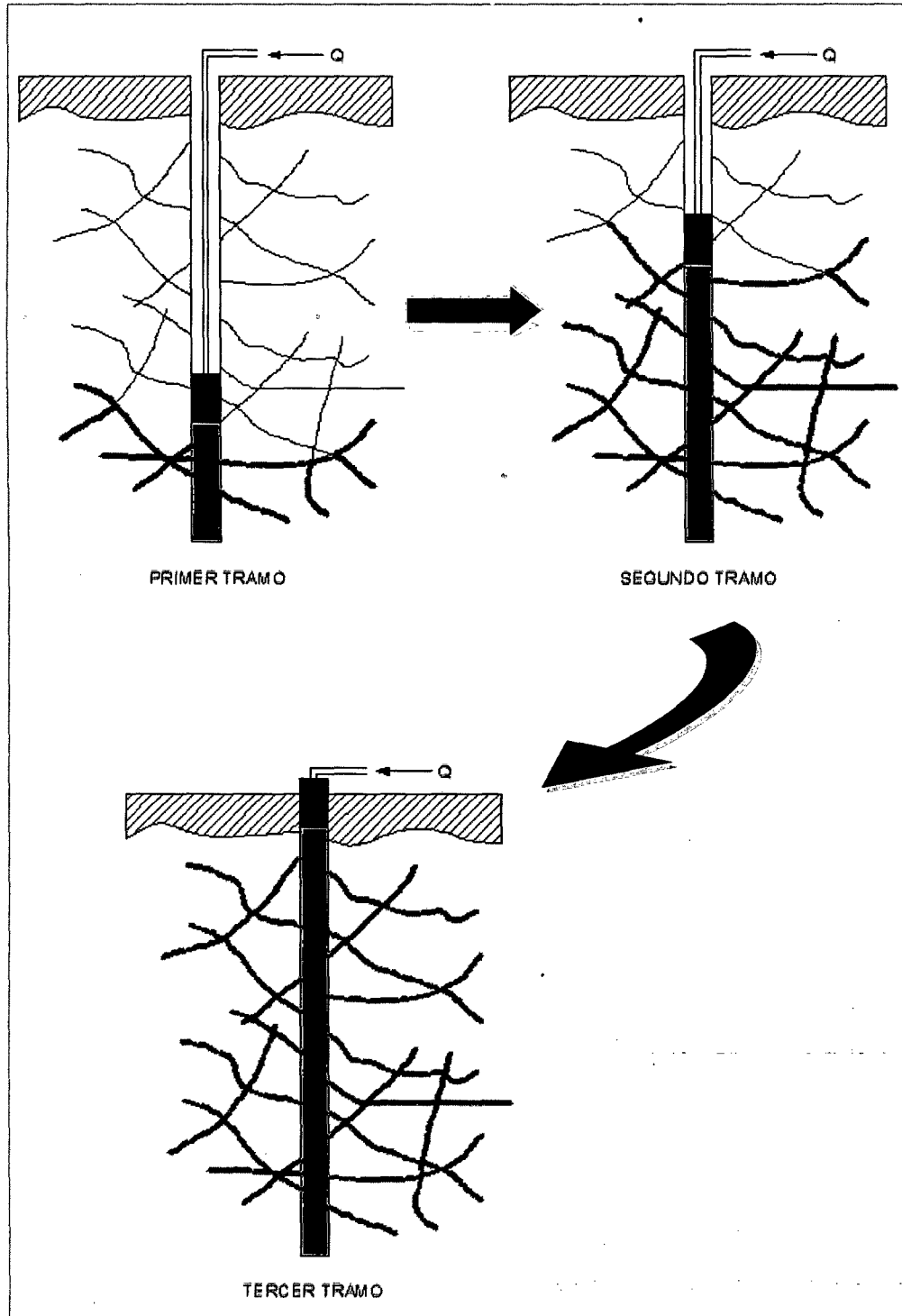


Figura N°5.1 Secuencia de inyección ascendente

5.1.2 INYECCIÓN DESCENDENTE

En este caso se va perforando e inyectando en tramos en forma descendente hasta alcanzarse la profundidad requerida. Se aplica cuando el terreno donde se ha realizado la perforación está muy fracturado y provoca que las paredes de perforación no sean estables. Se recomienda perforar en una progresión de 5 m de longitud, se inyectan y se vuelve a perforar el siguiente tramo inferior, avanzando de esta forma hasta que se encuentra roca más estable, ver figura N°5.2.

El proceso de inyección es más caro y lento, porque obliga que los equipos de perforación e inyección sean retirados y recolocados para cada zona. Adicionalmente se debe realizar el lavado después de la inyección. A pesar de ello esta técnica de inyección es más segura y controlable.

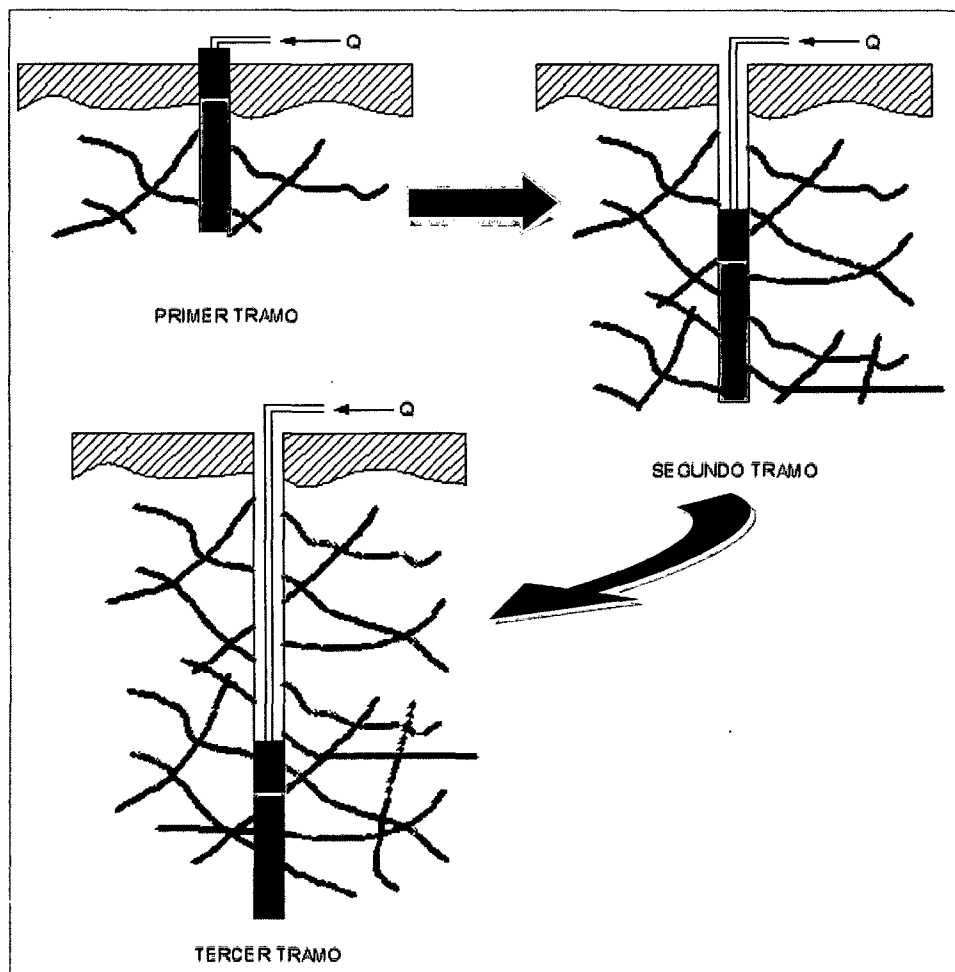


Figura N°5.2 Secuencia de inyección descendente

5.1.3 INYECCIÓN CON CIRCUITO

Se trata de disponer de un doble circuito en el sistema de inyección. Se coloca en el pozo un packer especial que tiene la línea de entrada de la lechada desde la bomba y una de salida hacia la batea de mezcla. Se comienza la inyección y la lechada va entrando en el pozo hasta que se llega a la presión de rechazo, indicando que ya no entra más lechada al pozo y esta vuelve por la línea hacia la batea. En esta situación el pozo forma parte del sistema de recirculación, teniendo como ventaja que la lechada está en movimiento hasta terminar la inyección, lo que favorece la eficiencia de la penetración en todas las fisuras.

5.2 CONTROL DE CALIDAD

El propósito de los controles de calidad es verificar que las obras se lleven a cabo de acuerdo a las especificaciones y de acuerdo a los requisitos dados por el ingeniero. Es fundamental la participación de personal idóneo y con experiencia en este tipo de trabajos en el diseño, ejecución e inspección de los trabajos. Deben llevarse registros diarios de los trabajos para ser usados en el seguimiento técnico como en el aspecto contractual y comercial. Por otro lado, desde el punto de vista contractual, las inyecciones son trabajos particularmente conflictivos en los cuales las cantidades tanto de perforaciones como de cemento inyectado no son inamovibles desde un comienzo y varían a lo largo de toda la obra, por lo que el registro de las actividades realizadas y las cantidades involucradas es indispensable.

Los registros deben incluir sistemáticamente: el logueo de perforaciones (descripción rápida del perforista), resultado de las tareas de lavado, ensayos de presión, cronología de los trabajos de inyección, presiones, volúmenes inyectados, relación a/c, y cualquier otra particularidad que se presente durante la ejecución de los trabajos.

5.2.1 PERFORACIÓN

Antes de realizar las perforaciones se debe realizar el control topográfico de la ubicación de los taladros, los cuales se identificarán con una marca de pintura en la superficie; estas marcas son codificadas llevando un orden para distinguir entre los taladros primarios, secundarios, terciarios, cuaternarios y quinaros. Posteriormente se verifica el alineamiento e inclinación, de acuerdo a la instrucción de campo y a los planos indicados. Terminada la perforación se debe verificar la profundidad del pozo perforado, para ello se recomienda contabilizar la cantidad de barras de taladros utilizados durante la perforación. Se programan taladros de perforación en función a la toma y distancias máximas establecidas.

El operario debe ser instruido de llevar una libreta de campo, donde podrá anotar todas las observaciones y dificultades encontradas durante la perforación. Las anotaciones que deben estar en la libreta de campo son: el nivel freático, pérdida de agua durante la perforación, presencia de fallas, rellenos en el pozo, etc., el operario perforista debe tener experiencia en este tipo de trabajos.

5.2.2 INYECCIÓN

El seguimiento de control de calidad antes de realizar el proceso de inyección consiste en lo siguiente:

- Se debe verificar el buen lavado de los taladros a inyectar, de lo contrario se tendrá un falso rechazo de inyección.
- Se debe tener un control riguroso de la calidad de los materiales para la inyección, cemento, agua y aditivo.
- En el cemento, se controlará de manera rigurosa la fecha de vencimiento, el apilado, el almacenamiento y la protección al medio ambiente.
- El agua usada para la inyección debe ser la misma utilizada en el diseño de mezcla. De manera visual, el agua será transparente sin presencia de turbidez, así también se debe controlar la calidad de pH.

- Los aditivos a usar deben cumplir con sus hojas técnicas, la fecha de vencimiento y el almacenamiento adecuado.
- Se debe calibrar el registro y la computadora de la central de inyecciones, verificando el caudal y la presión. Este proceso se debe realizar cada vez que se mueva de su lugar (inyecciones en desnivel).
- Se controla que los parámetros físicos de cada mezcla estén dentro del rango permitido de cada tipo de mezcla inyectada. Los ensayos realizados son: sedimentación, fluidez, densidad y cohesión. Estos ensayos se deben realizar periódicamente.

Durante el proceso de la inyección se debe llevar un minucioso control de calidad, observando el comportamiento durante la inyección de la lechada. Se debe monitorear la inyección en tiempo real mediante una computadora y la inyección de la lechada de cemento en los tramos se recomienda realizar como mínimo 10 minutos. Se debe realizar los ensayos de calidad en cada cambio de dosificación de la lechada para verificar el cumplimiento de los parámetros. De igual manera, se debe controlar el diseño de mezcla (resistencia alcanzada), con muestreos de probetas.

La integridad y la calidad de un programa de inyección comienzan con una planificación adecuada antes de la inyección y un conocimiento claro del procedimiento de inyección. Si la inyección no es adecuadamente planificada, y hay poco o ninguna supervisión de la inyección, es muy probable que la cortina no sea de buena calidad, ya que probablemente no cumpla con las especificaciones técnicas de inyección y los requerimientos de diseño.

5.2.3 VERIFICACIÓN DE EQUIPOS

Antes de iniciar con los trabajos de perforación e inyección se debe revisar el buen estado de los equipos. La eficiencia en las perforaciones dependerá del estado de los equipos, las brocas deben estar en buen estado y deben ser adecuadas para cada tipo de roca a perforar.

En los equipos de inyección se debe verificar los certificados de calibración de los instrumentos de medida de presión, certificado de los medidores de caudal, el estado del tanque mezclador y agitador.

- *Balanza de Lodos.*- El instrumento debe ser calibrado con frecuencia utilizando agua fresca. El agua dulce debe dar una lectura de 1.00 g/cm^3 a 21°C (70°F).
- *Cono Marsh.*- Verificar periódicamente que el embudo de Marsh y la taza no estén dañados o desgastados. Comprobar que las marcas de graduación estén presentes y legibles, en particular asegurarse de que la marca de 946 ml se pueda leer en la taza. Verificar que la fluidez del agua es de $26 \pm 0.5 \text{ s}$ a una temperatura de $21 \pm 3^\circ\text{C}$ ($70 \pm 5^\circ\text{F}$). Si el embudo no cumple con estos criterios para el agua dulce, limpiar el tubo de orificio e inspeccionar para verificar que el tubo no ha sido doblado, aplastado o de otra manera distorsionado. Si el embudo sigue proporcionando lecturas inexactas, puede haber sido dañado y debe ser reemplazado.

Mantenimiento de los equipos; se deberán realizar mantenimientos regulares a todos los equipos de inyección, de manera que se encuentren en óptimas condiciones de operación en todo momento. Se deberán lavar frecuentemente las bombas, mangueras de inyección, cabezales, mezcladores, pantallas y agitadores para asegurar que las escamas de lechada seca, o lechada demasiado espesa no tapen los sistemas de inyección.

Se deberán mantener limpias y en una buena condición de operación todos los medidores, balanza, y otros equipos de medición, y reparar o reemplazar rápidamente cualquier medidor o dispositivo de medición que no esté operando satisfactoriamente. Se deberá efectuar las verificaciones de calibración regularmente.

5.2.4 CONTROL DE ABSORCIÓN

El seguimiento del control de absorciones se realiza mediante los reportes e informes gráficos. Por razones de estimación contractuales y de costos, es necesario estimar la toma de la lechada, es decir, el volumen de lechada de

cemento (o peso seco del cemento), que será absorbida por la base durante la operación de inyección. Esto es difícil de hacer con cualquier grado de precisión debido a que la penetración de la lechada de cemento depende de la abertura de las fisuras, la rugosidad, la continuidad y la interacción con otros conjuntos de fracturas, viscosidad de la lechada, presión de inyectado, etc.

Según Camberfort (1968), los ensayos Lugeon deben realizarse siempre antes de la inyección de una zona. A partir de un gran número de medidas, se ha tratado de relacionar el número de unidades Lugeon en una zona con su absorción de cemento; Ewart (1985) realiza un cuadro comparativo de la toma de cemento con el valor Lugeon, ver figura N°5.3. Si se pudiese establecer a ciencia cierta esa relación, se simplificaría bastante el reconocimiento, ya que el ensayo de permeabilidad indicaría a la vez el estado de fisuración de la roca y la cantidad de lechada necesaria para el mejoramiento del sustrato con inyecciones. Todas las tentativas realizadas en este sentido no han conducido más que a leyes aproximadas.

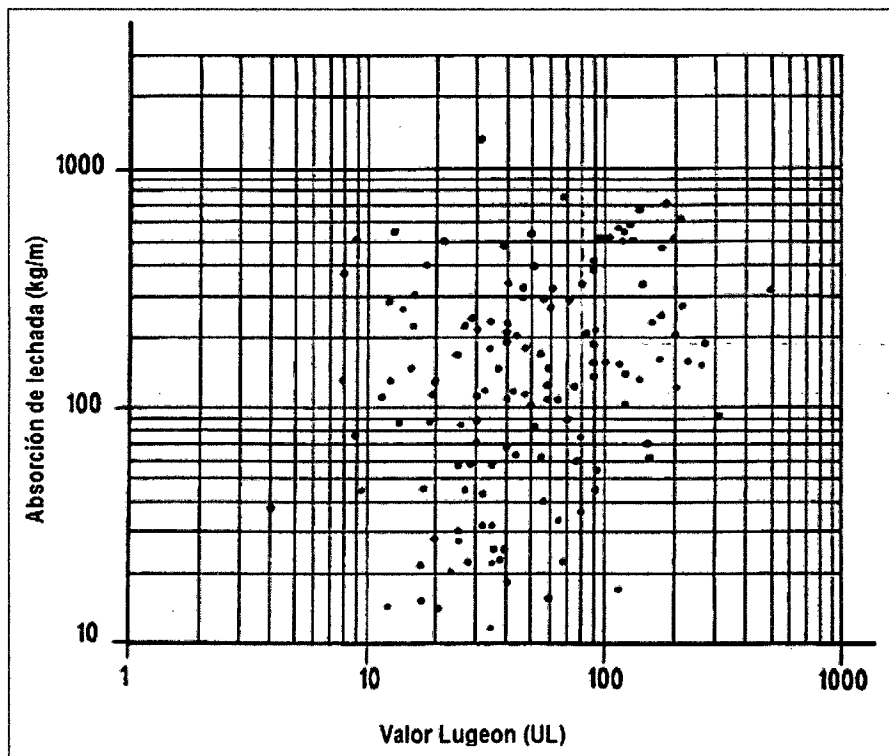


Figura N°5.3 Toma de Lechada vs Valor Lugeon (Ewart Jawantzky, 1985)

5.3 CRITERIO DE CIERRE

Hay opiniones diferentes sobre la forma de definir el criterio de cierre aceptable para las cortinas de impermeabilización, y sobre cómo seleccionar los límites. Esto es fundamental para la pregunta sobre si fue suficiente la inyección de lechada que se ha llevado a cabo. Los criterios desarrollados son el criterio de permeabilidad y el criterio de toma (absorciones).

5.3.1 CRITERIO DE PERMEABILIDAD

Houlsby (1977) recomienda realizar el criterio de cierre mediante el ensayo Lugeon. Este criterio consiste en:

- Para presas mayores a 30 m de altura, la inyección es innecesaria si el ensayo Lugeon resulta menor a la unidad Lugeon ($< 1UL$).
- Para presas menores a 30 m de altura, la inyección es innecesaria, si el ensayo Lugeon resulta menor a tres unidades Lugeon ($< 3UL$).

Donde:

$$1UL = 1.3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

5.3.2 CRITERIO DE TOMA (ABSORCIONES)

Deere (1982) sugiere un método de cierre basado en el registro de la 'toma' de lechada, es decir; la cantidad de lechada absorbida en la roca por metro de perforación de inyección (kg/m), ver cuadro N°5.1 y 5.2.

Cuadro N°5.1
Absorciones máximas

INTERVALO DE PROFUNDIDAD (m)	TOMA DE LECHADA (kg/m)
0 - 10	25
10 - 20	35
20 - 30	50
> 30	100

Cuadro N°5.2
Clasificación de absorción de lechada

TOMA DE LECHADA (kg/m)		
COLOR	RANGO	CLASIFICACIÓN
	0 - 12.5	Muy baja
	12.5 - 25	Baja
	25 - 50	Moderadamente baja
	50 - 100	Moderada
	100 - 200	Moderadamente alta
	200 - 400	Alta
	> 400	Muy alta

En resumen se recomienda lo siguiente: cuando la absorción de lechada en el taladro secundario es mayor que los límites indicados, se requieren taladros terciarios, y si la toma de lechada en el taladro terciario es mayor que los límites establecidos, se requiere taladros cuaternarios y así consecutivamente. De la experiencia en diferentes proyectos, ha sido suficiente realizar hasta el taladro quinario para el criterio de cierre, debido al espaciamiento y la toma muy baja resultante.

5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico es un potencial método aplicable durante la construcción de la cortina de inyección. Se examina estadio por estadio y se realiza un análisis de los datos, evaluando los estadios que se han inyectado y que han llegado a una presión máxima y a un caudal máximo aceptado, de acuerdo a la instrucción de campo. Esta evaluación se realiza mediante los datos de la toma de lechada.

a. Sumatoria de curvas

En la sumatoria de curvas de absorción de lechada se hace una comparación y evaluación de las tomas de lechada por estadio. Consiste en elaborar gráficos de series logarítmicas; en el eje X se coloca los valores de toma de lechada ordenados de menor a mayor, y en el eje Y se coloca los valores acumulados en porcentaje de los estadios (intervalos o tramos de inyección).

En esta curva se monitorea de manera minuciosa los trabajos de impermeabilización, verificando el comportamiento general de todos los taladros.

b. Distribución de frecuencias

Deere (1976), realiza la evaluación de tomas de los taladros de un tramo o varios tramos (estadios), de taladros primarios, secundarios, terciarios, etc. mediante los histogramas de frecuencia.

Para la elaboración de los histogramas de frecuencia las tomas (absorciones) de lechada se han clasificado en cinco tipos, según el cuadro N°5.3.

Cuadro N°5.3
Clasificación de toma de lechada (Deere, 1976)

TOMA DE LECHADA (kg/m)	
RANGO	CLASIFICACIÓN
0 - 25	L = Baja
25 - 50	ML = Moderadamente baja
50 - 100	M = Moderada
100 - 200	MH = Moderadamente alta
> 200	H = Alta

c. Evaluación logarítmica

La evaluación logarítmica consiste en plotear todos los datos de la cortina de inyecciones, estadio por estadio, en función de la profundidad. En el eje X se coloca los valores de la toma de lechada, y en el eje Y se colocan los valores ponderados de cada tramo (profundidades). Es importante el criterio y experiencia para su correcta interpretación, para evaluar la toma máxima de diseño requerido.

CAPÍTULO VI

APLICACIÓN EN LA PRESA PALLCA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA HUANZA, HUAROCHIRÍ – LIMA

6.1 INTRODUCCIÓN

La infraestructura de la Central Hidroeléctrica de Huanza está ubicada a 4200 m.s.n.m. en la provincia de Huarochirí, región Lima. Esta comprende la ejecución de una presa, un túnel de conducción, una tubería forzada y una casa de máquinas. Asimismo, la construcción de una pequeña toma de agua que permitirá aumentar el caudal nominal vertido a los generadores. La central llegará a producir 96 MW que serán suministradas al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.

El proyecto utilizará para su operación el agua proveniente del túnel transandino y del río Conay. Las aguas serán embalsadas en la presa Pallca desde donde discurrirán a través del túnel de conducción y la tubería forzada hasta llegar a la casa de máquinas, para activar las turbinas de los generadores eléctricos (2x48 MW), los cuales tendrán una potencia o capacidad instalada de 96 MW.

Esta importante obra es realizada con la inversión privada de la empresa Generación Huanza que es una subsidiaria del Grupo Buenaventura. La generación de energía de esta central será utilizada para las minas y empresas que pertenecen al mismo grupo y traerá beneficios y desarrollo a los habitantes de Huanza.

La construcción de obras civiles del proyecto Central Hidroeléctrica Huanza está a cargo del consorcio Río Pallca formado por las constructoras: GyM S.A constructora peruana, y ASTALDI, constructora italiana que es considerada una de las mejores a nivel mundial y que actualmente está presente en 24 países.

6.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

La presa Pallca es una estructura de gravedad de concreto, cuyo objetivo es embalsar las aguas provenientes del río Pallca para su posterior derivación por medio del túnel de conducción hasta la casa de máquinas. Se encuentra ubicado en la cuenca del río Pallca, en el distrito de Huanza, provincia de Huarochoirí, región Lima, a 130 km de Lima. La presa se encuentra entre las cotas 4020 y 4065 msnm, tiene una altura máxima de 38.70 m. La coordenada UTM del punto donde se encuentra la presa es aproximadamente 8 716 400 N, 347 350 E. La ubicación geográfica del proyecto se observa en la figura N°6.1. La ubicación local de la presa Pallca se observa en el Anexo 3 – lámina 1.

Para la impermeabilización de la fundación se ha realizado una cortina de inyecciones a lo largo del eje de la presa, con una longitud de la cortina de 220 m aproximadamente.

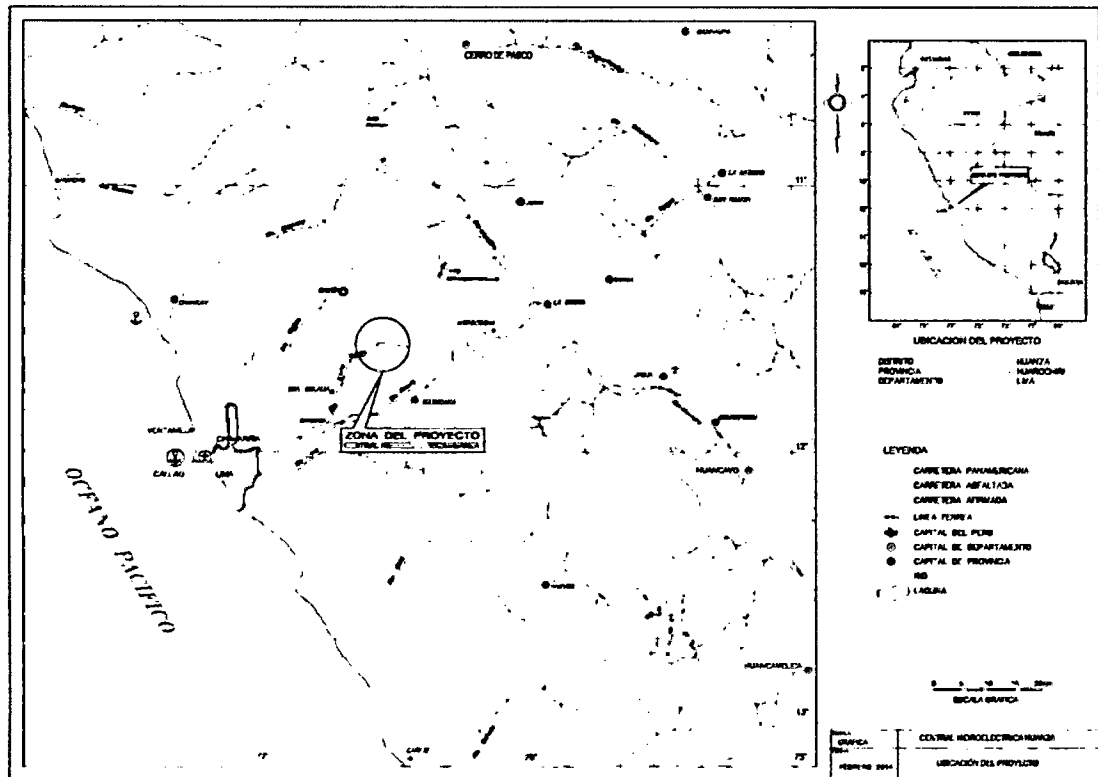


Figura N°6.1 Mapa de ubicación geográfica del proyecto.

6.3 ESTUDIO E INVESTIGACIÓN DE LA PRESA CON FINES DE IMPERMEABILIZACIÓN

6.3.1 INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA

Los estudios geológicos – geotécnicos realizados durante los estudios de factibilidad, excavación de la fundación y sondeos exploratorios para la cortina de inyección, permitieron conocer las características del macizo rocoso: litología y características de las discontinuidades, tales como su orientación y condiciones geotécnicas (abertura, continuidad, relleno, alteración); el perfil de meteorización, etc. Estos parámetros fueron la base principal para el diseño de la cortina de inyección.

El sector de la presa Pallca está constituido por rocas volcánicas del tipo andesitas grises, de textura granular a fina; superficialmente se tiene rocas fracturadas y a mayor profundidad rocas andesitas más compactas y macizas. Estas rocas ígneas volcánicas pertenecen al grupo Colqui del terciario inferior medio (Tim-cq). Las rocas aflorantes superficialmente presentan fuerte fracturamiento y alteración, ver Anexo 3 – láminas 2 y 3.

En el sitio se presentan fallas geológicas con aberturas mayores a 5 cm, con relleno de brechas, buzando al noroeste, es decir con dirección hacia el estribo derecho de la presa; su alineamiento es casi perpendicular al eje de la presa.

Las fracturas con aberturas de 1 a 5 mm, buzan tanto hacia el estribo izquierdo como derecho de la presa; éstas tienen un eje casi perpendicular al eje de la presa como se aprecia en el plano geológico, ver Anexo 3 – láminas 2 y 3.

6.3.2 ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO

Se tomaron en cuenta los datos de localización del nivel freático y caracterización de permeabilidad. Se distinguieron tramos con permeabilidades altas y tramos con permeabilidades bajas. Así fue posible definir la profundidad de la cortina de inyección. En el año 2009 se iniciaron con el programa de investigaciones realizando 3 perforaciones diamantinas en el eje de la presa y 2 perforaciones aguas arriba de la presa, en diferentes posiciones, direcciones y profundidad variable.

6.3.3 ESTUDIO HIDRÁULICO

Para el diseño del número de cortinas y la delimitación de las profundidades del taladro de inyección se tomaron como datos de entrada los parámetros: altura de presa, altura máxima del embalse, la respectiva variación de presiones hidrostáticas a lo largo de los estribos y el gradiente hidráulico.

6.3.4 TALADROS DE INVESTIGACIÓN

El programa de investigación de la cortina de inyecciones se inició en enero del 2009, con los taladros de exploración de la fundación, planteando ideas básicas de la cortina. Se retomó estas actividades en julio del 2012 con la perforación de cuatro taladros de investigación en el eje de la cortina de inyecciones de la presa Pallca (IMI-18, IMI-30, IMD-19 e IMD-31); los taladros tienen una orientación vertical. Las perforaciones fueron realizadas con extracción de muestras (perforaciones diamantinas), se realizó un registro de logueos, pruebas de agua (ensayo Lugeon) y las inyecciones de prueba. El cuadro N°6.1 resume los ensayos de permeabilidad. Las figuras N°6.2 y N°6.3 ilustran las cajas de testigos obtenidos de las perforaciones de investigación.

Cuadro N°6.1

Cuadro resumen de los taladros de investigación 2012.

