

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



**“APLICACIÓN DEL MÉTODO DE JET GROUTING PARA LA
IMPERMEABILIZACIÓN DEL TÚNEL DE DESVÍO DE LA PRESA
PUMAMAYO – DISTRITO DE MACUSANI – PROVINCIA DE CARABAYA –
REGIÓN PUNO”**

Tesis presentada por el Bachiller
ZEGARRA GOMEZ, LUIS FELIX
para optar el Título Profesional de
INGENIERO GEÓLOGO
Asesor: Pablo Rubén Meza Aréstegui

Arequipa – Perú

2020

DEDICATORIA

A mis padres, Luis y Rosa, por la formación que me dieron inculcándome siempre los buenos valores, por su constante apoyo en alcanzar mis objetivos y todo el amor recibido.

A mi hermano Luis por los años de vida que llevamos compartidos llenos de risas anécdotas y cariño.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por guiarme en mi camino a lo largo de toda mi vida, superando los obstáculos que se me ha presentado.

A mis padres Rosa y Luis, por el apoyo incondicional durante todos estos años, consejos palabras de aliento y comprensión para conmigo.

A los docentes de la escuela profesional de Ingeniería Geológica, por su apoyo y conocimientos que me ayudaron en el desarrollo de mi formación profesional.

A mi asesor. Ing. Pablo Meza Arestegui, por guiarme en el desarrollo de este anhelado logro profesional.

A la Universidad Nacional de San Agustín, que me dio la oportunidad de formar parte de ella.

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló en la presa Pumamayo, represa de tipo CFRD (concrete face rockfill dams), ubicada en el distrito de Macusani, provincia de Carabaya, región Puno, cuyo nivel máximo se encuentra en la cota 4,570.6 m.s.n.m.

Las filtraciones presentes en el Túnel de Desvío de la presa Pumamayo, implica que es necesario el desarrollo de una campaña de inyecciones de lechada en el túnel de descarga de fondo, con el propósito de alcanzar valores óptimos para mitigar las filtraciones existentes.

Las inyecciones que se desarrollaron en la estructura de descarga de la presa, se efectuaron aplicando el método de inyecciones JET GROUTING, por ser técnica y económicamente efectivo.

Los trabajos se iniciaron con las perforaciones a lo largo del túnel en los anillos propuestos a perforar, posteriormente se procedió con las inyecciones que, en el transcurso de los trabajos se dividieron en primarias, secundarias y terciarias, así mismo de acuerdo al análisis de las curvas de trayectoria de inyectado y a las absorciones de lechada, fue necesario aplicar una cuarta etapa en zonas de alto consumo. Con la última etapa de inyecciones se llega a un criterio de cierre, que finalmente fue corroborada con sondajes de verificación los cuales se realizaron con la finalidad de demostrar que las paredes internas del túnel han sellado adecuadamente y las bolsonadas de agua existentes no generarán nuevas filtraciones en la estructura.

La presente investigación es de tipo aplicada, donde se busca conocer y aplicar el método JET GROUTING de inyecciones a la problemática de permeabilidad en el túnel de desvío de la presa Pumamayo. Para demostrar la hipótesis aplicamos una investigación no experimental descriptiva donde se toman las condiciones de permeabilidad iniciales y se contrastan con las condiciones finales una vez aplicado el método JET GROUTING de inyecciones.

Palabras Clave: Permeabilidad, inyecciones, jet grouting, contacto, presas.

ABSTRACT

This work was developed in the Pumamayo dam, a dam of type CFRD (concrete face rock fill dams), located in the district of Macusani, province of Carabaya, Puno region, about 4450 AMSL.

The problem of permeability in the by-pass tunnel of the Pumamayo dam, implies that it is necessary to develop a grouting campaign in the bottom discharge tunnel, with the purpose of reaching optimum values to mitigate the existing leaks.

Injections that were developed in the structure of discharge of the dam, were carried out applying the JET GROUTING injections method, as it is technically and economically effective.

The Works began with the perforations along the tunnel in the rings proposed to be drilled, then the injections were made, which in the course of the works were divided into primary, secondary and tertiary, according to the analysis of the injected trajectory curves and grout removals, it was necessary to apply a fourth stage in areas of high consumption. With the last stage of injections, a closing criterion is reached, which will finally be corroborated with verification drills, which are carried out in order to demonstrate that the internal walls of the tunnel have been properly sealed and the existing water bags will not generate new filtrations I the structure.

The present investigation is of applied type, where it is sought to know and apply the JET GROUTING method of injections to the problematic of permeability in the diversion tunnel of the Pumamayo dam. To demonstrate the hypothesis, we apply a non-experimental descriptive investigation where the initial permeability conditions are taken and contrasted with the final conditions once the injections JET GROUTING method is applied.

Keywords: Permeability, injections, jet grouting, contact, dam.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
CONTENIDO.....	vi
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 UBICACIÓN.....	1
1.2 ACCESIBILIDAD.....	3
1.3 IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.....	3
1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.5 HIPÓTESIS.....	5
1.6 OBJETIVOS.....	5
1.6.1 Objetivo General.....	5
1.6.2 Objetivos Específicos.....	5
1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
1.7.1 Alcances de la Investigación.....	5
1.7.2 Limitaciones de la Investigación.....	5
1.8 VARIABLES E INDICADORES.....	6
1.8.1 Variables Independientes.....	6
1.8.2 Variables Dependientes.....	6
1.8.3 Indicadores.....	6
CAPÍTULO II.....	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 GENERALIDADES.....	7
2.2 MARCO GEOLÓGICO.....	7
2.2.1 Geología Regional.....	7
2.2 MARCO TEORICO ACERCA DE LAS INYECCIONES.....	17
2.2.1 Inyección de Lechada.....	17
2.2.2 Penetración de Lechada.....	17
2.2.3 Hidrofracturamiento e hidrogateo.....	18

2.2.4	Circuito de inyección	18
2.3	MÉTODOS TRADICIONALES DE INYECCIÓN.....	20
2.3.1	Inyección por Reemplazo o Jet Grouting.	20
2.3.2	Compensación o Fracture Grouting.	34
2.3.3	Inyección por Compactación	44
2.3.4	Chemical Grouting.....	47
2.3.5	Inyecciones de Cemento o Cement Grouting.	49
2.3.6	Inyecciones Ascendentes y descendentes	50
2.4	ENSAYOS DE PERMEABILIDAD.....	51
2.4.1	Ensayos de Permeabilidad Tipo Lugeon	51
2.4.2	Ensayos de Permeabilidad Tipo Lefranc	55
2.5	INYECTADO CONTROLADO POR COMPUTADORA.	57
2.5.1	Equipo de Registro Electrónico - LOGAC G5	58
	CAPÍTULO III.....	61
	MATERIAL DE ESTUDIO	61
3.1	GENERALIDADES	61
3.2	GEOLOGÍA LOCAL.....	61
3.3	DESCRIPCIÓN DEL TUNEL DE DESVÍO.....	71
3.3.1	Aspectos Generales	71
3.3.2	Diseño del Túnel	71
3.3.3	Geometría y Características del Túnel de desvío.....	71
3.4	CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROSOCO.....	72
3.4.1	Propiedades de la Roca Intacta.....	75
3.4.2	Clasificación Geomecánica del Macizo Rocosó	75
3.4.3	Condiciones Hidrogeológicas	76
3.5	DISEÑO DE LAS SECCIONES DE INYECCION.....	83
	CAPÍTULO IV	87
	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	87
4.1	GENERALIDADES	87
4.2	TIPO DE INVESTIGACIÓN	87
4.3	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	87
4.3.1	Recopilación Bibliográfica.....	87
4.3.2	Trabajo de Campo	88
4.3.3	Trabajo de Gabinete	89
	CAPÍTULO V.....	90
	IMPERMEABILIZACIÓN DEL TUNEL DE DESVÍO	90
5.1	GENERALIDADES.....	90

5.2 ELECCIÓN DEL MÉTODO JET GROUTING DE INYECCIONES EN EL TUNEL DE DESVÍO.....	90
5.3 ENSAYOS DE LABORATORIO EN CAMPO.....	91
5.3.1 Cohesión con Placa.....	91
5.3.2 Ensayo de Fluides Marsh - Viscosidad Dinámica (ASTM D6910-04).....	92
5.3.3 Densidad de la Mezcla (ASTM D4380-84).....	93
5.3.4 Factor de Decantación o Exudación (ASTM C243-95).....	93
5.3.5 Resistencia a la Compresión Simple (ASTM C349 -02).....	95
5.4 DISEÑO DE MEZCLA.....	96
5.5 DESARROLLO DE LAS PERFORACIONES.....	97
5.6 DESARROLLO DE INYECCIONES.....	98
5.6.1. Inyecciones Primarias de la Zona de Contacto.....	98
5.6.2. Inyecciones Secundarias de la Zona de Contacto.....	106
5.6.3. Inyecciones Terciarias de la Zona de Contacto.....	107
5.6.4. Inyecciones de Altos Consumos de la Zona de Contacto.....	108
CAPÍTULO VI.....	110
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	110
6.1 GENERALIDADES.....	110
6.2 EVALUACIÓN DE LA ZONA DE CONTACTO.....	110
6.2.1. Zona A (Desde la progresiva 0+020 hasta 0+070).....	112
6.2.1. Zona B (Desde la progresiva 0+070 hasta 0+120).....	113
6.2.1. Zona C (Desde la progresiva 0+120 hasta 0+170).....	115
6.2.1. Zona D (Desde la progresiva 0+170 hasta 0+220).....	116
CONCLUSIONES.....	119
RECOMENDACIONES.....	120
BIBLIOGRAFÍA.....	121

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.1 <i>Accesibilidad a la presa Pumamayo.</i>	3
Cuadro 2.1 <i>Resumen estratigráfico del área del proyecto.</i>	8
Cuadro 2.2 <i>Parámetros de inyección. Eurocodigo EN12761</i>	27
Cuadro 2.3. <i>Permeabilidad y resistencia. Keller Grundbau GmbH</i>	33
Cuadro 2.4 <i>Permeabilidad y resistencia. Keller Grundbau GmbH</i>	34
Cuadro 2.4 <i>Mezcla de lechada para inyección.</i>	41
Cuadro 3.1 <i>Características físicas del túnel.</i>	71
Cuadro 3.2 <i>Estaciones geomecánicas.</i>	74
Cuadro 3.3 <i>Perforaciones diamantinas.</i>	74
Cuadro 3.4 <i>Resumen de las clasificaciones geomecánica – Estaciones geomecánicas.</i>	76
Cuadro 3.5 <i>Calidad del macizo rocoso según la litología</i>	76
Cuadro 3.6 <i>Ensayos de permeabilidad del sondaje PP-1.</i>	82
Cuadro 3.7 <i>Control del nivel freático.</i>	82
Cuadro 3.8 <i>Unidades hidrogeológicas y su permeabilidad.</i>	83
Cuadro 3.9 <i>Resumen de perforaciones del Túnel de desvío.</i>	85
Cuadro 3.10 <i>Resumen de Perforaciones del túnel de desvío.</i>	87
Cuadro 5.1 <i>Diseño de mezclas para el Túnel de desvío.</i>	96
Cuadro 6.1. <i>Clasificación elaborada por Deere (1982) para absorciones de lechada.</i>	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Imagen satelital de la ubicación de la presa Pumamayo.	1
Figura 2.1. Columna estratigráfica regional. (Fuente: Modificado INGEMMET, 1996)	15
Figura 2.2 Inyección de lechada	17
Figura 2.3 Esquema bombeo de lechada (Fuente: MEYCO Expanding Horizons Underground).....	18
Figura 2.4. Circuito de Inyección	19
Figura 2.5. Esquema y circuito de inyección aplicando el Método de Jet Grouting.....	21
Figura 2.6. Esquema genérico de jet grouting. (Fuente: Layne Christensen Company) ...	22
Figura 2.7. Esquema de jet simple. (Fuente: Rodio Cementaciones Especiales)	22
Figura 2.8. Esquema de jet doble con agua. (Fuente: Rodio Cementaciones Especiales)	23
Figura 2.9. Esquema de jet doble con aire. (Fuente: Rodio Cementaciones Especiales)	23
Figura 2.10. Esquema de jet triple. (Fuente: Rodio Cementaciones Especiales)	24
Figura 2.11. Esquema de varillaje con broca de percusión. (Fuente: Boart Longyear)	25
Figura 2.12. Esquema de varillaje con broca de rotatoria. (Fuente: Boart Longyear)	25
Figura 2.13. Diagrama conceptual de inyección por compensación típico.	35
Figura 2.14. Eficiencia del Fracture Grouting en OCR=1 & 1.5 arcilla (Soga, 2004)	36
Figura 2.15. Perfil del Subsuelo, base del edificio y tubería de inyección.	38
Figura 2.16. El nivel de agua subterránea a 2.3m antes de la excavación en el sitio B.....	38
Figura 2.17. Flujo sin bombeo de la capa de arena y grava en la zona B.....	39
Figura 2.18. a) Antes de la excavación b) Después de la excavación.....	40
Figura 2.19. Ilustración esquemática del sistema de mangueras para la lechada.	41
Figura 2.20. Líneas de contorno finales de igual altura de elevación.	42
Figura 2.21. Gráfico de barras de los volúmenes de inyección.	42
Figura 2.22. Gráfico de trayectoria de los volúmenes de inyección.	43
Figura 2.23. Rendimiento de la lechada a) Antes del tratamiento b) Después del tratamiento	43
Figura 2.24. Esquema típico de inyección por compactación.....	47
Figura 2.25. Chemical Grouting.	48
Figura 2.26. Cement Grouting.	49
Figura 2.27 Inyecciones ascendentes y descendentes.....	50
Figura 2.28. Ensayo Lugeon con obturador simple y doble.	52
Figura 2.29. Condiciones de los ensayos de permeabilidad: a) flujo laminar; b) flujo turbulento; c) dilatación; d) erosión; e) relleno. (Modificado de Houlsby)	54
Figura 2.30. Ensayo Lefranc a carga constante.	55
Figura 2.31. Ensayo Lefranc a carga variable.	57
Figura 2.32. Registrador electrónico Logac G-5. (Fuente: Manual de Instrucciones LOGAC)	58
Figura 2.33. Composición del equipo. (Fuente: Manual de Instrucciones LOGAC)	59
Figura 2.34. Unidad de medición CFP (Fuente: Manual de Instrucciones LOGAC)	60
Figura 2.35. Modelo de registro de datos.....	60
Figura 3.1 Temperaturas anuales de Macusani (Fuente: Weather Spark 2016)	66
Figura 3.2 Temperaturas máximas y mínimas mes de junio en Macusani (Fuente: Weather Spark 2016)	66

Figura 3.3 <i>Categorías de nubosidad anual en Macusani (Fuente: Weather Spark 2016)</i>	67
Figura 3.4 <i>Precipitación histórica anual en Macusani (Fuente: Weather Spark 2016)</i>	67
Figura 3.5 <i>Distichia muscoides en la zona de Pumamayo – Macusani.</i>	68
Figura 3.6. <i>Columna estratigráfica local. (Fuente: Modificado INGEMMET,1996)</i>	69
Figura 3.7. <i>Esquema del diseño de sección del túnel (Fuente: Perforaciones e Inyecciones en el Túnel de desvío Proyecto Pumamayo).</i>	72
Figura 3.8. <i>Vista en planta del Túnel de desvío de la presa Pumamayo</i>	73
Figura 3.9. <i>Sección longitudinal del Túnel de desvío de presa (Fuente: Perforaciones e Inyecciones en el túnel de desvío proyecto regulación río Pumamayo.</i>	73
Figura 3.10. <i>Sección transversal del túnel y distribución de taladros.</i>	84
Figura 5.1. <i>Ensayo de cohesión.</i>	91
Figura 5.2. <i>Ensayo de viscosidad.</i>	92
Figura 5.3. <i>Medición de la densidad.</i>	93
Figura 5.4. <i>Ensayo de decantación.</i>	94
Figura 5.5. <i>Briquetas para el ensayo de compresión simple.</i>	96
Figura 5.6. <i>Ubicación de taladros con Pacómetro.</i>	97
Figura 5.7. <i>Instalación del equipo de inyección.</i>	98
Figura 5.8. <i>Consumos de lechada de cemento para las secciones primarias.</i>	99
Figura 5.9. <i>Índice de consumos de las inyecciones primarias para cada uno de los taladros de cada sección. (CT30, CT29, CT28, CT27, CT26, CT25)</i>	100
Figura 5.10. <i>Índice de consumos de las inyecciones primarias para cada uno de los taladros de cada sección. (CT24, CT23, CT22, CT21, CT20, CT19)</i>	101
Figura 5.11. <i>Índice de consumos de las inyecciones primarias para cada uno de los taladros de cada sección. (CT18, CT17, CT16, CT15)</i>	102
Figura 5.12. <i>Índice de consumos de las inyecciones primarias para cada uno de los taladros de cada sección. (CT14, CT13, CT12, CT11)</i>	103
Figura 5.13. <i>Índice de consumos de las inyecciones primarias para cada uno de los taladros de cada sección. (CT10, CT09, CT08, CT07, CT06, CT05)</i>	104
Figura 5.14. <i>Índice de consumos de las inyecciones primarias para cada uno de los taladros de cada sección. (CT04, CT03, CT02, CT01)</i>	105
Figura 5.15. <i>Consumos de lechada de cemento para los puntos de comprobación propuestos de las secciones primarias.</i>	106
Figura 5.16. <i>Consumos de lechada de cemento para las secciones secundarias.</i>	107
Figura 5.17. <i>Consumos de lechada de cemento para los puntos de comprobación de las secciones secundarias</i>	107
Figura 5.18. <i>Consumos de lechada de cemento para las secciones terciarias.</i>	108
Figura 5.19. <i>Instalación del equipo de inyección para las inyecciones de cuarta etapa.</i>	108
Figura 5.20. <i>Consumos de lechada de cemento para los puntos de altos consumos.</i>	109
Figura 6.1. <i>Absorciones de lechada en la zona – A del túnel de desvío.</i>	110
Figura 6.2. <i>Promedio de absorciones de lechada en la zona – A del túnel de desvío.</i>	112

Figura 6.3. <i>Absorciones de lechada en la zona – B del túnel de desvío.</i>	113
Figura 6.4. <i>Promedio de absorciones de lechada en la zona – B del túnel de desvío.</i>	114
Figura 6.5. <i>Absorciones de lechada en la zona – C del túnel de desvío.</i>	114
Figura 6.6. <i>Promedio de absorciones de lechada en la zona – C del túnel de desvío.</i>	115
Figura 6.7. <i>Absorciones de lechada en la zona – D del túnel de desvío.</i>	117
Figura 6.8. <i>Promedio de absorciones de lechada en la zona – D del túnel de desvío.</i>	117
Figura 6.9. <i>Distribución de taladros propuestos para la etapa de consolidación.</i>	118

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 UBICACIÓN

Políticamente el proyecto Pumamayo se ubica en la región Puno, provincia de Carabaya, distrito de Macusani; específicamente en la laguna Ajoyajota cuya salida del punto de represamiento se encuentra en las coordenadas UTM 0353670 E y 8443911 N, datum WGS 84, zona sur, huso y banda 19L.