CÓDIGO	DE	A	LUGEON		RQD
			UL	cm/s	%
IMI-18	1.0	5.0	20.86	2.71E-04	No se ha realizado perforación con recuperación
	5.0	10.0	26.91	3.50E-04	
	10.0	15.0	12.07	1.57E-04	
	15.0	17.5	29.93	3.89E-04	
	17.5	25.0	18.70	2.43E-04	
IMI-30	1.0	6.0	0.01	8.32E-08	79.99
	6.0	10.0	0.97	1.26E-05	65.00
	10.0	15.0	13.54	1.76E-04	59.75
	15.0	20.0	4.45	5.79E-05	70.15
	20.0	25.0	15.97	2.08E-04	76.21
	25.0	30.0	14.80	1.92E-04	76.91
	30.0	33.0			15.00
IMD-31	1.0	6.0	0.27	3.53E-06	77.75
	6.0	11.0	3.54	4.60E-05	87.50
	11.0	16.0	2.19	2.85E-05	65.29
	16.0	21.5	0.06	8.26E-07	76.80
	21.5	26.0	1.46	1.90E-05	53.61
	26.0	30.0	10.73	1.40E-04	71.00
IMD-19	1.0	6.0	0.09	1.17E-06	86.66
	6.0	11.0	0.57	7.41E-06	82.67
	11.0	15.0	3.27	4.25E-05	71.87
IMD-19A	14.0	21.0	33.60	4.37E-04	8.66

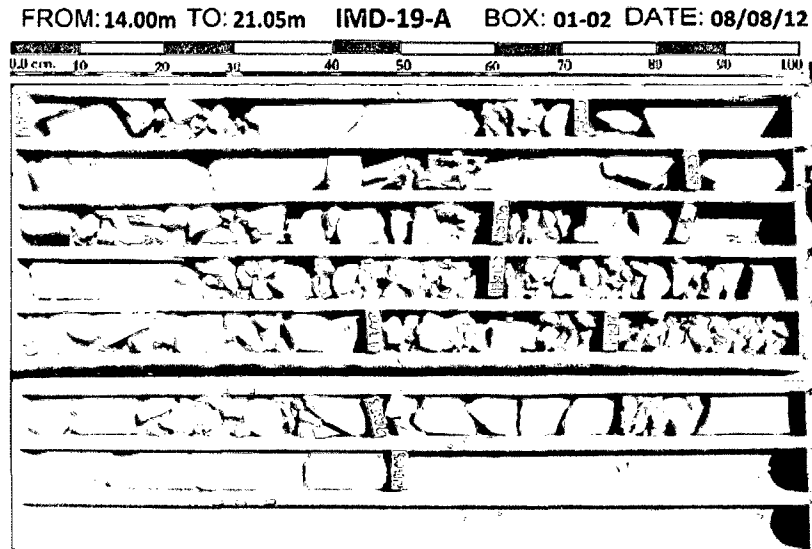


Figura N°6.2 Caja de testigos con muestra del taladro IMD-19A.

En la figura N°6.2 se observa rocas volcánicas andesitas de color gris, con presencia de óxido, y fractura rellenas con limos y clastos que durante la perforación fueron lavados. Roca tipo III a tipo IV.

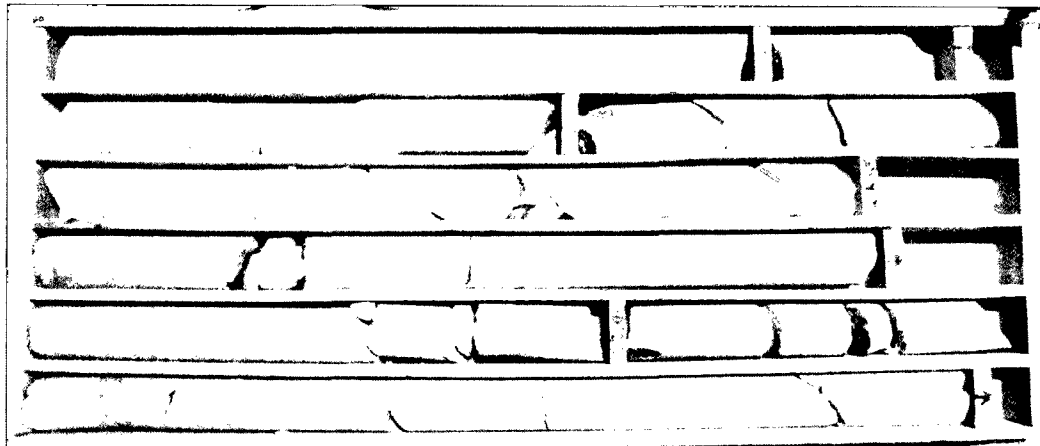


Figura N°6.3 Caja de testigos con muestra del taladro IMI-30, tramo de 24 a 29 m.

En la figura N°6.3 se observa roca volcánica Andesita de color gris oscura a claro, roca de buena calidad. Roca tipo II.

La interpretación de los datos de investigación logueos, mapeo geológico a lo largo de la cortina de la presa Pallca, etc. indica que existe una correlación entre la litología de la fundación de roca y las características físicas de la roca. En la figura N°6.4 se muestra el perfil longitudinal de la cortina de inyecciones con los taladros de investigación, valores RQD y sus respectivos valores Lugeon en cada tramo ensayado.

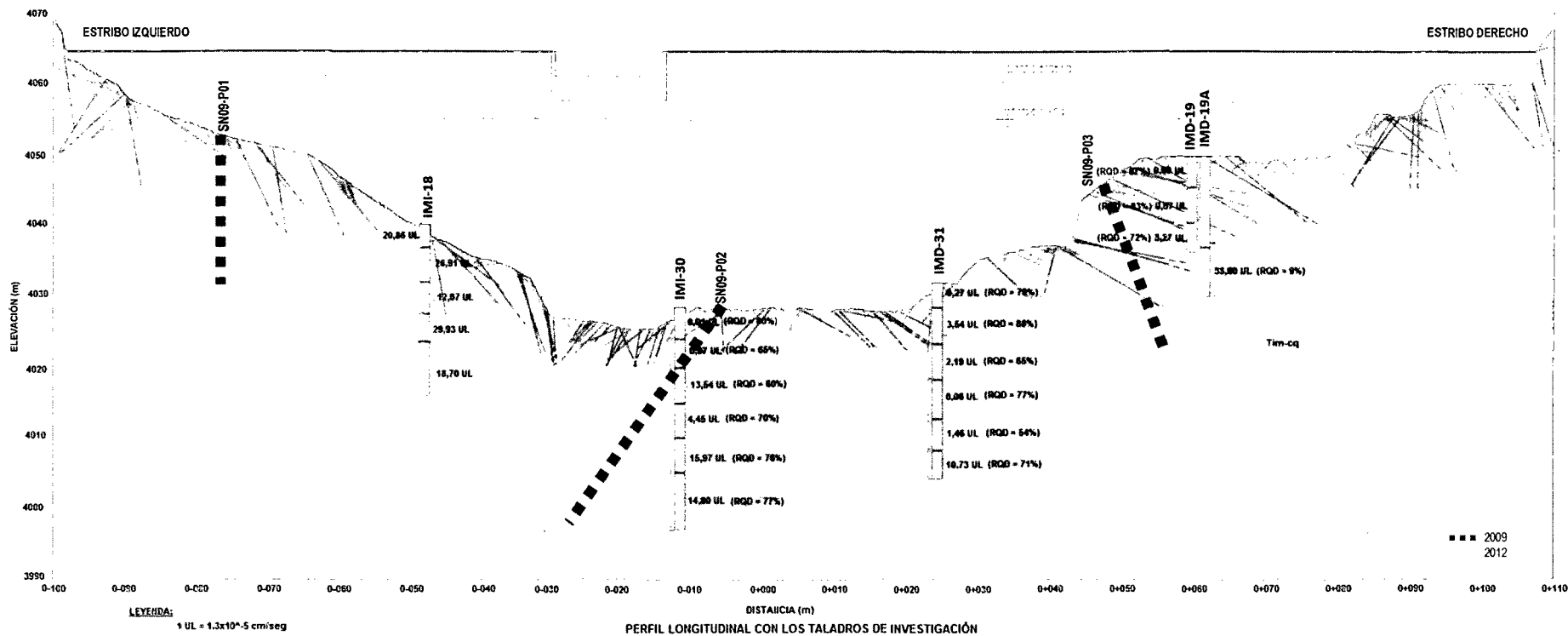


Figura N°6.4 Perforaciones de investigación con ensayos Lugeon y RQD.

6.4 DISEÑO DE LA CORTINA DE INYECCIÓN

a. Profundidad de los taladros de inyección

La profundidad de la cortina es variable, se ha utilizado como guía el criterio de Ridas (2007) y A. J. Schleiss, H. Pougatsch (2011), como $2/3 H$ (H: carga hidrostática); la profundidad de la cortina varía de 10 m a 25 m, en el estribo derecho e izquierdo de la presa se tienen profundidades menores y la profundidad mayor del taladro es en la parte más baja de la fundación.

En base a los resultados de los ensayos de prueba de agua y mapeo geomecánico estructural de la fundación, en algunos tramos se ha profundizado la longitud, de acuerdo a la experiencia y criterio del diseñador.

b. Espaciamiento de los taladros de inyección

La distribución entre distancias horizontales de los taladros, se ha analizado teniendo en consideración la geología de la zona, la permeabilidad y el número de líneas de la cortina de diseño.

Los espaciamientos entre perforaciones son los que se indican en la tabla:

<i>Orden de Perforación</i>	<i>Espaciamiento (m)</i>
Primaria	6
Secundaria	3
Terciaria	1.5

La cortina de inyección es de una sola línea, para lo cual se recomienda hacer perforaciones con menor espaciamiento, para tener una inyección continua. La longitud de la cortina de inyección de la presa Pallca es de 220 m.

c. Inclinación de los taladros de inyección

Para el análisis de inclinación de los taladros de la cortina de inyección se ha realizado una evaluación geológica a partir del mapeo de la orientación de las fracturas en la presa Pallca. Estos datos se han recopilado mediante la participación directa del geólogo y, en la lámina 2 (Anexo 3) se muestra la ubicación de las zonas donde se ha recolectado la información. Para el análisis se ha utilizado el programa DIPS como se muestra a continuación.

- Estructura geológica en el estribo derecho de la presa Pallca.

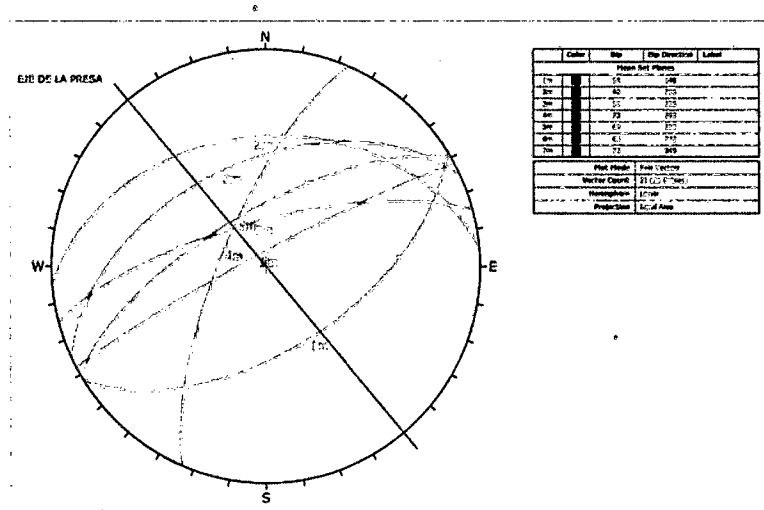


Figura N°6.5 Proyección estereográfica de estructuras geológicas.

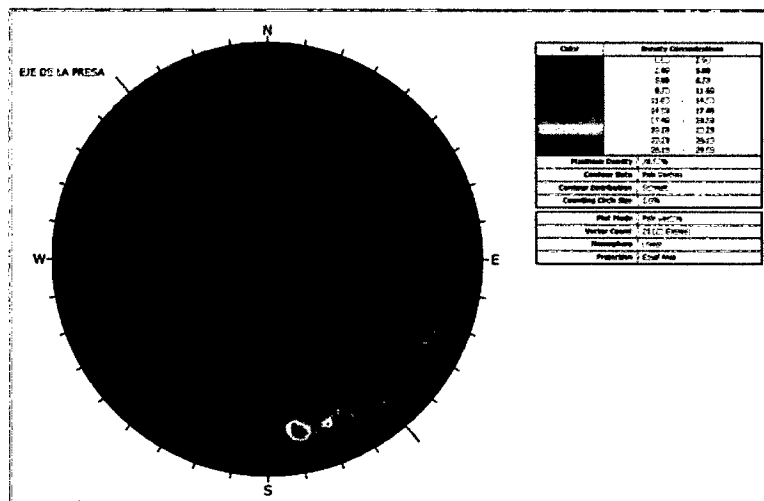


Figura N°6.6 Concentración de los polos de las fallas y diaclasas.

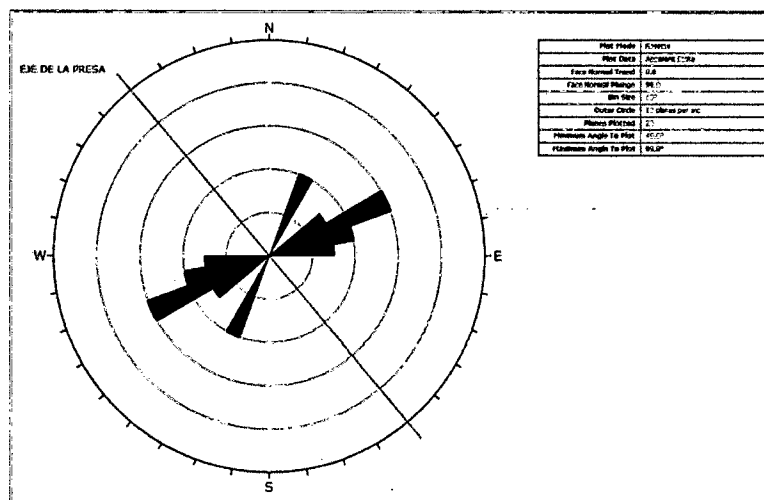


Figura N°6.7 Diagrama de roseta (Rosette Plot) orientación de las estructuras geológicas.

- Estructura geológica en el estribo izquierdo de la presa Pallca.

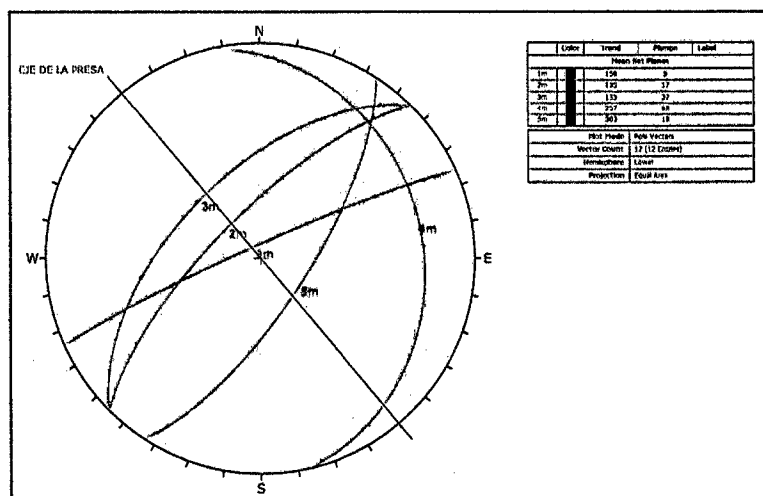


Figura N°6.8 Proyección estereográfica de estructuras geológicas.

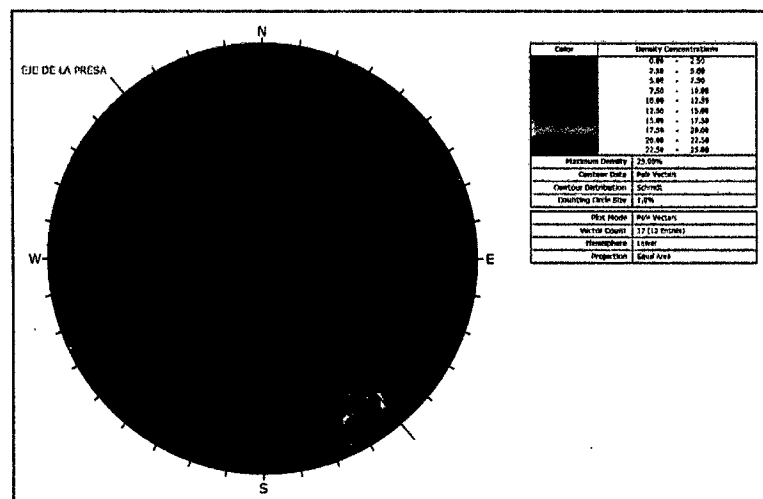


Figura N°6.9 Concentración de los polos de las fallas y diaclasas.

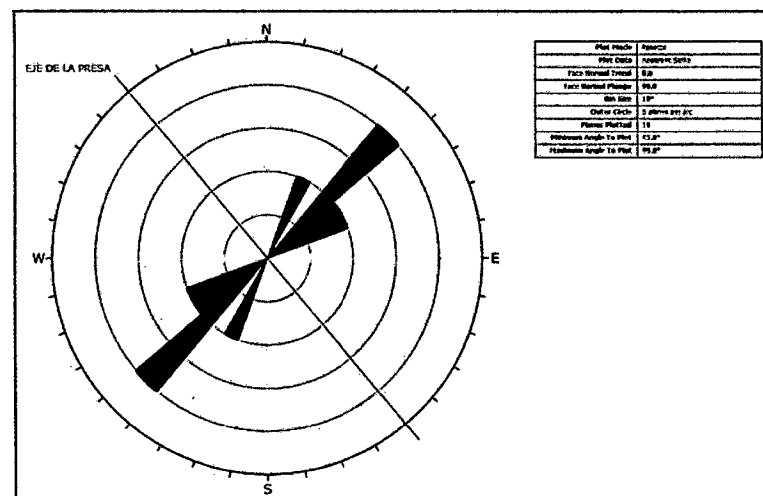


Figura N°6.10 Diagrama de roseta (rosette plot) orientación de las estructuras geológicas.

- Estructura geológica en el fondo del valle de la presa Pallca.

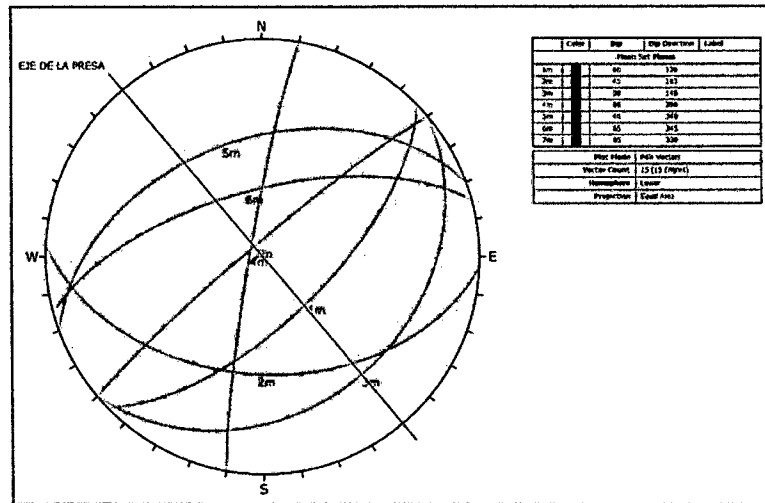


Figura N°6.11 Proyección estereográfica de estructuras geológicas.

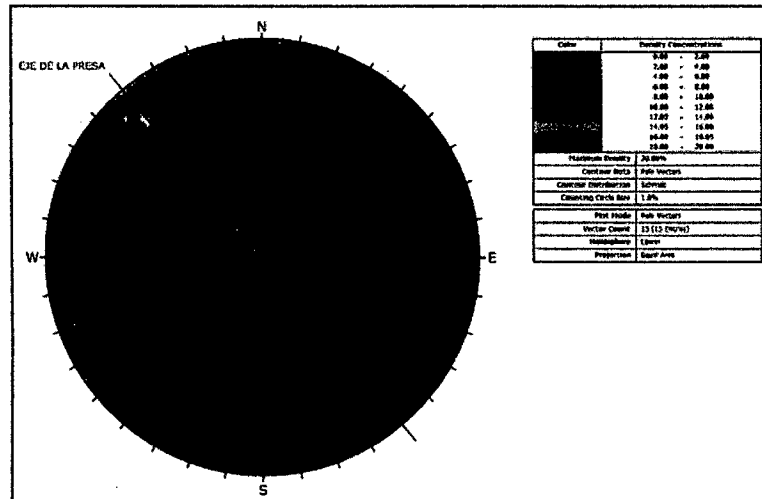


Figura N°6.12 Concentración de los polos de las fallas y diaclasas.

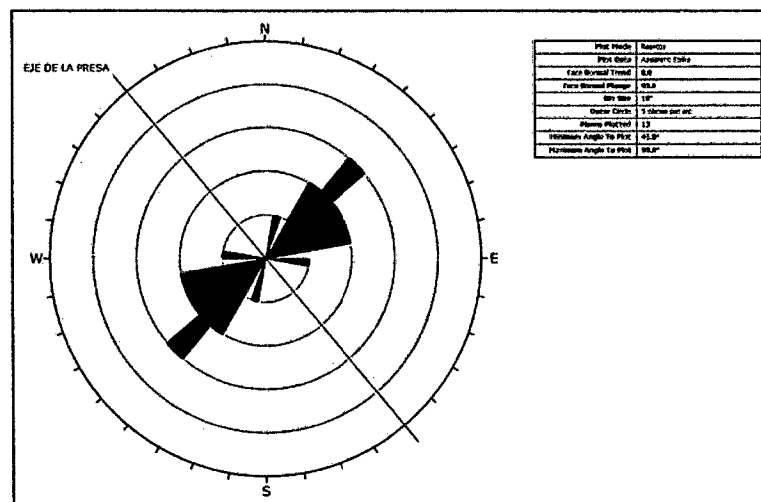


Figura N°6.13 Diagrama de roseta (rosette plot) orientación de las estructuras geológicas.

De la gráfica DIPS, se puede ver que se tiene una mayor concentración de estructuras geológicas con dirección SW-NE, ligeramente perpendicular al eje de la presa Pallca. De los planos geológicos estructurales (ver Anexo 3 – láminas 2 y 3) se tiene que los buzamientos correspondientes se encuentran entre 50° a 75° (localmente llegan hasta 35°) hacia el NW.

A partir de las proyecciones estereográficas y las concentraciones de las estructuras geológicas, así como del mapeo geológico estructural (ver Anexo 3 – láminas 2 y 3), se tiene que estas estructuras persisten hacia aguas arriba y aguas abajo, con inclinación entre 50° y 75° hacia el NW. Por ello, para la inclinación de los taladros en la cortina de inyección de la presa Pallca se eligió realizar las perforaciones en forma vertical (-90°).

En el diseño de la cortina de inyección, es decir, la definición del número de cortinas, profundidad, orientación de las perforaciones, espaciamiento, y la selección de la metodología de inyección se tomaron en cuenta los siguientes criterios: geología, condiciones hidrogeológicas, geomecánicas, hidráulicas, modelo y configuración de la cortina, más detalles se presenta en el capítulo 2.

6.5 DISEÑO DE MEZCLA Y PRESIONES DE INYECCIÓN

6.5.1 DISEÑO DE MEZCLA

Se llevó a cabo una serie de pruebas (en total 37 mezclas con diferentes dosificaciones) para el diseño de la mezcla de la lechada. En el laboratorio del Consorcio Río Pallca (CRP) y central de inyecciones instalada en el estribo derecho de la presa, se han llevado a cabo las pruebas básicas con mezcla de lechada estable, preparando en el mezclador cemento Portland tipo I, bentonita y aditivo en relación a/c de 0.5:1 a 1:1, con temperatura superior a 5°C.

6.5.1.1 ENSAYOS DE MEZCLAS DE LECHADA

Para el ensayo de mezcla de lechada se han utilizado los siguientes materiales: cemento, agua, aditivo.

- *Cemento.*- Se utilizó el cemento Portland tipo I y el cemento IP fabricado por Cementos Andino S.A – Perú, su valor de Blaine varia en el rango de 3050 a 3200 cm²/g.

- *Agua.*- El agua utilizada fue del río Pallca, teniendo un pH cerca de 7.4 y cantidad de sulfatos de 123 ppm. El agua es clara, sin presencia de turbidez.
- *Aditivo.*- El aditivo que se utilizó en la preparación de diferentes mezclas fue el Rheobuild 1000, que es un reductor de agua, tiene un peso específico de 1.21 g/cm³. El Rheobuild es un líquido de color marrón oscuro que se añade al agua de la mezcla en cantidades de 0.5 a 1.0% en peso del cemento.

Para la ejecución de los ensayos se usaron los siguientes equipos básicos requeridos:

- Cono de Marsh
- Balanza de lodos
- Placa de acero 100x100mm
- Probeta graduada de 1000 ml de plástico
- Aguja de Vicat
- Balanza digital de 500gr
- Moldes de briquetas
- Termómetro de aguja
- Cronómetro

Los ensayos que se realizaron en el laboratorio de CRP y la central de inyecciones son los siguientes:

- Fluidez de Marsh (ASTM D6910)
- Cohesión de Lombardi
- Densidad (ASTM C4380)
- Sedimentación (ASTM C243)
- Tiempo de fraguado (ASTM C191)
- Resistencia a la compresión (ASTM C349)
- Temperatura

Los resultados de los ensayos de diseño de mezcla se resumen en el cuadro N°6.2. Con los resultados obtenidos se ha elaborado el análisis estadístico mediante gráficas como se observa en las figuras N°6.14 al N°6.21.

Cuadro N°6.2

Cuadro de resultados de los ensayos de lechada.

ENSAYOS DE LECHADA PARA LA CORTINA DE IMPERMEABILIZACIÓN PRESA PALLCA													
Fecha	Mezcla	Cemento	Relación a/c	Rheobuild	Bentonita	Temperatura mezcla (°C)	Fluidez (seg)	Densidad (g/cm3)	Cohesión (g/cm2)	Cohesión relativa (mm)	Sedimentación 2 horas	Fragua Inicial	Fragua Final
7-Jul-12	1	IP	1 : 1	1%	0%	18.1	29.44	1.52	0.016	0.102	7.5%	22:00	8:00
7-Jul-12	2	IP	0.9 : 1	1%	0%	17.4	29.91	1.56	0.019	0.119	7.0%	20:40	6:00
7-Jul-12	3	IP	0.8 : 1	1%	0%	15.3	30.72	1.59	0.020	0.126	10.0%	20:20	5:00
7-Jul-12	4	IP	0.7 : 1	1%	0%	16.5	34.07	1.69	0.029	0.169	1.5%		
7-Jul-12	5	IP	0.6 : 1	1%	0%	18.3	35.59	1.73	0.033	0.191	1.0%		
7-Jul-12	6	IP	0.5 : 1	1%	0%	17.6	42.14	1.81	0.041	0.227	0.5%		
8-Jul-12	7	IP	1 : 1	0.5%	0%	16.1	30.70	1.49	0.019	0.124	15.0%	23:40	11:40
8-Jul-12	8	IP	0.95 : 1	0.5%	0%	14.4	30.30	1.52	0.020	0.129	13.0%	23:40	9:20
8-Jul-12	9	IP	0.9 : 1	0.5%	0%	15.8	30.39	1.55	0.025	0.162	10.0%	22:00	9:00
8-Jul-12	10	IP	0.85 : 1	1%	0%	15.9	30.98	1.58	0.022	0.139	10.0%	19:20	6:00
8-Jul-12	11	IP	0.75 : 1	1%	0%	14.7	31.66	1.63	0.025	0.151	1.5%	19:20	5:20
8-Jul-12	12	IP	0.65 : 1	1%	0%	16.0	34.84	1.75	0.032	0.180	1.0%	7:30	12:50
8-Jul-12	13	IP	0.8 : 1	1%	0%		30.93	1.60	0.019	0.119	8.0%		
9-Jul-12	14	I	1 : 1	1%	0%	15.2	29.78	1.52	0.013	0.086	11.0%	17:00	0:50
9-Jul-12	15	I	0.9 : 1	1%	0%	14.5	30.49	1.60	0.016	0.100	10.0%	13:40	20:40
9-Jul-12	16	I	0.8 : 1	1%	0%	16.5	30.61	1.61	0.017	0.106	13.0%	18:00	2:00
9-Jul-12	17	I	0.7 : 1	1%	0%	16.6	29.66	1.65	0.023	0.137	9.0%	15:00	1:00
9-Jul-12	18	I	0.6 : 1	1%	0%	17.4	32.64	1.76	0.024	0.134	1.5%	6:00	19:00
9-Jul-12	19	I	0.5 : 1	1%	0%	17.4	36.32	1.84	0.033	0.177	0.5%	7:40	11:00
10-Jul-12	20	I	0.85 : 1	0.5%	0%	15.1	30.76	1.60	0.022	0.138	21.0%	13:00	22:00
10-Jul-12	21	I	0.8 : 1	0.5%	0%	14.9	30.58	1.61	0.024	0.151	13.0%	12:40	21:00
10-Jul-12	22	I	0.75 : 1	1%	0%	15.0	30.50	1.63	0.021	0.129	10.0%	2:15	9:15
10-Jul-12	23	I	0.7 : 1	1%	0.5%	15.7	32.06	1.67	0.030	0.181	1.0%	10:15	17:15
10-Jul-12	24	I	0.9 : 1	1%	0.5%	14.9	30.99	1.58	0.021	0.132	13.0%	11:20	19:00
10-Jul-12	25	I	0.8 : 1	1%	0.5%	17.0	32.02	1.61	0.027	0.167	12.0%	10:40	20:00
20-Jul-12	26	I	0.75 : 1	0.5%	0.5%	19.1	33.00	1.65	0.044	0.264	2.0%	10:40	17:20
20-Jul-12	27	I	0.75 : 1	1%	0%	14.5	29.78	1.66	0.028	0.169	4.2%	10:40	19:00
20-Jul-12	28	I	0.75 : 1	0.5%	0%	16.0	30.37	1.66	0.028	0.170	3.6%	9:40	19:00
20-Jul-12	29	I	0.7 : 1	0.5%	0%	16.0	31.78	1.68	0.026	0.155	2.9%	9:30	17:40
20-Jul-12	30	I	0.65 : 1	0.5%	0%	17.1	31.90	1.72	0.039	0.227	2.2%	9:20	17:00
20-Jul-12	31	I	0.8 : 1	0.5%	0%	15.6	29.28	1.63	0.018	0.111	18.0%	8:40	19:00
21-Jul-12	32	I	0.9 : 1	0.5%	0.5%	20.5	31.56	1.59	0.032	0.199	4.0%	9:20	22:20
21-Jul-12	33	I	0.85 : 1	0.5%	0.5%	19.5	31.82	1.59	0.034	0.212	3.0%	10:20	21:40
21-Jul-12	34	I	0.8 : 1	0.5%	0.5%	19.4	32.50	1.61	0.037	0.232	1.8%	9:40	19:40
21-Jul-12	35	I	0.8 : 1	0.5%	0%	18.3	31.44	1.61	0.026	0.163	18.0%	10:20	21:20
21-Jul-12	36	I	0.75 : 1	0.5%	0%	19.0	32.41	1.66	0.026	0.159	4.0%	9:40	20:40
21-Jul-12	37	I	0.7 : 1	0.5%	0%	19.0	34.09	1.68	0.042	0.249	2.0%	9:00	19:40

Peso específico del cemento Andino IP 2,98 g/cm3
 Peso específico del cemento Portland tipo I 3,15 g/cm3
 Peso específico de aditivo Rheobuild 1000 1,21 g/cm3
 Peso específico de bentonita sódica 2,50 g/cm3

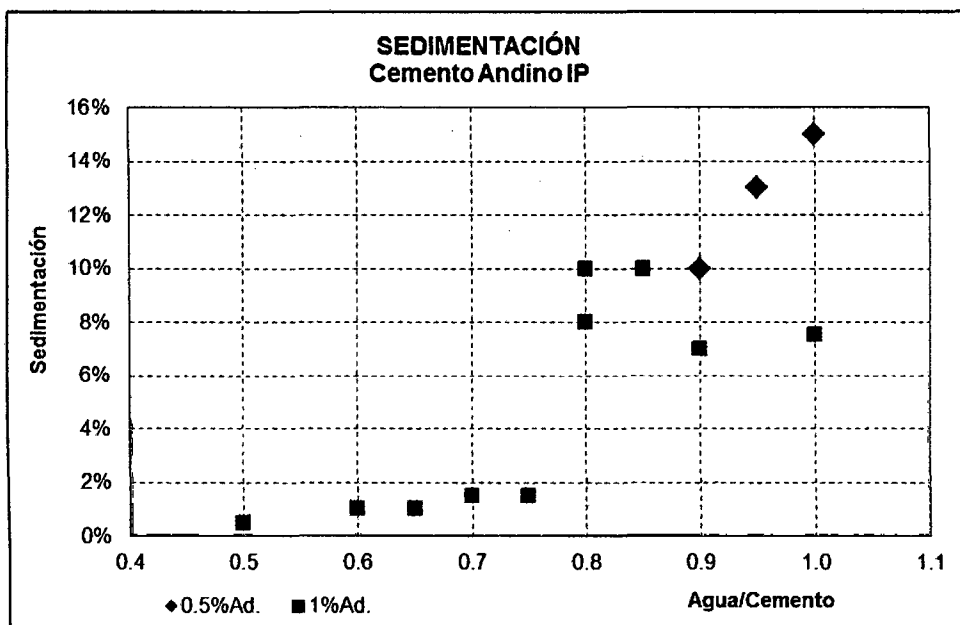


Figura N°6.14 Ensayo de sedimentación, cemento andino IP.