La represa Pumamayo está a 10 kilómetros de la ciudad de Macusani sobre los 4,600 m.s.n.m. (Ver Figura 1.1).



Figura 1.1 Imagen satelital de la ubicación de la presa Pumamayo.

Plano 1. *Ubicación*

PLANO 01 - UBICACION

1.2 ACCESIBILIDAD

El acceso a la presa Pumamayo es por vía terrestre desde la Ciudad de Arequipa hasta la ciudad de Juliaca con 262 Km de longitud, de Juliaca se toma la carretera Interoceánica, tramo IV-A, hasta el distrito de Macusani con 209 Km de distancia, de Macusani se continua hasta el desvío Munay Paqocha en un tramo de 4.3 kilómetros de carretera asfaltada, desde el desvío finalmente se llega a la laguna Ajoyajota con 5.9 kilómetros de trocha carrozable (Ver Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1 *Accesibilidad a la presa Pumamayo.*

Tramo de Carretera	Características de la Carretera	Distancia (km)	Tiempo Estimado
Arequipa - Juliaca	Asfaltada	262	4 hrs
Juliaca - Macusani	Asfaltada	209	4.5 hrs
Macusani - Desvío Munay Paqocha	Asfaltada	4.3	10 min
Desvío Munay Paqocha - Ajoyajota	Trocha Carrozable	5.9	15 min

Fuente: Elaboración propia.

1.3 IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

La represa Pumamayo es una presa de tipo CFRD (concrete face rockfill dams) construida para el afianzamiento hídrico del río San Gabán con fines hidroenergéticos, se construyó en el río Ajoyajota o Pumamayo, afluente por la izquierda del río Macusani, tributario del río San Gabán en la región Puno.

La fundación del dique se encuentra constituida por rocas sedimentarias de la Formación Ambo del Carbonífero inferior con un rumbo N10°E y buzamiento de 35° a 45° NO. La litología del estribo izquierdo comprende areniscas cuarzosas y el estribo derecho presenta limolitas y limolitas carbonosas.

El túnel de desvío de la presa Pumamayo presenta filtraciones en diversas zonas a lo largo de la estructura, así como manchas de humedad y puntos de goteo, cabe señalar que, al ejecutarse el llenado del embalse de la presa en mención, aproximadamente al 40% de su capacidad total, en el exterior del túnel de descarga de fondo se presentaron filtraciones de agua, deteniéndose entonces el proceso de llenado.

Posteriormente y después de vaciado el embalse de la presa, se identificaron filtraciones de agua al interior del túnel de descarga de fondo, generando también presencia de manchas de humedad y puntos de goteo, deduciendo que dicha estructura necesita de la aplicación de un tratamiento geotécnico con la finalidad de impermeabilizar la estructura mitigando las filtraciones ocurrentes en nuestra estructura.

Dicho trabajo permite conocer las condiciones de conductividad hidráulica y aplicar el método JET GROUTING de inyecciones en la zona de contacto del túnel de desvío de la presa Pumamayo, además busca eliminar las zonas de filtraciones y garantizar la conductividad fluida efectiva de la estructura.

El diseño de inyección empleado permite también tener una idea clara de los volúmenes gastados, directamente relacionado al aspecto económico de todo proyecto, es decir, bajar el costo total de la ejecución del proyecto.

La impermeabilización de la zona de contacto del túnel de descarga de fondo, brinda un conocimiento importante en la inyectabilidad para este tipo de rocas y servirá como guía para proyectos de similares condiciones geológicas – geotécnicas, lo que significa un aporte importante en el aspecto tanto práctico como económico para empresas que se dedican a la Geotecnia de Obras Civiles.

1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Será efectivo el tratamiento geotécnico empleado aplicando el método JET GROUTING de inyecciones, para la impermeabilización del túnel de desvío de la presa Pumamayo?

Causa

- Conductividad hidráulica.
- Presencia de fallas.
- Fracturamiento mecánico del macizo rocoso del túnel de descarga.
- Medioambiente geológico.

Efecto

- Aplicar un tratamiento geotécnico de impermeabilización por medio de inyecciones de lechada la zona de contacto entre la roca y el túnel.

1.5 HIPÓTESIS

La impermeabilización de la zona de contacto del túnel de desvío de la presa Pumamayo, es posible utilizando el método JET GROUTING de inyecciones.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo General

- Desarrollar el proceso de impermeabilización en la zona de contacto del túnel de desvío de la presa Pumamayo - distrito de Macusani, aplicando el método JET GROUTING de inyecciones, para la impermeabilización del túnel de descarga de fondo y posterior represamiento de la presa Pumamayo.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Reconocer las condiciones geo mecánicas donde se aplicará las inyecciones de lechada por el método JET GROUTING.
- Aplicar forma sistemática el método JET GROUTING de inyecciones.
- Efectuar ensayos de calidad para las dosificaciones de lechada.
- Eliminar la presencia de filtraciones en el Túnel de desvío de la presa.
- Verificar la eficiencia del método de inyección empleado.
- Obtener el título profesional de ingeniero geólogo mediante la presentación y sustentación de la presente tesis.

1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

1.7.1 Alcances de la Investigación

- Permite describir y aplicar el método de inyecciones de JET GROUTING.
- Fundamentar la necesidad de realizar inyecciones de impermeabilización en la zona de contacto del Túnel de desvío de la presa Pumamayo.
- Eliminar las filtraciones existentes, manchas de humedad, puntos de goteo y demás eventos que sustenten la presencia de fluidos hídricos en la estructura.

1.7.2 Limitaciones de la Investigación

- El caudal natural atraviesa actualmente por el túnel de descarga de fondo, a pesar de que el caudal será reducido para realizar los trabajos, estos se realizaran con un caudal ecológico constante.

- Para mantener el caudal controlado se deberá de liberar un volumen a través del dique de la laguna.

1.8 VARIABLES E INDICADORES

1.8.1 Variables Independientes

- Tipo de roca
- Permeabilidad del macizo rocoso.
- Fracturas abiertas
- Fallas

1.8.2 Variables Dependientes

- Conductividad hidráulica del macizo rocoso.
- Inyectabilidad al macizo rocoso.

1.8.3 Indicadores

- Conductividad hidráulica.
- Curvas de trayectoria de inyectado.
- Absorciones de lechada.

Del mismo modo se realizaron ensayos de calidad para los fluidos de inyección tales como; cohesión, exudación, viscosidad, etc.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES

Para la identificación de las formaciones geológicas y la asignación de su edad, se ha tomado como base la información del Boletín N° 79, de la Carta Geológica Nacional, cuadrángulo de Macusani, (29-v), elaborado por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), publicado en 1996, con mapa geológico a escala 1:100 000, así como del expediente técnico del proyecto titulado “Estudio Definitivo y Elaboración del Expediente Técnico del Proyecto de Regulación del Río Pumamayo” elaborado por CESEL Ingenieros quien elaboró un trabajo de campo a detalle con perforaciones diamantinas, calicatas, etc.

2.2 MARCO GEOLÓGICO

2.2.1 Geología Regional

A. Lito-estratigrafía

Regionalmente, las rocas basales que afloran en la zona de estudio, presa Pumamayo, son de origen sedimentario, constituidas por limolitas y areniscas, plegadas y en discordancia entre las formaciones de edad Paleozoica y Mesozoica (Ver Cuadro 2.1 y Figura 2.1).

El embalse de Ajoyajota es parte de un valle glacial y posiblemente el resto de una antigua laguna, el fondo de la depresión es una llanura de suave inclinación, por donde el río discurre formando meandros.

1. Formación Ananea (SD-a)

Esta unidad se compone generalmente de limoarcillitas pizarrosas, limolitas pizarrosas con algunas intercalaciones de areniscas cuarzosas, es posible también encontrar micáceas de color gris oscuro a negro. El carácter pelítico que presenta esta unidad da origen a formas suaves de colinas y cerros bajos.

Cuadro 2.1 *Resumen estratigráfico del área del proyecto.*

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES	SIMBOLOGIA	DESCRIPCION
CENOZOICA	Cuaternario	Holoceno	Deposito Fluvial	Qh – fl	Arenas, gravas y limoarcillitas
			Deposito Aluvial	Qh – al	Gravas y áreas de clastos polimicticos
		Pleistoceno	Dep. Glacio Fluviales	Qh – gf	Gravas subredondeadas en matriz areno-limosa
			Depósitos Morrenicos	Qp – mo	Gravas y arenas brechosas en matriz areniscosa.
	Neógeno	Plioceno Mioceno	Formación Quenamari / Miembro Yapamayo	Np – ya	Tobas blanco grisáceas pobremente estratificadas con intercalaciones de tobas lapillíticas. Se caracterizan por su naturaleza riolítica.
Paleógeno	Oligoceno	Formación Cayconi.	PN – ca	Basaltos gris oscuros, muy erosionados en capas poco definidas	
MESOZOICA	Cretáceo	Inferior	Formación Viluyo.	Ki – vi	Areniscas cuarzosas y arcoscicas estratificadas con limo-arcillitas rojas lamiaras.
			Formación Huancané	Ki – hu	Areniscas cuarzosas blanquecina, grano medio que yacen en estratos gruesos y arcoscicas estratificadas con limo-arcillitas rojas lamiaras.
PALEOZOICA	Permiano	Superior	Grupo Mitu	Ps – mi	Lavas andesíticas porfiríticas y brechas con litoclastos volcánicos de color rojizo
		Inferior	Grupo Copacabana	Pi – c	Calizas micríticas gris claras con niveles de dolomitas y calizas nodulares en la base.
	Carbonífero	Inferior	Grupo Ambo	Ci – a	Areniscas cuarzosas blanquecinas a gris oscuras intercaladas con limolita, limoarcillitas negras carbonosas y violáceas.
	Siluriano Devoniano		Formación Ananea	SD - a	Pizarras y filitas gris oscuras foliadas y venillas de cuarzo.

Fuente: *Elaboración propia.*

Las limoarcillitas pizarrosas son de color gris oscuro a negras, presentan una marcada foliación paralela a la estratificación. En algunos niveles se encuentran nódulos de limoarcillitas, ferruginosas y calcáreas.

2. Grupo Ambo (Ci-a)

Dentro del Grupo Ambo diferenciaremos dos secuencias, una inferior que consiste de una intercalación de limoarcillita con areniscas en una proporción de 2:1 aproximadamente. Las limoarcillitas contienen micas y se presentan laminadas en estratos de más de 1.00 m de grosor. Las areniscas son de color gris blanquecino a gris, pudiendo llegar a ser de color beige, son de grano fino, gran parte de ellas son cuarzosas con alto contenido de muscovita, presenta laminación pronunciada, dando lugar a una fracturación en laja, las capas son delgadas a medianas (0.10 a 0.30 m).

La secuencia superior está caracterizada por areniscas cuarzosas con niveles de limoarcillitas laminares.

Las areniscas cuarzosas son de grano fino a medio, de color gris blanquecino, beige a gris, con excepción de aquellas areniscas que presentan bandas ferruginosas en la que toma un color rojo brunáceo, presenta además lamelas de muscovita. Los estratos varían entre 0.15 y 0.90 m de grosor, algunas capas tienen laminación interna, las areniscas contienen estructuras de paleo-corrientes, truncadas por otras capas sub-horizontales y se encuentran alineadas lateralmente en un solo nivel, se interpreta como de origen fluvial.

3. Grupo Copacabana (Pi-c)

Los afloramientos de este grupo dan origen a formas características que generalmente son abruptas con grandes escarpas verticales. El grupo Copacabana está compuesto generalmente de calizas en capas gruesas, de color claro debido a la meteorización y destacan morfológicamente entre las unidades lo cual hace difícil su reconocimiento a distancia.

4. Grupo Mitu (Ps-mi)

El Grupo Mitu da origen a una topografía escarpada de relieve abrupto, con picos elevados y fuertes pendientes, ocasionalmente presenta gruesos farallones de paredes casi verticales, en forma general está compuesto por dos litofacies, una clástica y otra volcánica, pero no pueden separarse debido a la interdigitación de ambas.

La unidad se inicia con una secuencia clástica que consiste de brechas sedimentarias con clastos de caliza micrítica, areniscas arcóscicas rojas y areniscas cuarzosas con matriz areniscosa roja, en capas de 1.5 metros.

La segunda litofacie, la volcánica, está compuesta por lavas andesíticas de textura porfirítica, de naturaleza plagiofírica con fenos que pueden llegar a medir hasta 0.03 m de largo,

es de color rojo violáceo y a veces gris. Presenta algunas intercalaciones de brechas con litoclastos volcánicos y algunas pizarras.

5. Grupo Moho - Formación Viluyo (Ki-vi)

La formación Viluyo está compuesta por areniscas cuarzosas de color rojizo y blanquecino, con intercalaciones de limoarcillita roja en capas de 0.05 a 0.3 metros de grosor, esta formación puede alcanzar hasta 126 metros de grosor, yaciendo en concordancia sobre la Formación Huancané e infrayace a la formación Ayavacas.

6. Formación Quenamari – Miembro Yupamayo (Np-ya)

Está compuesta por tobas blancas o blancas grisáceas, en capas gruesas (3.00 m), se intercalan tobas lapillíticas en capas también gruesas. Las tobas son de naturaleza riolítica, algo cohesionadas durante la recristalización razón por la cual las más gruesas son más friables.

El vidrio volcánico puede presentarse en las tobas de dos formas: como astillas de obsidiana que forma parte de la matriz con textura vitroclástica y como macusanita que es una variedad de vidrio volcánico no hidratado.

7. Depósitos Morrénicos (Qp-mo)

Estos depósitos se encuentran rellenando los valles glaciares antiguos, por encima de los 4200 metros, son generalmente morrenas que están constituidas por brechas de composición variada, los clastos están englobados en una matriz arenosa, presentan una estratificación muy mala.

8. Depósitos Glacio-fluviales (Qp-gf)

Estos depósitos provienen de la erosión y re-movilización de los depósitos morrénicos debido a la desglaciación. Depósitos de este tipo se tienen en el cerro Huari Umaña, cerro Amaysanca, fundo Ajamani, Pampa Lacca y Pampa Ccaluyo. Estos depósitos están constituidos por gravas con clastos de hasta 0.50m de diámetro, sub-redondeados a redondeados en una matriz arenosa o areno-limosa, presenta cuerpos lenticulares de areniscas de grano fino a medio.

9. Depósitos Aluviales (Qp-al)

Son aquellos depósitos que se acumulan en los fondos de los valles y quebradas tributarias, también se encuentran formando superficies sub-horizontales, tales como las

pampas Calapampa, Patanipampa. Están constituidas por gravas polimícticas en una matriz arenosa.

B. Geomorfología

El área de estudio está controlada morfo estructuralmente por el flanco Oriental de la Cordillera de los Andes en el Sureste peruano. Este accidente geomorfológico ha controlado las condiciones climáticas de la zona, presentando como característica una variedad de relieves debido a diferentes procesos geomorfológicos que han actuado sobre las diversas litologías. Condicionados por otros elementos morfoestructurales como la depresión tectónica de Macusani y los bloques paleozoicos levantados, así como la variación de las condiciones climáticas.

1. Relieve Cordillerano

Esta unidad geomorfológica se encuentra distribuida en el sector central norte y nororiental del cuadrángulo. Corresponde a los nevados y los cerros más altos que presentan fuertes pendientes y en algunos casos picos pronunciados.

La glaciación cuaternaria es uno de los agentes que actuaron en el modelado del terreno en casi todo el cuadrángulo, pero es en el relieve cordillerano en donde aún se observa la acción del hielo sobre la roca, conservándose glaciares en algunos lugares y que están formando parte de nevados como: el Queroni, Toldoqueri, Balansani, Ravelinas, Muro Muruni, Vilajota, los cuales delinean la Cordillera Oriental en el cuadrángulo de Macusani.

La litología que constituye a esta unidad está representada por rocas ígneas tales como las de los plutones de Coasa y de San Francisco de Quenamari, y rocas sedimentarias tales como las rocas del Paleozoico superior, compuestas de areniscas y calizas, y formando estructuras de rumbo NO-SE a E-O. Esta geoforma tiene mayor amplitud al Este del río Tirutaria alcanzando más de 25 km de ancho, en cambio entre Antauta y Macusani tiene aproximadamente 10 km.

2. Laderas Cordilleranas

Esta unidad se distribuye en la parte Central y Oriental del cuadrángulo, y está bordeando a la unidad de Relieve Cordillerano. Presenta pendientes no muy fuertes, con perfiles asimétricos y disectados por quebradas profundas. Forma un nexo entre el relieve cordillerano y las peneplanicies andinas.

La glaciación cuaternaria es aún el principal agente modelador, dando origen a una serie de cerros de mediana altura. Litológicamente está compuesta de rocas del Paleozoico superior

(areniscas, calizas y conglomerados), ubicadas al Norte de la Depresión Ananea – Crucero – Cojata. En esta unidad las elevaciones aún pueden presentar crestas pronunciadas y cambios bruscos de relieve así mismo se nota una disminución paulatina de la altitud del eje de la cordillera hacia los flancos.

3. Peneplanicie Andina

Ubicada en la parte Central y Septentrional del cuadrángulo. Está compuesta por superficies planas, ligeramente onduladas y cerros pequeños de baja altura que se encuentran disectados por ríos de cursos sinuosos que forman bofedales y pequeñas lagunas.

Estos emplazamientos corresponden a antiguas llanuras lacustres de origen glaciar, en las que aún permanecen pequeñas lagunas, las que sufrieron un modelado y reducción de su masa inicial de materiales, producida por la acción combinada de meteorización, remoción en masa y la erosión, producida en gran parte por las aguas de escorrentía, formando estas peneplanicies a los que los lugareños les llaman “pampas”, tal como la de Calapampa por donde discurre el río Crucero.