En la figura N°6.14 se observa que las mezclas con dosificaciones mayores a 0.75:1 es inestable, la sedimentación es mayor a 5%.

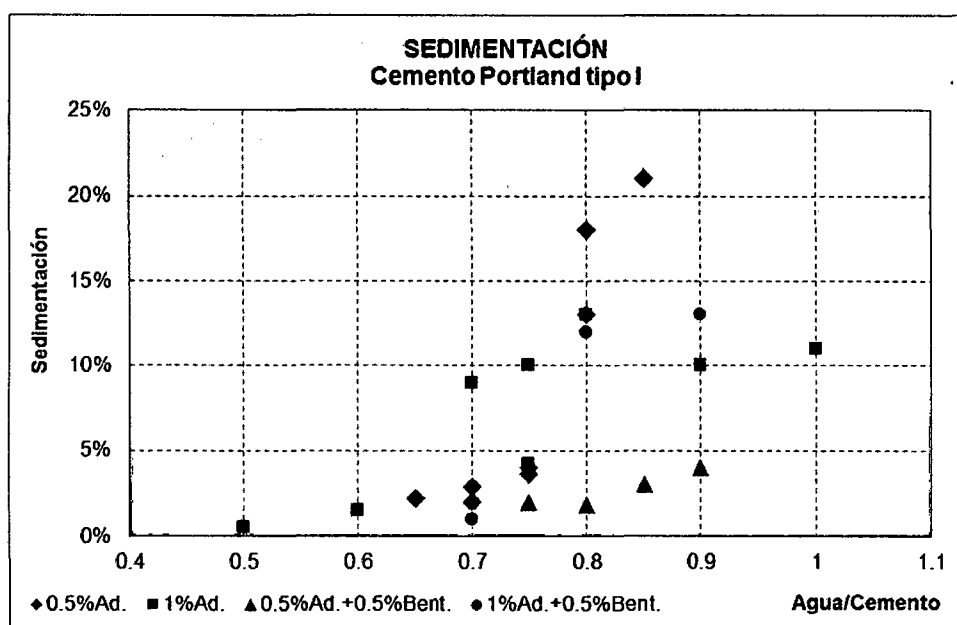


Figura N°6.15 Ensayo de sedimentación, cemento Portland tipo I.

En la figura N°6.15 se observa que las mezclas con 0.5% de aditivo más 0.5% de bentonita (relación en peso de cemento) es estable, la sedimentación es menor a 5%.

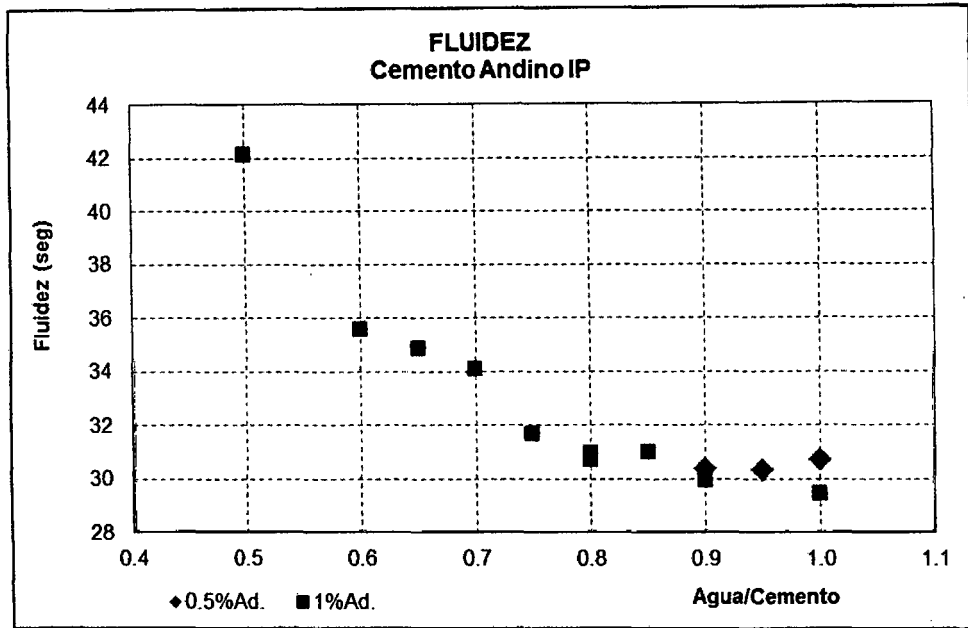


Figura N°6.16 Ensayo de fluidez, cemento andino IP.

En la figura N°6.16 se observa que las mezclas con 1% de aditivo mejora el comportamiento de la lechada, donde la relación agua/cemento es inversamente proporcional a la fluidez.

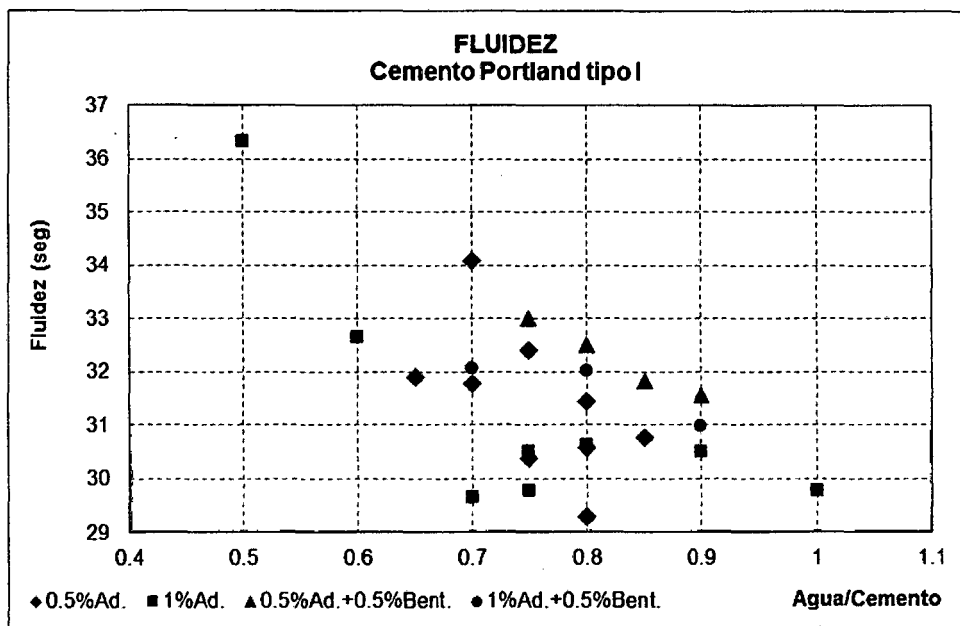


Figura N°6.17 Ensayo de fluidez, cemento Portland tipo I.

En la figura N°6.17 se observa que las mezclas con 0.5% de aditivo más 0.5% de bentonita 1% mejora el comportamiento de la lechada, donde se observa una función lineal inversa.

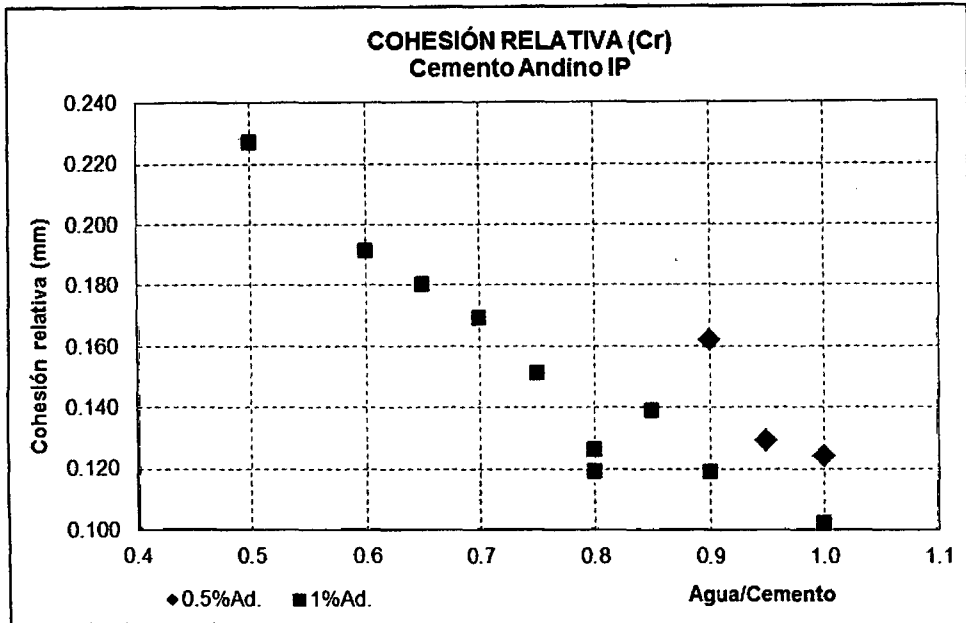


Figura N°6.18 Gráfico de cohesión relativa, cemento andino IP.

En la figura N°6.18 se observa que las mezclas con 1% de aditivo y las dosificaciones que varían en el rango de 0.75:1 a 1:1, disminuye la resistencia al corte de la lechada, aumentando la penetrabilidad de la mezcla.

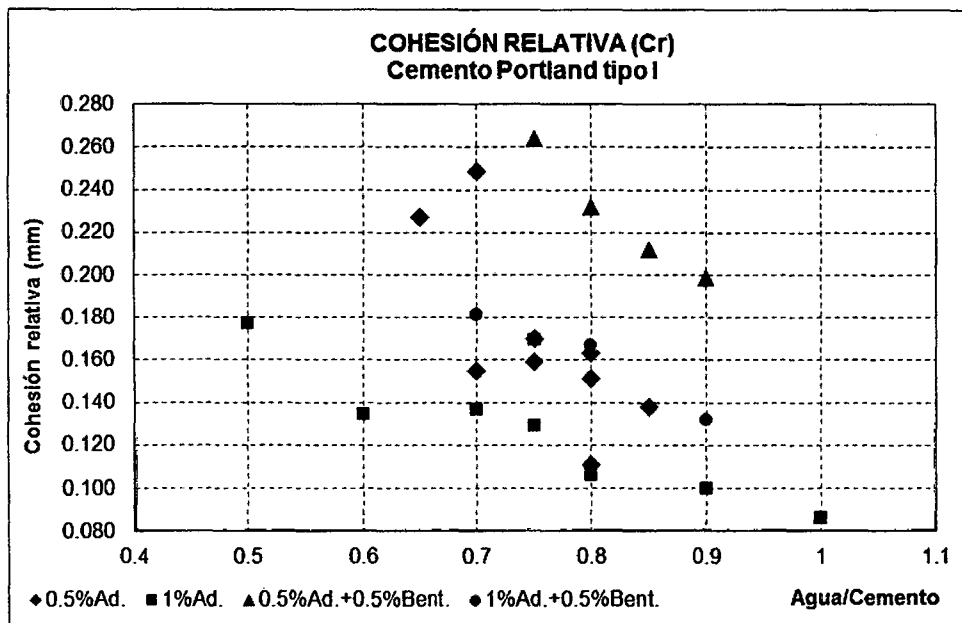


Figura N°6.19 Gráfica de cohesión relativa, cemento Portland tipo I.

En la figura N°6.19 se observa que las mezclas con 0.5% de bentonita aumenta la resistencia al corte de la lechada, disminuyendo la penetrabilidad de la mezcla.

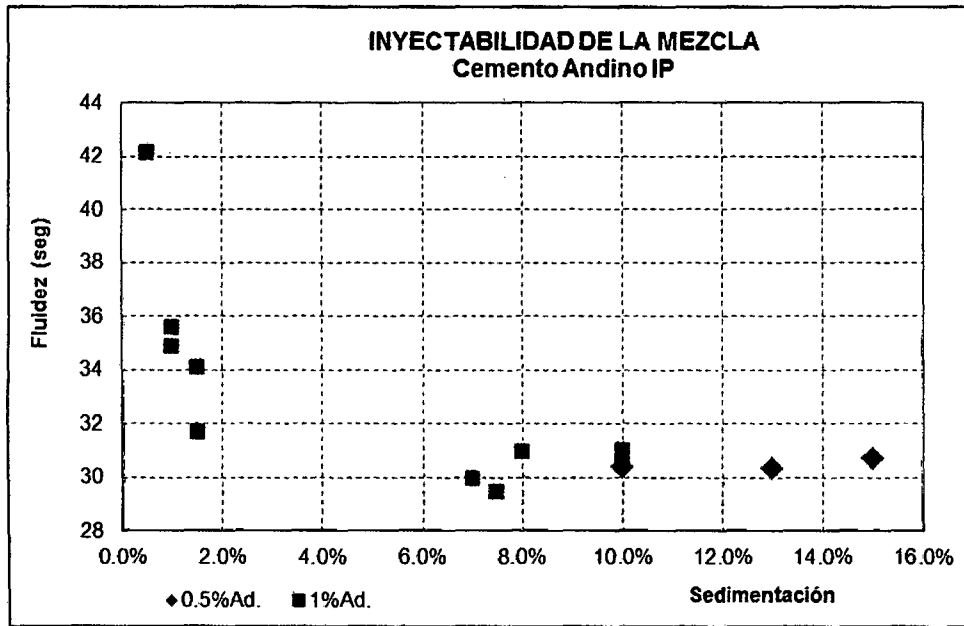


Figura N°6.20 Gráfica de inyectabilidad de la mezcla, cemento andino IP.

En la figura N°6.20 se observa que las mezclas con 0.5% de aditivo la sedimentación es mayor a 10%, dando indicio de la inestabilidad de la mezcla.

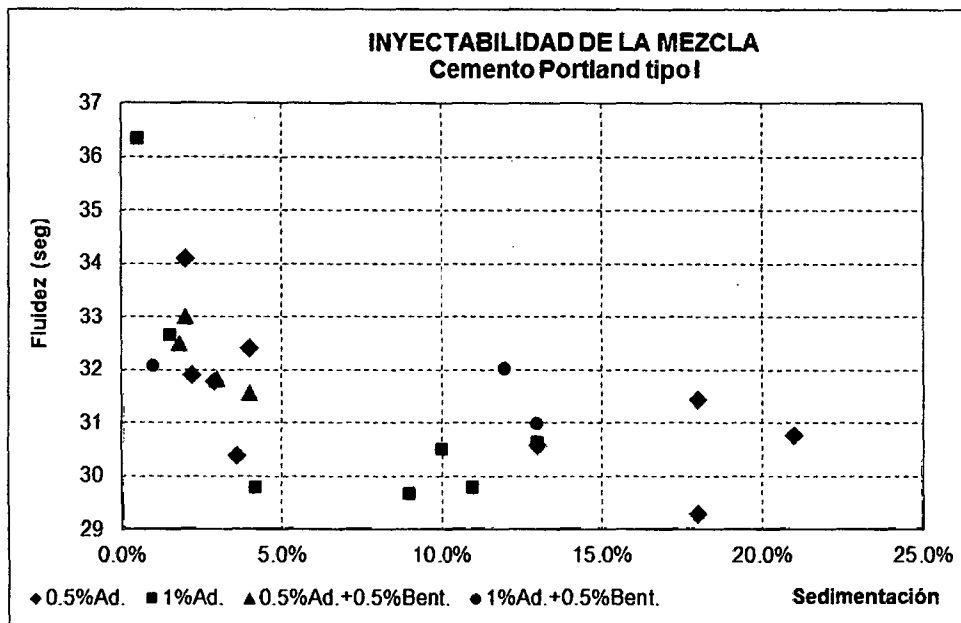


Figura N°6.21 Gráfica de inyectabilidad de la mezcla, cemento Portland tipo I.

En la figura N°6.21 se observa 50% de las mezclas tienen sedimentación menor a 5% y la fluidez varía en el rango de 30 a 35 segundos en promedio.

6.5.1.2 SELECCIÓN DE LA MEZCLA DE DISEÑO

Del análisis de las curvas típicas (gráfico de sedimentación, fluidez, cohesión e inyectabilidad) se ha seleccionado las posibles mezclas de inyección:

- 0.9:1+0.5%+0.5% (a/c + aditivo + bentonita)
- 0.75:1+0.5% (a/c + aditivo)
- 0.65:1+0.5% (a/c + aditivo)
- 0.6:1+1% (a/c + aditivo)
- 0.5:1+1% (a/c + aditivo)

Con los datos de dosificaciones seleccionadas como posibles mezclas de estables para la inyección, se grafica la curva de inyectabilidad, ver figura N°6.22. De la gráfica se selecciona como mezcla de partida la dosificación 0.75:1+0.5% de aditivo plastificante (Rheobuild 1000), seguido por la dosificación 0.65:1+0.5% de aditivo plastificante y, para absorciones altas se ha seleccionado la dosificación 0.5:1+1% de aditivo plastificante. En el cuadro N°6.3 se muestra la mezcla seleccionada.

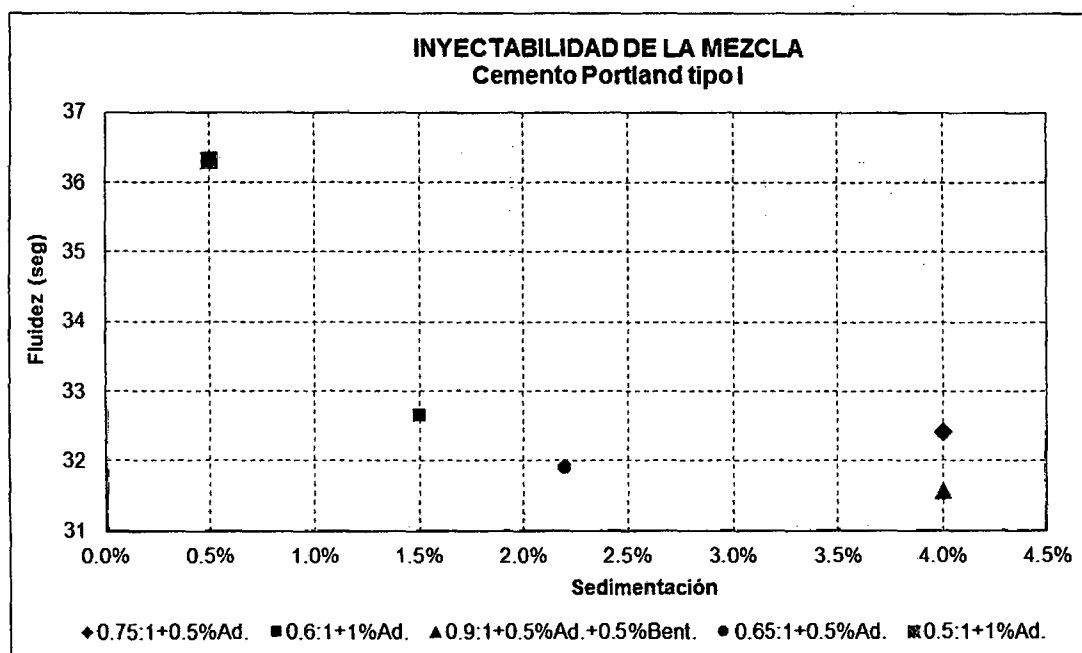


Figura N°6.22 Inyectabilidad de la mezcla seleccionada.

Cuadro N°6.3

Mezcla seleccionada para la cortina de inyección.

ENSAYOS DE LECHADA PARA LA CORTINA DE IMPERMEABILIZACIÓN PRESA PALLCA													
Fecha	Mezcla	Cemento	Relación a/c	Rheobuild	Bentonita	Temperatura mezcla (°C)	Fluidez (seg)	Densidad (g/cm ³)	Cohesión (g/cm ²)	Cohesión relativa (mm)	Sedimentación 2 horas	Fragua Inicial	Fragua Final
9-Jul-12	19	I	0.5 : 1	1%	0%	17.4	36.32	1.84	0.033	0.177	0.5%	7:40	11:00
20-Jul-12	30	I	0.65 : 1	0.5%	0%	17.1	31.90	1.72	0.039	0.227	2.2%	9:20	17:00
21-Jul-12	36	I	0.75 : 1	0.5%	0%	19.0	32.41	1.66	0.026	0.159	4.0%	9:40	20:40

Peso específico del cemento Andino Portland tipo I 2,98 g/cm³

Peso específico de aditivo Rheobuild 1,21 g/cm³

6.5.2 PRESIONES DE INYECCIÓN

Se establecieron presiones manométricas para los taladros de investigación en función a las investigaciones geológicas (logueos, RQD) y las investigaciones geotécnicas (ensayos de Lugeon) para caracterizar el material a inyectar; en el cuadro N°6.4 se muestra las presiones manométricas de acuerdo a la especificación técnica propuesta para la obra.

Cuadro N°6.4

Presiones manométricas propuestas.

Profundidad (m)	Presión manométrica (bar)
0 - 5	3
5 - 10	5
10 - 15	10
> 15	15

Se llevaron a cabo las pruebas de presión de inyección, en los taladros de exploración, ubicados en la galería de la presa, con código IMI-18, IMI-30, IMD-31, IMD-19 y IMD-19A (forma parte del taladro IMD-19), ver figura N°6.24. Los taladros fueron inyectados en tramos de 5 m de largo en profundidad, controlando la inyección en tiempo real.

En base a los resultados de los ensayos se determinaron las presiones máximas recomendadas, en el cuadro N°6.5 se muestra las presiones manométricas recomendadas en base a los resultados de los taladros de exploraciones.

Cuadro N°6.5

Presiones manométricas recomendadas.

Profundidad (m)	Presión manométrica (bar)
0 - 5	2.5
5 - 10	4
10 - 15	8
> 15	12

En la figura N°6.23 se puede observar la variación de la presión utilizada para el proyecto de la Central Hidroeléctrica de Huanza en función a las presiones recomendadas por diferentes autores.

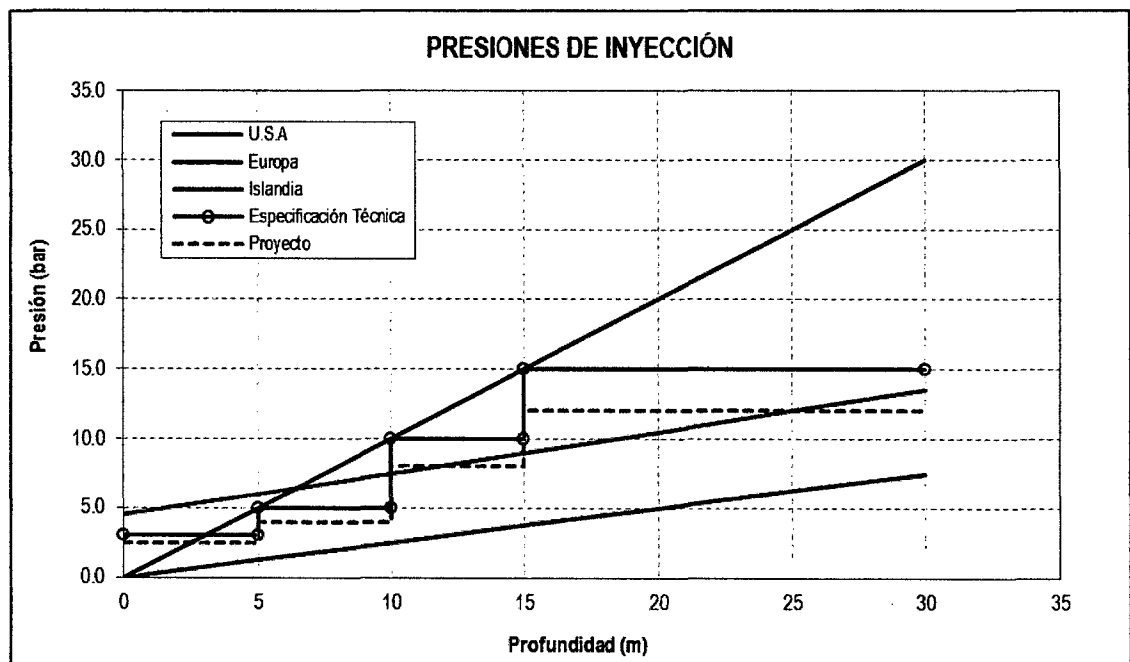


Figura N°6.23 Análisis de presiones de inyección.

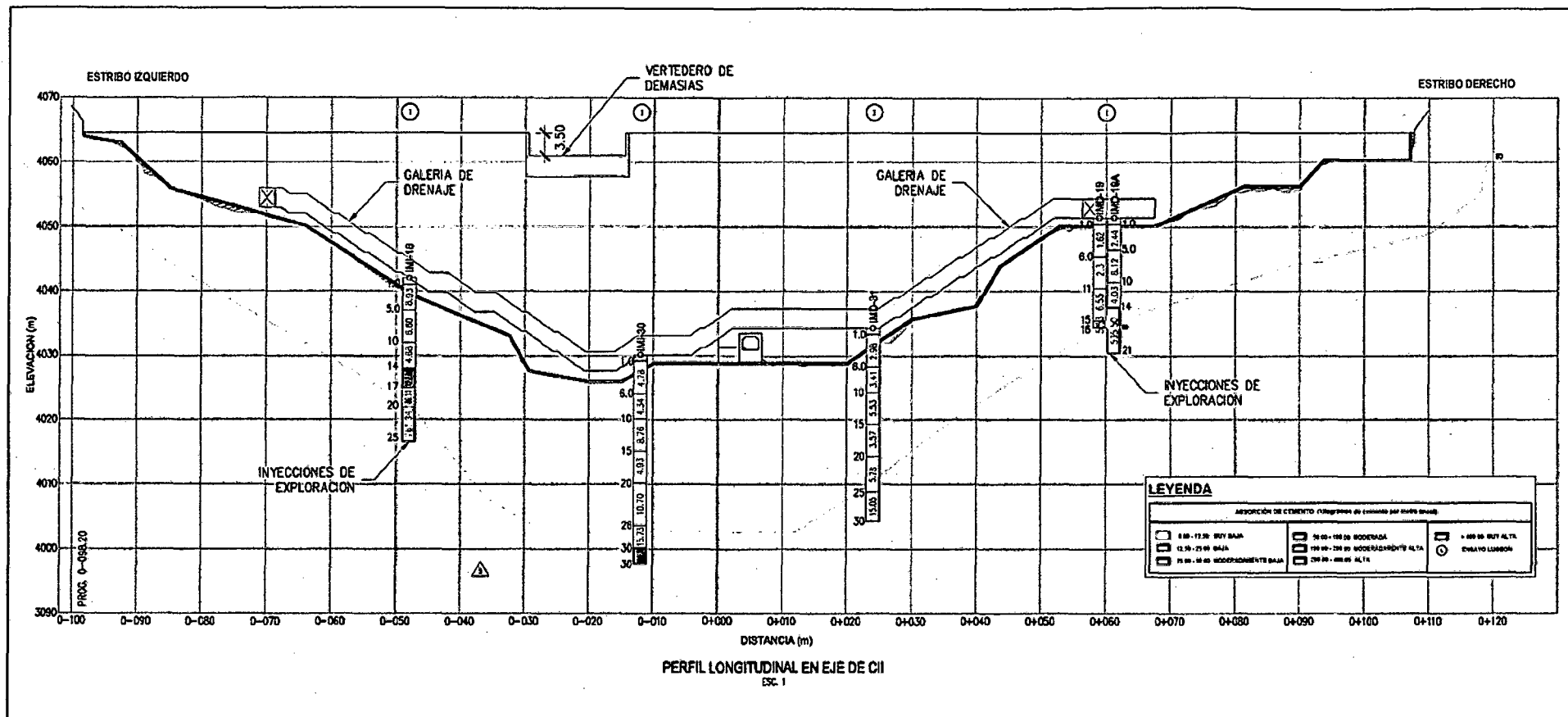


Figura N°6.24 Perfil de absorción de los taladros de investigación.

6.6 PROCEDIMIENTO DE INYECCIÓN

A continuación se describirá en forma resumida el proceso de impermeabilización de la cortina presa Pallca, que se inició con el replanteo de la ubicación de los taladros de perforación, seguido de la perforación, lavado del taladro, inyección de lechada y el control de calidad.

6.6.1 PERFORACIÓN

Antes del inicio de la perforación se replanteó la ubicación de los taladros de acuerdo al plano indicado (foto N°1), identificando cada taladro con sus respectivos códigos.

La perforación de los taladros de la cortina de impermeabilización se realizó utilizando el método rotopercusivo, para ello se utilizaron tres tipos de perforadoras:

- *Beretta T43*: montada sobre orugas de jebe que tiene las dos funciones de perforación rotopercusiva y diamantina (foto N°2), con esta máquina se inició las perforaciones de investigación y luego las cortinas de inyección, se perforó con brocas de 4 pulgadas de diámetro.
- *Beretta T30*: montada sobre carriles tipo esquí (foto N°3-a), la perforación se realiza con brocas de 4 pulgadas de diámetro.
- *Diamec 232*: estática, porque se ancla para perforar y solo perfora tipo diamantina rotativa (foto N°3-b), se perforó con broca de 50 mm sin recuperación de testigos.