Básicamente, la peneplanicie andina esta tapizada por depósitos aluviales, glaciofluviales, de pie de monte y morrénicos, estas últimas evidencian antiguas llanuras erosionadas, se considera que esta depresión morfológica tiene su inicio en una depresión tectónica originada probablemente por esfuerzos distensivos que afectaron esencialmente a un macizo de rocas paleozoicas.

4. Lomas

Esta unidad se ubica en la parte Centro y Noroccidental de la hoja, en los bordes de las peneplanicies. Forma pequeñas elevaciones de terreno, con perfiles moderados convexos y bordes alargados y redondeados.

5. Colinas Intracordilleranas

Se ubican inmediatamente al Sur de las peneplanicies centrales conformando unas colinas altas que se elevan progresivamente de las peneplanicies centrales hasta los bordes de las zonas más conspicuas de esta área que se denominan cumbres intracordilleranas.

Litológicamente se compone de rocas del Paleozoico superior y de afloramientos del Cenozoico que tienen inclinaciones moderadas. Representan el paso de las cumbres intracordilleranas a las áreas más bajas y de relieve suave.

6. Cumbres Intracordilleranas

Se ubican en la parte Suroccidental de la hoja, forman las partes más saltantes de la Pre-Cordillera de Carabaya que es un macizo de rocas paleozoicas que sigue una dirección N 60 O aproximadamente con 12 km de ancho. Se caracteriza por una topografía abrupta de montañas disectadas por ríos profundos que cortan la unidad de Norte a Sur, formando valles maduros. Sus montañas alcanzan altitudes que bordean los 5,000 msnm como los cerros Condorpata (5,107 msnm), Coritajane (4,848 msnm), Ichumoroco (4,718 msnm), Ccalacruz (4,930 msnm).

Litológicamente está constituido por los afloramientos de areniscas y calizas del Paleozoico superior que conforman los grupos Ambo, Tarma y Copacabana. Estas cumbres intracordilleranas se encuentran limitadas por fallas que han permitido su ascenso como un bloque de rocas más antiguas que aquellas de la parte suroeste y constituyen el Sinclinorio de Putina.

7. Sinclinorio de Putina

Se distribuye en el extremo suroeste de la hoja y está conformada por colinas y cerros de crestas alargadas que siguen un control estructural, que se encuentran disectados por ríos y quebradas con direcciones N – S, el relieve tiene altitudes entre 4,000 y 4,800 m.s.n.m. Litológicamente está compuesta por las capas rojas, areniscas y calizas cretáceas de las formaciones Muni, Huancané, Grupo Moho y Formación Ausangate, las mismas que se disponen en estas estructuras de orientación NO – SE con alternancia irregular de elevaciones y depresiones morfológicas.

8. Plataforma Volcánica

Esta unidad se ubica el extremo Noroccidental del cuadrángulo y está formando una superficie plana y ligeramente ondulada que la caracteriza, se diferencia de otras unidades por su drenaje dentrítico de quebradas profundas y barrancos abruptos. Tiene un control litológico conformado por tobas de la Formación Quenamari, se encuentran en posición sub-horizontal.

9. Valles Fluviales

Se ubican generalmente en la parte Central y Meridional del cuadrángulo, al sur de las peneplanicies con direcciones preferenciales Norte – Sur. Estos valles conforman los cursos inferiores de los ríos. Se caracterizan por su sección transversal en forma de “V” y con pendientes moderadas, emplazadas en un fondo plano relleno por depósitos fluviales inconsolidados: limos, arenas y gravas, con rodados de formas redondeadas a sub-redondeadas y de diferente

composición. Las terrazas fluviales están poco desarrolladas y generalmente asimétricas. Entre los ríos que forman estos valles tenemos: los ríos Angostura, Pirhuani, Condoriri y el río Crucero, después de cruzar el “codo”, en la parte Meridional de la hoja. Los ríos Pichichuane, Vicullune, Pacobamba y Añucaya que desaguan en la pampa Calapampa. Así como los ríos Antauta y Ajoyani, que desaguan en el “codo” de Crucero.

10. Valles Glaciares

Esta unidad predomina sobre todo en la parte Central y Nororiental de la hoja de Macusani, conformando los cursos superiores de los ríos, con una orientación predominante Norte – Sur y Sureste – Noroeste. Constituyen el nexo entre los nevados de la zona y los cursos medios de los ríos y peneplanicies aluviales.

Transversalmente presentan una forma típica en “U” con un fondo curvo o casi planar, el cual es claramente notorio en la cabecera de estos ríos, mientras en sus cursos medio e inferior esta forma se va perdiendo paulatinamente. Es común encontrar, longitudinalmente, umbrales o escalones que corresponden a zonas de menor excavación de los glaciares, de los cuales quedan pocas evidencias de la erosión glacial debido a la posterior erosión fluvial. Sin embargo, aún se observan numerosos depósitos de morrenas y sobre todo depósitos glaciofluviales inconsolidados, que están compuestos por clastos subangulosos y subredondeados de tamaños variables y de distinta naturaleza. Los valles en las nacientes de los ríos Cayconi, Añucaya, Chullumayo, Trapiche, Achasiri y Queyacucho son característicos de esta morfología, así como los cursos superiores de ríos Antauta y Pirhuani, los que generalmente se localizan entre las cumbres elevadas y nevados de relieve cordillerano.

11. Circos Glaciares

Se localizan generalmente al Nororiente y Centro del cuadrángulo, ubicándose en las cabeceras de los ríos. Presentan la típica forma en “U” con unas cabeceras empinadas y cuenca en forma circular, separadas de los valles glaciares por los umbrales. Se encuentran tapizados por depósitos morrénicos de tamaños muy heterogéneos, con abundantes bofedales y pequeñas lagunas. Por su naturaleza están asociados a nevados como el Balansani, Queroni, Toldorequi, Muro Muro, así como lagunas como la Pumajolluni, Ajoyajota y Pampacocha.

12. Valles Encañonados

Se tiene pocos representantes de tales valles, generalmente están ubicados al Nororiente del cuadrángulo, justo en el flanco Este de la Cordillera Oriental donde se tiene cambios bruscos de altitud en tramos cortos.

Se manifiestan como valles profundos de paredes escarpadas y pendientes verticales a subverticales, que comúnmente tienen un fondo en forma de “V”, pero en el que destacan más sus impresionantes acantilados. Entre estos valles encañonados tenemos el curso inferior del río Ahasiri, y el de los lagos Sajosa y Pacchani, que drenan hacia el río Inambari cortando rocas de resistencia homogénea.

C. Rocas Intrusivas

1. Intrusivo Riolítico (N-ri)

Ubicado a 10 km al este de Macusani bajo el nombre de cerro Carcapata que tiene más de 4 km de largo por 2 km de ancho, litológicamente corresponde a tobas de matriz afanítica con fragmentos sub angulosos y sub redondeados en la que se encuentran amígdalas rellenas por feldespatos y fragmentos de cuarzo, plagioclasa y biotita. Además, contiene fragmentos líticos sub angulosos y sub redondeados de origen ígneo con feldespatos potásicos y plagioclasas, así como fragmentos volcánicos de textura porfírica, con moldes de fenos alterados a feldespatos y minerales opacos. Los cristales de plagioclasa y cuarzo presentan microfracturas rellenas por sericita y clorita, se encontraron además sílice en venillas y en microfracturas de fragmentos.

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES	Simbología	Potencia (m)	GRÁFICO	DESCRIPCIÓN	
CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno	Depósitos Aluviales	Qp-al			Gravas y arenas de clastos polimícticos	
		Pleistoceno	Dep. Glaciofluviales	Qp-gf			Gravas subredondeadas en matriz areno-limosa	
			Dep. Morrénicos	Qp-mo			Gravas y arenas brechosas en matriz areniscosa	
Neógeno	Plioceno	Formación Quenamari	Miembro Yapamayo	Np-ya	500		Tobas blanco grisáceas pobremente estratificadas con intercalaciones de tobas lapilíticas. se caracterizan por su naturaleza riolítica	
MESOZOICO	Cretáceo	Inferior	Grupo Mocho	Formación Viluyo	Ki-vi	<150		Arenisca cuarzosa rojiza con niveles de arenisca cuarzosa blancas y limoarcillitas.
PALEOZOICO	Pérmico	Superior	Grupo Mitu	P-s-mi	500		Lavas porfíricas con grandes fenocristales de plagioclasas Conglomerado polimíctico, brechas y areniscas.	
		Inferior	Grupo Copacabana	Pl-c	300		Caliza espática y micrítica gris clara con niveles de dolomitas y calizas nodulares en la base, niveles fosilíferos	
	Carbonífero	Inferior	Grupo Ambo	Ch-a	800		Areniscas cuarzosas blancas y grisáceas con intercalaciones de limoarcillitas negras carbonosas. Algunos niveles de areniscas con estratificación sesgada	
	Devónico	Inferior	Formación Ananea	SD-a	> 1000		Pizarras, filitas, fuertemente deformadas, se encuentran numerosas vetillas de cuarzo.	
	Siluriano	Superior					N-ri, tobas de composición riolítica	

Figura 2.1. Columna estratigráfica regional. (Modificado INGEMMET, 1996).

Plano 2. *Geología Regional*

PLANO 02 – GEOLOGIA REGIONAL

2.2 MARCO TEORICO ACERCA DE LAS INYECCIONES

2.2.1 Inyección de Lechada

La inyección es el proceso mediante el cual se logra introducir un fluido a presión en el terreno, buscando sustituir elementos internos, ya sea agua o aire ocurrentes en oquedades, grietas, fisuras con un producto específico, el cual reducirá el flujo de agua existente a través del medio inyectado (impermeabilización) y, en algunos casos, incrementara la resistencia y el módulo de deformabilidad (consolidación) del medio en forma significativa; cabe señalarse que el objetivo principal de este tratamiento es fortificar el suelo, incrementando sus propiedades mecánicas.

Las inyecciones son procedimientos que se aplican al subsuelo, y consisten en introducir en los poros o fisuras del medio a tratar una suspensión de cemento solido en agua llamada “lechada” (Weaver, 2007).

Una lechada de inyectado “estable” se comporta como un fluido Binghamiano durante el flujo, presentando un comportamiento viscoso y cohesivo. La viscosidad gobierna la velocidad de flujo y la cohesión gobierna la distancia máxima de penetración de la lechada.



Figura 2.2. *Inyección de lechada.*

2.2.2 Penetración de Lechada

La penetración de la lechada depende de algunos factores, entre los principales tenemos la geometría de las fracturas, su forma, abertura, extensión e interconexión entre estas. Combinaciones de estas características puede derivar en casos complicados a analizar.

La distancia máxima de penetración lograda por una lechada de inyectado es directamente proporcional a la presión aplicada y a la apertura de las fisuras y es inversamente proporcional a la cohesión de la lechada.

Una lechada presenta comportamiento estable si al someterla a un proceso de decantación en una probeta de 1,000 ml, durante 2 horas, presenta 5% de agua libre en su superficie. De no ocurrir así, la mezcla será inestable y estará sujeta a un comportamiento difícil de predecir, cómo podría ser una sedimentación errática, erosión, re-suspensión y re-sedimentación.

2.2.3 Hidrofracturamiento e hidrogateo

El hidrofracturamiento está relacionado a la formación y apertura de nuevas fracturas o fisuras en la roca, y el hidrogateo está relacionado a la apertura de fisuras y fracturas pre existentes en el macizo. Ambos por el incremento y exceso de presión de agua o mezcla de inyección.

La penetración de la lechada depende de algunos factores, entre los principales tenemos la geometría de las fracturas, su forma, abertura, extensión e interconexión entre estas. Combinaciones de estas características puede derivar en casos complicados a analizar.

2.2.4 Circuito de inyección

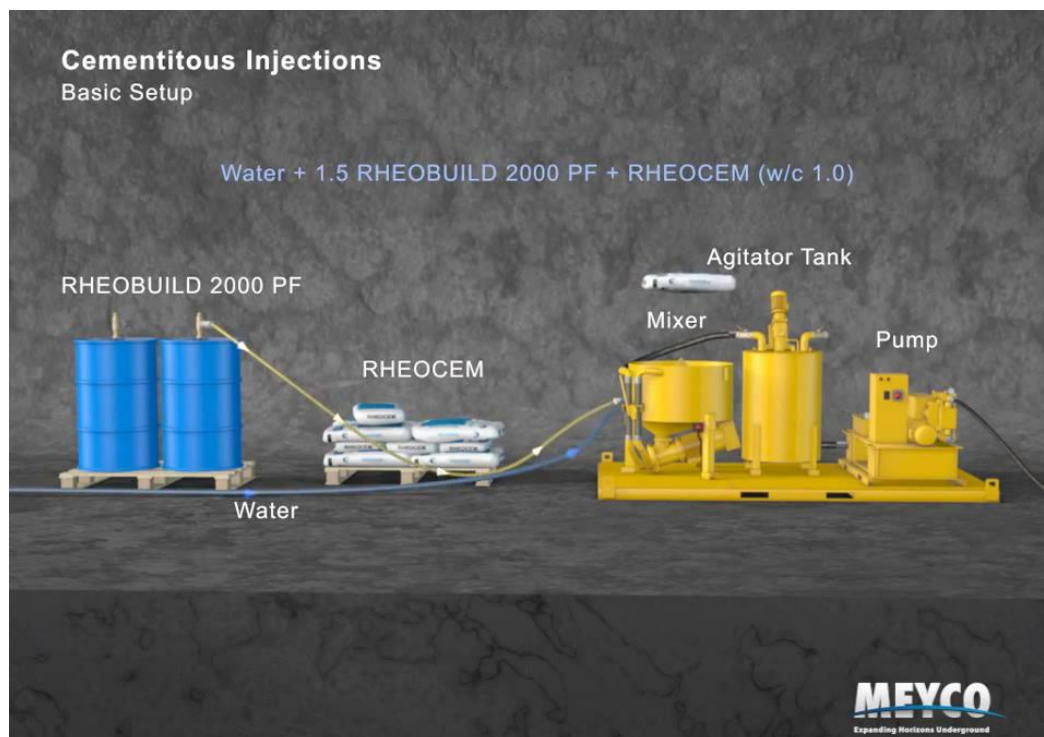


Figura 2.3. Esquema bombeo de lechada (Fuente: MEYCO Expanding Horizons Underground)

Como primer paso se realiza el lavado de todos los taladros sin excepción mediante agua a presión, esta operación para retirar los detritos y materiales finos de las perforaciones que podrían impedir el ingreso de la lechada en las fracturas del macizo rocoso.

Después se procede con la preparación de la mezcla o lechada; se deben separar los componentes de la lechada como agua, cemento y aditivos. Estos componentes se depositan de acuerdo al diseño de mezclas en la mezcladora de altas revoluciones y posteriormente trasladado por medio de válvulas y motores hacia el agitador de bajas revoluciones.

El operador de válvulas dará paso a la lechada desde el agitador hacia la bomba de inyección que bombeará la mezcla hacia el punto perforado.

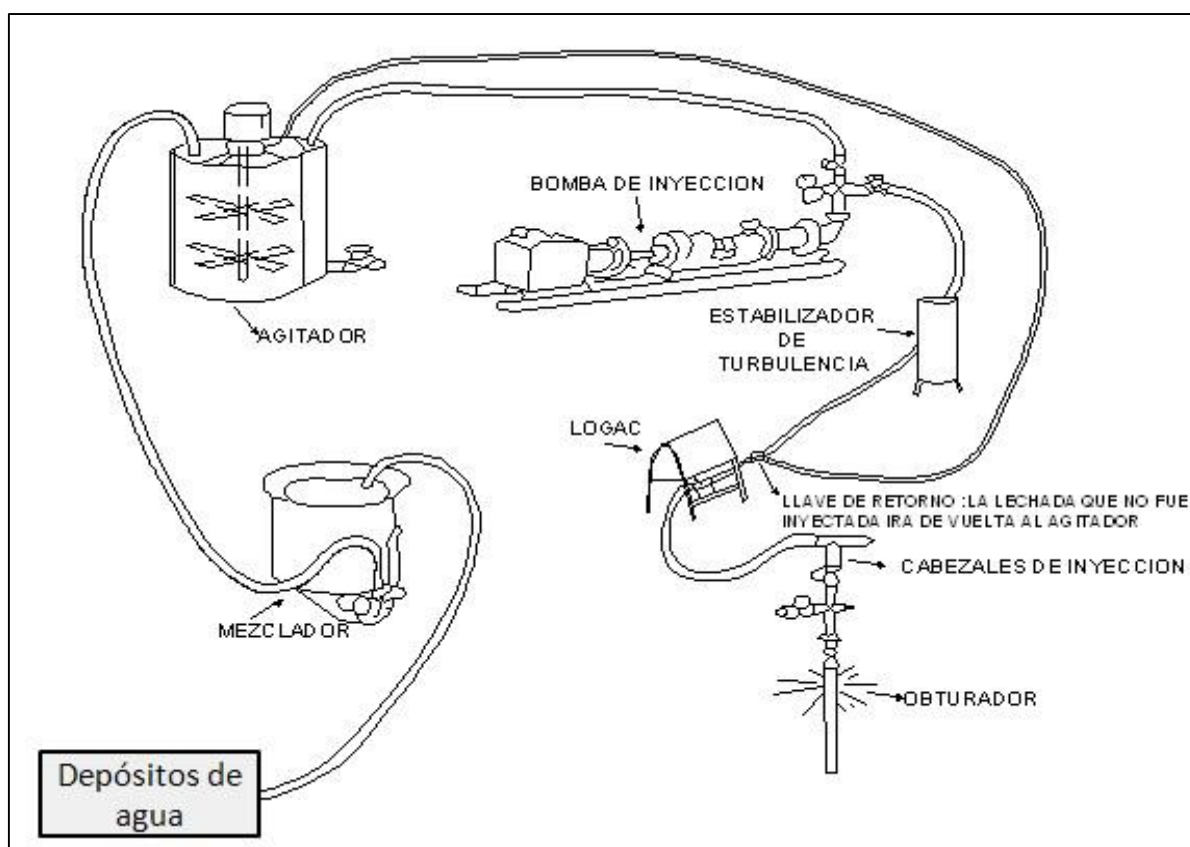


Figura 2.4 *Circuito de inyección.*

En el recorrido desde la bomba de inyección hacia el sondeo se colocan 2 instrumentos adicionales de suma importancia en la inyección; el primero corresponde al supresor de presiones o de turbulencia (pulmón) que cumple la función de bajar o eliminar los golpes del fluido producido por la bomba de inyección; el segundo es el registrador electrónico que almacena los datos de inyección como presión, caudal, volumen y tiempo (Ver Figura 2.4).

2.3 MÉTODOS TRADICIONALES DE INYECCIÓN

Se tienen varios métodos de inyección que se realizan para intervenir no solamente macizos rocosos, también se pueden intervenir suelos, terrenos aluviales, depósitos meteorizados, milonitizados y coluviones. Estos los podemos realizar como:

- Inyección por reemplazo o Jet Grouting.
- Inyección por impregnación y fractura o Fracture Grouting.
- Inyección por Compactación.
- Inyección de lechadas fluidas, geles, aditivos plastificantes denominadas Chemical Grouting
- Inyecciones de cemento o Cement Grouting.

Cada método se diferencia principalmente por la presión con la que se inyecta el material; diferenciándose así métodos de alta o baja presión.

2.3.1 Inyección por Reemplazo o Jet Grouting.

El tratamiento geotécnico por medio de inyecciones de cemento y/o lechada es una práctica de la geotécnica con el objetivo de mejorar las condiciones mecánicas e hidráulicas de los macizos rocosos y estructuras carentes de este tratamiento geotécnico y según Lombardi & Deere esta práctica por mucho tiempo ha estado dominada por reglas empíricas y experiencias personales que llevan a una creencia dogmática.

A. Descripción del procedimiento

1. Proceso General

La unidad elemental de una actuación con jet grouting es la columna. Puede ser más corta, en lechos para pilotes, o más larga, bajo zapatas; inclinada en anclajes o vertical en impermeabilización; individuales o solapadas, formado pantallas, bóvedas o macizos. Pero en todos los casos, la jetcolumna se ejecuta de la misma manera.

En primer lugar, se realiza un taladro, del orden de 10 cm de diámetro. Una vez que se ha llegado a la longitud deseada, comienza el proceso de inyección de fluidos, que sale a alta velocidad por toberas laterales que giran y ascienden solidarias al tubo de perforación en su lenta extracción. Los fluidos van disgregando el suelo y mezclándolo con la lechada de cemento.

Habitualmente parte de la mezcla de lechada, agua y suelo, rebosa. Esto permite realizar un cierto control de calidad, asegurándose de que se van rellenando los huecos.

Finalizada la extracción del varillaje, no hay más que dejar fraguar la columna.

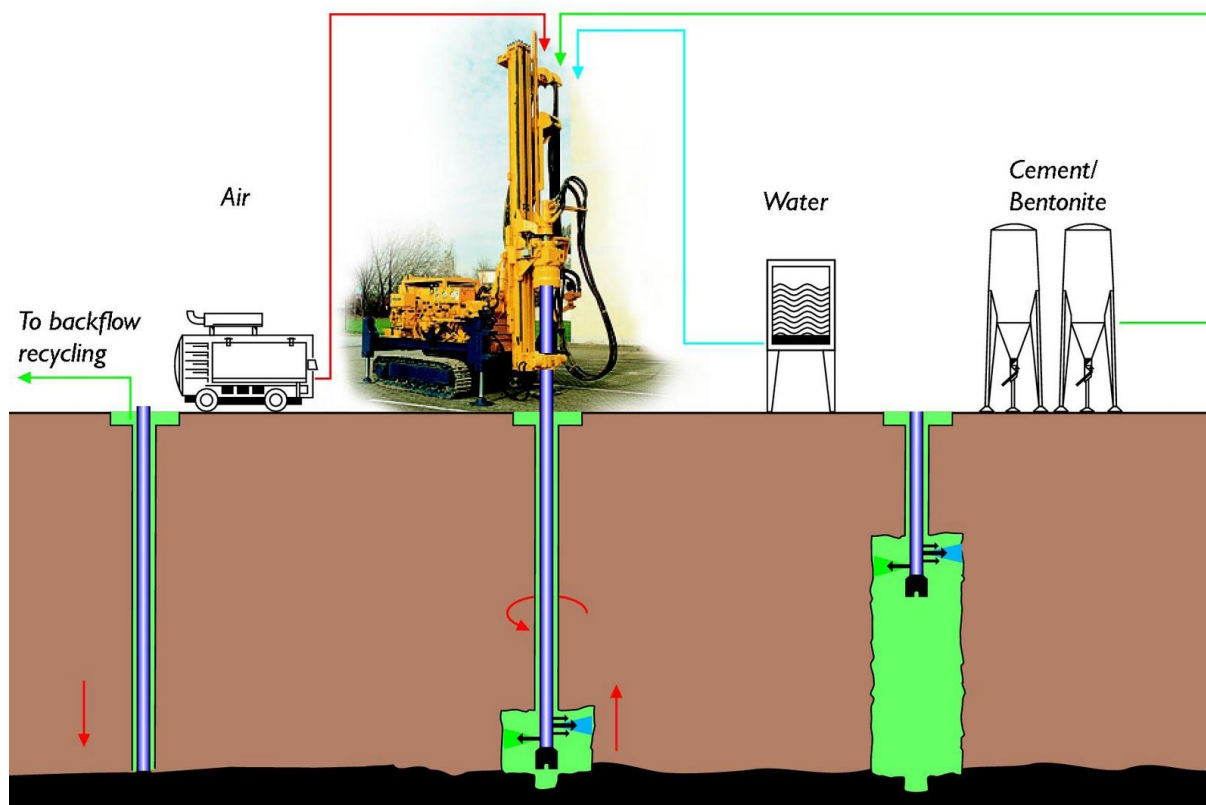


Figura 2.5. Esquema y circuito de inyección aplicando el Método de Jet Grouting

Hasta aquí, se ha descrito el proceso tradicional. Sobre éste, se puede realizar determinadas mejoras, el uso de aire comprimido, como se ha indicado previamente. De entre estas variaciones, hemos de destacar una propuesta que mejora la economía de lechada empleada, lo que tiene especial incidencia en la coyuntura actual.

Desde hace unos años se viene proponiendo una serie de mejoras para optimizar la eficiencia en el corte y mezcla, según qué condiciones de suelos puede resultar insuficientes, así como la resistencia de la columna resultante de la mezcla de suelo y lechada, especialmente cuando el trabajo se realiza sobre estratos muy diferenciados. Frente a estos posibles problemas, que encarecen la mejora del suelo especialmente por un uso excesivo de cemento, la Academia de Investigación Geológica de Moscú apunta como soluciones el uso de un dispositivo de generación de vórtices, para mejorar la hidrodinámica del proceso; y la extracción y clasificación del suelo arrancado, sustituyéndolo parcial o totalmente por otro material más resistente, para resolver el problema de la resistencia de la mezcla resultante.

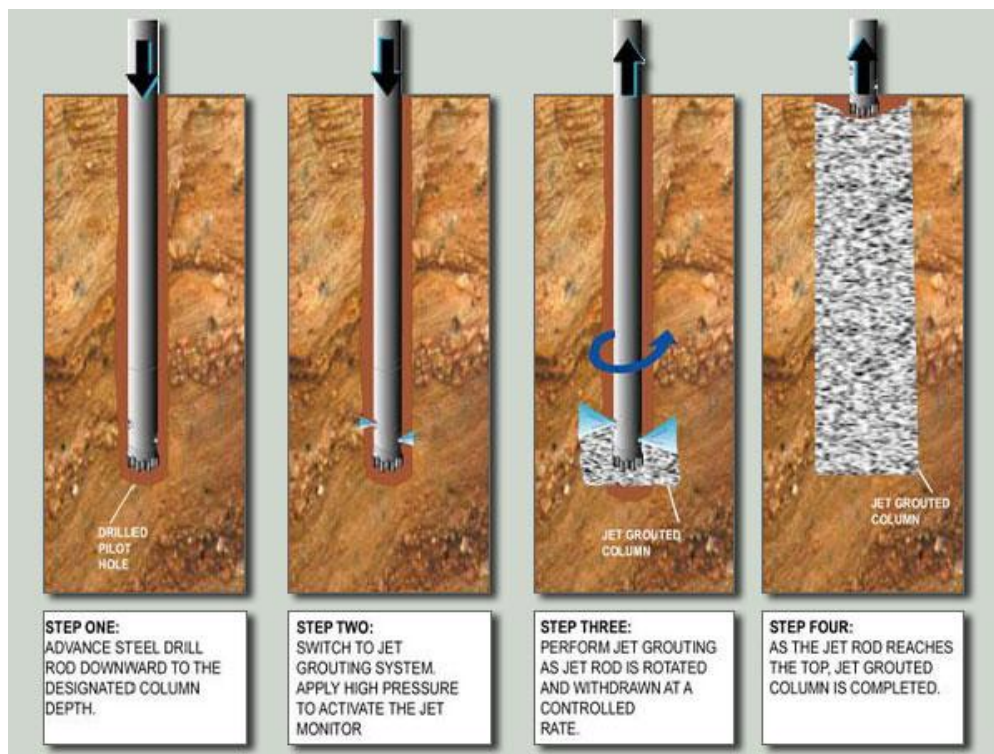


Figura 2.6. Esquema genérico de jet grouting. Layne Christensen Company

2. Materiales

Según los materiales usados, hay tres variantes de jet grouting. El sistema básico es el de fluido simple (Ver Figura 2.7), que usa lechada para cortar el suelo además como material estructural también es empleado.

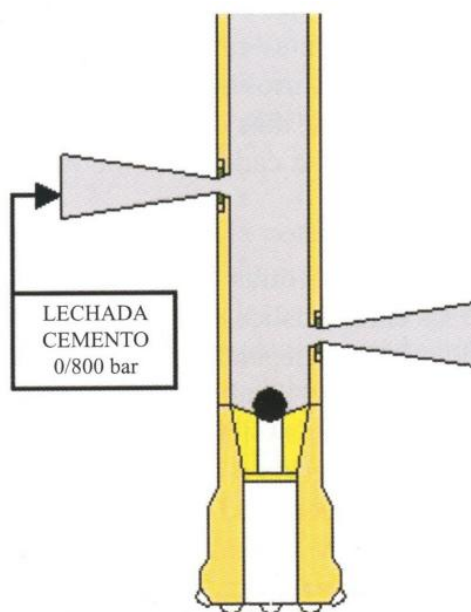


Figura 2.7. Esquema de jet simple. Rodio Cimentaciones Especiales.

El de doble fluido introduce agua (Ver Figura 2.8) o aire a alta presión (Ver Figura 2.9), y finalmente, el sistema de triple fluido (Ver Figura 2.10) utiliza agua en el interior de un chorro de aire comprimido, para el corte del suelo.

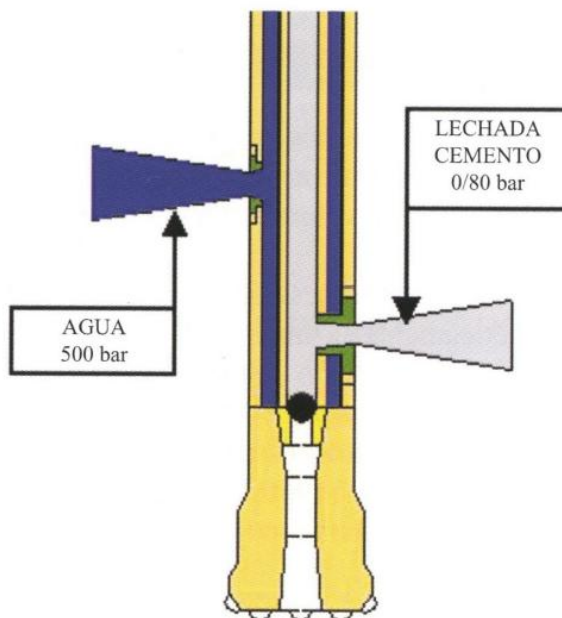


Figura 2.8. Esquema de jet doble con agua. Rodio Cimentaciones Especiales.

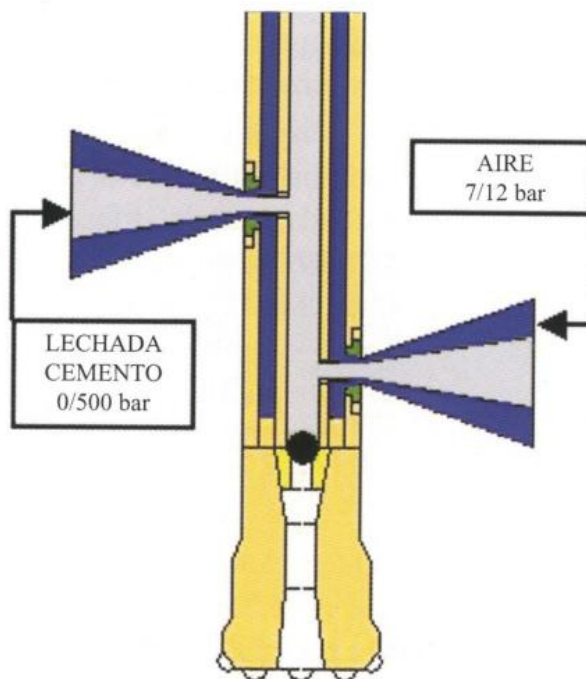


Figura 2.9. Esquema de jet doble con aire. Rodio Cimentaciones Especiales.

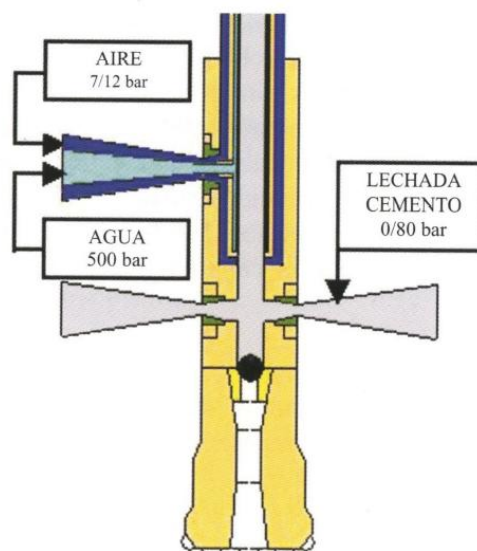


Figura 2.10. Esquema de jet triple. Rodio Cimantaciones Especiales.

La lechada, además de agua y cemento, puede incluir bentonita en la mezcla. Este material también se puede usar durante la perforación, cuando hay problemas de agarre de varillaje a profundidades importantes, lechada sola si hay problemas de desprendimiento, espuma en suelos abiertos, o sencillamente aire y agua de limpieza.

3. Maquinaria

Como se ha podido deducir de la descripción del proceso, la maquinaria necesaria se compone de un varillaje de diámetro adecuado en relación a la longitud útil del corte, para la evacuación del “spoil”, los elementos mecánicos mueven y regulan el varillaje en rotación y traslación desde el carro de perforación, y las bombas para dar la adecuada presión al fluido en el interior.

El varillaje va rematado con un tricono o trialeta que permite realizar el sondeo. Por encima de este elemento, se sitúan las toberas de inyección, del orden de 1.8 a 5 mm de diámetro, responsables de la alta velocidad que adquieren los fluidos. Estas toberas son concéntricas en el caso de sistemas multifluido, y deberán, además, tener una resistencia mecánica adecuada para recibir impactos de los áridos.

Por lógica, forma parte también del mismo sistema hidráulico del jet, el dispositivo para la inyección de fluidos de sondeo, que puede ir en el portatoberas o añadiendo una tobera sobre la trialeta de perforación.

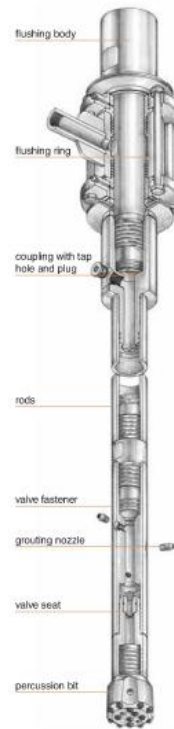


Figura 2.11. *Esquema de varillaje con broca de percusión. Boart Longyear.*

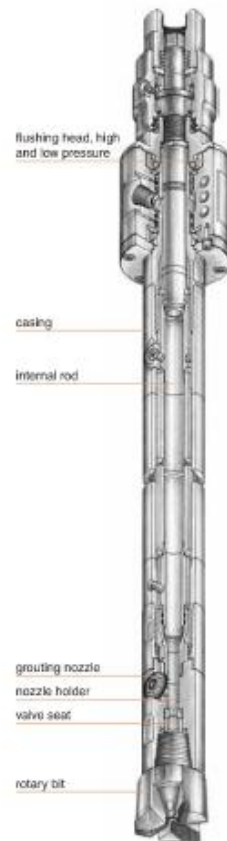


Figura 2.12. *Esquema de varillaje con broca de rotatoria. Boart Longyear.*

Las velocidades de retirada y giro del varillaje dependen del tratamiento que se quiere realizar, pero son del orden de 20 a 80 cm / min y 10 a 30 r.p.m.; mencionar que actualmente hay maquinas que son capaces de alcanzar los 70 mpa y 650 l/s.

B. Descripción de Modelos y parámetros de diseño.

Existe un amplio debate sobre los parámetros de diseño de un proyecto de ejecución con jet grouting. Esto se debe fundamentalmente a la tendencia de cada empresa de desarrollar experimentalmente sus procedimientos, centrándose en su ámbito geográfico de actuación, y a la escasa documentación completa sobre ellos; se puede encontrar recetas en las que se define poco o nada las características de los suelos sobre los que se emplean.

Hay autores que señalan al jet grouting como la solución a cualquier situación, mientras que otros delimitan excesivamente su campo de actuación; sobre ello se hace una descripción del fenómeno en cuatro pasos; la inyección, el chorro, la interacción con el suelo, y finalmente, hablaremos sobre qué podemos esperar del material fraguado.

1. Inyección de fluidos

En los parámetros que caracterizan la inyección de lechada, podemos distinguir, por una parte, los referentes a la maquina (mecánicas: longitud de varillaje, características de las toberas; operativas: presión de impulsión, velocidad de salida de chorro, velocidad de retirada y de giro de varillaje), y por otra, las características de la lechada en sí (propiedades del cemento, relaciones agua/cemento, y la uniformidad de la mezcla).