Foto N°1 Replanteo de los taladros de perforación

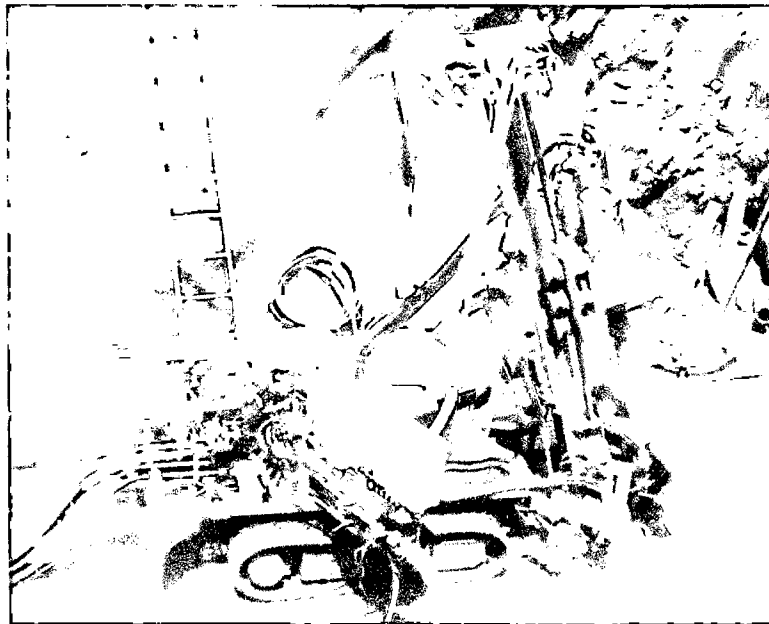


Foto N°2 Perforadora Beretta T43.

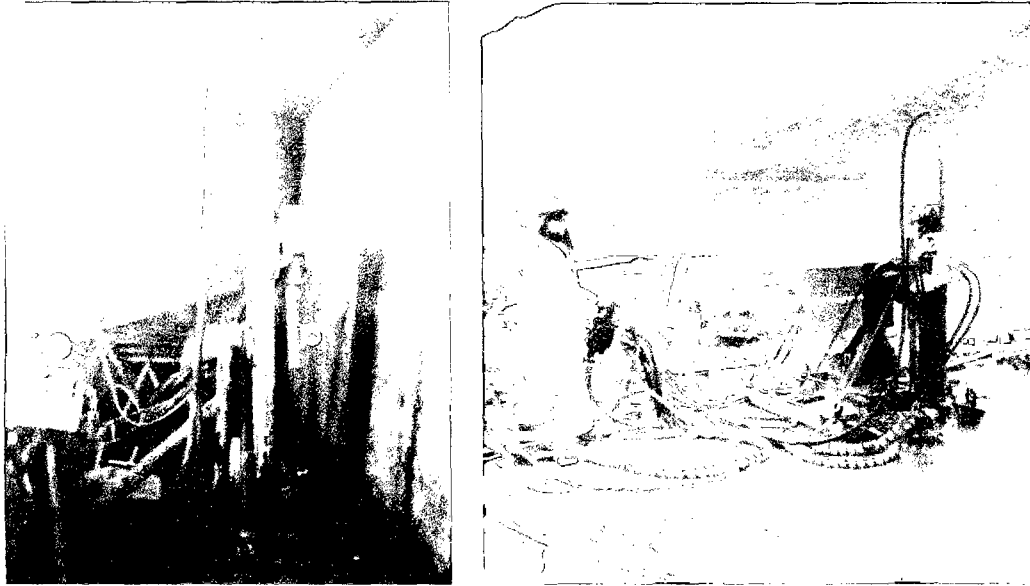


Foto N°3 (a) Perforadora Beretta T30, izquierda; (b) Perforadora Diamec 232, derecha.

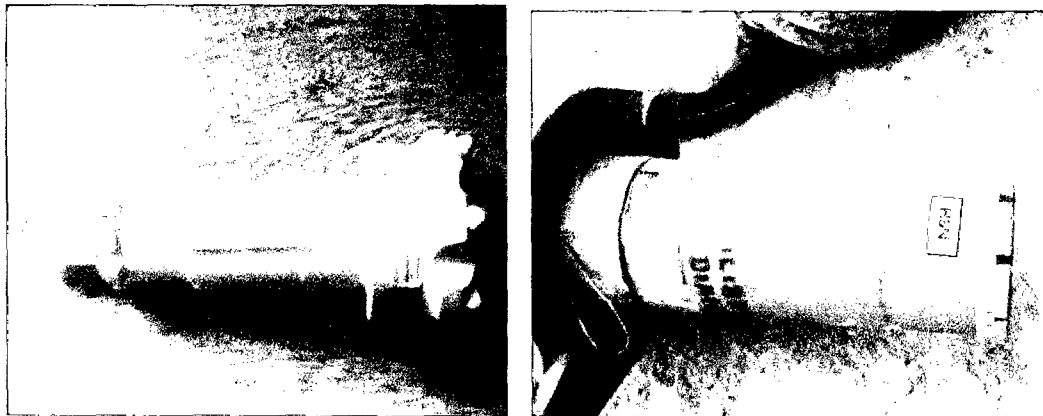


Foto N°4 (a) Broca de 4", izquierda; (b) Broca de 50 mm, derecha.

Al inicio de la perforación se instaló niples de acero de longitud 0.60m, 0.50m empotrado dentro del taladro y 0.10m fuera de la superficie del taladro; estos niples tienen un diámetro de 5 pulgadas, se instalan para proteger los taladros de la contaminación de finos y aguas sucias. La perforación se realiza con aire y agua, para mitigar los polvos de detritus de roca. Las barras de perforación utilizadas son de 3 pulgadas de diámetro y 1 metro de longitud, que van unidas a la broca de 4 pulgadas. Debido a la rigidez de la barra se minimiza la oscilación de las barras de perforación y la desviación de los taladros. A lo largo del eje se realizaron perforaciones verticales (-90°); en los estribos se realizaron perforaciones inclinadas formando abanicos y los taladros de chequeo también se perforaron con un ángulo de inclinación.

6.6.2 INYECCIÓN

Se inició con el lavado del taladro con abundante agua, insertando tuberías de acero de 1 pulgada de diámetro; el lavado se realizó hasta que el agua saliera limpia; con esta tubería se verificó que no hayan derrumbes en los taladros.

Terminando el lavado del taladro, se colocó el packer en el tramo inferior, inyectando de forma ascendente. Se obturó el packer y se indicó el envío de la mezcla para la inyección. Paralelo al lavado de la perforación se inició con la preparación de la mezcla; una vez que se cumplieron los parámetros de ensayo, esta se bombeó con la bomba Moyno capaz de suministrar más de 40 litros por minuto. Las inyecciones se iniciaron con la dosificación de mezcla 0.75:1 según el cuadro N°6.3.

La presión de inicio fue de 0 bar, incrementándose progresivamente según las tomas de la lechadas en el tramo inyectado. La inyección se consideró terminada cuando se alcanzó la presión de rechazo y con un caudal menor de 1 l/min durante 5 minutos como mínimo. Una vez completada la inyección de un tramo, se esperó un tiempo para que la presión se disipe completamente. Luego se levantó el obturador hasta el tramo superior continuando de esta forma la inyección de todo el taladro.

Por el tipo de obra y la heterogeneidad de las fracturas, la inyección se realizó utilizando el método tradicional, mediante la técnica ascendente. Hubo algunos taladros donde se utilizó la técnica descendente debido al fracturamiento de la roca (muy fracturada) provocando derrumbes y atrapamiento de los packers.

La perforación e inyección de los taladros se realizó en etapas con el objetivo de lograr la impermeabilización progresiva de las fracturas de la fundación. En la primera etapa se realizó con la separación de los taladros primarios espaciados 12 m (taladros intercalados) y se inyectó en toda su longitud en tramos de 5 m. En la segunda etapa se inyectó los taladros primarios restantes ubicados en el centro de la primera etapa. La tercera etapa se realizó con la inyección de los taladros secundarios ubicados en el centro de la segunda etapa (ver figura N°6.25). Para los taladros adicionales donde la toma fue alta, se ha seguido el mismo esquema de inyección.

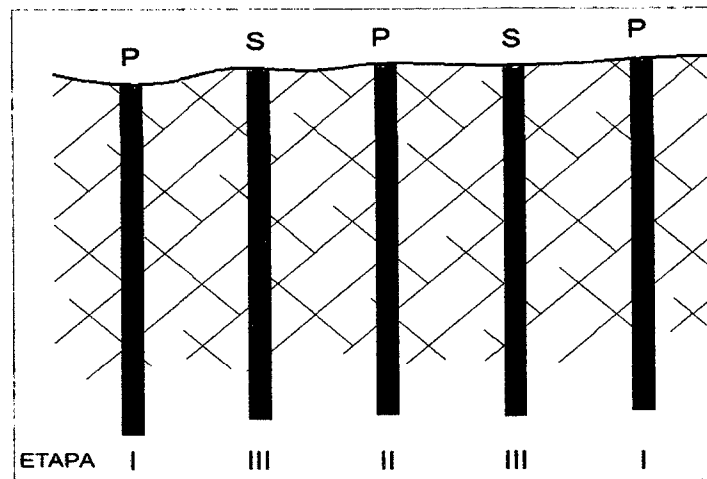


Figura N°6.25 Secuencia de inyección de impermeabilización.

La central de inyecciones se instaló en el estribo derecho de la presa Pallca, equipada con una mezcladora, agitador de mano, la bomba de pistón tipo Peroni y los equipos de control de mezcla. La bomba pistón envía la mezcla al agitador que está ubicado en la ventana de la galería (la capacidad aproximada del agitador es 200 litros) y esta mezcla es enviada a los taladros mediante la bomba Moyno que está ubicada en la ventana de la galería. La presión máxima de inyección de la bomba Moyno es de 15 bares con un caudal de 100 litros por minuto. El tiempo de mezclado de la lechada fue de aproximadamente 2 min por cada tanda. Una malla metálica de $\frac{1}{2}$ " aproximadamente, fue ubicada en la parte superior del mezclador para prevenir que ingresen trozos de cemento endurecido. Al culminar la inyección de cada taladro, se lavan los equipos, para evitar el taponamiento con la lechada parcialmente endurecida en la línea de inyección.

Para el sellado de los taladros se utilizaron packers hidráulicos con 1.5 m de largo y con una longitud de goma que iba desde 0.5 a 1.0 m. Estos han sido inflados con gas de nitrógeno a presiones entre 25 a 35 bares, el nitrógeno utilizado para inflar el packer fue suministrado mediante mangueras que soportan a presión de 50 a 100 bares y un balón de gas nitrógeno.

6.6.3 CONTROL DE CALIDAD

El control de calidad se llevó a cabo durante la perforación e inyección

- a. **Perforación.-** se verificó el alineamiento de la perforación, para ello se utilizó un inclinómetro digital Laserliner. La profundidad de la perforación se verificó contabilizando las barras de perforación.

b. Inyección.- se realizó un monitoreo constante de la mezcla de la lechada, antes y durante la inyección. El control de calidad se realizó mediante pruebas de densidad, sedimentación, fluidez, cohesión y temperatura de la mezcla. También se han sacado muestras de probetas para su ensayo de compresión.

Se verificó que los materiales como el cemento, aditivos y el agua, cumplan con los estándares requeridos en el diseño, y se controló el almacenamiento correcto de los materiales. El monitoreo de la inyección se realizó en tiempo real, utilizando un registrador de lechada Data Logger Jet 4000. Este equipo almacena y envía datos en tiempo real al computador durante las operaciones de inyección. El registro de los datos se da en formato “.txt” y la visualización de los gráficos en el computador es mediante el programa Jet S104, propio del registrador, ver Anexo 2 – panel fotográfico.

El registrador se lee antes de la inyección de cada taladro y cuando sea necesario, se procede a recalibrarlo. Durante la inyección se controla que no haya subidas rápidas de presión para evitar el hidrofracturamiento y lograr un buen cierre del tramo. En la figura N°6.26 se puede apreciar el diagrama de flujo que se sigue en el proceso de inyección, considerando los criterios de cierre.

El criterio de cierre para la inyección es de 30 kg/m; por lo tanto, si la cantidad de cemento inyectado supera este valor en cualquier tramo del taladro, se deberá adicionar taladros posteriores, adyacentes a cada lado del taladro que ha tenido toma alta. En el cuadro N°6.6 se puede observar la nomenclatura utilizada para clasificar la toma de la lechada.

Cuadro N°6.6
 Clasificación de absorción de lechada – presa Pallca.

TOMA DE LECHADA (kg/m)		
COLOR	RANGO	CLASIFICACIÓN
	0 - 12.5	Muy baja
	12.5 - 25	Baja
	25 - 50	Moderadamente baja
	50 - 100	Moderada
	100 - 200	Moderadamente alta
	200 - 400	Alta
	> de 400	Muy alta

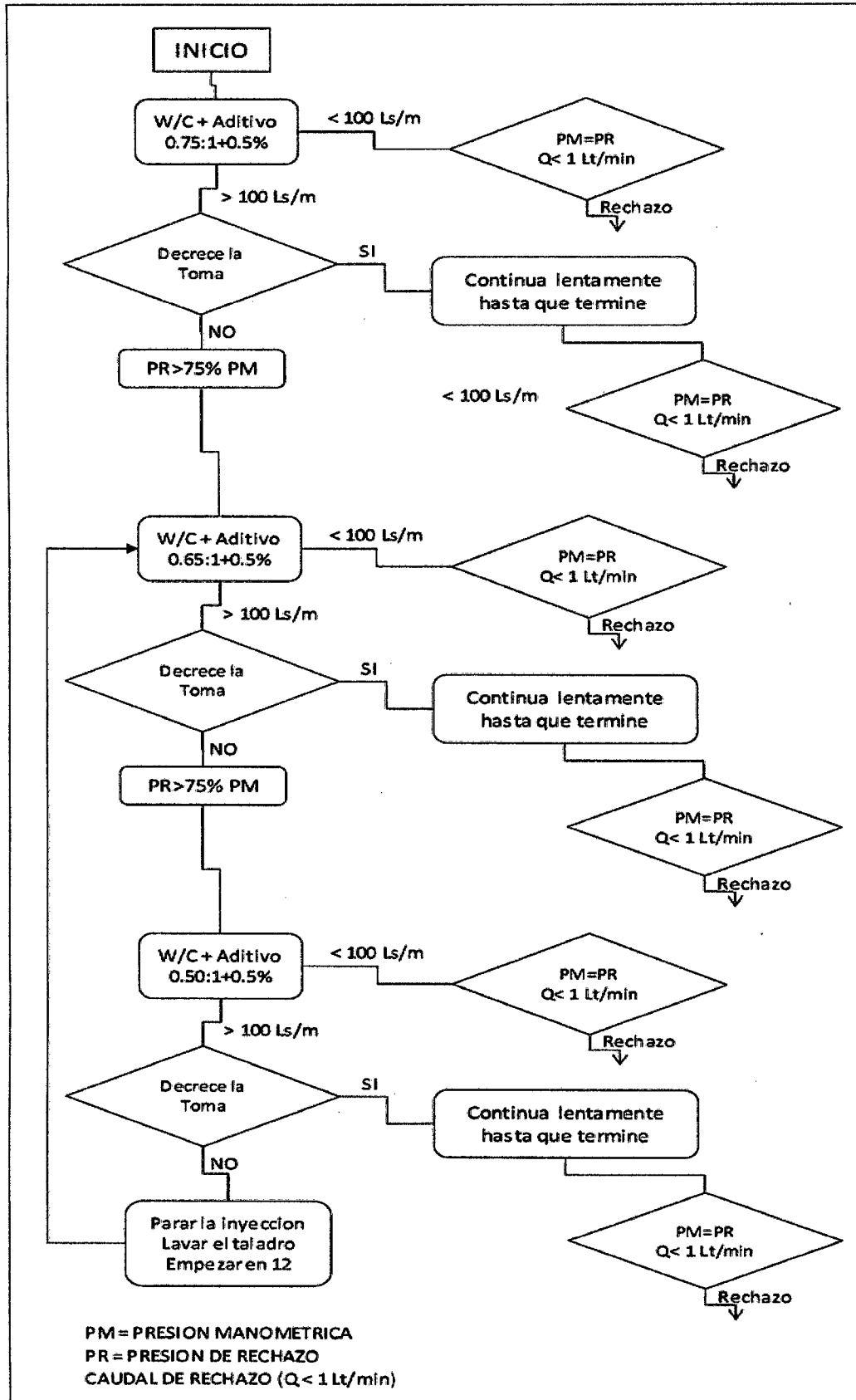


Figura N°6.26 Diagrama de flujo para el proceso de inyección.

6.6.4 TALADROS ADICIONALES

Con el objetivo de cerrar la cortina en las zonas complicadas geológicamente, se ha realizado taladros adicionales aguas arriba y aguas abajo del eje de la cortina:

- Aguas arriba; entre las progresivas 0-100 a 0-090, 0+055 a 0+065 y 0+100 a 0+110.
- Aguas abajo; entre la progresiva 0+100 a 0+110.

Con la ejecución de estos taladros se ha reducido la absorción en el eje de la cortina, esto se demuestra con los resultados de absorción de los taladros de chequeo realizados en el eje de la cortina, ver Anexo 3 – lámina 5.

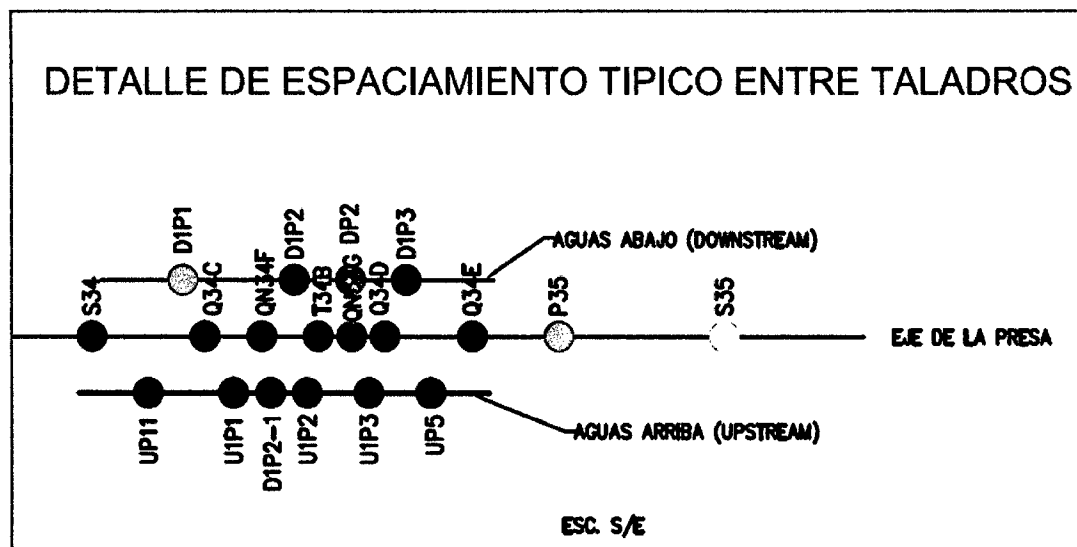


Figura N°6.27 Esquema de la cortina en la progresiva 0+100 a 0+110. La distancia de la cortina aguas arriba y aguas abajo respecto al eje es de 20 cm.

Para cumplir con el objetivo de la cortina de impermeabilización de la presa Pallca, se perforaron e inyectaron 6 taladros de verificación: CH1, CH2, CH3, CH4, CH5 y CH6, cuyos resultados cumplen con el criterio de cierre, es decir tomas inferiores a 30 kg/m, ver Anexo 3 – lámina 5.

6.7 ANÁLISIS DE LA CORTINA DE INYECCIÓN

Con el fin de evaluar y realizar un análisis del proceso de inyección se ha elaborado gráficos estadísticos con los datos obtenidos durante el programa inyección.

a. Proceso de la producción

El programa de la cortina de inyección se inició en julio del 2012 con los taladros de investigación para la cortina de inyecciones, y los trabajos de inyecciones se culminaron en enero 2013. En la figura N°6.28 se observa la producción total de la perforación y el cemento inyectado por mes. Durante el programa se perforaron 153 taladros, haciendo un total de aproximadamente 3236.50 metros lineales, ver cuadro N°6.7.

Cuadro N°6.7

Resumen del programa de la cortina de inyección.

TALADROS	LONGITUD PERFORADO (m)	CEMENTO INYECTADO (kg)
Primario	885.0	30676.50
Secundario	804.5	31821.88
Terciario	663.5	20036.20
Cuaternario	371.5	9808.15
Quinario	96.5	6754.10
Aguas Arriba	213.0	6389.03
Aguas Abajo	85.0	1903.58
Chequeo	117.5	998.33
TOTAL	3236.5	108387.75

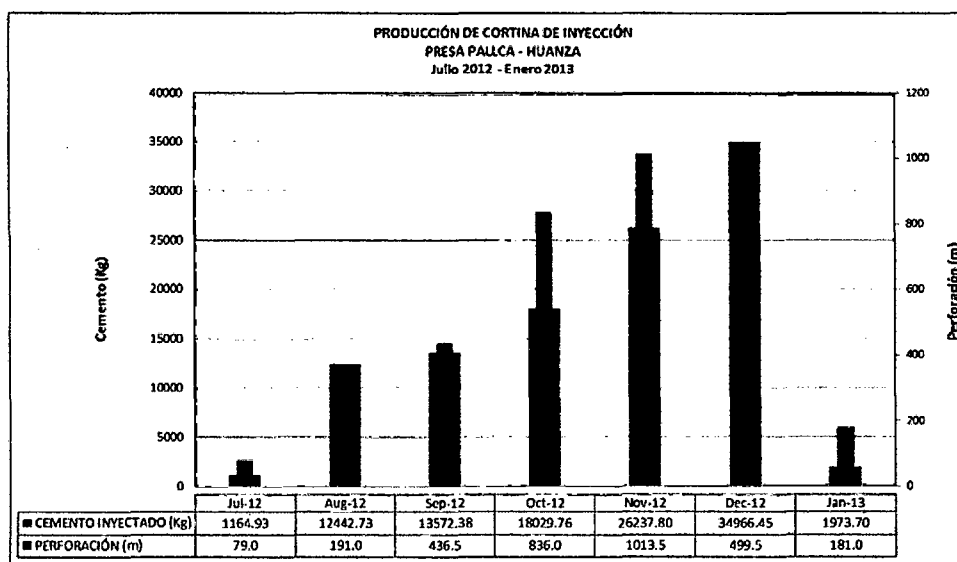


Figura N°6.28 Producción de la cortina de inyección.

b. Control de absorción

El gráfico de control de absorción se ha realizado con los taladros de investigación IMI-18, IMI-30, IMD-31, IMD-19 y IMD-19A. Como se puede observar los resultados de la prueba Lugeon varían con los datos de la toma de lechada, con lo cual la estimación de la cantidad de lechada a utilizar en la cortina de impermeabilización de la presa Pallca se haría con dificultad, presentando margen de error considerable.

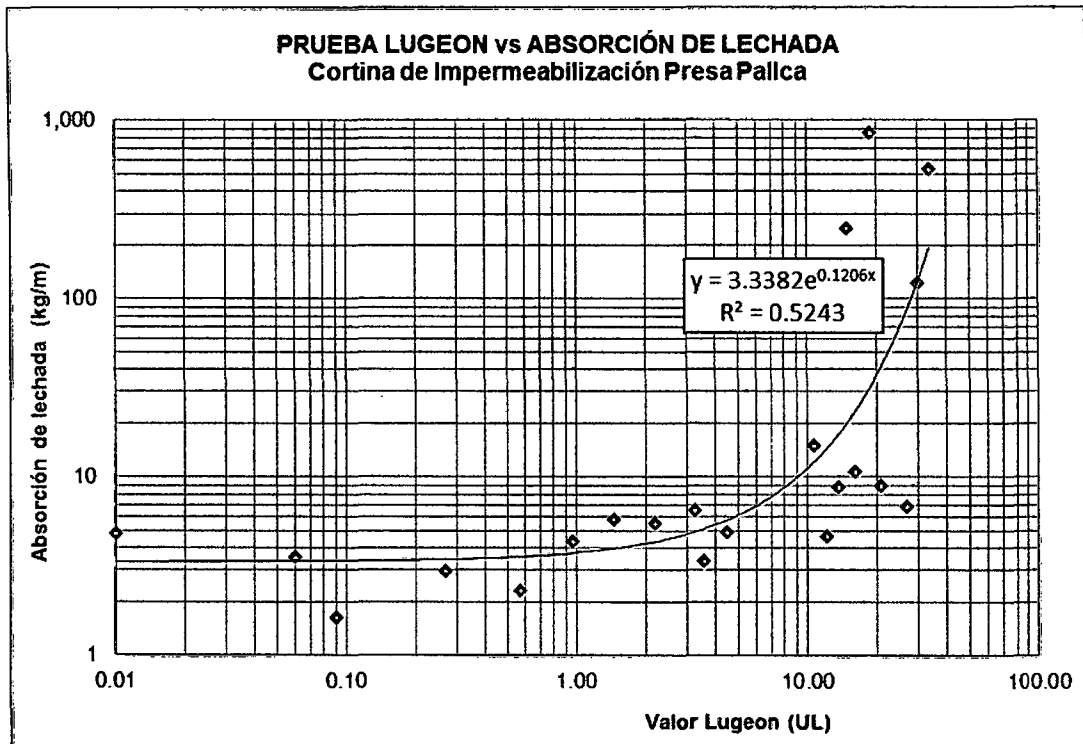


Figura N°6.29 Prueba Lugeon vs Absorción de lechada.

De la figura N°6.29 se puede observar que los datos están dispersos, y la mejor curva que se ajusta a los datos mediante el análisis de regresión es una función exponencial, teniendo un coeficiente de correlación igual a 0.52. Se deduce que la correlación entre la toma de lechada varía considerablemente en función del ensayo Lugeon, esto se debe a que la lechada tiene diferentes propiedades físicas y reológicas que el agua.

c. Sumatorias de curvas

Con el fin de evaluar y presentar mejor los datos de las absorciones de lechada, se elabora gráficos de series logarítmicas. En la figura N°6.30 se observa la tendencia de las curvas de taladros primarios, secundarios, terciarios, cuaternarios, quíntarios, de chequeo y adicionales; así mismo se observa que las tomas en los taladros de chequeo son menores a 30 kg/m, cumpliendo con el criterio de cierre.

En la figura N°2.31 se hace una comparación y evaluación de las tomas acumuladas de todos los taladros realizados. El 85% de los tramos inyectados tiene tomas menores a 30 kg/m y el 15% de los tramos inyectados tiene toma mayor a 30 kg/m. Las tomas altas se dieron en zonas puntuales donde se han encontrado fracturas con relleno de material morrenico, zonas como: el estribo derecho y el estribo izquierdo de la presa.

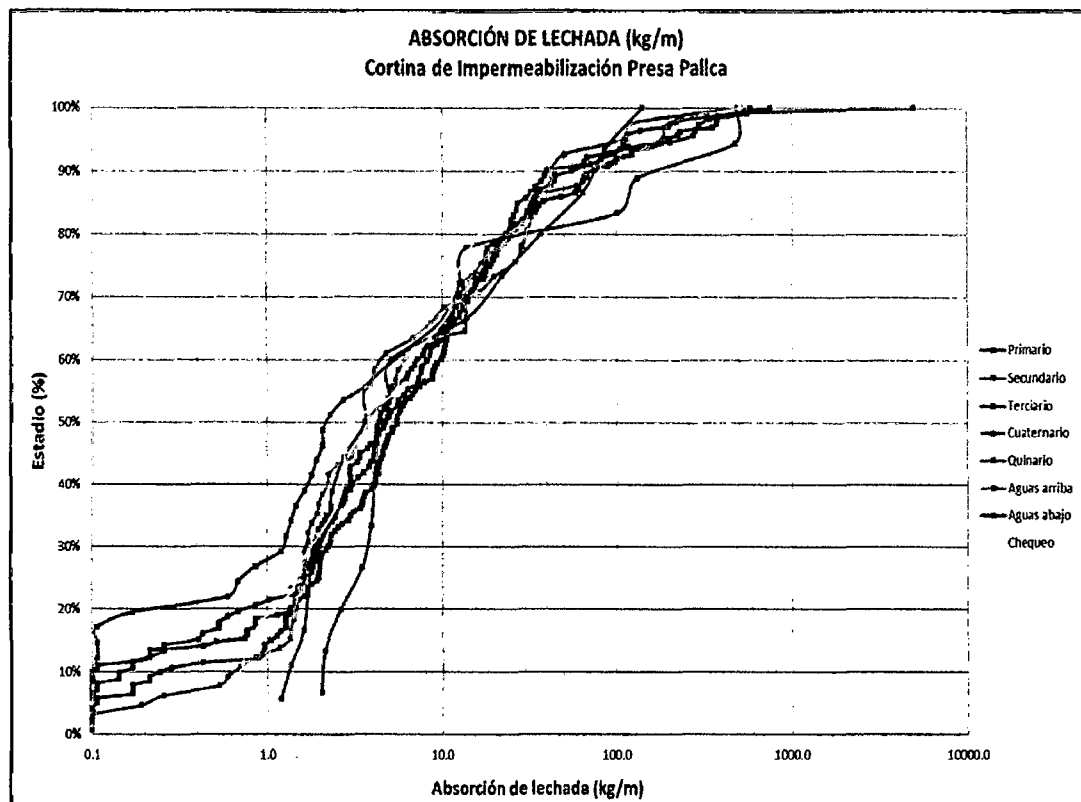


Figura N°6.30 Curvas de absorción de lechada por taladros.