Poco se puede decir del primer tramo de lechada, más que la importancia de una mezcla uniforme y unas características físicas del polvo de cemento y densidad de la lechada adecuadas para que no haya problemas al salir a altas velocidades por los finos orificios de las toberas.

Es importante saber la relación entre la presión de impulsión y la velocidad de chorro, ya que las pérdidas de carga pueden ser importantes, y varían de una maquinaria a otra.

La velocidad inicial a la salida de la tobera es:

$$V_o = m\sqrt{2gp_o}$$

$$Q = VA = m\sqrt{2gp_o} \frac{\pi}{4} d^2$$

Cuadro 2.2 *Parámetros de inyección. Eurocodigo EN12761*

Parámetros de trabajo	1 fluido	2 fluidos (aire)	2 fluidos (agua)	3 fluidos
Presión lechada (Mpa)	30 - 50	30 - 50	>2	>2
Caudal lechada (l/min)	50 - 450	50 - 450	50 - 200	50 - 200
Presión agua (Mpa)	-	-	30 - 60	30 - 60
Caudal agua (l/min)	-	-	50 - 150	50 - 150
Presión aire (Mpa)	-	0.2 - 1.7	-	0.2 - 1.7
Caudal aire (l/min)	-	3 - 12	-	3 - 12

Fuente: *Mejora de suelos con la técnica de jet grouting (J. Tsao, 2008)*

Se sugiere como parámetros habituales de bombeo de 1 a 3 l/s, con densidades de lechada entre 1.5 y 1.65, para maquinarias con bombas de 350 a 500 CV, orificios de salida entre 1.8 y 5 mm (Biosca, 1997). Por otra parte, el Eurocodigo EN12761 propone los rangos del cuadro 2.2. En la misma línea, Covil hace una recopilación de estos mismos parámetros, en casos reales documentados.

Como fórmulas de aplicación directa, Covil señala un par de fórmulas ajustables empíricamente:

$$Q = \frac{1}{4} \pi D^2 H \gamma (1 + \beta)$$

Donde γ es el parámetro empírico de Kanematsu y β la pérdida de carga; el volumen de suelo erosionado V_e

$$V_e = 0,04 \pi R_a^2 L_s \left(\frac{m^3}{s} \right)$$

Con R_a el radio del jet y L_s la velocidad de retirada (en *cm/mm*) (Covil & Skinner, 1996).

Un paso más es establecer relaciones entre diámetros de toberas, tipos de técnica, relación agua/cemento, densidad de la lechada, presión, caudal.

Y lógicamente, hay que relacionar los parámetros del procedimiento con las características del suelo. También se marca otros parámetros importantes en el resultado final, como son la velocidad de retirada y rotación del varillaje. Sobre éstos, ya hemos dado unas

ordenes de magnitud al hablar de maquinaria anteriormente, pero es importante resaltar la gran variación en las velocidades de retirada según los suelos.

Sin demasiadas explicaciones, se proponen dos fórmulas aproximadas para prever el diámetro D de la columna. La primera, para suelos no cohesivos:

$$D = \sqrt{\frac{\left[Q_e \frac{1}{V_y} - \frac{\pi}{4} d^2 \left(1 - n + \frac{w_o}{p_w} \right) \right] (p - p_g)}{\frac{\pi}{8} \left(1 - n + \frac{w_o}{p_w} \right) (p_{ro} - 2p + p_g) + 2(p - p_g)}}$$

Y lógicamente, la segunda, para suelos no cohesivos:

$$D = \sqrt{\frac{8}{\pi} \left[Q_g \frac{1}{V_y} \frac{p - p_g}{p_{ro} - 2g} + \frac{\pi}{4} d^2 \left(2 - \frac{p - p_g}{p_{ro} - p_s} \right) \right]}$$

Donde Q_g es el flujo de lechada de una tobera, V_y es la tasa de ascenso efectivo del jet, d es el diámetro del taladro, n la porosidad natural del suelo, w_o es la unidad natural del suelo (en unidades de masa de agua por volumen del suelo), p_w es la densidad del agua, p_g la densidad de la lechada, p la densidad de la mezcla de lechada y suelo expulsada, p_{ro} la densidad de suelo erosionado y agua contenida en sus poros ($p_{ro} = pp(1-n) + w_o$, con pp densidad de las partículas del suelo); todo en unidades del S.I. (Zege, Broid, Antonov & Sin'ko, 2002).

Croce y Flora indican, en el análisis del sistema de fluido simple, dos expresiones de relación de parámetros. La primera, está realizada desde el enfoque práctico, calculado la energía E_n en las toberas:

$$E_n = \frac{mv_n^2}{2L} = \frac{8p_g Q^3}{\pi^2 M^2 d^4 v}$$

Donde m es la masa total de lechada para el intervalo de tiempo, V_n es la velocidad en las toberas, L es la longitud de columna, p_g es la densidad de lechada, Q es el caudal de lechada, M el número de toberas, d su diámetro y v la velocidad de elevación.

La segunda expresión se basa en un primer intento de modelo teórico, comprobado experimentalmente, y cuya intención es acercar el diseño a la realidad del fenómeno físico:

$$V = \frac{\alpha}{\delta(n + \beta - n\beta)} V_j$$

En este caso, V es el volumen por unidad de longitud de columna, α el porcentaje volumétrico de subsuelo arrancado por el tratamiento, δ el porcentaje de poros rellenos por la inyección, n la porosidad original, y V_j es el volumen de lechada inyectado por unidad de longitud. Ya considerando la columna resistente:

$$V = \frac{k\alpha}{n + \beta - n\beta - nsc} V_j$$

Expresión en la que aparecen nuevos parámetros, k , relación entre cemento hidratado y lechada retenida, y nsc , porosidad definitiva del jet. Sobre k :

$$k = \frac{(1 + r_s)p_g}{(1 + r_g)p_{hc}}$$

Así, r_s es la relación agua-cemento, r_g la relación agua-cemento de la lechada, p_{hc} es la densidad del cemento hidratado (unos $25.5kN/m^3$) (Croce & Flora, 2001).

2. La interfase entre el varillaje y el suelo

El paso siguiente para comprender la acción del jet en el suelo, es ver el comportamiento de la inyección de los fluidos. Para ello, distinguiendo en tres zonas: la zona 1, en la que la presión hidrodinámica es constante, que es un pequeño espacio más allá de la boquilla; la zona 2, o zona de influencia del jet, del orden de unas 300 veces el diámetro de la tobera; y la zona 3, a partir de la cual los efectos de la presión hidrodinámica caen exponencialmente y dominan los fenómenos de cavitación en el suelo. Este último efecto se acentúa en medios saturados, luego es importante que no exista una zona 3 a la hora de ejecutar el jet grouting, ya que este suele producirse por debajo de la lámina de lechada. Afinando un poco más, hacemos referencia a la formulación de Midoni, Croce y Mongiovi, que acota la geometría del campo de velocidades en un sistema de fluido simple, para el radio de influencia del jet. La primera ecuación se refiere a la velocidad máxima a una distancia x de la boquilla V_{xmax} en relación a la velocidad de salida v_o .

$$\frac{V_{xmax}}{v_o} = \frac{\gamma}{\sqrt{N}} \frac{d_o}{x}$$

Donde γ es un parámetro de ajuste a determinar por tipologías de toberas, d_o es el diámetro de la tobera, y N es la relación entre las viscosidades cinemáticas en régimen turbulento de fluido inyectado y agua. (Midoni, Croce & Mongiovi, 2006)

La segunda ecuación relaciona, para una misma distancia x , la velocidad máxima con el resto de velocidades a esa misma distancia:

$$\frac{V_x}{V_{xmax}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1,33\gamma^2 \left(\frac{r}{x}\right)^2}{N}\right)^2}$$

Lo que nos está indicando un perfil de velocidades con forma de campana, en la que en el centro está la velocidad máxima y en los extremos tiende a 0 (Midoni, Croce & Mongiovi, 2006). Se puede simplificar suponiendo que el chorro está dentro de una superficie cónica, más allá de la cual la velocidad es 0. Fijando una relación $E=V_x/V_{xmax}$ obtenemos el radio del cono para una distancia x :

$$\frac{r_{eq}}{x} = \sqrt{\frac{N}{1,33\gamma^2} \left(\sqrt{\frac{1}{E}} - 1\right)}$$

Para el cálculo de la densidad de la lechada, los mismos autores sugieren aplicar $P_g = I + W / I/P_c + I/P_w$; y suponer, para obtener N , que es la misma relación que entre viscosidades cinemáticas en régimen lamiar, a falta de más datos.

Finalmente recordar, una vez más, el orden de magnitud de velocidades para un corte efectivo del suelo, se mueve entre los 150 – 300 m/s. Y destacar la importancia de tener más en cuenta esta magnitud que la presión de impulsión en la máquina ya que, de unos aparejos a otros, las variaciones de pérdidas de carga pueden ser importantes.

3. Interacción suelo - lechada

Tras su análisis de varios casos reales bien documentados, y de tests en diversos tipos de suelo, se extraen las siguientes conclusiones:

- El jet grouting es muy efectivo en suelos granulares gruesos, mientras que en suelos de grano fino puede no producir mejoras apreciables.
- No se puede establecer una correlación directa entre los resultados del SPT, se pueden conseguir grandes diámetros para suelos muy densos.
- En gravas, el efecto se consigue más por penetración de la lechada que por arrancamiento y mezcla; si son gravas arenosas se consiguen muy buenos resultados, mientras que, en gravas limpias, aun alcanzando la resistencia deseada,

la permeabilidad de la columna puede seguir siendo excesivamente alta (Croce & Flora, 2001).

Afirmaciones que parece chocar con los preceptos tradicionales del jet grouting. Destacamos especialmente el segundo punto, por ser una referencia habitual el SPT para determinar el diámetro del jet, procedimiento que utiliza Covil.

La formulación más compleja que hemos encontrado, que pretende servir de forma efectiva para el diseño previo de un procedimiento de jet grouting, son los modelos de Modoni, Croce y Mongiovi (2006). Con la misma búsqueda de tres parámetros: un tiempo de tratamiento t , unos radios de tratamiento R , y una eficiencia E , se consiguen modelos diferenciados para gravas (filtración) y arenas y arcillas (erosión). Siendo muy completos en parámetros a considerar, además deja hueco a la experimentación, ya que se requiere una adecuada calibración con suelos reales. A continuación, mostramos las expresiones más destacadas.

- **Filtración gravas**

En este modelo se parte de la validez de la ley de Darcy, considerando el suelo una red de filtración en régimen laminar:

$$t^* = \frac{ma_1}{2\pi R_1 V_s}$$

Donde m es el número de toberas, a_1 el área de impacto, R_1 el radio del taladro, y V_s la velocidad de retirada.

$$R_{lim} = R_1 \exp \left[\frac{k_f a_1}{R_1 q_o} \left(\Omega_g \frac{v_{eq1}^2}{2g} - h_e \right) \right]$$

Donde k_f es el coeficiente de permeabilidad del suelo, q_o el caudal de lechada inyectada por la tobera, v_{eq1} es la velocidad promedio de inyección en R_1 , h_e es la carga hidrostática (del suelo inalterado) en el punto de tratamiento, y Ω_g es el coeficiente de pérdida de carga entre la tobera y la pared del taladro ($h_1 = \Omega_g \frac{v_{eq1}^2}{2g}$). Este valor de radio limite se debe comparar con el radio efectivo R_e , de tal manera que, si aquel es menor que éste, la lechada rebosará por el taladro.

$$h_1 - h_e = \frac{V_1 R_1}{k_f} \ln \left(\frac{R_e}{R_1} \right)$$

La eficiencia:

$$E = \frac{mv_s D^2}{mv_o d_o^2} \leq 1$$

Siendo n la porosidad del suelo.

- **Erosión. Suelos arenosos**

En los modelos erosivos se considera la dialéctica entre la fuerza de erosión de inyección y la resistencia del suelo a ser erosionado. Para el suelo arenoso, la resistencia viene dada por la expresión:

$$V_s = \Omega_2 (c' + \sigma' \tan \varphi')$$

El cálculo de σ' :

$$\sigma' = \sigma_z - \frac{\gamma f}{2g} v_f^2$$

Donde v_f es la velocidad promedio del jet, que tiende a una velocidad límite v_l :

$$v_l = \sqrt{\frac{\Omega_s g}{\gamma f} \frac{c' + \sigma_z \tan \varphi'}{1 + 0,5 \Omega_s \tan \varphi'}}$$

En este caso, $\Omega_s = \Omega_2 / \Omega_1$ será nuestro factor de calibración, agrupando geometría y mecánica del jet y del suelo (Ω_1 es un parámetro que calibra las pérdidas de energía desde el jet hasta la pared del taladro, y Ω_2 representa la resistencia del suelo a ser erosionado, ambos adimensionales). El radio máximo del jet:

$$R_{max} = \frac{2\lambda v_{x0} C d_o}{\sqrt{\frac{\Omega_{2s} g N}{\gamma f} \frac{c' + \sigma_z \tan \varphi'}{1 + 0,5 \Omega_s \tan \varphi'}}}$$

Donde N es la viscosidad cinemática turbulenta relativa del fluido inyectado. Finalmente, la eficiencia se cuantifica como:

$$E = \frac{1}{(1 - n) + \left(\frac{mv_o d_o^2}{v_s D_{av}^2} \right)}$$

Y el tiempo de tratamiento, subdividiendo la columna en Δs tramos:

$$t^* = \frac{m \Delta_s}{v_s} \frac{2(\text{req}/x)}{2\pi}$$

D_{av} es el diámetro promedio de la columna.

- **Erosión. Suelos arcillosos**

El modelo erosivo de los suelos arcillosos sigue ciertos paralelismos con el de los suelos arenosos. Tendremos una resistencia al suelo dependiente de la cohesión:

$$v_c = \Omega_3 c_u$$

Siendo Ω_3 el análogo en suelos arcillosos al Ω_2 en suelos arenosos. La velocidad límite:

$$v_l = \sqrt{\frac{\Omega_c g}{\gamma f}} c_u$$

Y el radio máximo:

$$R_{max} = \frac{2\lambda C d_o v_{xo}}{\sqrt{\frac{\Omega_c g}{\gamma f}} N c_u}$$

Los parámetros de tiempo y eficiencia se calculan de la misma manera que para suelos arenosos.

C. Resistencia y permeabilidad

En el caso de la resistencia, nos encontramos de nuevo con informaciones incompletas y métodos parciales. Una vez más, con fórmulas o más bien, con ausencia de fórmulas que nos permita predecir la resistencia de una columna jet, tendremos que acudir forzosamente a los caros ensayos in situ, si queremos saber exactamente que estamos ejecutando. Aun así, indicamos algunas de las orientaciones que distintos autores/fabricantes proporcionan. Por un lado, Biosca nos orienta con rangos de entre 25 y 45 kg/cm² para arcillas, 40-60 kg/cm² para limos y 60 a más de 100 kg/cm² para arenas.

Keller relaciona tipos de suelos con permeabilidad y resistencia:

Cuadro 2.3. *Permeabilidad y resistencia. Keller Grundbau GmbH*

Parámetros	Suelos granulares	Suelos cohesivos
Diámetro (m)	Hasta 3	Hasta 2.5
q_u (N/mm ²)	De 1 a 10	0.5 a 5
Permeabilidad (m/s)	10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁸	10 ⁻⁷ a 10 ⁻⁹

Fuente: *Mejora de suelos con la técnica de jet grouting (J. Tsao, 2008)*

En un sentido más práctico TekTracker nos proporciona un ábaco de diseño, de éste el detalle de que, por mucho que se aumente la cantidad de cemento en el tratamiento con arcillas, la resistencia es limitada.

Finalmente, la Asociación Japonesa de Jet Grouting ha adoptado unas funciones de distribución de resistencias, tomando percentiles del 1 al 3%. El cuadro 2.4 refleja los valores standard propuestos por esta asociación.

Cuadro 2.4 *Permeabilidad y resistencia. Keller Grundbau GmbH*

Tipo de suelo	q_u (N/mm ²)	c (N/mm ²)	f (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)
Cohesivo	1	0.3	0.1	0.2
Granular	3	0.5	0.17	0.33

Fuente: *Mejora de suelos con la técnica de jet grouting (J. Tsao, 2008)*

Como en toda técnica de suelos, por encima de la teoría, está la ejecución en el suelo real. Y así, se debe tener en cuenta, para el éxito final, sea por resistencia, por permeabilidad, los siguientes elementos:

- La existencia de flujos de agua que puedan lavar el jet. Si es necesario, se deberá modificar las líneas de flujo por medios artificiales.
- La existencia de zonas de granulometrías discontinuas, que se quede con poca inyección por alta permeabilidad.
- El efecto sombra por algún obstáculo, en el chorro de la inyección.

Y por supuesto, en la medida de lo posible, hay que realizar un control de geometría final, lo cual, es un problema nada evidente.

2.3.2 Compensación o Fracture Grouting.

La lechada de compensación o Fracture grouting es una técnica empleada para compensar el hundimiento causado durante excavación y/o tunelado afectando la estructura del subsuelo. El principio básico es inyectar lechada en la zona, entre el túnel y los edificios superiores para compensar la pérdida de tierra inducida por la excavación subterránea (Mair & Hight, 1994).

La lechada de compensación se realiza típicamente a través de una serie de tubos de lechada conocidos como Tubo Manchette tipo A (TAM), que se inserta horizontalmente desde un eje vertical como se muestra en la figura (Véase, figura 2.13).