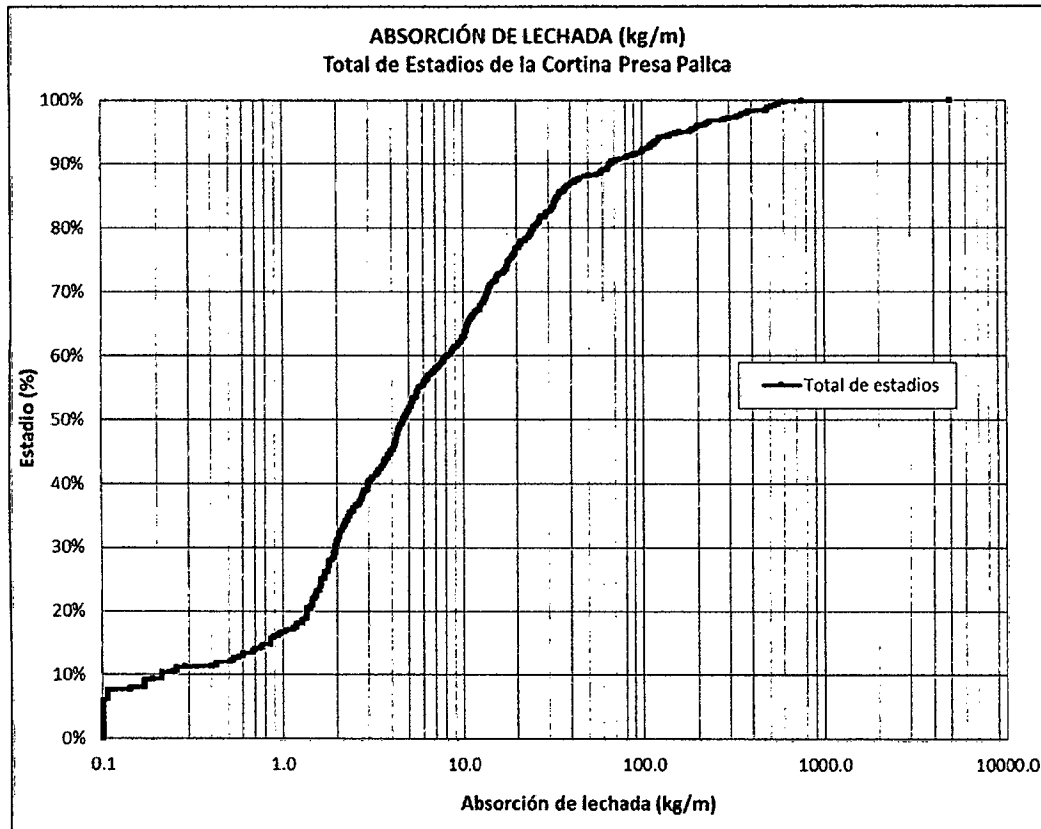
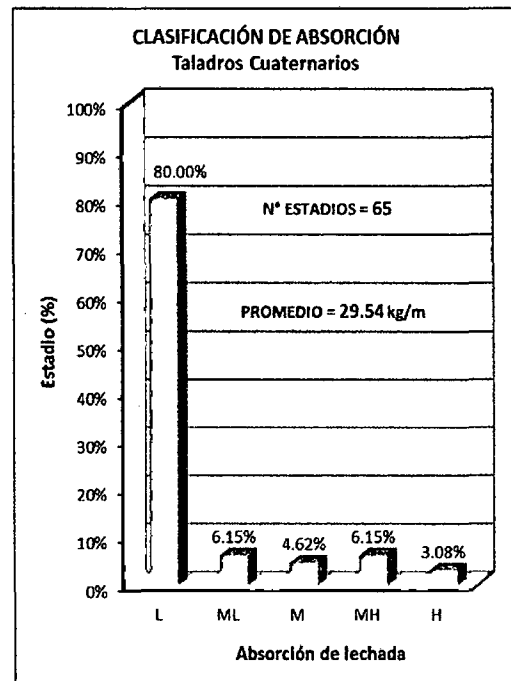
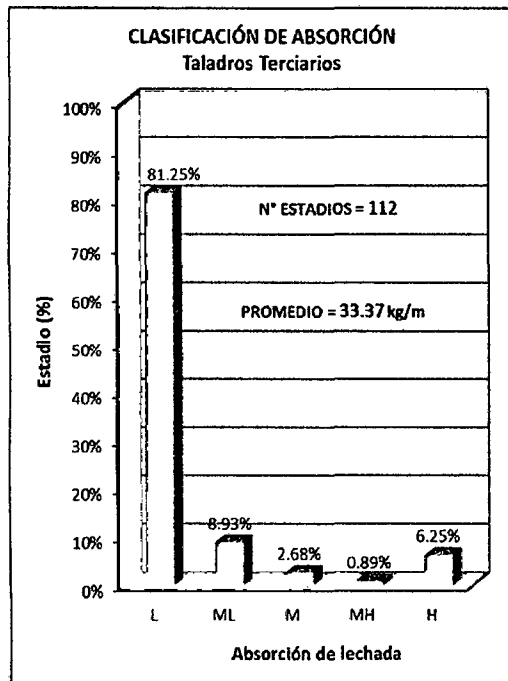
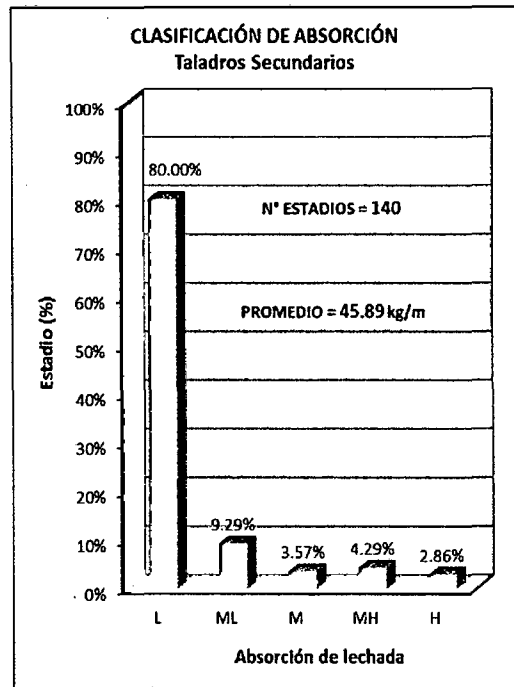
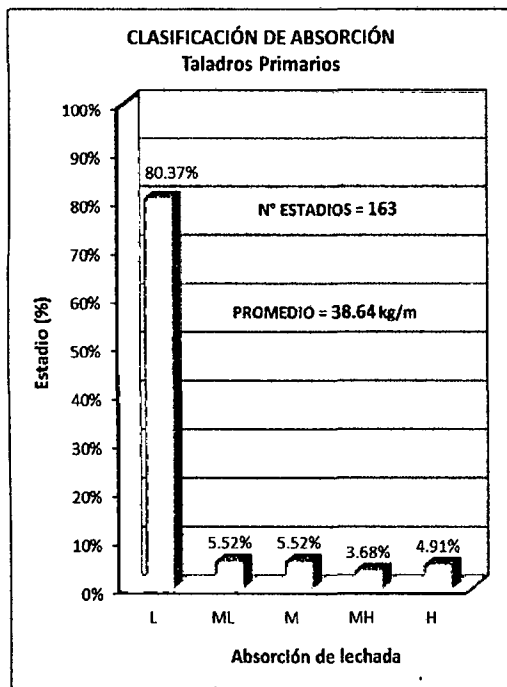


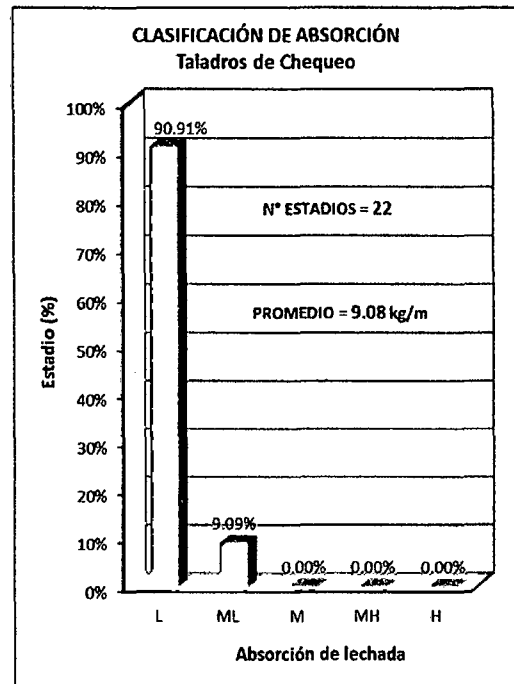
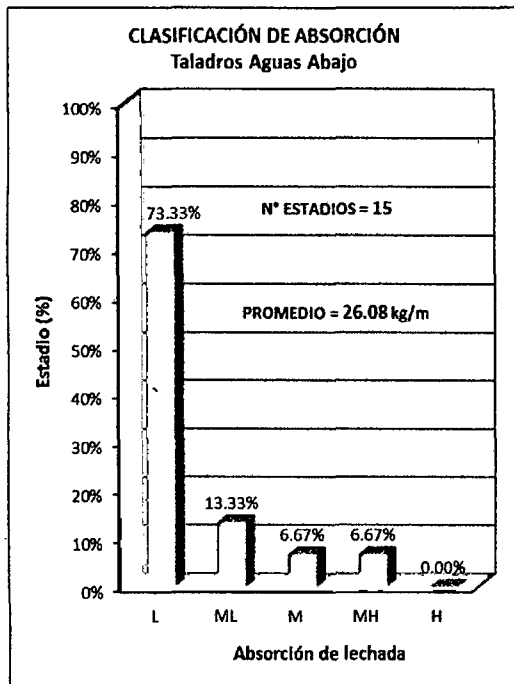
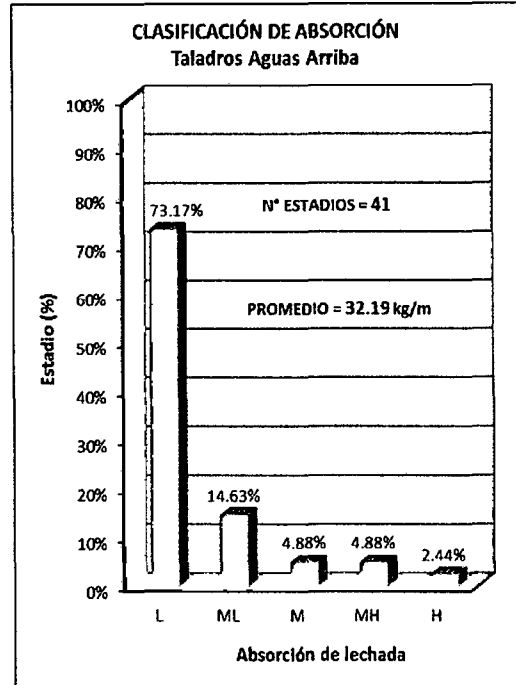
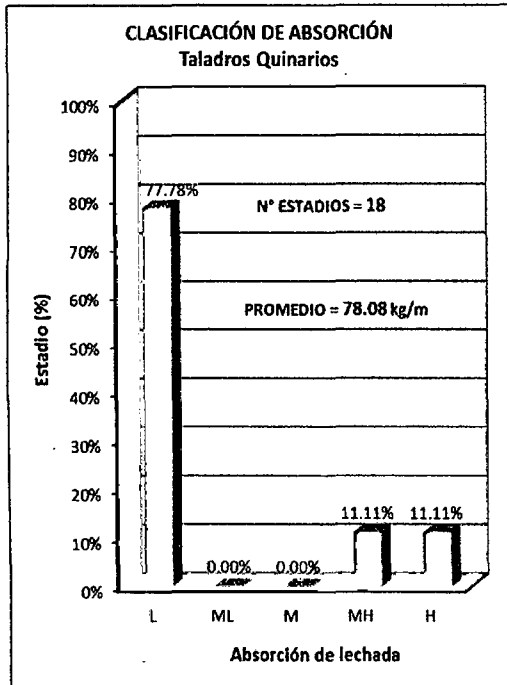
Figura N°6.31 Curva de absorción de lechada de todos los taladros.

d. Distribución de frecuencias

Con el fin de evaluar las absorciones de cada estadio, se utiliza el análisis estadístico mediante los histogramas de frecuencia. En la figura N°6.32 se puede observar la clasificación de las absorciones por estadios de los taladros primarios, secundarios, terciarios, cuaternarios, quinarios, de chequeo y adicionales. De la gráfica se observa que en promedio las absorciones son: el 80% baja, 8% moderadamente baja, 4% moderado, 4% moderadamente alta y 4% alta.

En la figura N°6.33 se observa el resumen de todos los taladros. De la gráfica se observa que en promedio el 91% tiene absorciones bajas, lo cual indica que se ha reducido eficientemente la permeabilidad del macizo rocoso.





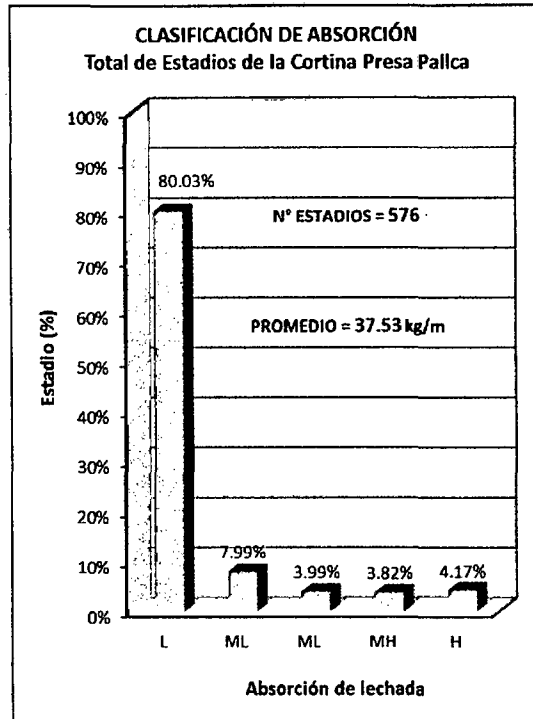


Figura N°6.32 Distribución de frecuencia por taladros

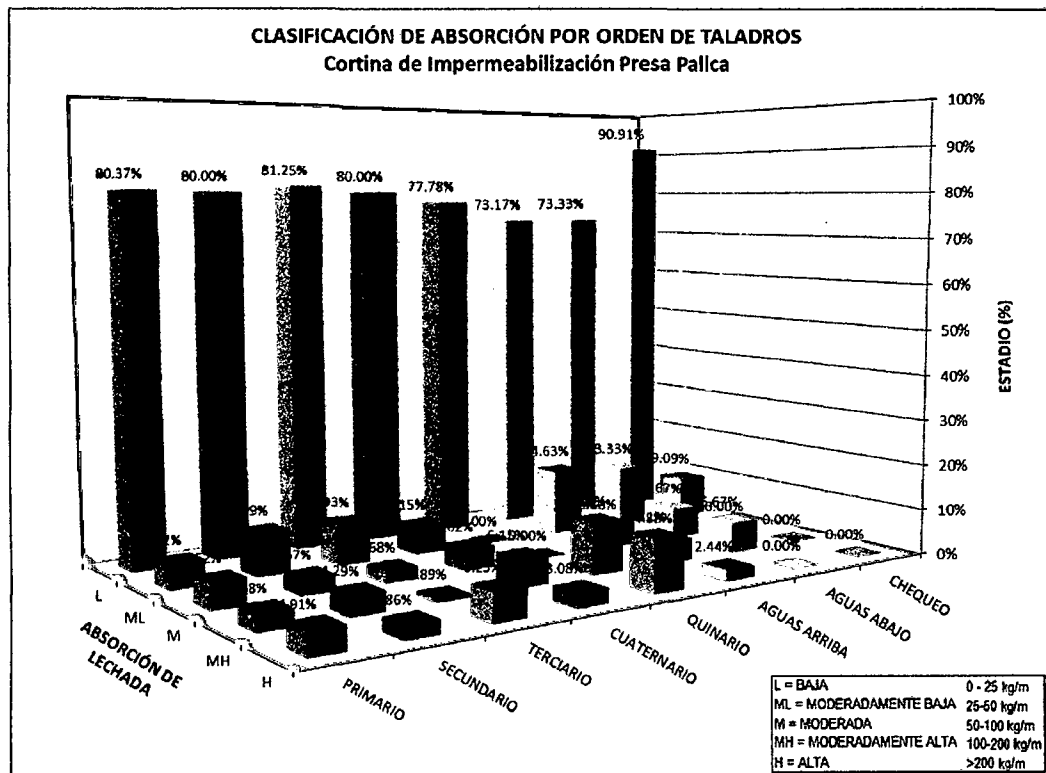


Figura N°6.33 Distribución de frecuencia de todo los taladros.

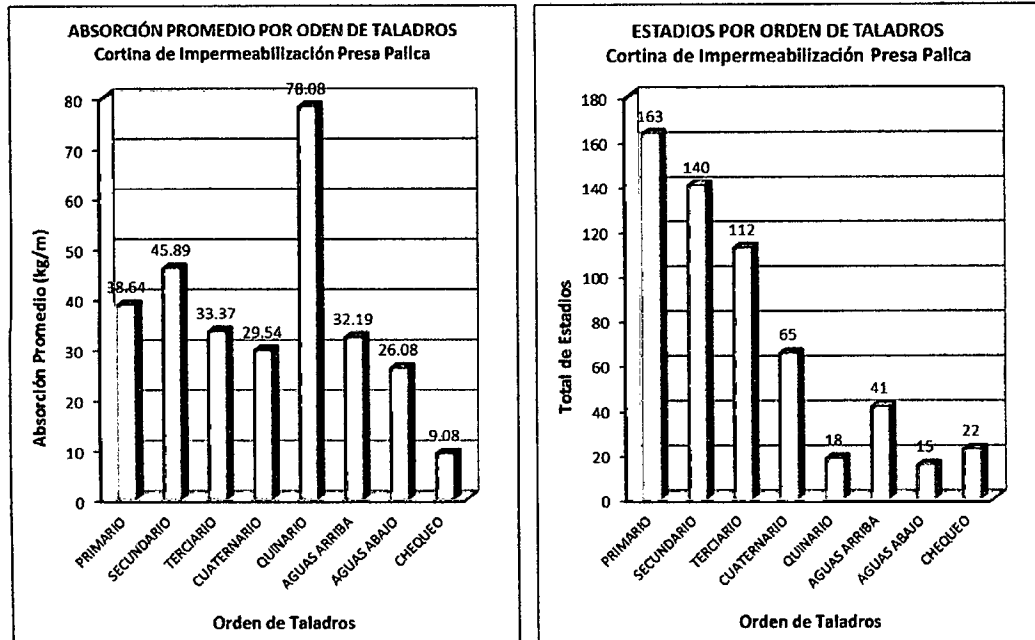


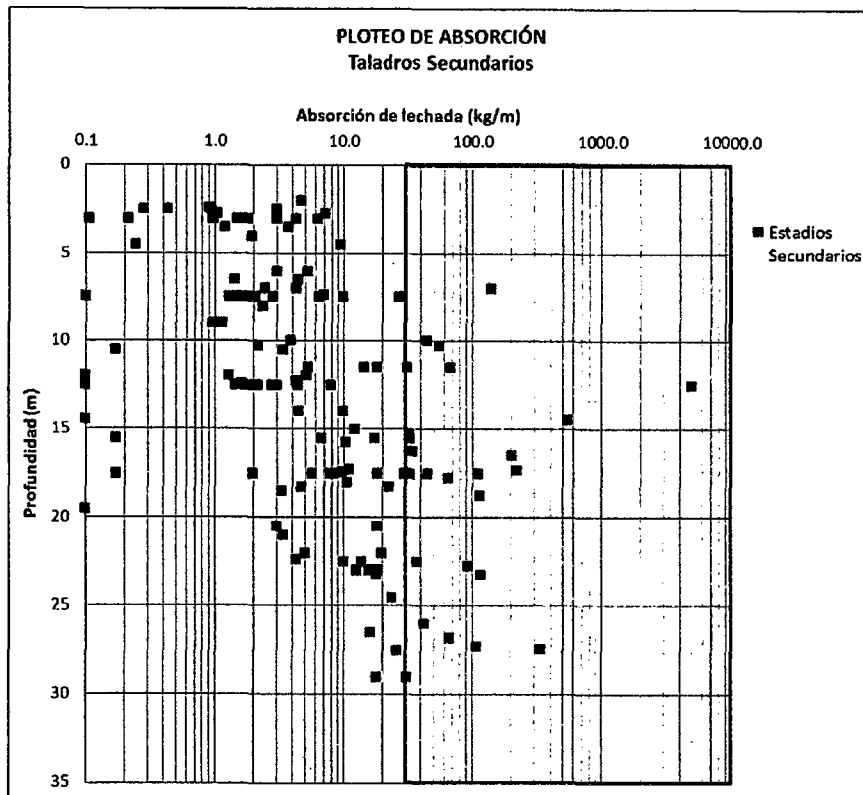
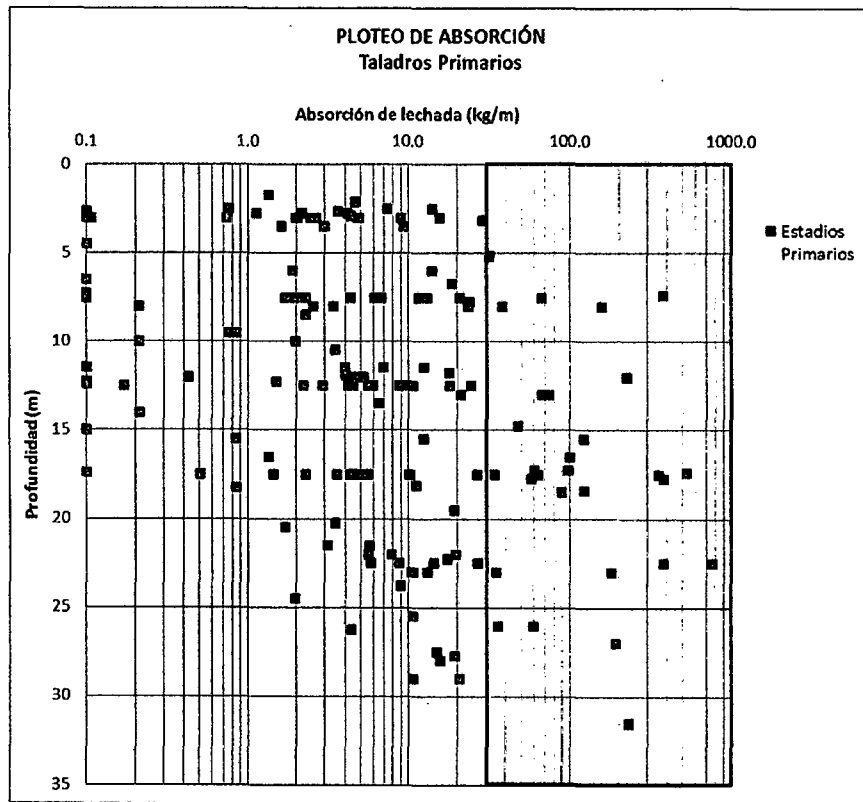
Figura N°6.34 (a) Absorción promedio por taladros, izquierda, (b) total de estadios por taladros, derecha.

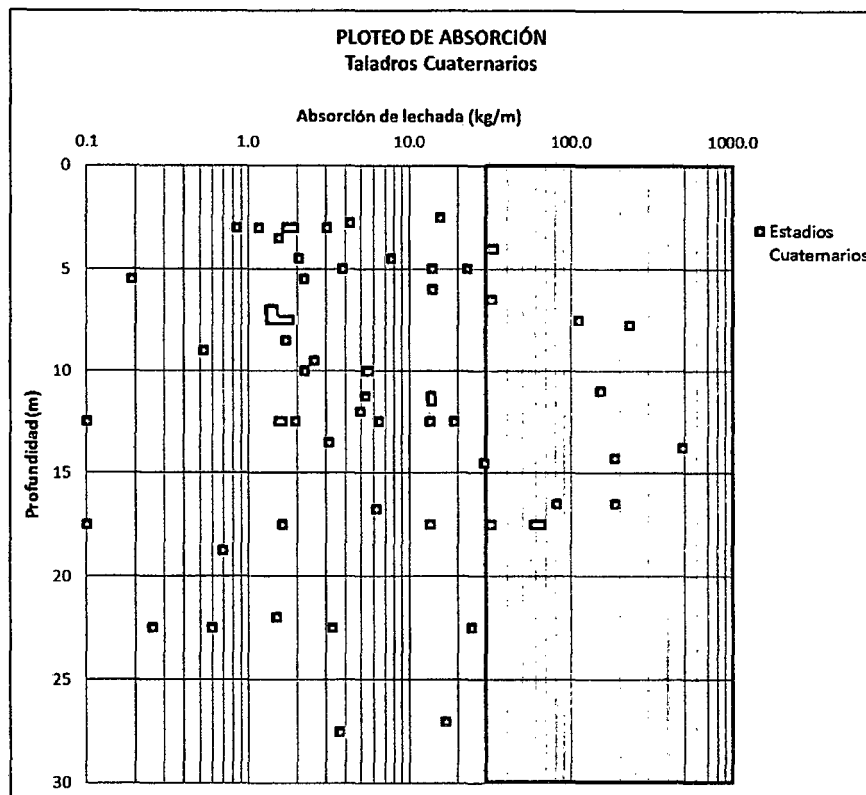
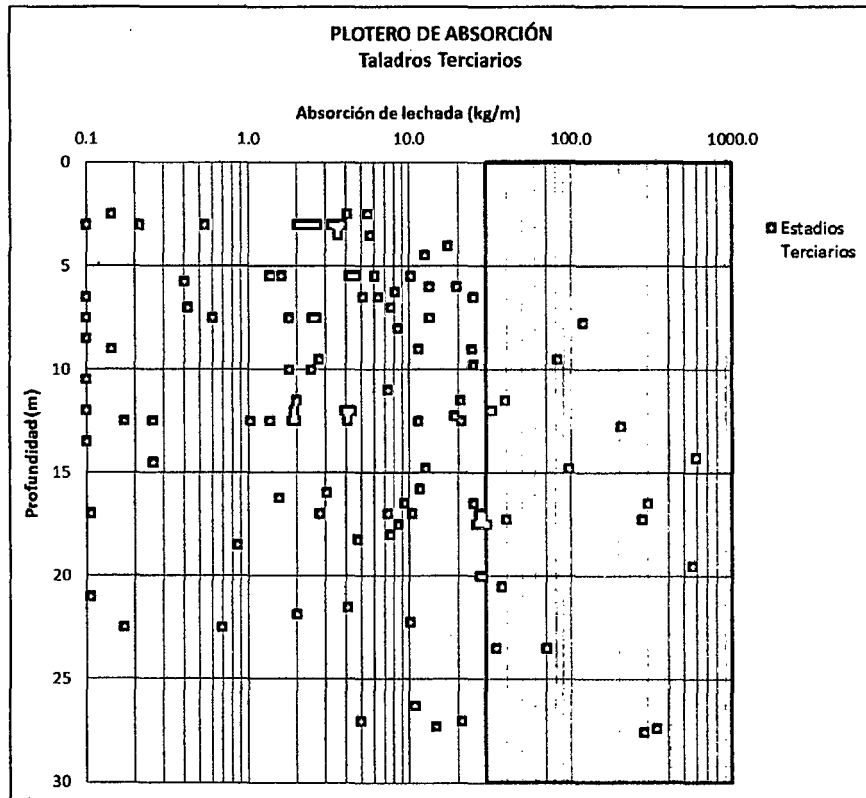
De la figura N°6.34-a se observa la absorción promedio de los taladros primarios, secundarios, terciarios, cuaternarios, quinarios, de chequeo y adicionales, y el taladro quinario tiene un absorción promedio mayor a los demás y esta se debe porque se ha tenido absorciones altas en estadios puntuales, por ello que se ha realizado taladros adicionales para cumplir con el objetivo de cerrar la cortina de inyecciones. Así mismo en la figura N°6.34-b se observa el total de estadios por taladros, siendo los taladros primarios ejecutados en mayor cantidad y los taladros quinarios en menor cantidad.

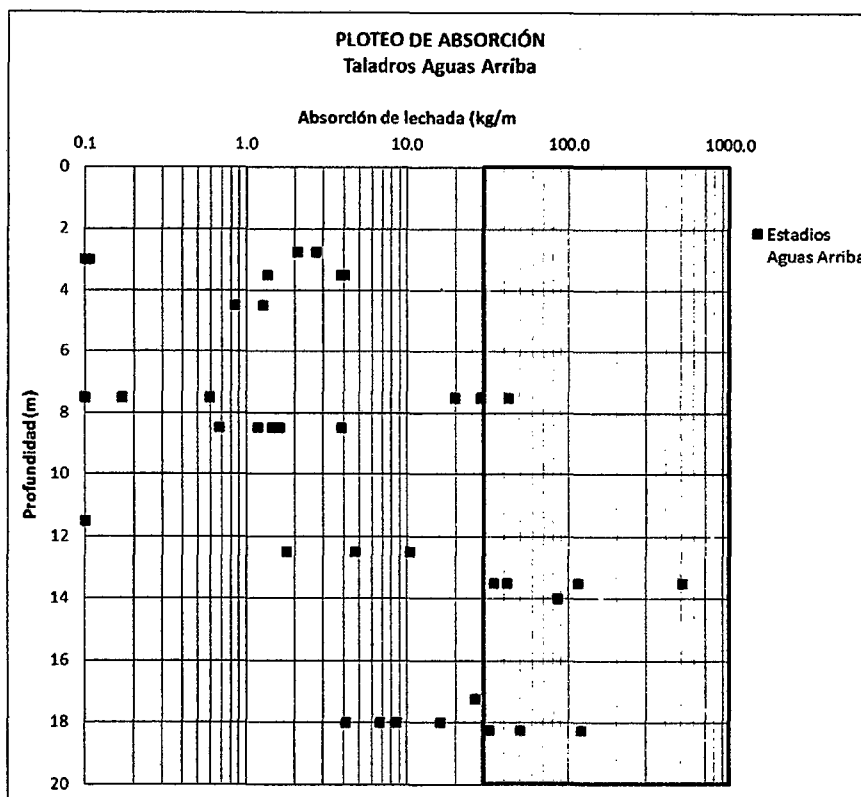
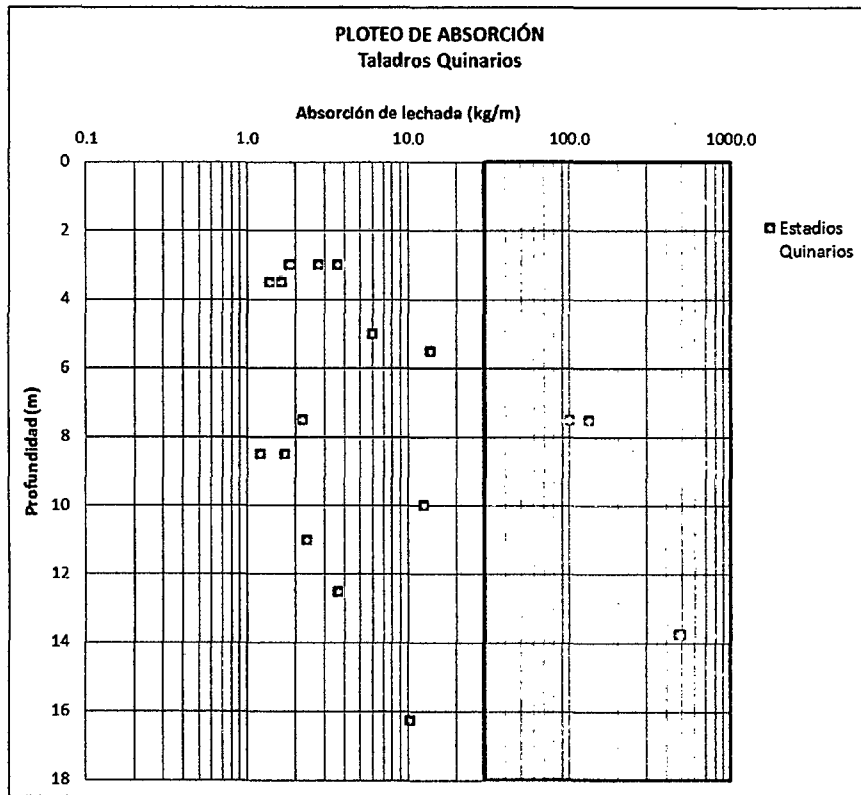
e. Evaluación logarítmica

La evaluación logarítmica nos permite tener una visión de las absorciones en relación a las profundidades. En la figura N°6.35 se observa que la cortina de inyección se va cerrando en función al orden de los taladros inyectados. En la gráfica de chequeo se puede observar que solo se tiene un estadio con absorción mayor a 30 kg/m.

En la figura N°6.36 se observa que el mayor porcentaje de absorciones mayor a 30 kg/m, está en el rango de 10 a 25 metros de profundidad de los taladros de inyección.







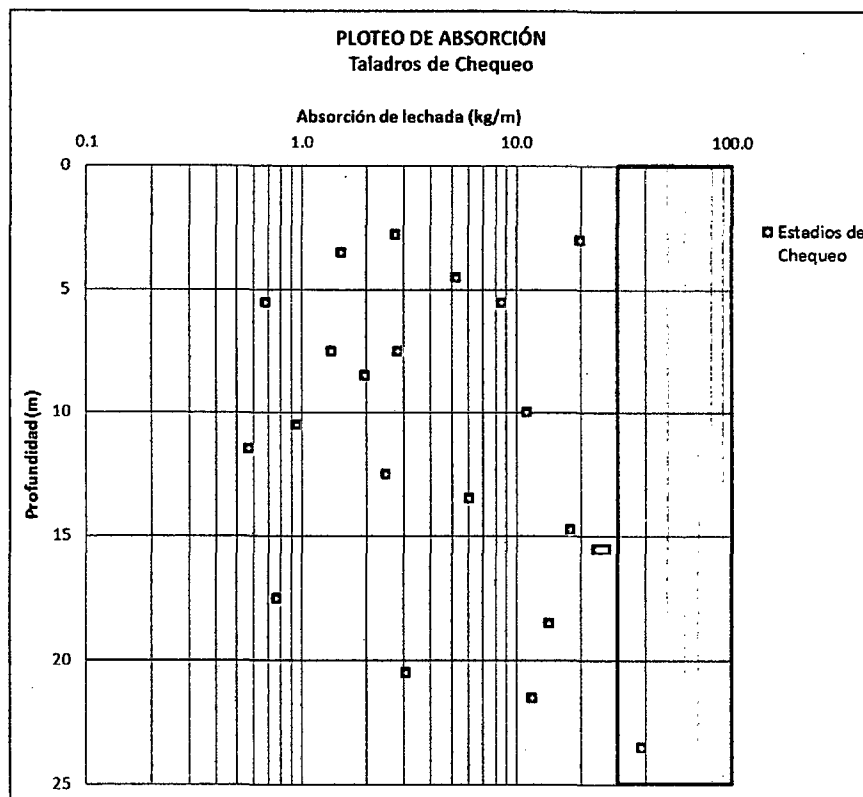
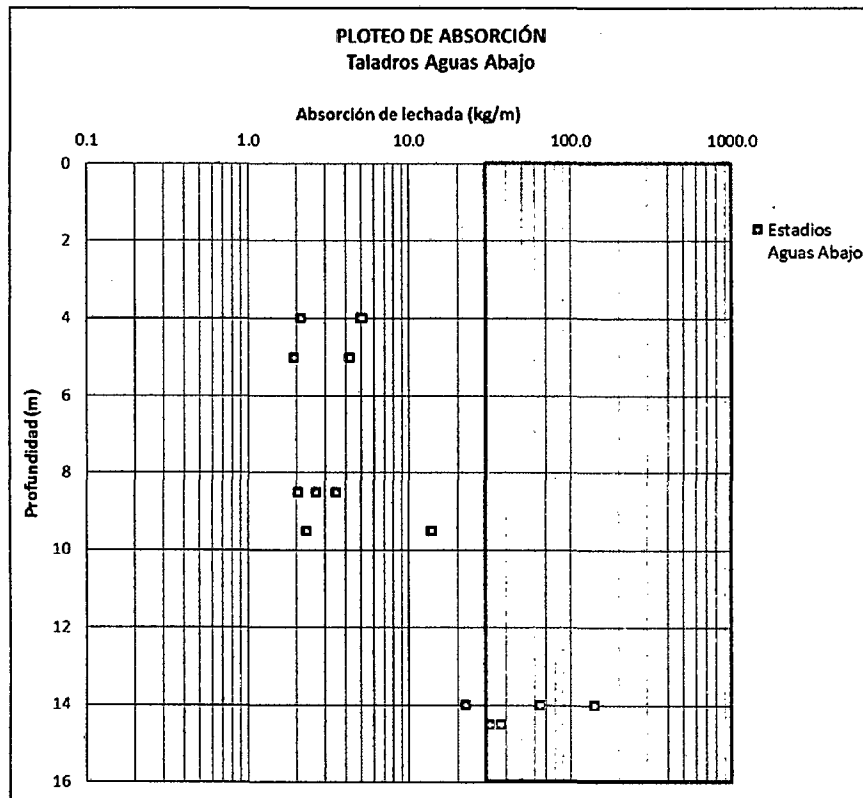


Figura N°6.35 Ploteo de absorción de estadios en función a la profundidad.

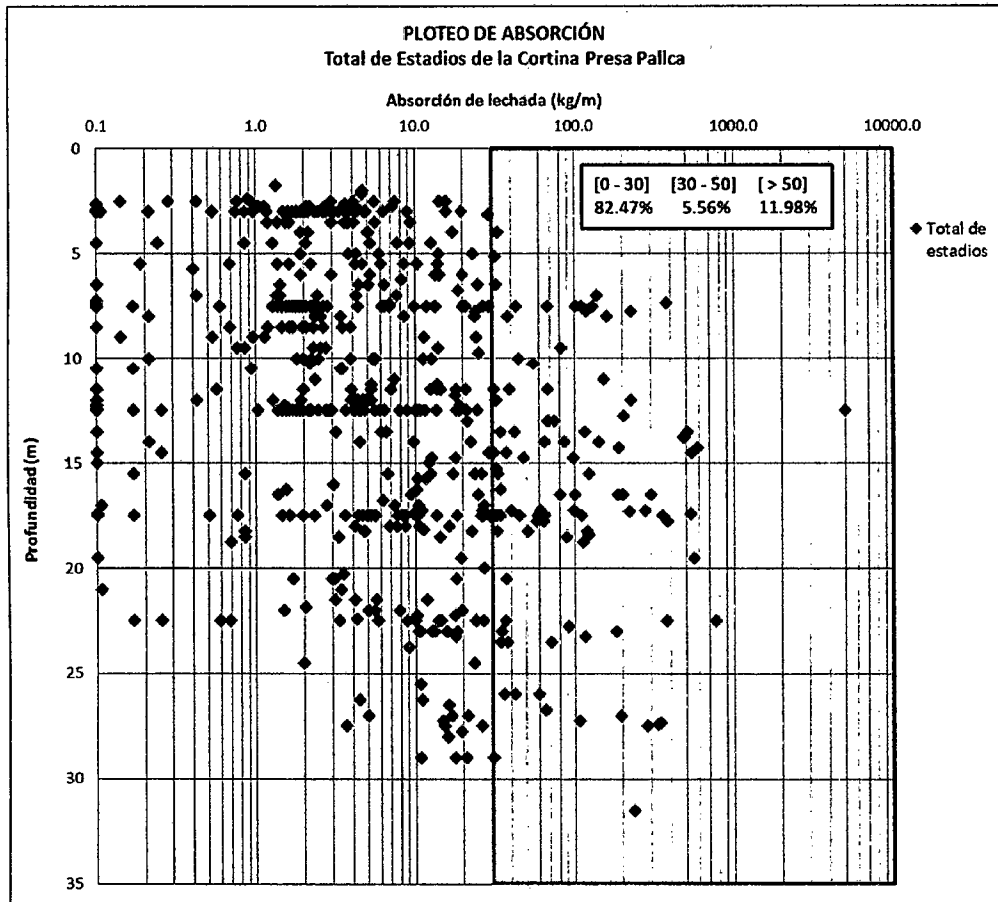


Figura N°6.36 Ploteo de absorción total de estadios en función a la profundidad.

f. Perfil de absorción

En el perfil longitudinal de la cortina se muestran todos los taladros de inyecciones realizados a lo largo de la campaña de inyecciones en la presa Pallca. Los taladros muestran las tomas de las absorciones por tramo o estadio; se analiza las tomas altas y bajas por metro lineal del taladro para verificar si se necesita taladros adicionales de acuerdo al criterio de cierre; para más detalle sobre el perfil de absorciones del tratamiento de inyecciones, ver Anexo 3 – lámina 5.

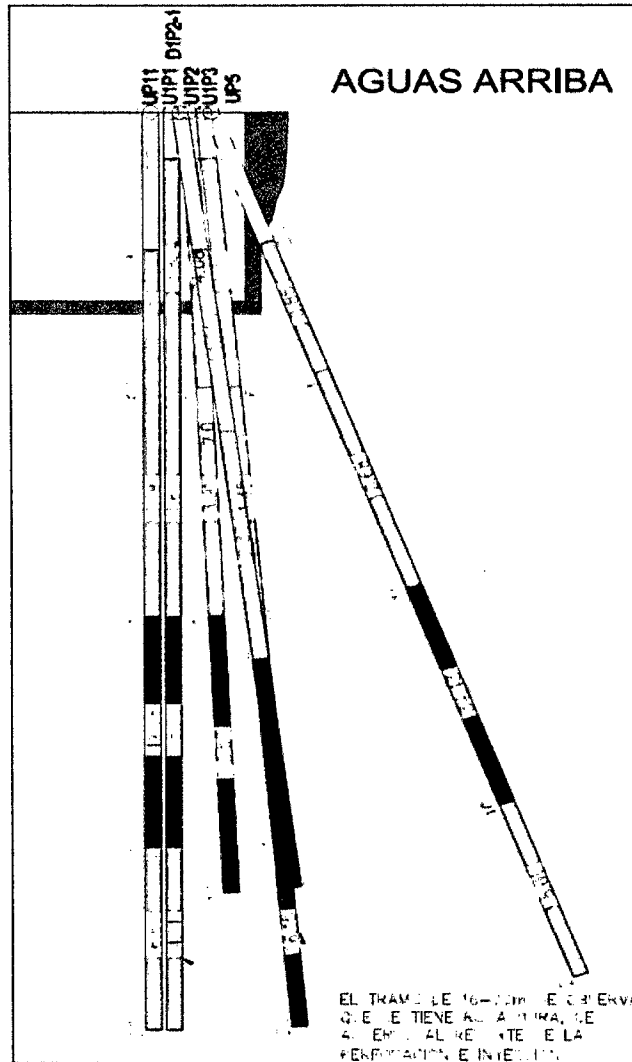


Figura N°6.37 Esquema de perfil de absorción aguas arriba de la progresiva 0+100 a 0+110.

g. Zonificación de absorciones

La zonificación de absorciones de la cortina de inyección se realiza mediante el método de interpolación utilizando el software ArcGIS, los datos de input son: absorción de los estadios y profundidad promedio de los estadios. La zonificación de las absorciones simplifica en la evaluación de la toma alta y bajas de las inyecciones.

La mayor parte de las tomas altas se ha experimentado en las partes más profundas de la perforación del estribo derecho de la presa, entre la progresiva de 0+100 a 0+110 m aproximadamente. Se ha tenido tomas altas por la presencia de aberturas rellenas por limo gravoso (morrena).

En el estribo izquierdo y en el fondo de valle se ha tenido tomas altas en zonas puntuales y en las partes más profundas de la perforación. En el Anexo 3 – lámina 6 a lámina 11, se muestra las zonificaciones en la cortina de inyecciones.

h. Resistencia a la compresión

Se realizaron rupturas de probetas en el laboratorio del Consorcio Río Pallca (CRP), cuyas muestras han sido obtenidas de diferentes taladros con sus respectivas dosificaciones utilizadas, más detalle sobre los resultados de las rupturas de las probetas, ver el Anexo 1 – cuadro de resultados de los ensayos de compresión. Los resultados de resistencia de las probetas fueron mayores a lo requerido, estas son ensayadas a los 28 días, en la figura 6.38 se puede apreciar los resultados obtenidos de las muestras de lechada.

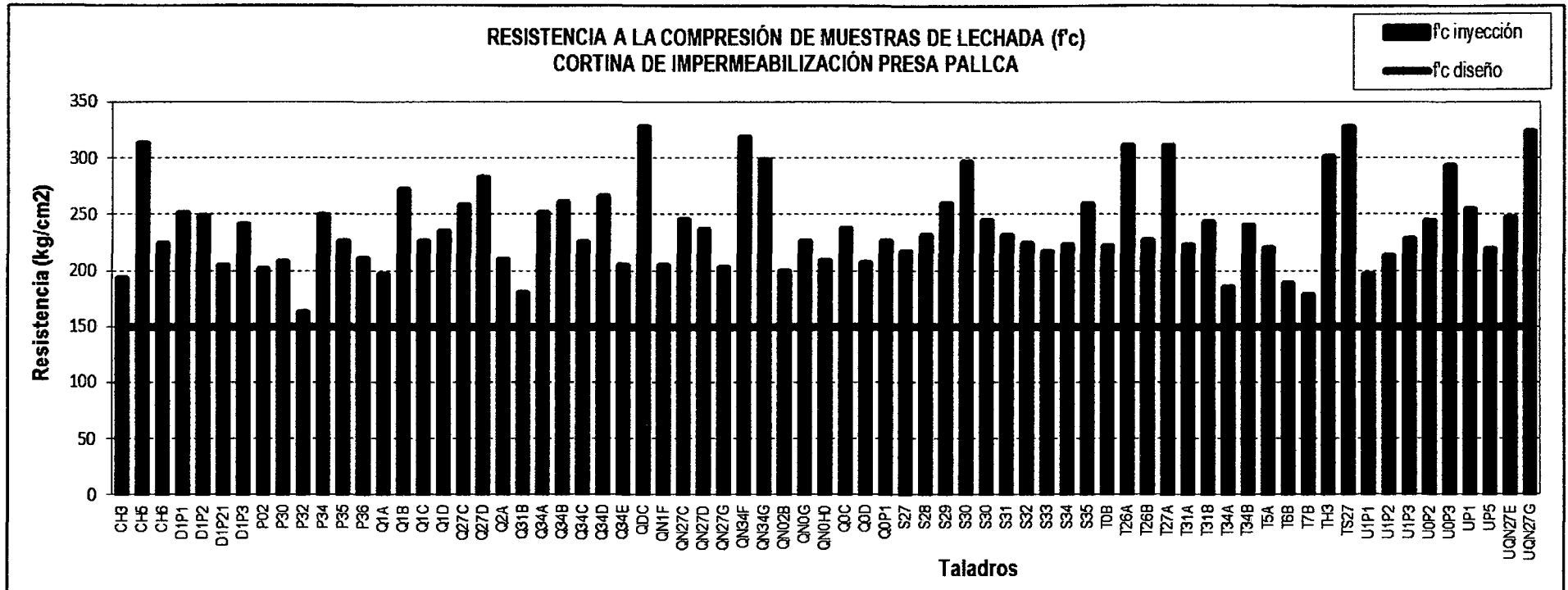


Figura N°6.38 Resistencia a la compresión de muestras de lechada en la cortina presa Palla.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- Los parámetros definidos a partir de las investigaciones geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas, en el macizo rocoso, son fundamentales para el diseño de la cortina de inyecciones. La experiencia del diseñador es un factor importante en el criterio y consideraciones para el diseño.
- El método tradicional de inyección es el más utilizado en los proyectos de impermeabilización de fundaciones en Perú, debido a que este permite utilizar diferentes dosificaciones en diferentes tipos de rocas, incluso en material heterogéneo. A diferencia del método GIN que se utiliza una sola dosificación de mezcla de inyección estable para todo el proceso, y su ejecución es viable para proyectos con presupuestos altos.
- El proceso de inyección en la presa Palca se realizó utilizando el método tradicional y de forma ascendente, y en algunos taladros se utilizó el método descendente debido a los derrumbes en las perforaciones, como en la zona del taladro S34 ubicado en el estribo derecho de la presa. El monitoreo de la inyección se realizó mediante un Data Logger con gráficas en tiempo real, y el control de calidad de la lechada se realizó mediante los ensayos solicitados en las especificaciones técnicas.
- En el estribo derecho y estribo izquierdo de la presa Palca se ha inyectado hasta los taladros quinarios, adicionalmente se han realizado cortinas pequeñas aguas abajo y aguas arriba con el fin de cumplir el objetivo de minimizar las filtraciones; las tomas altas han sido evidenciadas por las aberturas encontradas en rellenos de material morrénico. El criterio de cierre se ha verificado con la ejecución de los taladros de chequeo, donde las tomas de inyección disminuyen significativamente.

- Es importante realizar las investigaciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del macizo rocoso, ya que mediante ellas se podrá obtener detalles sobre las características hidrogeológicas y geomecánicas del macizo, como son: índices de permeabilidad, grado de fracturamiento de la roca, calidad del macizo rocoso, y características de las discontinuidades; resultado utilizados para el diseño y para la elección de las mezclas a inyectar.
- La elección de los materiales para los diseños de mezcla de la inyección será acorde a la calidad de agua subterránea y abertura de las fracturas. El agua que se utilizará en los diseños de mezclas, debe ser la misma que se empleará en las cortinas de inyección.

7.2 RECOMENDACIONES

- Mantener el reporte de registro de tomas y reporte gráfico actualizados diariamente en campo, ya que ésta permite una visión clara del comportamiento de las inyecciones en las fundaciones y plantear soluciones rápidas ante algún problema.
- Para la ejecución y control de calidad de los trabajos de inyección, utilizando el método tradicional o el método GIN, es necesario que el equipo humano tenga experiencia en trabajos similares y capacitación adecuada en la utilización del sistema computarizado para los registros de inyección, con el fin de evitar al máximo errores que afecten el objetivo final esperado.
- Los valores o fórmulas propuestas por diferentes autores para el diseño de la cortina son referenciales; para realizar un buen diseño de "Cortina de inyecciones" se recomienda realizar como mínimo un reconocimiento geológico geotécnico detallado en superficie (mapeo superficial estructural), reconocimiento que debe ser complementado con investigaciones en subterráneo (sondajes con recuperaciones de muestras, ensayos de permeabilidad, orientación de testigos para definir la posición real de las fracturas y ensayos de resistencia a la compresión de los testigos). En ambos casos, se deberá definir con exactitud el grado de fracturamiento, definición de las familias de fracturas y características de las discontinuidades.

- Para el diseño de la orientación y dirección de los taladros de inyección, se recomienda tener información con exactitud de la dirección y buzamiento de las discontinuidades. Para el caso de familias de discontinuidades con ángulos de buzamiento comprendidos entre 30° y 60° se recomienda taladros de inyección verticales. Por otro lado, para familias de discontinuidades de posición sub-horizontal y sub-vertical se recomienda taladros de inyección inclinados con la finalidad de intersectar la mayor cantidad de fisuras.

- De acuerdo a la geología del Perú y en base a la experiencia en diferentes proyectos se recomienda que los espaciamientos horizontales entre taladros primarios deben ser de 6 metros y los espaciamientos horizontales entre taladros secundarios también de 6 metros, con la finalidad de lograr una inyección continua. El aumentar o disminuir el espaciamiento dependerá de la geología del sitio y el tipo de obra.

- Se recomienda evaluar las presiones para las inyecciones de acuerdo a la altura de la presa, y la evaluación geológica, geotécnica e hidrogeológica previa. Así mismo, considerar los ensayos de permeabilidad en la toma de decisiones sobre las presiones que se usarán en las cortinas de inyección, las que generalmente varían en el rango de 0.25 a 1.0 bar/m.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Materials:
 - ASTM C191 – Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico por Vicat, 2004.
 - ASTM C349 – Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico, 2002.
 - ASTM D2113 – Método para perforación de testigos con diamante para investigación en el sitio, 1999.
 - ASTM D4380 – Método de prueba estándar para la densidad por balanza de lodos, 2001.
 - ASTM D6910 – Método de prueba estándar para la viscosidad por cono Marsh Funnel, 2004.
2. Ampuero Cayo, Salomón E., “Mejoramiento de cimentaciones en suelos y rocas aplicando las técnicas de grouting”, tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2012.
3. Bachy y Asociados S.A., “Sondeo, inyecciones y fundaciones”, Caracas, Venezuela.
4. Bureau of Reclamation, “Design of Small Dams”, tercera edición, U.S. Department of the Interior, Washington, 1987.
5. Bureau of Reclamation, “Engineering Geology Field Manual”, segunda edición, Volumen I, U.S. Department of the Interior, Washington, 1998.
6. Bureau of Reclamation, “Engineering Geology Field Manual”, segunda edición, Volumen II, U.S. Department of the Interior, Washington, 2001.
7. Cambefort, Henry, “Inyecciones de suelos”, primera edición, ediciones omega S.A., Barcelona, 1968.
8. Evert Hoek, “Practical Rock Engineering”, Canadá, 2007.

9. Fell, Robin, MacGregor, Patrick & Stapledon, David, "Geotechnical Engineering of embankment dams", A.A. Balkema, Suiza, 1992.
10. Fell, Robin, MacGregor, Patrick, Stapledon, David & Bell, Graeme, "Geotechnical Engineering of dams", A.A. Balkema, UK, 2005.
11. Guadalupe Alcoser, Rolando E., "Análisis del uso del método GIN (Grouting Intensity Number) en el proyecto hidroeléctrico Mazar", tesis, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2011.
12. Goodman, Richard E., "Introduction to Rock Mechanics", John Wiley & Sons, 1989.
13. Hayward Baker, Wallace, "Grouting in Geotechnical Engineering", American Society of Civil Engineers, 1982.
14. Housby, "Construction and design of cement grouting", John Wiley & Sons, 1990.
15. James Warner, "Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock and Structures", United States of America, 2004.
16. Lombardi, G. y Deere, D., "Diseño y control de inyecciones empleando el principio GIN", tomado de Water Power & Dam Construction, Junio 1993.
17. Lombardi, Giovanni, "Grouting of rock masses", Tercera Conferencia Internacional de Grouting y Tratamiento con Lechada, Suiza, Octubre 2002.
18. U.S. Army Corps of Engineers, "Engineers Manual 1110-2-3506: Grouting Technology", Department of the Army, Washington, 20 de enero 1984.
19. Weaver, Kenneth D. y Bruce, Donald A., "Dam Foundation Grouting", American Society of Civil Engineers, 2007.

ANEXO 01

**CERTIFICADO DE CALIDAD
DE LOS MATERIALES**



INFORME DE CALIDAD

TIPO DE CEMENTO: **Portland Tipo I** Fecha: **Primera Quincena de Mayo del 2012**
 ESPECIFICACIÓN VIGENTE: **ASTM C-150**
NTP 334.009

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

PRUEBAS FÍSICAS:			ANÁLISIS QUÍMICO:	% en peso
1) Superficie específica (BLAINE)	cm ² /gr.	3050	1) Pérdida por ignición.	1.30 %
2) Tiempo de fraguado (VICAT)	Hr. min.		2) Residuo Insoluble	0.70 %
	INICIAL	2:11	3) Dióxido de silicio (SiO ₂)	20.87 %
	FINAL	4:45	4) Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	4.64 %
3) Expansión Autoclave	%	0.00	5) Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	3.31 %
4) Contenido de Aire, en volumen	%	5.20	6) Óxido de Calcio (CaO)	63.96 %
			7) Óxido de Magnesio (MgO)	2.05 %
			7) Cal libre	0.93 %
			8) Trío xido de Azufre (SO ₃)	2.59 %
			10) Óxido de Sodio (Na ₂ O)	0.10 %
			11) Óxido de Potasio (K ₂ O)	0.64 %
5) Resistencia a la compresión	Mpa	(lb/pulg ²)	FASES MINERALÓGICAS SEGÚN BOGUE	
a 3 Días	17.61	2560	SILICATO TRICÁLCICO (C ₃ S)	54.67 %
a 7 Días	21.94	3190	SILICATO DICÁLCICO (C ₂ S)	18.61 %
a 28 Días	29.57	4300	ALUMINATO TRICÁLCICO (C ₃ A)	6.70 %
6) Densidad	(gr/cm ³)	3.15	FERROALUMINATO TETRACÁLCICO (C ₄ AF)	10.06 %
7) Falso Fraguado, penetración final	%	90.00	ALCALIS EQUIVALENTES	0.52 %
8) Resistencia a sulfatos			Calor de Hidratación a 7 días	66.00 Cal/g
Expansión a 180 días	%	0.037	Calor de Hidratación a 28 días	78.00 Cal/g

* Corresponde a 1ra. Quincena de Abril del 2012

FORMATO SIG-651110-008-03

Ing. Miguel Quirope A.



The Chemical Company

RHEOBUILD® 1000

Aditivo reductor de agua para producir concreto reoplástico

USOS RECOMENDADOS

- Concreto donde se desea una alta plasticidad, características de fraguado normal y desarrollo rápido de resistencias
- Aplicaciones de concreto pretensado, prefabricado y premezclado
- Aplicaciones de construcción subterránea civil y minera: shotcrete por vía húmeda o seca, grouts de alto desempeño, grouts de túneles y suspensiones de inyección

DESCRIPCION

RHEOBUILD 1000 es un aditivo reductor de agua de alto-rango diseñado para producir concreto reoplástico. Este concreto fluye fácilmente manteniendo una alta plasticidad por tiempos más prolongados que el concreto superplastificado convencional. El concreto reoplástico tiene la baja proporción agua:material cementicio del concreto sin asentamiento, dando excelentes propiedades de ingeniería (endurecimiento). RHEOBUILD 100 cumple con los requerimientos de la norma ASTM C494- C494M para aditivos reductores de agua Tipo A, y Tipo F aditivos reductores de agua de alto rango.

CARACTERÍSTICAS

En el concreto plástico

- Rango de plasticidad de 200 a 280 mm (8-11 in)
- Retención prolongada de asentamiento
- Tiempos de fraguado controlados
- Permite mezclas cohesivas sin segregación y mínima exudación de agua.
- Mínima exudación

Para concreto endurecido

- Mayores resistencias iniciales en comparación con los superplastificantes convencionales
- Mayor resistencia final a compresión
- Mayor módulo de elasticidad
- Mejor resistencia de adhesión al acero
- Baja permeabilidad y alta durabilidad
- Menor contracción y deformación
- Integridad estructural del elemento terminado

altamente confiable

BENEFICIOS

- Menos dependencia de energía de consolidación
- Menor costo de mano de obra y mayor productividad
- La resistencia temprana permite la aceleración de los métodos de construcción, resultando en conclusiones de obra en tiempos menores a los planeados
- Permite cambios en las especificaciones de ingeniería ya que es factible aumentar los límites de caída libre del concreto fresco, los espesores de las coladas y temperaturas del concreto, así como ajustes económicos en las mezclas.

CARACTERÍSTICAS DE DESEMPEÑO

Velocidad de endurecimiento

RHEOBUILD 1000 ha sido diseñado para producir características normales de fraguado para todo el rango de dosificación que se recomienda. El tiempo de fraguado del concreto depende de la composición física y química de los ingredientes básicos del concreto, la temperatura del concreto y las condiciones ambientales. Deben hacerse mezclas de prueba con los materiales de la obra para determinar la dosificación requerida para el tiempo de fraguado especificado y un requerimiento de resistencia determinado.

Manejabilidad

El concreto al que se ha adicionado RHEOBUILD® 1000 tiene la capacidad de mantener una condición rheoplástica de 200 a 280 mm (8 a 11 in) de asentamiento si así se

**Master
Builders**



requiere. La duración precisa para poder trabajar la mezcla no solo depende de la temperatura, sino también del tipo de cemento, materiales cementicios suplementarios, proporciones de la mezcla, la naturaleza de los agregados, el método de transporte y la dosificación.

APLICACION

Dosificación

El rango de dosificación recomendado para el RHEOBUILD 1000 es de 650-1600 ml/100 kg (10-25 oz fl/100 lb) de material cementicio dependiendo de la aplicación y de cuanto se desee incrementar el asentamiento y resistencia.

Las dosificaciones anteriores aplican a la mayoría de las mezclas de concreto que usan ingredientes típicos del concreto. Debido a las variaciones en las condiciones de la obra y de los materiales de concreto como la microsifia, se podrán requerir rangos de dosificación diferentes a los recomendados. En tales casos, contacte a su representante local de BASF.

Mezclado

Ya que se incrementa la retención de asentamiento usando el aditivo RHEOBUILD 1000, éste se puede adicionar en la planta de premezclados. También puede adicionarse en la obra si se desea incrementar el asentamiento.

RECOMENDACIONES

Corrosividad

No corrosivo, no contiene cloruros

RHEOBUILD 1000 no iniciará o promoverá la corrosión del acero reforzado en el concreto, concreto pretensado o concreto colocado en sistemas de pisos y techos de acero galvanizado. No se utilizó cloruro de calcio ni ningún ingrediente a base de cloruros en la manufactura del aditivo RHEOBUILD 1000.

Compatibilidad

RHEOBUILD 1000 puede utilizarse en combinación con la mayoría de los aditivos de BASF Construction Chemicals y en todo el concreto de color y arquitectónico. Cuando se usa con otros aditivos, cada aditivo deberá adicionarse a la mezcla en forma separada. RHEOBUILD 1000 no debe usarse con RHEOMAC® UW 450 o RHEOMAC® 450 VMA ya que pueden experimentarse comportamientos erráticos en asentamiento, extensión del asentamiento o capacidad de bombeo.

Temperatura

Si se llega a congelar el RHEOBUILD 1000, eleva a una temperatura de 7°C (45°F) o mayor y reconstituya el producto por completo con una agitación mecánica ligera. No use aire presurizado para agitar.

ALMACENAMIENTO

RHEOBUILD 1000 tiene una vida útil de 18 meses como mínimo. Dependiendo de las condiciones de almacenamiento, la vida útil puede ser mayor.

EMPAQUE

RHEOBUILD 1000 se suministra en tambores de 208 l (55 gal), en tanques de 1040 l (275 gal) y a granel.

SEGURIDAD

Consulte la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) para este producto

Para información adicional sobre este producto o para su uso en el desarrollo de mezclas de concreto con características especiales de desempeño, consulte a su representante local de BASF.