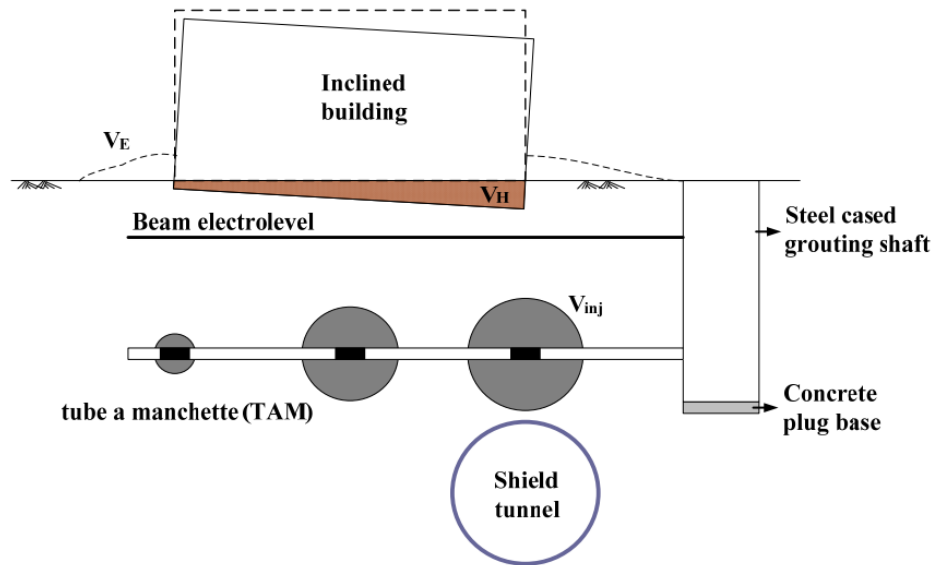


Figura 2.13. *Diagrama conceptual de inyección por compensación típico.*

Las vigas de nivel eléctrico incrustadas horizontalmente sobre el TAM se utilizan para indicar cuando comenzar y cuando detener la inyección, de modo que los asentamientos se limiten a las cantidades específicas (Boone et al, 1997).

Las lechadas con partículas de baja viscosidad penetran en el suelo, esta mezcla inyectada permite el desplazamiento de elevación que contribuye a la compensación efecto del asentamiento en el suelo asociado con las excavaciones del túnel (Soga et al, 2004). La mayor limitación es que la alta movilidad y la baja viscosidad puede causar dificultades en controlar la ubicación de la lechada; sin embargo, con un tiempo de fraguado rápido, se puede usar para resolver parcialmente este problema.

La efectividad de la lechada de compensación se puede evaluar por la cantidad de suelo elevado para un volumen de lechada inyectada dada (Soga et al, 2004). La eficiencia de la lechada, η , se define como la relación del volumen elevado del suelo, V_E , contra el volumen inyectado de lechada, V_{inj} .

$$\eta = \frac{V_E}{V_{inj}}$$

La eficiencia de la lechada es generalmente menor que 1 debido a la pérdida del fluido de lechada, el escape de lechada en el área designada sufre de la migración del fluido debido a la presencia de fracturas, y el asentamiento del suelo por la disipación de las presiones debido a la porosidad existente durante la inyección de lechada.

Para investigar el asentamiento inducido por la consolidación debido a la fractura de la lechada, Soga, realizo una serie de inyecciones únicas y múltiples de lechadas en muestras de arcilla con varias relaciones de sobre consolidación. Para las pruebas de inyección múltiple se colocaron cuatro agujas de inyección en una cuadrícula en el consolidometro de 100 mm de diámetro. La distancia diagonal entre los puntos de inyección fue de 50 mm. Para la inyección única o simple, se utilizó el mismo consolidometro de 100 mm de diámetro, pero la inyección se realizó en el centro de la muestra.

Las pruebas de inyección única se llevaron a cabo inyectando 20 ml de lechada en un punto de inyección, mientras que las pruebas de inyección múltiple fueron realizadas inyectando 5 ml de lechada para cada aguja, dando un volumen total de inyección de 20 ml.

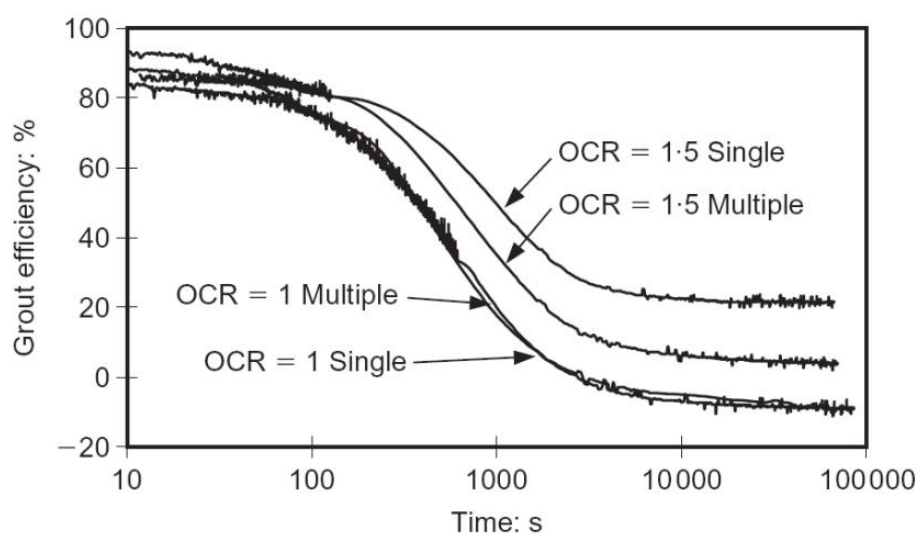


Figura 2.14. Eficiencia del Fracture Grouting en OCR=1 & 1.5 arcilla (Soga, 2004)

De los resultados de las pruebas de laboratorio, se rescata que la eficiencia de la lechada disminuye drásticamente a valores negativos con el tiempo para arcillas consolidadas o ligeramente sobre consolidadas debido al cizallamiento extenso durante la inyección y aumento de la presión efectiva media alrededor del punto de inyección causado por un bloqueo de presión cuando la lechada se solidifica (Véase figura 2.14.). Sin embargo, por mucha sobre consolidación de las arcillas, el agua en porosidad migro desde la zona de exceso de presión positiva alrededor del punto de inyección, a la zona negativa a cierta distancia del punto de inyección durante la etapa de consolidación. La compresión cerca del punto de inyección y la hinchazón a cierta distancia del punto de inyección resulto en un despreciable efecto de consolidación para arcillas muy sobre consolidadas.

Además de la pérdida de eficiencia discutida anteriormente, la eficiencia de compresión de lechada, definida como la relación entre el volumen establecido de construcción y el volumen total inyectado de lechada, puede ser reducido aún más por los efectos de geometría de campo, por ejemplo, la lechada debajo de la base de la estructura solo puede contribuir a la elevación efectiva de un edificio inclinado.

$$\text{Eficiencia de compensación, } \zeta = V_H / V_{inj}$$

Linney y Essler, lleva a cabo un ensayo de compensación de lechada en Londres. El estudio de la lechada consistió en dos fases.

La primera fase fue la de acondicionamiento del terreno en el cual se realizó la inyección de compensación para compactar el terreno antes de elevarlo. El acondicionamiento implicó la frecuente inyección de volúmenes bajos de lechada en las fracturas creadas en la estructura, éste se llevó a cabo durante toda la zona de fractura hasta que se detectaron movimientos de la estructura suprayacente. El fluido relativamente compuesto de cemento y bentonita fue inyectado a través de tubos con mangas, mientras los movimientos de la edificación y la superficie del suelo, fueron monitoreados.

La segunda fase fue la lechada de hidro-fractura para lograr la elevación. Después de la fundación del suelo entre la edificación y la zona de fractura, ésta se aprisionó, ocasionando que el suelo de la base se comporte como una balsa, elevándose junto con la edificación. La prueba demostró que el movimiento podría controlarse dentro de 1 – 2 mm de los objetivos predefinidos.

Se observó cierta distensión dentro del suelo después de la lechada de compensación, por lo que serán necesarias nuevas inyecciones y se suspenderá dichas pruebas si se determina que la ejecución requiere niveles más altos de compensación. Los resultados del ensayo son prometedores con respecto al uso de una inyección de lechada como un medio para compensar los asentamientos inducidos por túneles.

A. Condiciones de superficie

Un edificio de hormigón armado de siete pisos, de 30 m por 20 m con un sótano, fue apoyado en la base de la estera que estaba a 4.5 metros bajo la superficie. Este edificio de hormigón armado de siete pisos estaba en la ladera de una colina. El perfil del subsuelo debajo de este edificio consistía en arena blanda arcillosa, arena y grava y roca madre de limolita.

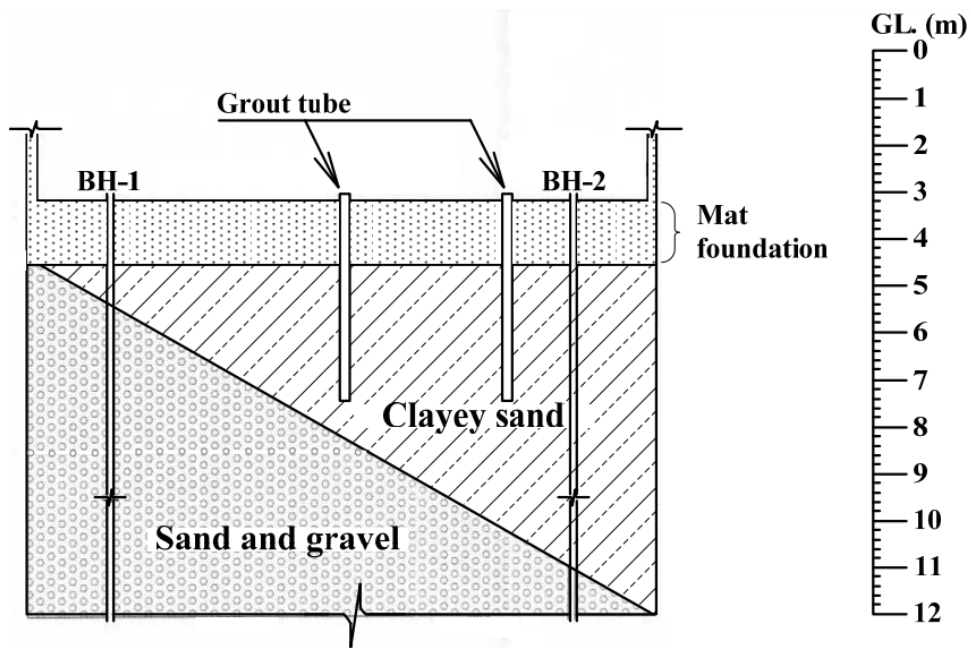


Figura 2.15. Perfil del Subsuelo, base del edificio y tubería de inyección.

El espesor de la capa de arena arcillosa normalmente consolidada variaba de 7 metros al este a 1 metro al oeste (Véase figura 2.15).



Figura 2.16. El nivel de agua subterránea a 2.3m antes de la excavación en el sitio B

Este edificio se inclinó debido al asentamiento compresiblemente desigual del espesor, posterior a la consolidación de la arena arcillosa, la consolidación fue desencadenada por la ejecución de excavaciones profundas en la punta de la colina.

La distancia entre los dos sitios era de unos 400 m. La base del suelo del sitio B, consistió en capa de arcilla limosa de 15 m de espesor, otra capa de arena y grava de 25 m de espesor y la roca madre limolita.

El nivel de agua subterránea en la arena y grava confinada fue de 2 a 3 metros por encima de la superficie del suelo debido a la presión del agua subterránea desde la colina como se muestra en la figura (Véase figura 2.16).

Se instaló en un pozo profundo, parte del sistema de desagüe en la zona B, sin bombeo, el alto caudal de 85.7 cm^3 por minuto indica que la permeabilidad de la capa de arena y grava fue significativa (Véase figura 2.17).



Figura 2.17. *Flujo sin bombeo de la capa de arena y grava en la zona B*

Cuando la excavación subterránea alcanzó a través de la arcilla limosa suprayacente la capa de grava y arena, la cantidad de agua de filtración se disparó a 1,800 toneladas por día. Esto disminuyó drásticamente la presión de agua en la capa de arena y grava, pero la presión en la arcilla limosa se mantuvo sin cambios debido a su baja permeabilidad como se muestra en la figura (Véase figura 2.18).

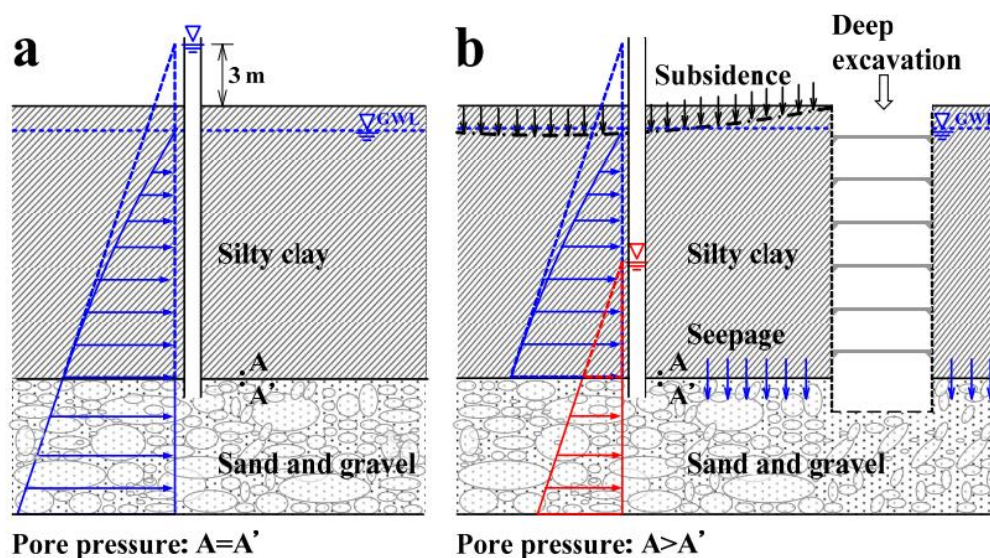


Figura 2.18. a) Antes de la excavación b) Después de la excavación

Esto conlleva a la disipación de la presión desde la capa de arcilla limosa o arena arcillosa hasta la capa subyacente de arena y grava, el asentamiento de la consolidación, gradualmente hizo que el edificio en el sitio A se inclinara a pesar de que el punto A está a unos 400 m del punto B. Desde la capa de arena arcillosa que era la más gruesa en la esquina noreste del edificio, la estructura estaba inclinada hacia el noreste $0^{\circ}34'43''$.

B. Programa de Crecimiento

La permeabilidad y la resistencia al corte de los depósitos de arena arcillosa están controladas por las partículas de arcilla. El sistema unificado de clasificación de suelos define a la arena arcillosa como las arenas con un contenido de arcilla de 12 por ciento o más en peso. La cantidad suficiente de arcillas puede separar efectivamente cada partícula de arena por arcilla, de modo que las partículas de arena no tengan contacto directo. Esto explica por qué la arcilla controla la permeabilidad y la resistencia al corte de la arena arcillosa.

Las arenas con un contenido de bentonita de 15 por ciento o más muestra la misma permeabilidad que la bentonita. Por tanto, la lechada de compensación que se usa típicamente en suelos de grano fino se seleccionó como método de inyección. Se instaló una serie de tubos verticales de lechada a través de la base a 2.5 m por debajo y se inyectaron lechadas de fraguado rápido de forma repetitiva a través del extremo de los tubos de lechada.

El espacio entre los agujeros de la lechada estaba a dos metros en el centro. Los revestimientos de perforación tenían un metro de longitud y se perforó a través del piso del

concreto reforzado de la base de la estera con un pequeño equipo para la inserción de la lechada. Se usa agua como medio de lavado.

Se utiliza bombas de pistón de doble efecto accionadas por presión hidráulica. Para mejorar la eficiencia de la compensación, se adoptó el sistema de manguera de lechada de 1.5 disparos (Véase figura 2.19). y la mezcla de lechada de fraguado rápido (tiempo de gel 10 – 15 segundos) en la tabla para limitar el recorrido de la lechada (Véase cuadro 2.4).

Cuadro 2.4 Mezcla de lechada para inyección.

Líquido A		Líquido B	
Cemento	Agua	NaO-3SiO ₂	Agua
400 kg	355 lt	125 – 250 lt	250 – 375 lt
500 lt		500 lt	
1000 lt			

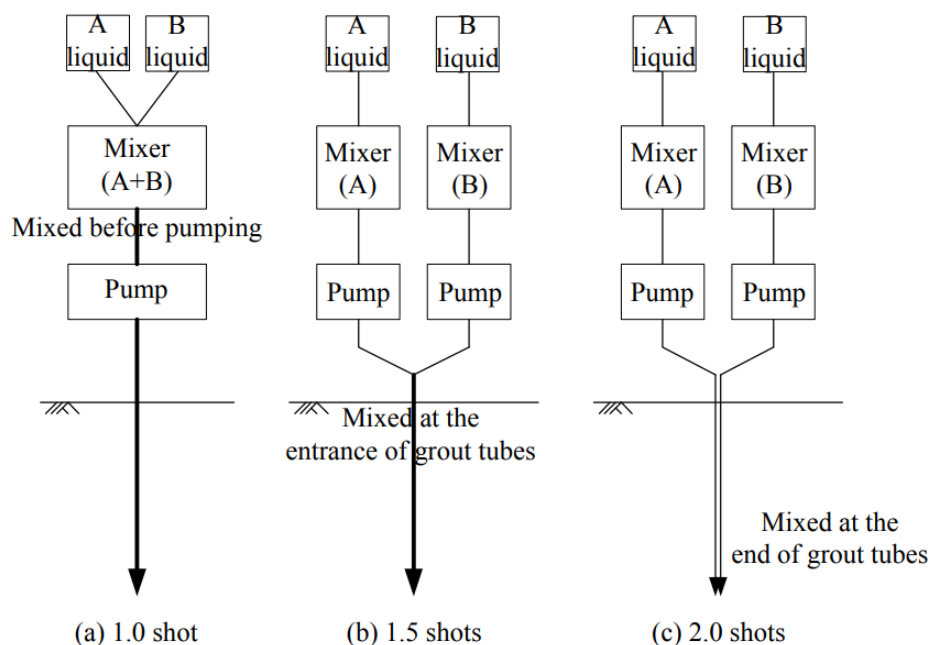


Figura 2.19. Ilustración esquemática del sistema de mangueras para la lechada.

Se planearon dos etapas de lechada. La primera etapa de lechada se usó para estabilizar la capa de arena arcillosa debajo de la base de la estera. La capa de arena arcillosa agrupada y la capa de arena y grava subyacente podrían proporcionar la reacción para la segunda etapa de la lechada para levantar el edificio.

C. Sistema de monitoreo y rendimiento del crecimiento

Las elevaciones de las columnas del edificio en el sótano y la superficie del suelo, a lo largo de la línea A y la línea B fuera del edificio, se monitorearon antes y después del programa de lechada de cada día. Para proteger la integridad de la estructura por el daño de la deformación debido a los procesos de lechada, los intervalos entre cada línea de contorno deben mantenerse lo más uniformes posible.

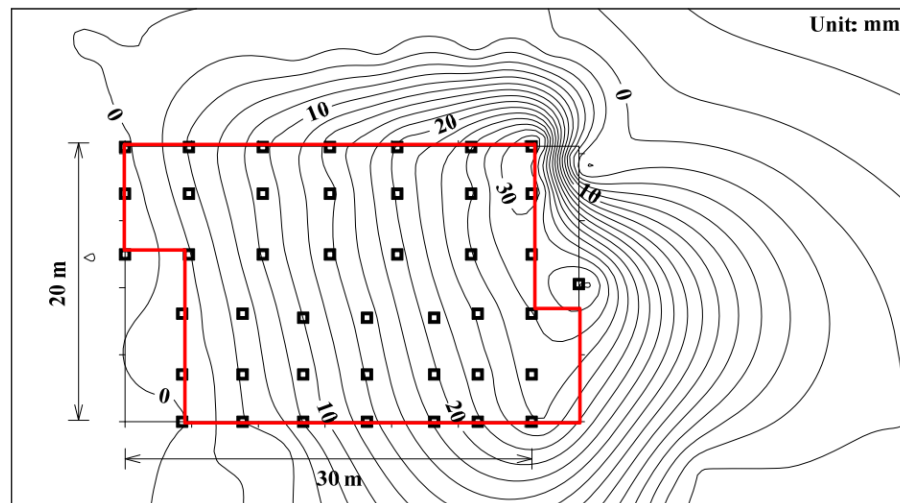


Figura 2.20. Líneas de contorno finales de igual altura de elevación.

Las líneas finales de contorno se muestran al final del programa de lechada, y la base se mantuvo en plano durante todo el programa de lechada (Véase figura 2.20).

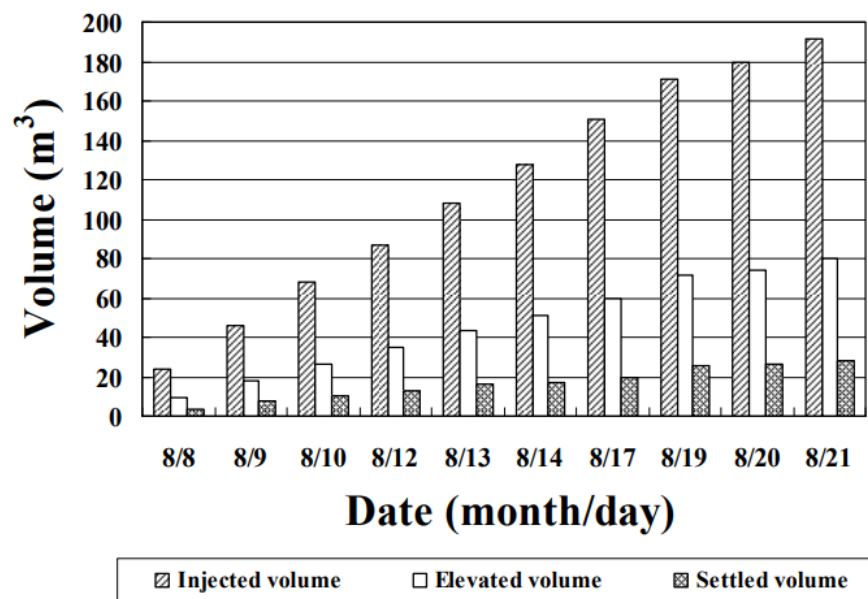


Figura 2.21. Gráfico de barras de los volúmenes de inyección.

La diferencia de las líneas de contorno entre la pre-inyección y la post-inyección proporciona el volumen elevado para el edificio inclinado al final de cada jornada. Además, la diferencia de las líneas de contorno entre las inyecciones ya mencionada, proporciona el volumen establecido durante la noche debido a la disipación del exceso de presión de los poros de la inyección. La figura 2.21 muestra los volúmenes diarios acumulativos inyectados y asentados. (Véase figura 2.21).

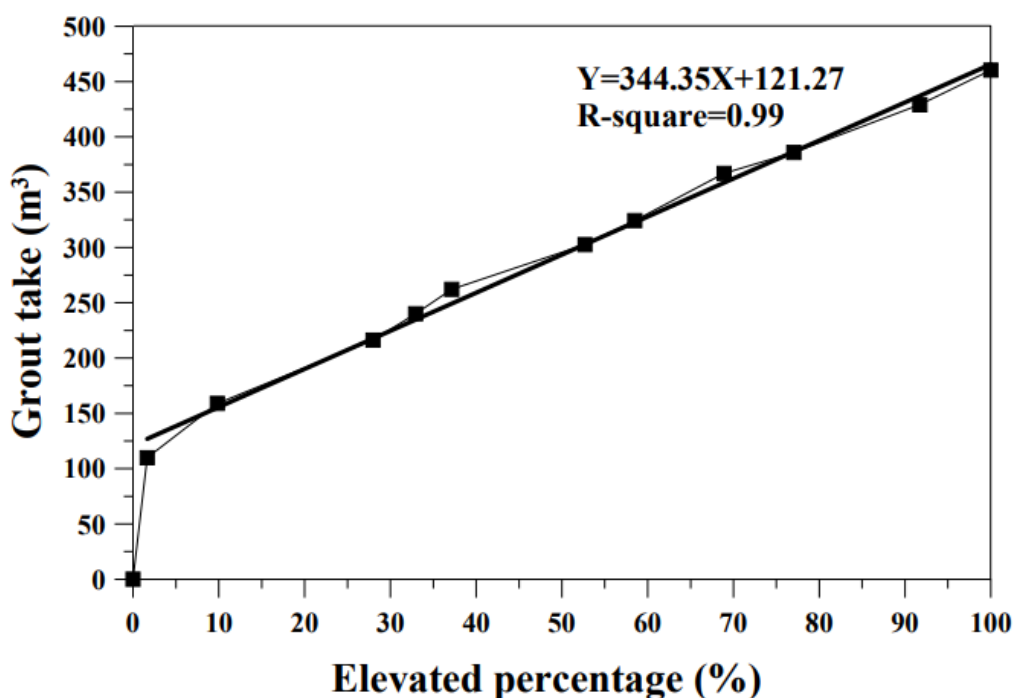


Figura 2.22. Gráfico de trayectoria de los volúmenes de inyección.

La figura 2.22, muestra la relación entre el volumen de la lechada y el volumen elevado como un porcentaje (Ver Figura 2.22). La regresión lineal de los resultados de la lechada podría expresarse como:

$$\text{Grout take} = 344.35 \times \text{porcentaje de elevación} + 121.27$$

La intersección 121.27 m^3 es la cantidad mínima de volumen de lechada para estabilizar la arena arcillosa antes de que inicie la etapa de elevación de la lechada. La intersección y la pendiente de esta relación depende del tipo de suelo, también de la presión de los cimientos del edificio. En general, cuanto más compresible es el suelo y la presión de cimentación más alta, se necesita más volumen de lechada para estabilizar el suelo de cimentación y elevar la estructura.

Si estas relaciones pueden definirse a partir de suficientes datos de campo, entonces los volúmenes totales de lechada pueden estimarse a partir de las ecuaciones lineales si se conoce

el tipo de suelo, el historial de tensiones y la presión de la fundación. La figura 2.23 muestra que el edificio inclinado antes de la lechada y el edificio nivelado con éxito después de la lechada (Ver Figura 2.23).



Figura 2.23. Rendimiento de la lechada a) Antes del tratamiento b) Después del tratamiento

2.3.3 Inyección por Compactación

La inyección de compactación es una técnica de mejora de suelo que tiene como fin, tanto aumentar la capacidad p rtate del terreno, como conseguir un aumento de la densidad relativa del mismo. Este efecto se consigue inyectando un mortero de baja movilidad que produce el desplazamiento lateral del terreno.

A. Usos frecuentes

- Apropiado para rellenos de escombros o suelos mal compactados, suelos sueltos o colapsables y suelos licuables.
- Habitualmente se emplea para tratamientos debajo de estructuras existentes porque las columnas no precisan una conexión estructural a las cimentaciones.
- Reducir el potencial de licuación
- Disminución o corrección de asientos
- Aumentar la capacidad p rtate.

B. Proceso

Esta técnica se basa en la inyección en el terreo de un mortero de baja movilidad, provisto de una gran fricción interna de forma que la inyección queda concentrada en el punto de aplicación, sin penetrar dentro de los poros del suelo. El material inyectado provoca el desplazamiento lateral en el entorno del punto de aplicación, provocado de esta forma una densificación y estabilización del suelo que rodea a la zona tratada. Adicionalmente se reduce considerablemente el porcentaje de huecos en la misma al provocarse una reorganización de las partículas del terreno.

El fraguado de la inyección confiere resistencia y dureza al terreno tratado. La tensión vertical de la capa de terreno tratada tiene que garantizar que el mortero de baja movilidad desplace el terreno horizontalmente, sin producir un levantamiento en la superficie.

La técnica de inyección de compactación fue empleada por primera vez en los años 50 en Estados Unidos. Es una técnica de mejora del terreno, que pese a basarse en un concepto relativamente sencillo, abarca complejidades que dependen de la mecánica de suelos, las propiedades reológicas del mortero, así como las dificultades propias de los procesos de perforación e inyección. Se requiere de un control por parte de especialistas capaces de manejar estos factores y que determina el éxito final de la ejecución de esta técnica.

Es a partir de los años 90 cuando se empieza a emplear las inyecciones de compactación en Europa, tras la buena experiencia obtenida en Estados Unidos, desarrollando y mejorando la técnica, basándose en multitud de diseños empíricos. Hoy en día es una técnica que se ha extendido a varios tipos de proyectos, con la característica común de solventar problemas relacionados con estructuras en servicio y sensibles a posibles asentos.

Los parámetros de diseño que debe cumplir las inyecciones de compactación son:

- Índice de inclusión/volumen de inyección: entre 5 y 15%
- Inyección en retirada
- Secuencia de inyección de taladros: buscando el mayor confinamiento posible de terreno
- Separación de taladros: 1 a 3,5 m
- Etapas o fases de inyección: 0,20 – 0,50 m
- Presión de inyección: entre 5 y 30 bares

- Velocidad de inyección; entre 10 y 90 l/mi
- Mortero de baja movilidad: Cono Abrams entre 3 y 8 cm

El mortero a inyectar debe presentar una dosificación tal que garantice su bombeabilidad con poca agua de amasado, presentando además una gran fricción interna, para mantenerlo como una masa homogénea en expansión.

La resistencia característica a compresión simple a los 28 días suele ser superior a 5 Mpa.

Dependiendo de las prioridades en cada punto de terreno, la inyección se puede realizar siguiendo diferentes criterios:

- Por volumen: una vez alcanzado el volumen del mortero máximo establecido en proyecto para cada fase.
- Por presión: en caso de alcanzar la presión máxima establecida en el proyecto, independientemente del volumen inyectado en la fase.
- Por movimientos en superficie: en caso de detectarse movimientos en superficie o en las estructuras próximas superiores a los límites previamente establecidos.
- Por reflujos por la boca del taladro: en caso de que el mortero salga por la boca del taladro. Este suele ser el criterio de corte que marca el final de los escalones próximos a la plataforma de trabajo.

C. Ventajas

- Amplia gama de suelos tratables
- Instalación y ejecución rápidas, desde dentro y fuera de la estructura
- Posibilidad de tragar en espacios reducidos
- Aplicación de emplazamientos de difícil acceso
- Método no destructivo y adaptable a sistemas de cimentación existente
- Método limpio, no hay resurgencia
- No se necesita conexión estructural con la cimentación existente.
- Se puede tratar profundidades no alcanzables con otras técnicas
- Alternativa económica frente a la excavación y sustitución del terreno

D. Garantía de calidad

- Se debe realizar un control sistemático del mortero mediante el ensayo de cono de Abrams
- Control de parámetros de ejecución
- Control de movimientos en la plataforma de trabajo o en la estructura

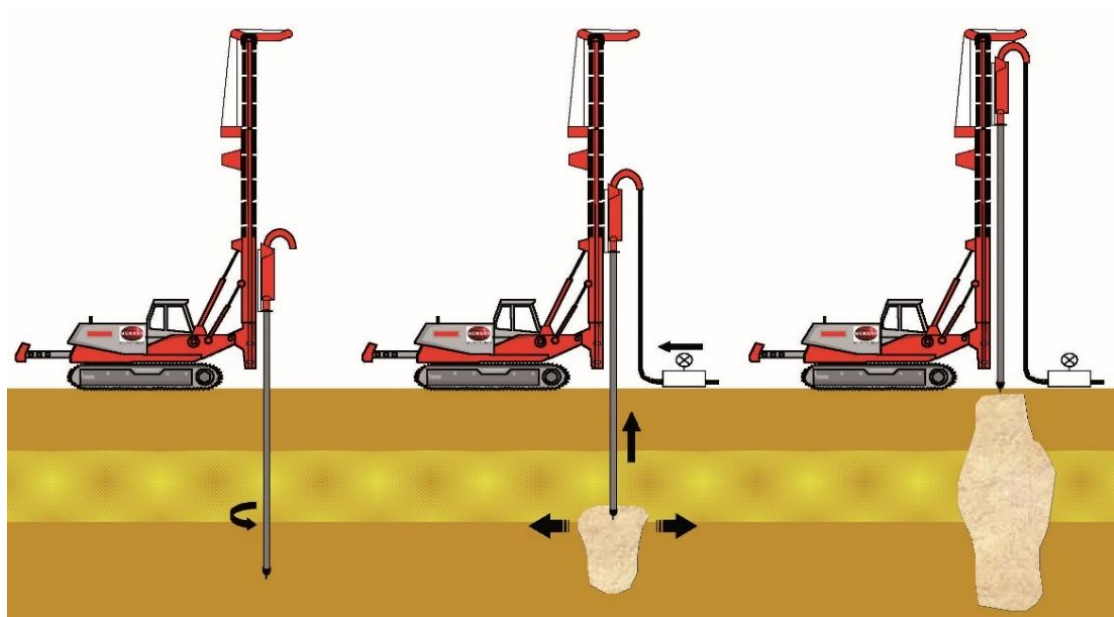


Figura 2.24. Esquema típico de inyección por compactación

2.3.4 Chemical Grouting

La inyección de presión es una alternativa a las reparaciones de cimientos profundos en el caso de suelos granulares o consolidados debajo de los cimientos.

La lechada química aumenta la resistencia y la rigidez de los suelos granulares al transformar el suelo en masas sólidas parecidas a piedras al llenar los huecos con una lechada de solución de partículas de baja viscosidad. La lechada química se inyecta a presión a través de una tubería en suelos sin cohesión.

A medida que impregna el suelo, la lechada química une el suelo en una masa sólida y mejora la capacidad de soporte del suelo. La lechada química es más adecuada para arenas limpias y/o grava.

Este procedimiento de estabilización del suelo ofrece las ventajas de realizarse fácilmente donde el acceso y el espacio son limitados, y donde no se requiere una conexión estructural a los cimientos que se sustentan. Una aplicación común de la lechada química es

proporcionar soporte de excavación para evitar el asentamiento de estructuras existentes adyacentes a una excavación.

La lechada de permeación (productos químicos y partículas) se utiliza como una técnica económica para detener fugas en minas, túneles, tanques subterráneos, pozos de ascensores y alrededor de conductos y tuberías subterráneas. La lechada de permeación se inyecta a través de agujeros colocados a lo largo de grietas, juntas o a lo largo de zonas de paso de agua. La inyección de lechada se puede realizar desde el interior de las estructuras o desde el exterior, dependiendo del acceso al área de trabajo.

Corresponde a la inyección de lechadas con diferentes tipos de aditivos y/o geles muy finos, que son capaces de rellenar cualquier fractura, algunas tan fluidas como el agua, lo que permite tener máxima penetrabilidad (Houlsby 1990). Luego de cierto tiempo el fluido reacciona y se expande, hasta formar un material muy viscoso (Ver Figura 2.25).

Las lechadas químicas son muy costosas y requieren mucha experiencia para ser aplicadas. Además, no son permanentes, requieren tratamientos posteriores ya que sufren deshidrataciones de hasta el 30% del volumen inicial de la inyección.

Se aplican en revestimientos y soporte de túneles, fundaciones de presas pequeñas, tanques de relaves en minas y estabilización de rocas.

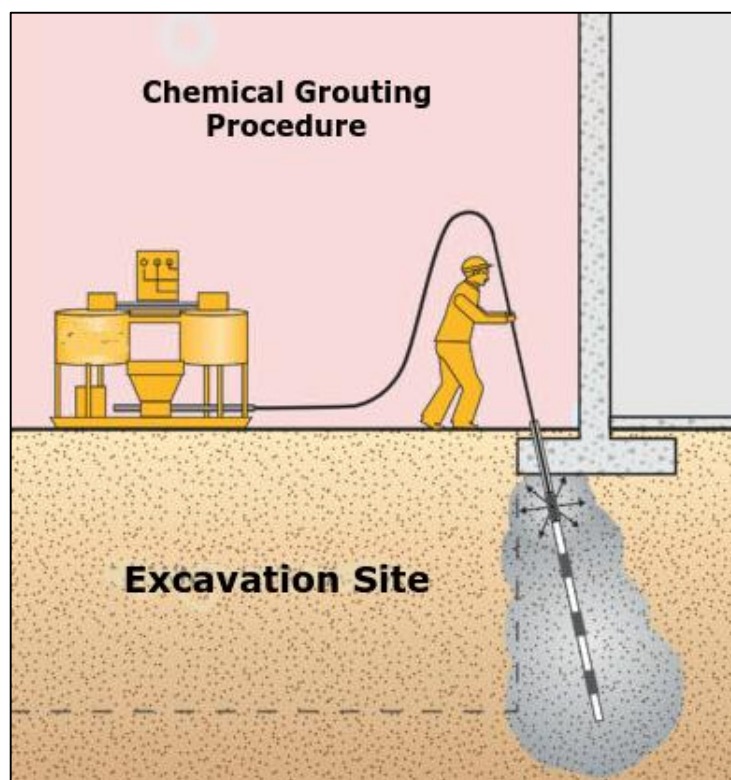


Figura 2.25. *Chemical Grouting*.