BASF Construction Chemicals
23700 Chagrin Blvd
Cleveland, OH, USA, 44122
1-216-839-7550

México 55-5899-3984 www.basf-cc.com.mx	Guadalajara 33-3811-7335	Monterrey 81-8335-4425	Mérida 999-925-6127	Tijuana 664-686-6655
Costa Rica 506-2440-8110 www.centroamerica.basf-cc.com	Panamá 507-300-1360	Puerto Rico 1-787-258-2737 www.caribbean.basf-cc.com	Rep. Dominicana 809-334-1026 www.basf-cc.com.do	

© Marca registrada de BASF
© 10/2008

**CERTIFICADO DE
CALIBRACIÓN DE LOS EQUIPOS**

ASTALDI GYM		VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE MEDIDA DE EQUIPO DE INYECCIÓN (PRESIÓN Y VOLUMEN)								SCC-PCQ-CRP-05.006	
CONSORCIO RIO PALLCA		Cliente: CONTRATO PARA LA CONSTRUCCION DE OBRAS CIVILES Y EQUIPAMIENTO ELECTROMECANICO DE LA "CENTRAL HIDROELECTRICA HUANZA"				Obr. CONSTRUCCION CENTRAL HIDROELECTRICA HUANZA				Rev.0	
Cliente: CONSORCIO ENERGETICO DE HUANCAVELICA S.A.										Fecha: Setiembre 2,011	
EQUIPO DE LECTURA: DATA LOGGER JET 4000		FECHA: 17/10/2011				REPORTE No.:				2	
ITEM	TIPO DE FLUIDO	HORA	PRESIÓN (BAR)				VOLUMEN (Cm ³ litros)				COMENTARIOS
			DATA LOGGER	Manómetro	Δ P	% Δ P	DATA LOGGER	Contador	Δ V	% Δ V	
	Agua	08:49					100.2	100	0.2	0.20%	
	Agua						101.1	100	1.1	1.10%	
	Agua						100.3	100	0.3	0.30%	
	Agua	09:02	0.9 - 1.1	1	±0.1	±10%					Con flujo
	Agua		1.8 - 2.2	2	±0.2	±10%					Con flujo
	Agua		2.9 - 3.1	3	±0.1	±3.3%					Con flujo
	Agua		3.8 - 4.2	4	±0.2	±5%					Con flujo
	Agua		4.9 - 5.1	5	±0.1	±2%					Con flujo, proteccion salice hasta 5.6 bar
	Agua	09:22	4.0 - 5.1	5	±0.1	±2%					Sin flujo
	Agua		5.8 - 6.3	6	±0.2	±3.3%					Sin flujo
	Agua		2.9 - 3.1	3	±0.1	±3.3%					Sin flujo
COMENTARIOS Y/O OBSERVACIONES: Temperatura del agua: 12.3°C											

ASTALDI  GYM		VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE MEDIDA DE EQUIPO DE INYECCIÓN (PRESIÓN Y VOLUMEN)							RUC: PGO-CRP-09.804 Rev.0 Fecha: 08 de febrero 2014 Página: 1 de 1			
CONSORCIO PRO PALMISA		Cliente: CONSORCIO ENERGÉTICO DE HUANCAYEL S.A.			Contrato: CONTRATO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE OBRAS CIVILES Y EQUIPAMIENTO ELECTROMECÁNICO DE LA "CENTRAL HIDROELECTRICA HUANZA"			Obra: CONSTRUCCIÓN CENTRAL HIDROELECTRICA HUANZA				
EQUIPO DE LECTURA:		DATA LOGGER JET 4000			FECHA:			04/11/2011			REPORT: Nro.:	3
ITEM	TIPO DE FLUIDO	HORA	PRESIÓN (BAR)			VOLUMEN (m ³ litros)				COMENTARIOS		
			DATA LOGGER	Manómetro	Δ P	% Δ P	DATA LOGGER	Caudalímetro	Δ V		% Δ V	
	Agua	16:43					103.2	100.0	3.2	3.20%		
	Agua						103.0	100.0	3.0	3.00%	Terminado esta medición se calibró el equipo	
	Agua						99.9	100.0	-0.1	-0.10%		
	Agua						100.2	100.0	0.2	0.20%		
	Agua						100.0	100.0	0.0	0.00%		
	Agua						100.0	100.0	0.0	0.00%		
	Agua	17:19	2	2	0	0.0%						
	Agua		3	3	0	0.0%						
	Agua		4.1	4	0.1	2.5%						
	Agua		5.1	5	0.1	2.0%						
	Agua		6.2	6	0.2	3.3%						
COMENTARIOS Y/O OBSERVACIONES: Monómetro Marca Dynamic # 6, Certificado de Calibración CSA-1927-11												
Caudalímetro VANSA de 3.5m ³ /h S/N 11-03000354, Certificado de Calibración N° 0254-11/PRO-VANSA												
081. Es conforme												

ASTALDI		VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE MEDIDA DE EQUIPO DE INYECCIÓN (PRESIÓN Y VOLUMEN)						SUC-PCO-CHP-09.R06 Rev.0 Fecha: 06/09/2011 Página: 1 / 2			
CONSORCIO RÍO PALCA		CLIENTE: CONSORCIO ENERGÉTICO DE HUANCABALLA S.A.				CORPORATIVO: CONTRATO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE OBRAS CIVILES Y EQUIPAMIENTO ELECTROMECANICO DE LA "CENTRAL HIDROELECTRICA HUANZA"		DISEÑO: CONSTRUCCIÓN CENTRAL HIDROELECTRICA HUANZA			
EQUIPO DE LECTURA: Manómetros Varios			FECHA: 11/01/2012			REPORTE Nro.: 4					
ITEM	TIPO DE FLUIDO	HORA	PRESIÓN (DAR)				VOLUMEN (V* litros)				COMENTARIOS
			Patrón	Manómetro	A P	% A P	DATA LOGGER	Calibración	A V	% A V	
1	Nitrógeno		4	4	0	0.0%					Manómetro # 1 (11 bar) Certificado de Calibración: CSA 1924-11 Identificación: 8745
2	Nitrógeno		6	6	0	0.0%					
3	Nitrógeno		8	8	0	0.0%					
4	Nitrógeno		4	4	0	0.0%					
5	Nitrógeno		6	6	0	0.0%					Manómetro # 8 (11bar) Certificado de calibración: CSA 1924-11 Identificación: 971
6	Nitrógeno		8	8	0	0.0%					
7	Nitrógeno		4	4	0	0.0%					
8	Nitrógeno		6	6	0	0.0%					Manómetro # 0 (11 bar) Certificado de Calibración: CSA 1924-11 Identificación: 978
9	Nitrógeno		8	8	0	0.0%					
10	Nitrógeno		4	4	0	0.0%					
11	Nitrógeno		6	6	0	0.0%					Manómetro # 10 (11 bar) Certificado de calibración: SIC Identificación: 85
12	Nitrógeno		8	8	0	0.0%					
13	Nitrógeno		4	4	0	0.0%					
14	Nitrógeno		6	6	0	0.0%					Manómetro # 11 (16 bar) Certificado de Calibración: SIC Identificación: FN 837 Cod. L. 1001709
15	Nitrógeno		8	8	0	0.0%					
16	Nitrógeno		4	4	0	0.0%					
17	Nitrógeno		6	6	0	0.0%					Manómetro # 12 (16bar) Certificado de Calibración: SIC Identificación: FN837Cod. L. 1001706
18	Nitrógeno		8	8	0	0.0%					
19	Nitrógeno		4	4	0	0.0%					Manómetro # 13 (16 bar) Certificado de Calibración: SIC Identificación: FN 837 Cod

COMENTARIOS Y/O OBSERVACIONES: Manómetro Patrón: Certificado N° 0896/SQ N°10-11/ Control Instruments Products USA

**CUADRO DE RESULTADOS DE LOS
ENSAYOS DE COMPRESIÓN NO CONFINADA**

Cuadro de resultados de los ensayos de resistencia a la compresión de muestras de lechada de inyección de la cortina de presa Pallca.

Código de Muestreo	Dosificación	Frente / Elemento	f_c (kg/cm ²)	Fecha de moldeo	Probeta	Fecha de Rotura	Días	Altura (cm)	Peso (g)	ϕ (cm)	Área (cm ²)	Carga (kg-f)	H/D	Resistencia alcanzada (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
LI191	R a/c 0.75 : 1+0.5%	Presa Pallca P02 14:13	150	15-Nov-12	1	13-Dec-12	28	10.20	433	5.33	22.31	4480	1.91	200.8	197.5
					2	13-Dec-12	28	10.22	434	5.32	22.23	4430	1.92	199.3	
					3	13-Dec-12	28	10.19	426	5.32	22.23	4280	1.92	192.5	
LI192	R a/c 0.65 : 1+0.5%	Presa Pallca P02 1618	150	15-Nov-12	1	13-Dec-12	28	10.18	441	5.33	22.31	5530	1.91	247.8	278.7
					2	13-Dec-12	28	10.20	447	5.33	22.31	6440	1.91	288.6	
					3	13-Dec-12	28	10.20	450	5.34	22.40	6710	1.91	299.6	
LI193	R a/c 0.5 : 1+0.5%	Presa Pallca P02 17:40	150	15-Nov-12	1	13-Dec-12	28	10.18	444	5.30	22.06	7450	1.92	337.7	397.7
					2	13-Dec-12	28	10.16	461	5.34	22.40	9250	1.90	413.0	
					3	13-Dec-12	28	10.19	448	5.31	22.15	9800	1.92	442.5	
LI194	R a/c 0.75 : 1+0.5%	Presa Pallca P02 08:20	150	15-Nov-12	1	13-Dec-12	28	10.16	424	5.30	22.06	4070	1.92	184.5	174.5
					2	13-Dec-12	28	10.19	431	5.32	22.23	3650	1.92	164.2	
					3	13-Dec-12	28	10.14	416	5.30	22.06	3860	1.91	175.0	
LI195	R a/c 0.75 : 1+0.5%	Presa Pallca P02 09:35	150	15-Nov-12	1	13-Dec-12	28	10.15	418	5.29	21.98	4200	1.92	191.1	184.6
					2	13-Dec-12	28	10.18	426	5.31	22.15	4320	1.92	195.1	
					3	13-Dec-12	28	10.17	422	5.30	22.06	3700	1.92	167.7	
LI196	R a/c 0.75 : 1+0.5%	Presa Pallca P02 11:05	150	15-Nov-12	1	13-Dec-12	28	10.13	407	5.29	21.98	3630	1.91	165.2	180.5
					2	13-Dec-12	28	10.15	413	5.31	22.15	4050	1.91	182.9	
					3	13-Dec-12	28	10.14	406	5.30	22.06	4270	1.91	193.5	
LI197	R a/c 0.75 : 1+0.5%	Presa Pallca P02 08:50	150	16-Nov-12	1	14-Dec-12	28	10.19	437	5.32	22.23	6500	1.92	292.4	245.1
					2	14-Dec-12	28	10.21	449	5.34	22.40	4990	1.91	222.8	
					3	14-Dec-12	28	10.16	423	5.32	22.23	4890	1.91	220.0	

LI198	R a/c 0.75 : 1+0.5%	Presa Pallca P02 12:25	150	16-Nov-12	1	14-Dec-12	28	10.18	442	5.31	22.15	4290	1.92	193.7	193.6
					2	14-Dec-12	28	10.18	439	5.30	22.06	4430	1.92	200.8	
					3	14-Dec-12	28	10.22	449	5.32	22.23	4140	1.92	186.2	
LI199	R a/c 0.75 : 1+0.5%	Presa Pallca P02 16:45	150	16-Nov-12	1	14-Dec-12	28	10.19	444	5.33	22.31	4390	1.91	196.8	210.7
					2	14-Dec-12	28	10.17	438	5.31	22.15	4700	1.92	212.2	
					3	14-Dec-12	28	10.20	447	5.33	22.31	4980	1.91	223.2	
LI200	R a/c 0.75 : 1+0.5%	Presa Pallca Taladro T26B 13:05 hrs	150	17-Nov-12	1	15-Dec-12	28	10.20	438	5.32	22.23	5040	1.92	226.7	235.0
					2	15-Dec-12	28	10.18	430	5.30	22.06	5120	1.92	232.1	
					3	15-Dec-12	28	10.18	432	5.30	22.06	5430	1.92	246.1	
LI201	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro T0B Hora 7:50 hrs	150	18-Nov-12	1	16-Dec-12	28	10.21	425	5.33	22.31	4610	1.92	206.6	215.4
					2	16-Dec-12	28	10.21	426	5.33	22.31	5230	1.92	234.4	
					3	16-Dec-12	28	10.23	439	5.36	22.56	4630	1.91	205.2	
LI202	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro T0B Hora 9:40 hrs	150	18-Nov-12	1	16-Dec-12	28	10.16	416	5.30	22.06	5960	1.92	270.1	267.4
					2	16-Dec-12	28	10.20	432	5.32	22.23	5640	1.92	253.7	
					3	16-Dec-12	28	10.18	425	5.30	22.06	6140	1.92	278.3	
LI203	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro T0B Hora 12:15 hrs	150	18-Nov-12	1	16-Dec-12	28	10.20	433	5.34	22.40	4820	1.91	215.2	214.8
					2	16-Dec-12	28	10.15	417	5.30	22.06	4390	1.92	199.0	
					3	16-Dec-12	28	10.15	419	5.31	22.15	5100	1.91	230.3	
LI213	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro T0B Hora 10:07 hrs	150	21-Nov-12	1	19-Dec-12	28	10.18	430	5.26	21.73	4800	1.94	220.9	230.6
					2	19-Dec-12	28	10.22	439	5.24	21.57	5830	1.95	270.3	
					3	19-Dec-12	28	10.21	416	5.29	21.98	4410	1.93	200.6	
LI214	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro T0B Hora 11:15 hrs	150	21-Nov-12	1	19-Dec-12	28	10.20	431	5.30	22.06	5830	1.92	264.3	286.9
					2	19-Dec-12	28	10.19	428	5.30	22.06	6520	1.92	295.5	
					3	19-Dec-12	28	10.21	429	5.28	21.90	6590	1.93	301.0	

LI216	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro Q2A Hora 8:25 hrs	150	22-Nov-12	1	20-Dec-12	28	10.22	426	5.33	22.31	4660	1.92	208.9	206.9
					2	20-Dec-12	28	10.20	422	5.29	21.98	4700	1.93	213.8	
					3	20-Dec-12	28	10.16	414	5.27	21.81	4320	1.93	198.0	
LI217	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro Q1C Hora 12:55 hrs	150	22-Nov-12	1	20-Dec-12	28	10.18	424	5.30	22.06	4980	1.92	225.7	224.5
					2	20-Dec-12	28	10.21	429	5.28	21.90	4950	1.93	226.1	
					3	20-Dec-12	28	10.18	425	5.31	22.15	4910	1.92	221.7	
LI218	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro Q1C Hora 13:50 hrs	150	22-Nov-12	1	20-Dec-12	28	10.20	426	5.32	22.23	6090	1.92	274.0	285.2
					2	20-Dec-12	28	10.23	434	5.30	22.06	7200	1.93	326.4	
					3	20-Dec-12	28	10.19	428	5.30	22.06	5630	1.92	255.2	
LI220	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro QOD Hora 08:57 hrs	150	23-Nov-12	1	21-Dec-12	28	10.17	426	5.30	22.06	4540	1.92	205.8	204.9
					2	21-Dec-12	28	10.21	425	5.33	22.31	4410	1.92	197.6	
					3	21-Dec-12	28	10.17	412	5.31	22.15	4680	1.92	211.3	
LI221	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro QOD Hora 10:27 hrs	150	23-Nov-12	1	21-Dec-12	28	10.21	412	5.27	21.81	5750	1.94	263.6	274.6
					2	21-Dec-12	28	10.20	421	5.29	21.98	6010	1.93	273.4	
					3	21-Dec-12	28	10.19	418	5.31	22.15	6350	1.92	286.7	
LI222	R a/c 0.5 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro QOD Hora 11:28 hrs	150	23-Nov-12	1	21-Dec-12	28	10.18	449	5.32	22.23	8350	1.91	375.6	438.5
					2	21-Dec-12	28	10.18	448	5.30	22.06	10390	1.92	470.9	
					3	21-Dec-12	28	10.22	454	5.32	22.23	10420	1.92	468.8	
LI223	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro Q1D Hora 14:44 hrs	150	23-Nov-12	1	21-Dec-12	28	10.18	430	5.34	22.40	5250	1.91	234.4	228.6
					2	21-Dec-12	28	10.20	427	5.31	22.15	4870	1.92	219.9	
					3	21-Dec-12	28	10.16	413	5.28	21.90	5070	1.92	231.6	
LI224	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro QN.27D Hora 09:15 hrs	150	24-Nov-12	1	22-Dec-12	28	10.17	413	5.29	21.98	4750	1.92	216.1	203.2
					2	22-Dec-12	28	10.20	428	5.32	22.23	4390	1.92	197.5	
					3	22-Dec-12	28	10.22	429	5.31	22.15	4340	1.92	196.0	

LI225	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro QN.27D Hora 09:45 hrs	150	24-Nov-12	1	22-Dec-12	28	10.20	433	5.34	22.40	7070	1.91	315.7	304.5
					2	22-Dec-12	28	10.20	424	5.31	22.15	6840	1.92	308.9	
					3	22-Dec-12	28	10.22	441	5.33	22.31	6450	1.92	289.1	
LI227	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro QN27D Hora 11:43 hrs	150	24-Nov-12	1	22-Dec-12	28	10.23	418	5.31	22.15	5210	1.93	235.3	217.2
					2	22-Dec-12	28	10.23	417	5.33	22.31	3860	1.92	173.0	
					3	22-Dec-12	28	10.21	409	5.29	21.98	5350	1.93	243.4	
LI228	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro QN27G Hora 14:40 hrs	150	24-Nov-12	1	22-Dec-12	28	10.24	433	5.34	22.40	4530	1.92	202.3	212.3
					2	22-Dec-12	28	10.20	425	5.29	21.98	4360	1.93	198.4	
					3	22-Dec-12	28	10.24	431	5.32	22.23	5250	1.92	236.2	
LI229	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro QN27G Hora 15:18 hrs	150	24-Nov-12	1	22-Dec-12	28	10.22	441	5.31	22.15	6030	1.92	272.3	278.4
					2	22-Dec-12	28	10.18	423	5.30	22.06	7060	1.92	320.0	
					3	22-Dec-12	28	10.18	437	5.33	22.31	5420	1.91	242.9	
LI231	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro QNOG Hora 16:45 hrs	150	24-Nov-12	1	22-Dec-12	28	10.18	421	5.28	21.90	4940	1.93	225.6	229.4
					2	22-Dec-12	28	10.20	426	5.30	22.06	5380	1.92	243.9	
					3	22-Dec-12	28	10.21	424	5.28	21.90	4790	1.93	218.8	
LI232	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro QNO2B Hora 17:40 hrs	150	24-Nov-12	1	22-Dec-12	28	10.19	427	5.31	22.15	4400	1.92	198.7	212.7
					2	22-Dec-12	28	10.19	426	5.31	22.15	4760	1.92	214.9	
					3	22-Dec-12	28	10.22	434	5.33	22.31	5010	1.92	224.5	
LI233	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro QN27C Hora 07:34 hrs	150	25-Nov-12	1	23-Dec-12	28	10.21	450	5.31	22.15	5410	1.92	244.3	234.2
					2	23-Dec-12	28	10.18	432	5.31	22.15	5010	1.92	226.2	
					3	23-Dec-12	28	10.16	434	5.34	22.40	5200	1.90	232.2	
LI288	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro T34A Hora 07:04 hrs	150	6-Dec-12	1	3-Jan-13	28	10.20	413	5.34	22.40	4150	1.91	185.3	185.8
					2	3-Jan-13	28	10.10	400	5.30	22.06	3760	1.91	170.4	
					3	3-Jan-13	28	10.10	404	5.32	22.23	4480	1.90	201.5	

LI289	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro T31B Hora 07:40 hrs	150	6-Dec-12	1	3-Jan-13	28	10.10	396	5.30	22.06	3920	1.91	177.7	191.7
					2	3-Jan-13	28	10.20	408	5.32	22.23	4400	1.92	197.9	
					3	3-Jan-13	28	10.30	417	5.34	22.40	4470	1.93	199.6	
LI290	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro Q31B Hora 09:00 hrs	150	6-Dec-12	1	3-Jan-13	28	10.20	381	5.31	22.15	3970	1.92	179.3	184.0
					2	3-Jan-13	28	10.20	381	5.31	22.15	4240	1.92	191.5	
					3	3-Jan-13	28	10.20	383	5.30	22.06	4000	1.92	181.3	
LI291	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro S34 Hora 10:00 hrs	150	6-Dec-12	1	3-Jan-13	28	10.20	418	5.29	21.98	4890	1.93	222.5	223.9
					2	3-Jan-13	28	10.20	409	5.30	22.06	5420	1.92	245.7	
					3	3-Jan-13	28	10.30	421	5.30	22.06	4490	1.94	203.5	
LI292	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro UQN27G Hora 11:45 hrs	150	6-Dec-12	1	3-Jan-13	28	10.30	441	5.41	22.99	7420	1.90	322.8	254.4
					2	3-Jan-13	28	10.30	430	5.37	22.65	4740	1.92	209.3	
					3	3-Jan-13	28	10.30	443	5.40	22.90	5290	1.91	231.0	
LI293	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro UQN27E Hora 12:10 hrs	150	6-Dec-12	1	3-Jan-13	28	10.20	407	5.34	22.40	7070	1.91	315.7	292.1
					2	3-Jan-13	28	10.30	431	5.40	22.90	6520	1.91	284.7	
					3	3-Jan-13	28	10.20	411	5.34	22.40	6180	1.91	275.9	
LI294	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro UQN27E Hora 13:24 hrs	150	6-Dec-12	1	3-Jan-13	28	10.30	428	5.38	22.73	5600	1.91	246.3	256.0
					2	3-Jan-13	28	10.20	415	5.34	22.40	5200	1.91	232.2	
					3	3-Jan-13	28	10.20	422	5.36	22.56	6530	1.90	289.4	
LI295	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro T5A Hora 15:20 hrs	150	7-Dec-12	1	4-Jan-13	28	10.20	446	5.34	22.40	4910	1.91	219.2	204.9
					2	4-Jan-13	28	10.10	441	5.34	22.40	4330	1.89	193.3	
					3	4-Jan-13	28	10.20	446	5.36	22.56	4560	1.90	202.1	
LI296	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro T5A Hora 16:55 hrs	150	7-Dec-12	1	4-Jan-13	28	10.20	450	5.33	22.31	5150	1.91	230.8	218.7
					2	4-Jan-13	28	10.20	453	5.32	22.23	4450	1.92	200.2	
					3	4-Jan-13	28	10.30	463	5.38	22.73	5120	1.91	225.2	

LI297	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Palca Taladro T34A Hora 07:16 hrs	150	9-Dec-12	1	6-Jan-13	28	10.30	429	5.34	22.40	5780	1.93	258.1	234.0
					2	6-Jan-13	28	10.20	418	5.34	22.40	4860	1.91	217.0	
					3	6-Jan-13	28	10.30	431	5.37	22.65	5140	1.92	226.9	
LI299	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Palca Taladro T34A Hora 08:50 hrs	150	9-Dec-12	1	6-Jan-13	28	10.20	467	5.40	22.90	6020	1.89	262.9	238.5
					2	6-Jan-13	28	10.20	451	5.37	22.65	5460	1.90	241.1	
					3	6-Jan-13	28	10.10	441	5.38	22.73	4810	1.88	211.6	
LI300	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Palca Taladro T34B Hora 09:10 hrs	150	9-Dec-12	1	6-Jan-13	28	10.20	427	5.34	22.40	5020	1.91	224.1	194.7
					2	6-Jan-13	28	10.10	418	5.36	22.56	4010	1.88	177.7	
					3	6-Jan-13	28	10.20	429	5.34	22.40	4080	1.91	182.2	
LI301	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Palca Taladro T34B Hora 10:25 hrs	150	9-Dec-12	1	6-Jan-13	28	10.20	430	5.36	22.56	5410	1.90	239.8	243.7
					2	6-Jan-13	28	10.30	443	5.36	22.56	5930	1.92	262.8	
					3	6-Jan-13	28	10.20	429	5.34	22.40	5120	1.91	228.6	
LI314	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Palca Taladro T34B Hora 11:10 hrs	150	9-Dec-12	1	6-Jan-13	28	10.30	421	5.29	21.98	5270	1.95	239.8	251.2
					2	6-Jan-13	28	10.30	437	5.32	22.23	6210	1.94	279.4	
					3	6-Jan-13	28	10.20	421	5.30	22.06	5170	1.92	234.3	
LI316	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Palca Taladro QN34F Hora 07:50 hrs	150	13-Dec-12	1	10-Jan-13	28	10.20	439	5.33	22.31	7100	1.91	318.2	268.9
					2	10-Jan-13	28	10.20	433	5.33	22.31	5670	1.91	254.1	
					3	10-Jan-13	28	10.30	442	5.36	22.56	5290	1.92	234.4	
LI319	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Palca Taladro QN34G Hora 12:00 hrs	150	13-Dec-12	1	10-Jan-13	28	10.20	429	5.34	22.40	6770	1.91	302.3	297.9
					2	10-Jan-13	28	10.30	430	5.31	22.15	5650	1.94	255.1	
					3	10-Jan-13	28	10.20	436	5.34	22.40	7530	1.91	336.2	
LI322	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Palca Taladro QN34G Hora 09:25 hrs	150	14-Dec-12	1	11-Jan-13	28	10.30	446	5.33	22.31	4790	1.93	214.7	251.1
					2	11-Jan-13	28	10.20	427	5.30	22.06	5270	1.92	238.9	
					3	11-Jan-13	28	10.20	435	5.33	22.31	6690	1.91	299.8	

LI323	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro U1P1 Hora 07:10 hrs	150	15-Dec-12	1	12-Jan-13	28	10.20	435	5.34	22.40	5470	1.91	244.2	230.9
					2	12-Jan-13	28	10.10	419	5.32	22.23	5420	1.90	243.8	
					3	12-Jan-13	28	10.20	436	5.34	22.40	4580	1.91	204.5	
LI326	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro U1P1 Hora 12:50 hrs	150	15-Dec-12	1	12-Jan-13	28	10.20	430	5.33	22.31	7060	1.91	316.4	281.9
					2	12-Jan-13	28	10.20	432	5.31	22.15	6320	1.92	285.4	
					3	12-Jan-13	28	10.10	435	5.34	22.40	5460	1.89	243.8	
LI327	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro U1P3 Hora 13:10 hrs	150	15-Dec-12	1	12-Jan-13	28	10.20	419	5.30	22.06	4390	1.92	199.0	199.9
					2	12-Jan-13	28	10.20	419	5.30	22.06	4220	1.92	191.3	
					3	12-Jan-13	28	10.10	434	5.34	22.40	4690	1.89	209.4	
LI328	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro U1P3 Hora 13:50 hrs	150	15-Dec-12	1	12-Jan-13	28	10.20	431	5.36	22.56	5130	1.90	227.4	263.0
					2	12-Jan-13	28	10.20	428	5.33	22.31	6270	1.91	281.0	
					3	12-Jan-13	28	10.10	431	5.36	22.56	6330	1.88	280.5	
LI331	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro U1P2 Hora 07:00 hrs	150	17-Dec-12	1	14-Jan-13	28	10.20	430	5.27	21.81	4630	1.94	212.3	245.7
					2	14-Jan-13	28	10.30	431	5.29	21.98	5370	1.95	244.3	
					3	14-Jan-13	28	10.20	432	5.30	22.06	6190	1.92	280.6	
LI334	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro U1P1 Hora 09:40 hrs	150	17-Dec-12	1	14-Jan-13	28	10.10	374	5.33	22.31	4370	1.89	195.9	185.6
					2	14-Jan-13	28	10.10	370	5.31	22.15	3950	1.90	178.4	
					3	14-Jan-13	28	10.20	383	5.36	22.56	4120	1.90	182.6	
LI335	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro D1P1 Hora 07:10 hrs	150	18-Dec-12	1	15-Jan-13	28	10.20	450	5.40	22.90	5970	1.89	260.7	264.6
					2	15-Jan-13	28	10.30	444	5.34	22.40	6580	1.93	293.8	
					3	15-Jan-13	28	10.20	436	5.34	22.40	5360	1.91	239.3	
LI336	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro D1P1 Hora 07:50 hrs	150	18-Dec-12	1	15-Jan-13	28	10.20	425	5.31	22.15	5550	1.92	250.6	251.8
					2	15-Jan-13	28	10.30	422	5.29	21.98	5430	1.95	247.1	
					3	15-Jan-13	28	10.20	421	5.33	22.31	5750	1.91	257.7	

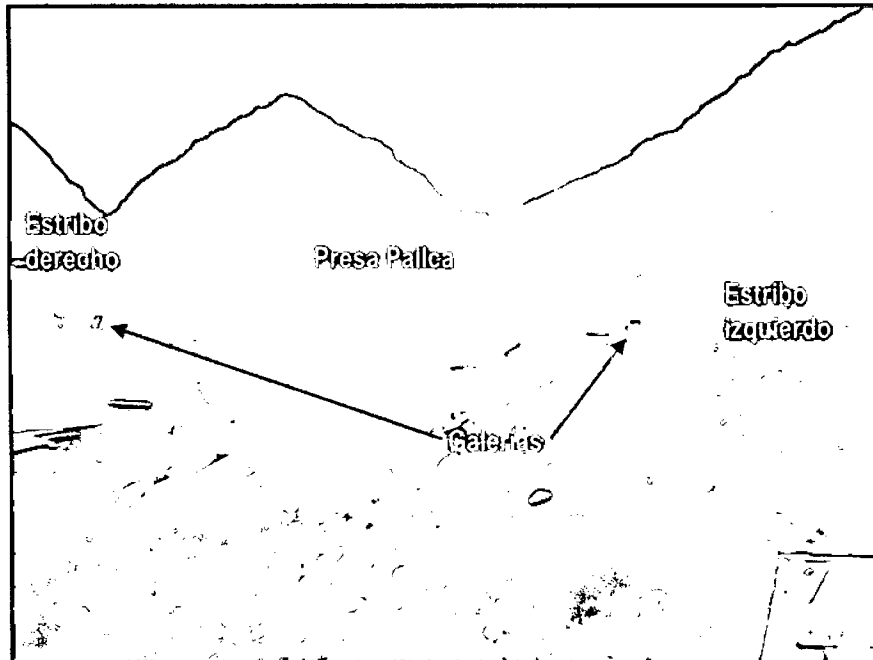
LI337	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro D1P1 Hora 09:15 hrs	150	18-Dec-12	1	15-Jan-13	28	10.20	402	5.41	22.99	4680	1.89	203.6	198.0
					2	15-Jan-13	28	10.20	406	5.29	21.98	4720	1.93	214.8	
					3	15-Jan-13	28	10.20	440	5.31	22.15	3890	1.92	175.7	
LI338	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro D1P3 Hora 09:30 hrs	150	18-Dec-12	1	15-Jan-13	28	10.30	440	5.26	21.73	3960	1.96	182.2	209.2
					2	15-Jan-13	28	10.20	431	5.28	21.90	4950	1.93	226.1	
					3	15-Jan-13	28	10.20	430	5.29	21.98	4820	1.93	219.3	
LI339	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro D1P3 Hora 09:50 hrs	150	18-Dec-12	1	15-Jan-13	28	10.20	424	5.33	22.31	5380	1.91	241.1	250.7
					2	15-Jan-13	28	10.20	424	5.31	22.15	5460	1.92	246.6	
					3	15-Jan-13	28	10.20	425	5.34	22.40	5920	1.91	264.3	
LI340	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro D1P3 Hora 11:00 hrs	150	18-Dec-12	1	15-Jan-13	28	10.20	408	5.30	22.06	4540	1.92	205.8	186.8
					2	15-Jan-13	28	10.30	415	5.31	22.15	3760	1.94	169.8	
					3	15-Jan-13	28	10.20	411	5.31	22.15	4090	1.92	184.7	
LI341	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro D1P2 Hora 07:30 hrs	150	19-Dec-12	1	16-Jan-13	28	10.30	458	5.34	22.40	5550	1.93	247.8	235.5
					2	16-Jan-13	28	10.20	429	5.32	22.23	5230	1.92	235.3	
					3	16-Jan-13	28	10.20	428	5.30	22.06	4930	1.92	223.5	
LI342	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro D1P2 Hora 07:50 hrs	150	19-Dec-12	1	16-Jan-13	28	10.30	238	5.32	22.23	7340	1.94	330.2	317.2
					2	16-Jan-13	28	10.20	426	5.28	21.90	6360	1.93	290.5	
					3	16-Jan-13	28	10.20	429	5.30	22.06	7300	1.92	330.9	
LI345	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro D1P2 Hora 11:45 hrs	150	19-Dec-12	1	16-Jan-13	28	10.30	414	5.28	21.90	4960	1.95	226.5	238.2
					2	16-Jan-13	28	10.20	410	5.30	22.06	6120	1.92	277.4	
					3	16-Jan-13	28	10.20	408	5.30	22.06	4650	1.92	210.8	
LI346	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro Q34A Hora 09:00 hrs	150	20-Dec-12	1	17-Jan-13	28	10.10	402	5.02	19.79	4960	2.01	250.6	250.8
					2	17-Jan-13	28	10.20	406	5.03	19.87	4430	2.03	222.9	
					3	17-Jan-13	28	10.20	407	5.01	19.71	5500	2.04	279.0	

LI348	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro Q34A Hora 11:20 hrs	150	20-Dec-12	1	17-Jan-13	28	10.10	395	5.02	19.79	5090	2.01	257.2	262.1
					2	17-Jan-13	28	10.20	391	4.99	19.56	4810	2.04	246.0	
					3	17-Jan-13	28	10.20	400	5.01	19.71	5580	2.04	283.1	
LI349	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro Q34E Hora 13:00 hrs	150	20-Dec-12	1	17-Jan-13	28	10.20	371	5.02	19.79	3150	2.03	159.2	174.5
					2	17-Jan-13	28	10.20	369	4.99	19.56	3650	2.04	186.6	
					3	17-Jan-13	28	10.10	371	5.02	19.79	3520	2.01	177.8	
LI350	R a/c 0.65 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro Q34E Hora 13:20 hrs	150	20-Dec-12	1	17-Jan-13	28	10.10	377	5.04	19.95	4070	2.00	204.0	202.7
					2	17-Jan-13	28	10.20	380	5.01	19.71	4110	2.04	208.5	
					3	17-Jan-13	28	10.10	372	5.00	19.64	3840	2.02	195.6	
LI351	R a/c 0.75 : 1+0.5% Rh	Presa Pallca Taladro Q34E Hora 13:50 hrs	150	20-Dec-12	1	17-Jan-13	28	10.20	375	4.96	19.32	3690	2.06	191.0	193.5
					2	17-Jan-13	28	10.10	354	4.92	19.01	3820	2.05	200.9	
					3	17-Jan-13	28	10.20	374	4.97	19.40	3660	2.05	188.7	
LI354	R a/c 0.75:1+0.5%	Presa Pallca D1P21 08:13 hrs	150	6-Jan-13	1	4-Feb-13	29	10.40	448	5.16	20.91	4960	2.02	237.2	245.9
					2	4-Feb-13	29	10.30	435	5.10	20.43	3300	2.02	161.5	
					3	4-Feb-13	29	10.20	432	5.08	20.27	6870	2.01	339.0	
LI355	R a/c 0.65:1+0.5%	Presa Pallca D1P21 08:40 hrs	150	6-Jan-13	1	4-Feb-13	29	10.30	428	5.10	20.43	4170	2.02	204.1	248.2
					2	4-Feb-13	29	10.30	424	5.18	21.07	6140	1.99	291.4	
					3	4-Feb-13	29	10.40	436	5.16	20.91	5210	2.02	249.1	
LI358	R a/c 0.75:1+0.5%	Presa Pallca UP1 17:45 hrs	150	9-Jan-13	1	6-Feb-13	28	10.50	469	5.15	20.83	5290	2.04	254.0	282.3
					2	6-Feb-13	28	10.40	446	5.11	20.51	6730	2.04	328.2	
					3	6-Feb-13	28	10.50	447	5.10	20.43	5410	2.06	264.8	
LI359	R a/c 0.75:1+0.5%	Presa Pallca UP5 07:40 hrs	150	10-Jan-13	1	7-Feb-13	28	10.50	439	5.12	20.59	4490	2.05	218.1	228.1
					2	7-Feb-13	28	10.30	421	5.10	20.43	4830	2.02	236.4	
					3	7-Feb-13	28	10.30	424	5.14	20.75	4770	2.00	229.9	

ANEXO 02

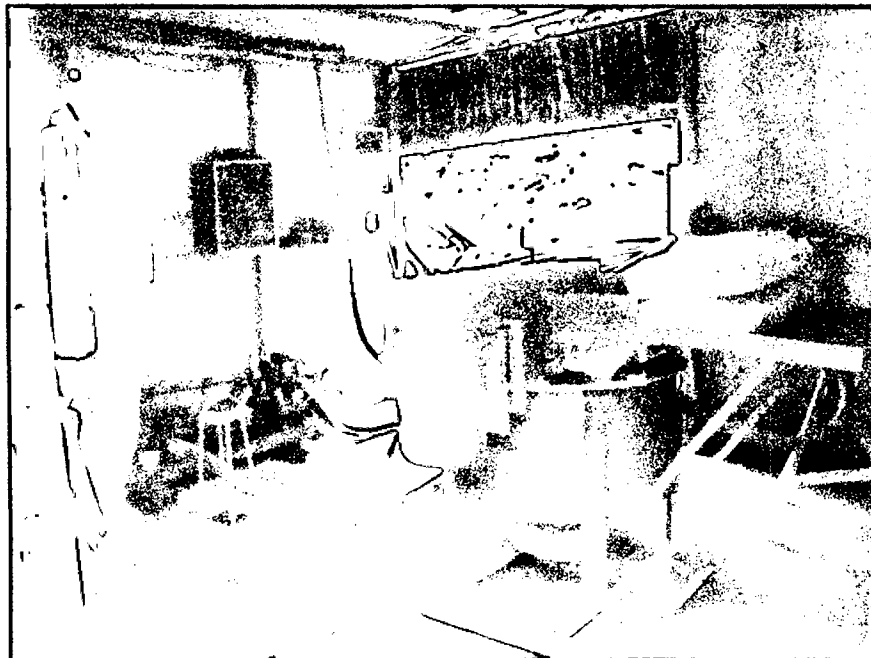
PANEL FOTOGRÁFICO

FOTO N°01



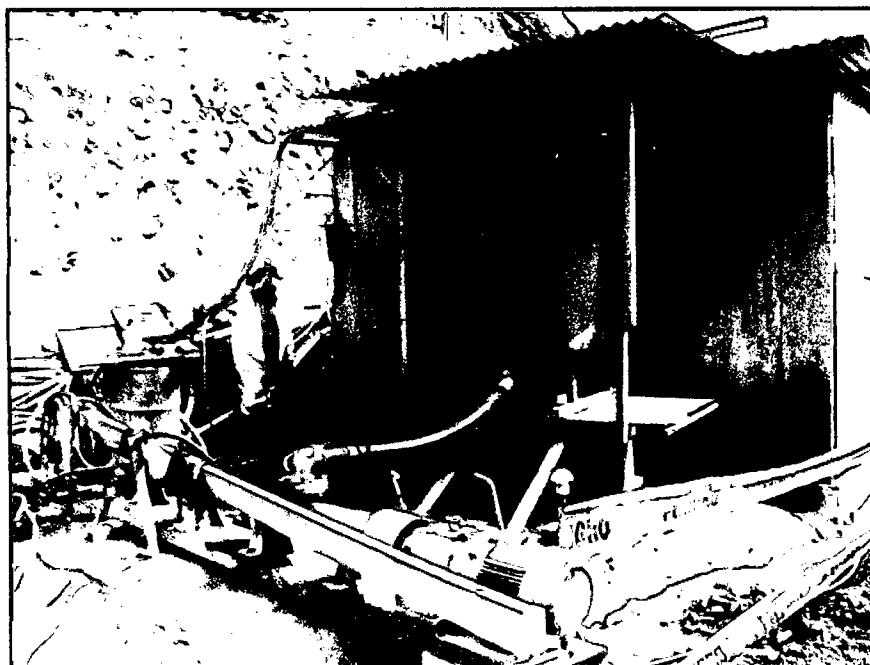
Vista panorámica del área de trabajo

FOTO N°02



Planta de inyecciones

FOTO N°03



Agitador de lechada – planta de inyecciones

FOTO N°04



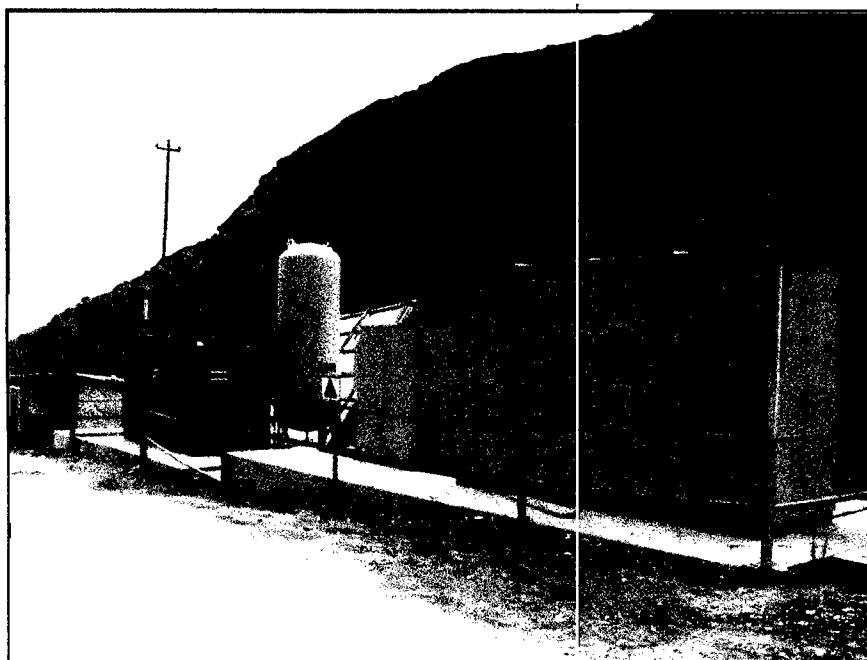
Bomba de inyección Peroni

FOTO N°05



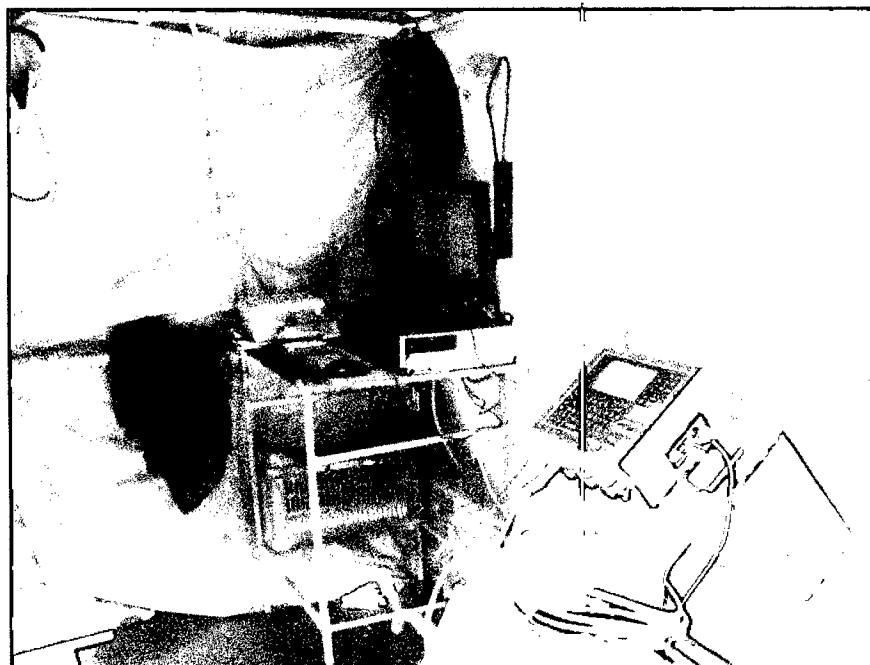
Bomba de inyección Moyno

FOTO N°06



Equipo de suministro de aire comprimido

FOTO N°07



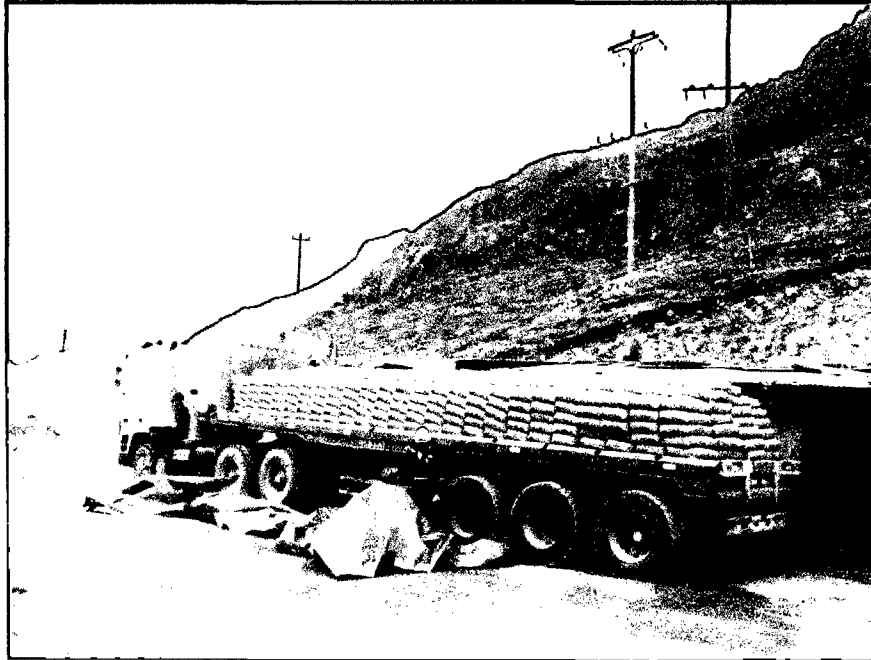
Equipo de monitoreo en tiempo real

FOTO N°08



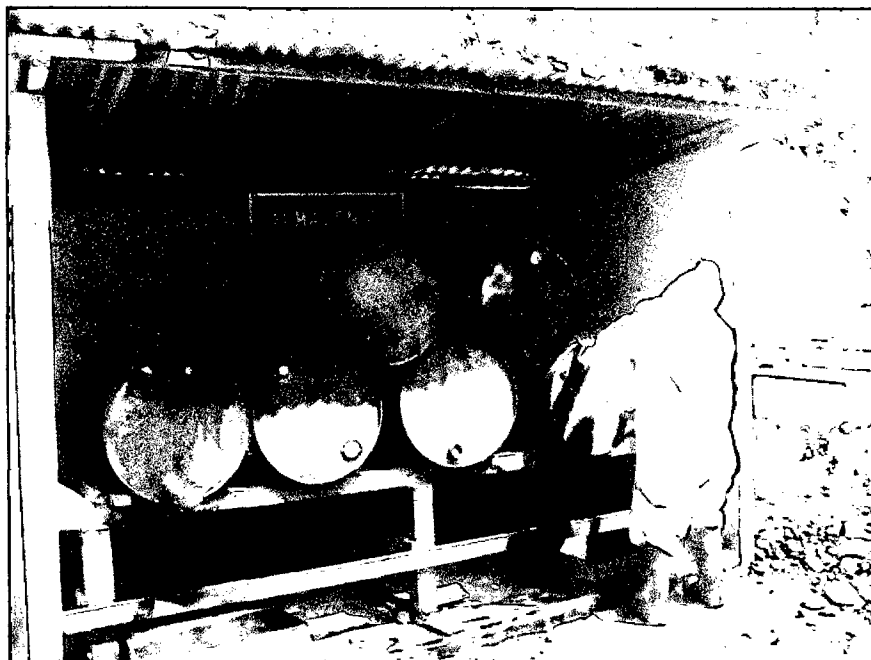
Calibración del equipo de monitoreo Data Logger Jet 4000

FOTO N°09



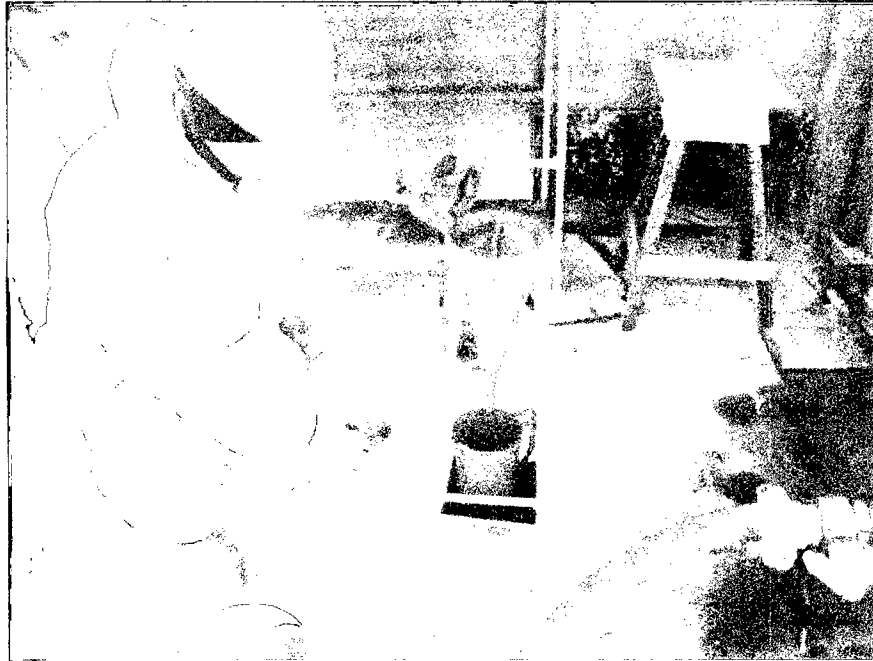
Almacenamiento del cemento Portland tipo I

FOTO N°10



Almacén de aditivos Rheobuild 1000

FOTO N°11



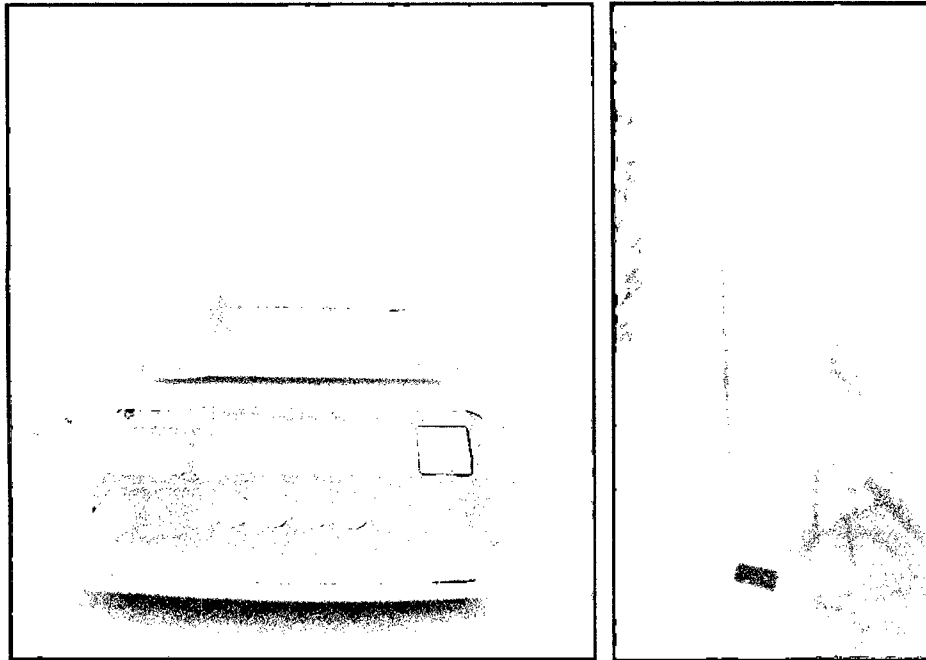
Ensayo de fluidez – cono Marsh

FOTO N°12



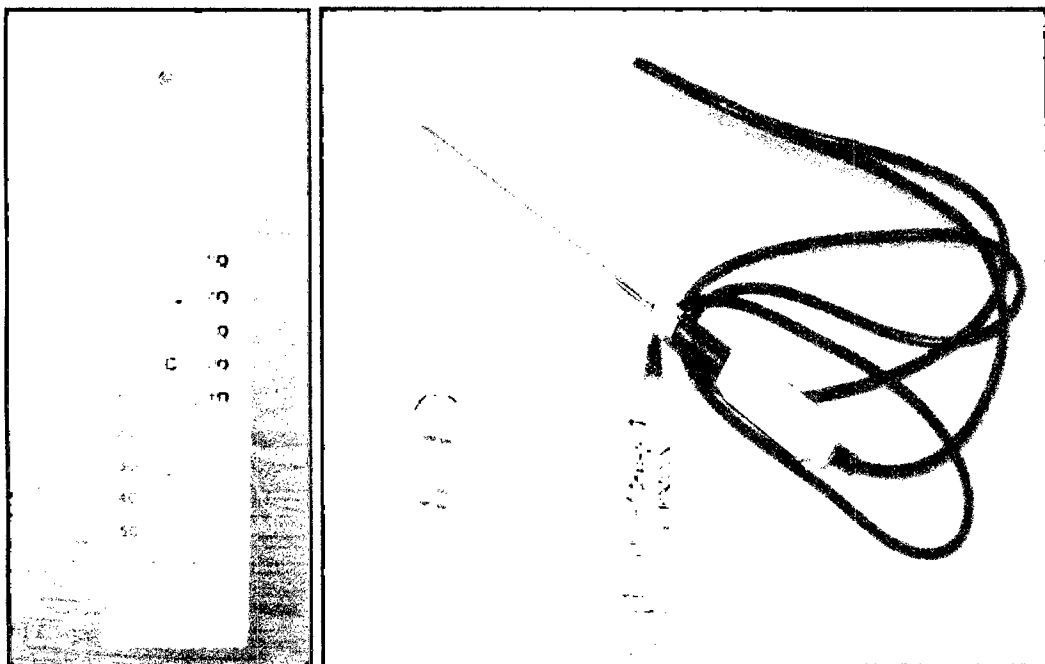
Ensayo de densidad – balanza de lodos

FOTO N°13



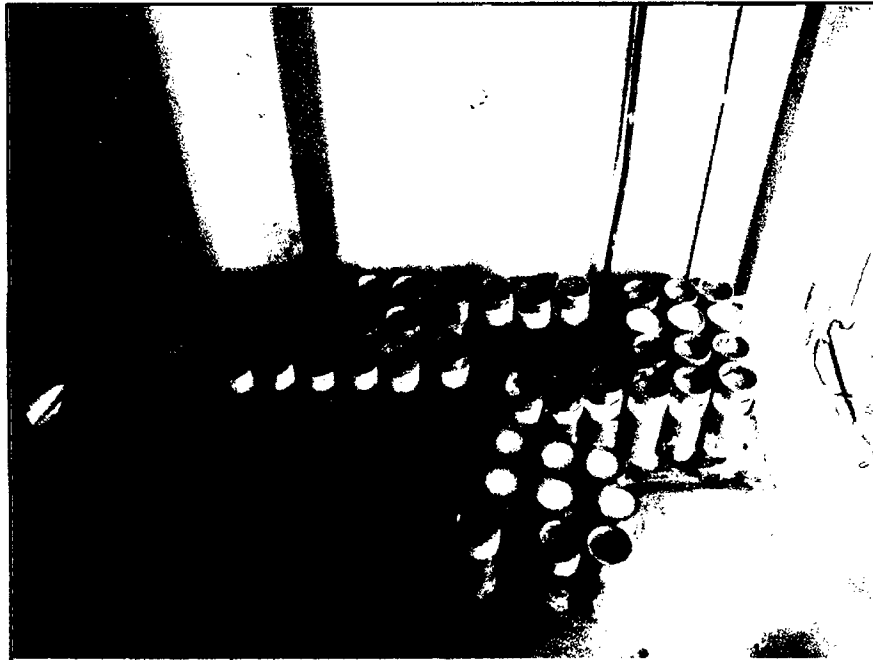
Izquierda: Equipos para ensayo de cohesión; Derecha: Ensayo de sedimentación

FOTO N°14



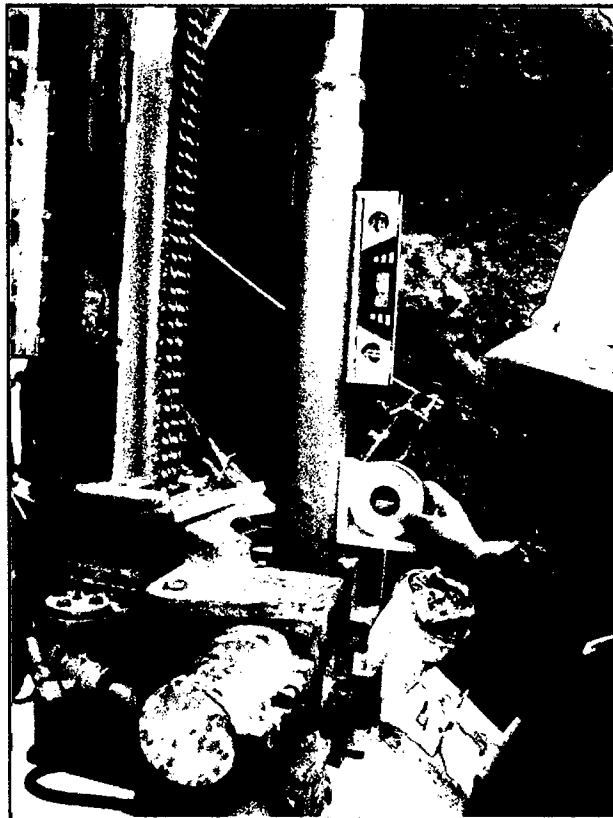
Izquierda: Termómetro Amarell; Derecha: Termómetro Pocket

FOTO N°15



Probetas de lechada para la prueba de ruptura

FOTO N°16



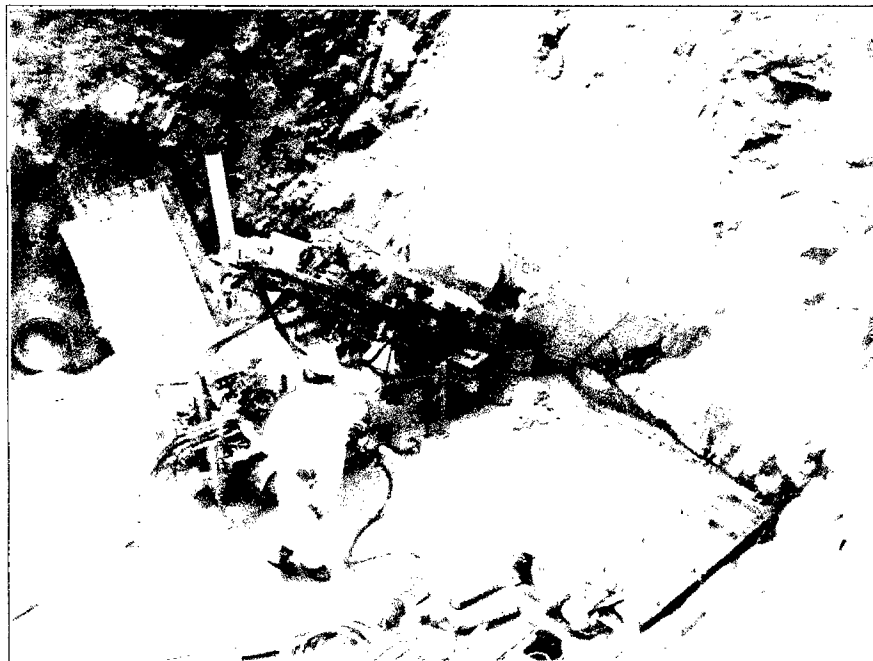
Control del ángulo de inclinación del taladro

FOTO N°17



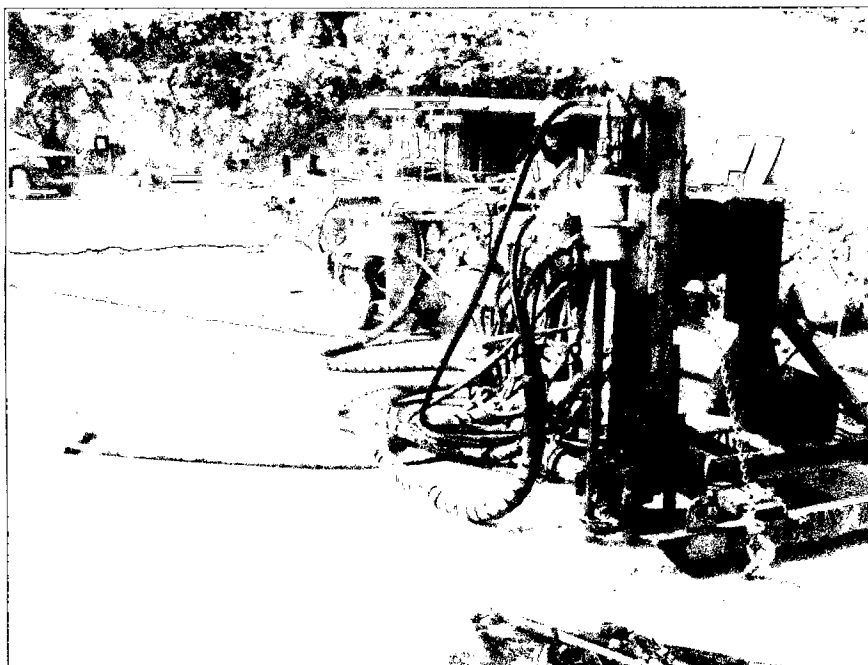
Verificación del diámetro de la broca de perforación

FOTO N°18



Perforación inclinada con la máquina Beretta T43

FOTO N°19



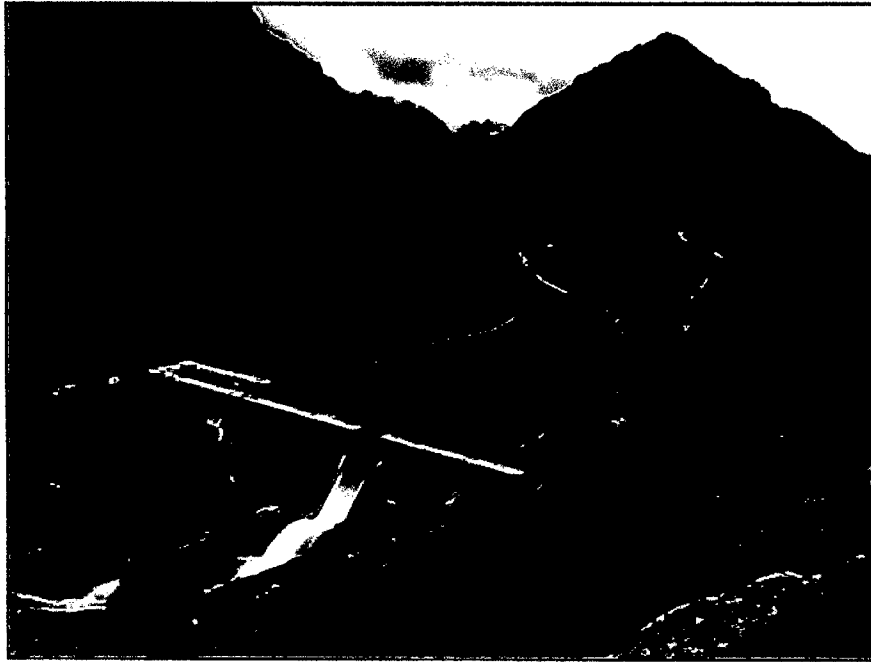
Perforación vertical con la máquina Diamec 232

FOTO N°20



Equipos de Trabajo (Empresas: ASTALDI y MWH PERÚ S.A.)

FOTO N°21



Vista panorámica de la presa Pailca

ANEXO 03