2.3.5 Inyecciones de Cemento o Cement Grouting.

Consiste en inyectar una o varias dosificaciones de lechadas de agua y cemento, con el fin de rellenar fracturas en la roca (Ver Figura 2.25). Modernas prácticas en inyecciones han evolucionado desde el uso de fluidos inestables y métodos manuales hasta el uso de lechadas apropiadamente formuladas y estables controladas con sistemas automáticos computarizados (Weaver and Bruce 2007).

La lechada de cemento crea masas solidificadas al llenar poros e imperfecciones en el suelo y las rocas.

La filosofía, el equipo y las metodologías han cambiado; en los últimos años, el cuerpo de ingenieros del ejército estadounidense, a la vanguardia en la experiencia de las inyecciones, ha venido utilizando lechadas estables y sistemas computarizados para monitorear, evaluar y controlar las operaciones de inyección. Weaver y Bruce (2007) sugieren que esta evolución en la aplicación del método es positiva ya que permite llegar a altos y uniformes estándares de calidad y efectividad, pero requiere ser eficiente en términos de control e inspección. Además, siempre habrá excepciones donde los métodos manuales serán necesarios.

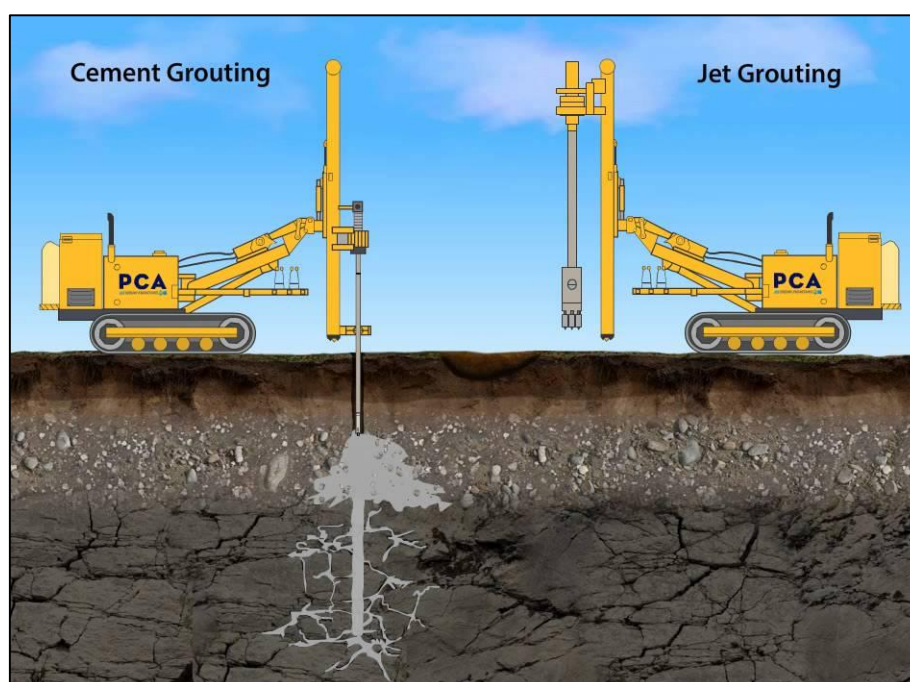


Figura 2.26. *Cement Grouting.*

El método tradicional de inyecciones, ha sido desarrollado básicamente por la escuela americana, avalado por la ASCE (American Society of Civil Engineers, USA), y ampliamente desarrollada en la literatura escrita por autores como Ewert (1985), Houlsby (1990), y Weaver And Bruce (2007).

A. Usos comunes

- Control de aguas subterráneas
- En excavaciones y cimientos
- Mejora la cohesión del suelo

B Detalles técnicos

La lechada de cemento (también conocida como lechada de alta movilidad), utiliza lechada de partículas fluidas para llenar los poros en el suelo granular o huecos en la roca. La inyección de la lechada de cemento se realiza en varios lugares a través de tuberías de puerto de manga simple o múltiple. Un tubo, típicamente de PVC o acero de 38mm a 75mm de diámetro, contiene varios conjuntos de pequeños orificios a lo largo de su longitud que están envueltos por mangas protectoras de goma expansible.

Las mangas actúan como válvulas unidireccionales, evitando que entre fluido fuera de la tubería, pero permitiendo que el fluido en el interior, una vez suficientemente presurizado, salga. La propagación de la lechada se rige por el tipo de suelo, el grado de compactación del suelo, la distribución del tamaño de grano, el tiempo de gel de tipo de lechada, la reología de la lechada y la presión de lechada. El resultado es una masa agrupada que es más fuerte y más rígida. Esta técnica se puede aplicar cuando el acceso es problemático y el espacio es mínimo, y es adaptable a los cimientos existentes. La lechada de cemento se puede realizar sin alterar las operaciones normales de una instalación existente.

El monitoreo en tiempo real de la presión, el flujo y la toma acumulada de lechada se usa para evaluar y determinar constantemente la dirección del programa de lechada. Su implementación también resulta conveniente en la medición del trabajo completado para la compilación de registros y el cálculo de datos útiles, como la propagación teórica de la lechada y la determinación del umbral de hidrofractura.

2.3.6 Inyecciones Ascendentes y descendentes

La inserción de los barrenos se puede realizar siguiendo el método de progresiones descendentes o ascendentes.

Emplearemos el primer método siempre y cuando la perforación sea estable y permita ser perforada toda su longitud, por lo que la inyección se realiza a partir del fondo hacia arriba, avanzando en tramos de 5mt. de longitud (Ver Figura 2.27).

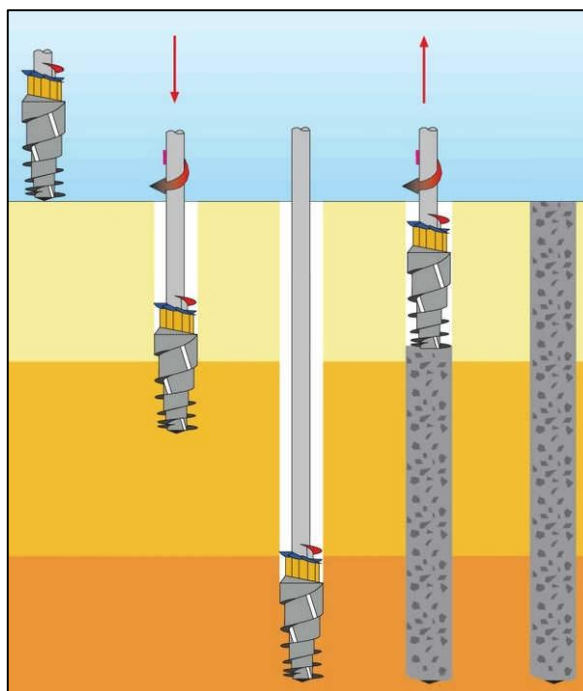


Figura 2.27 *Inyecciones ascendentes y descendentes*

Aplicaremos el segundo método cuando habiéndose realizado la perforación, esta presenta una zona muy fracturada y provoca que las paredes de la perforación no sean estables. Posteriormente se perfora una progresión de 5m de longitud, se procede a inyectar y se vuelve a perforar el siguiente tramo inferior, avanzando en esta forma hasta que se encuentra roca más estable.

2.4 ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

2.4.1 Ensayos de Permeabilidad Tipo Lugeon

Existen ensayos de agua a presión o pruebas de permeabilidad de tres tipos: ensayos para proyectos de diseño; ensayos que se realizan antes del proceso de inyecciones; y, ensayos que se realizan como verificación luego de inyectar un macizo (Weaver and Bruce, 2007). Las pruebas de permeabilidad o más propiamente dichas pruebas de conductividad hidráulica, se realizan comúnmente en los estudios de exploración finales de diseño para ayudar a evaluar posibles pérdidas por filtración luego del llenado del embalse.

Las unidades en las que se mide la permeabilidad son centímetros por segundo [cm/s]. Para mostrar los resultados de los ensayos se utiliza la unidad denominada Lugeon, que equivale a un litro por metro por bar de presión ensayada a una presión de 10 bar; o.

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

Algunos autores que han definido pruebas donde la presión puede ser constante o variable; siendo estas últimas las más comunes. Una consideración inicial dice que si la permeabilidad tiene valores igual o superior a 10^{-3} cm/s con presiones bajas, no es necesario ensayar a presiones mayores (Weaver and Bruce, 2007).

Littlejohn (1992) sugiere que para rocas débiles o suaves se debe usar intervalos o estadios de presión de 2-4-6-4-2 bares, y para rocas duras intervalos de 10-20-40-20-10 bares. El tiempo de inyección es de 5 a 10 minutos para cada intervalo; y el tramo ensayado debe estar entre 3 y 5 m.

Ewert (1985) indica que cinco estadios de presión no son suficientes para tener una idea precisa; los estadios serían a-b-c-d-c-b-a. Los intervalos de tiempo son de 10 minutos y el tramo de ensayo no debe ser mayor a 5 m.

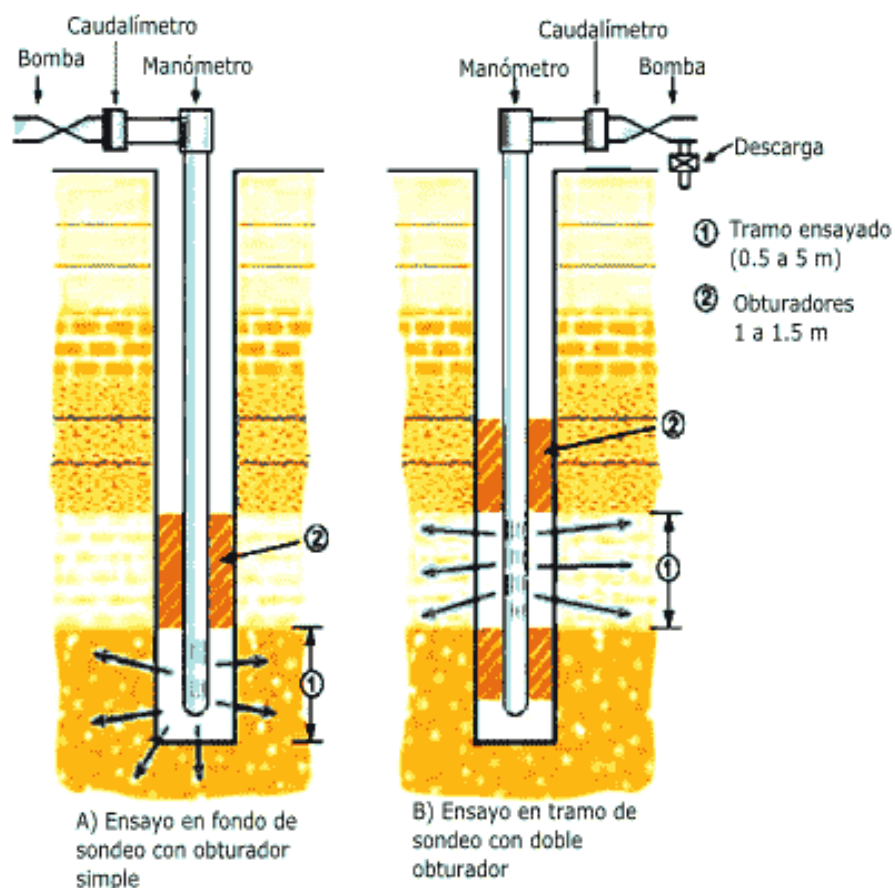


Figura 2.28. Ensayo Lugeon con obturador simple y doble.

Houlsby (1976, 1990) indica utilizar cinco estadios de presión: a-b-c-b-a aplicados durante 10 minutos. Hace también un análisis de los resultados para cada estadio y presenta un modelo para cada ensayo. Describe cinco condiciones básicas que se pueden dar:

A. Flujo Laminar

Valores Lugeon similares para cada estadio de presión, usualmente indica un flujo suave en fracturas finas. Como valor Lugeon final indica usar cualquier valor de los 5 obtenidos o hacer un promedio de los mismos (Ver Figura 2.29-a).

B. Flujo Turbulento

Valores simétricos decrecientes mientras aumenta la presión. Indica un flujo rápido a través de fracturas gruesas. El valor Lugeon considerado es el que corresponde a la presión máxima (Ver Figura 2.29-b).

C. Dilatación

El valor Lugeon más alto corresponde a la presión máxima. Indica una dilatación local de fracturas por compresión de materiales suaves adyacentes o que fracturas adyacentes paralelas se cierran. El valor Lugeon considerado es el que corresponde a la presión más baja o intermedia (Ver Figura 2.29-c).

D. Erosión

Los valores Lugeon incrementan incluso al bajar la presión. Indica un lavado del material que rellena las fracturas. El valor Lugeon considerado es el de la presión final del ensayo. Si se repite con frecuencia durante un sondeo puede indicar que la presión máxima utilizada es demasiado grande (Ver Figura 2.29-d).

E. Relleno

Los valores Lugeon decrecen durante todo el ensayo. Lo que indica que se llenan los vacíos presentes en la roca. El valor Lugeon utilizado es el más bajo de todo el ensayo (Ver Figura 2.29-e).

Ewert (2003), usando datos de experiencias en algunos proyectos y haciendo un análisis comparativo presenta algunas correlaciones del valor Lugeon (Lu) y la posibilidad de inyección en la roca:

- Valores entre $<1 - 5$ Lu indican roca no inyectable.
- Valores entre $5 - 10$ Lu indican roca pobremente inyectable.
- Valores mayor a 10 Lu indican roca inyectable.

Houlsby (1990), indica que se debe inyectar la roca cuyos valores de permeabilidad sean mayores a 10 Lu.

HV CONTABILIDAD S.A.		PATRONES TIPOS DE RESULTADOS DE PRUEBAS LUGEON (HOULSBY 1976)				
TIPO DE FLUJO	ESTADIOS 10°c/u	PRESIONES DE PRUEBA MAX. RELATIVA (APROX.)	PATRONES LUGEON CALCULADOS PAR CADA 10" PATRON GENERALIZADO	CARACTERISTICAS DE LOS PATRONES E INTERPRETACION	VALOR A USAR COMO "K" DEL ENSAYO	CURVA DE INTERPRETACION
FLUJO LAMINAR	1° 2° 3° 4° 5°			LOS 5 VALORES LUGEON SON APROXIMADAMENTE IGUALES	SE USA EL PROMEDIO DE LOS 5 VALORES	
FLUJO TURBULENTO	1° 2° 3° 4° 5°			EL VALOR LUGEON MAS BAJO OCURRE EN LA PRESION MAXIMA	SE USA EL VALOR LUGEON PARA LA PRESION MAXIMA	
FLUJO DILATACION	1° 2° 3° 4° 5°			EL VALOR LUGEON MAS ALTO OCURRE EN LA PRESION MAXIMA	SE USA LOS VALORES LUGEON PARA LAS PRESIONES MINIMAS y/o MEDIAS	
FLUJO EROSION	1° 2° 3° 4° 5°			LOS VALORES LUGEON AUMENTAN EN EL PROCESO DE LA PRUEBA (POR CAMBIOS EN EL MEDIO ROCOSO)	SE USA EL VALOR LUGEON MAS ALTO	
FLUJO RELLENO	1° 2° 3° 4° 5°			LOS LUGEONES DECRETAN EN EL PROCESO DE LA PRUEBA. (LOS VACIOS SON GRADUALMENTE RELLENADOS)	SE USA EL VALOR LUGEON MAS BAJO	

1,0 U.L.=1,3x10²cm./seg (C.A. HOULSBY, 1976)

Figura 2.29. Condiciones de los ensayos de permeabilidad: a) flujo laminar; b) flujo turbulento; c) dilatación; d) erosión; e) relleno. (Modificado de Houlsey)

2.4.2 Ensayos de Permeabilidad Tipo Lefranc

El ensayo Lefranc es una investigación geotécnica que se realiza in situ, sirve para definir el valor de la permeabilidad (K) en suelos permeables o semipermeables granulares por debajo del nivel freático y en rocas muy fracturadas, es un ensayo geotécnico aplicado en suelos.

El ensayo Lefranc se aplica en el interior del sondeo por debajo del nivel freático, durante o en pausas cuando se realiza la perforación, en suelos del tipo granular (aluviales, arena, limo) y en rocas muy fracturadas.

A. Lefranc de Carga Constante

Estas pruebas reciben este nombre porque durante toda la ejecución del ensayo se mantiene un nivel constante de agua en la boca del sondaje y se toman lecturas del caudalímetro en un lapso de un minuto durante 10 minutos.

Los 10 valores obtenidos se promedian y con los datos de profundidad y diámetros de perforación se calcula la permeabilidad.

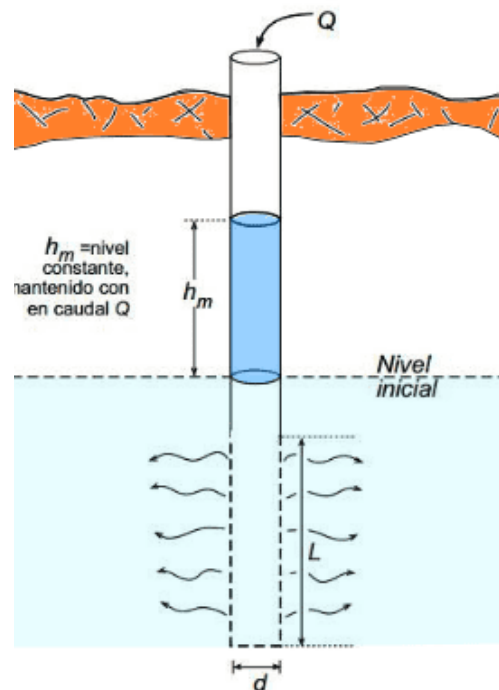


Figura 2.30. Ensayo Lefranc a carga constante.

1. Procedimiento de Prueba

Se vierte agua suministrada por una bomba a la boca de la tubería de revestimiento, haciendo que el agua suba a lo largo de ella, y se regula la bomba hasta que el caudal de salida

de la misma sea igual al caudal de absorción del terreno en ese momento se alcanza un nivel constante y consecuentemente un consumo constante (Z_n).

El control del nivel constante es posible mediante las válvulas de suministro de agua al taladro y de descarga. Conseguida la estabilización del nivel, se determina el caudal que ingresa a través del bulbo de ensayo (caudalímetro), por diferencia de lecturas, en cada minuto transcurrido. Se realizan lecturas durante diez minutos con el nivel estabilizado y el caudal es el promedio de estas diez (10) lecturas.

El nivel constante determina una carga constante que actúa sobre un tramo de ensayo. La carga hidráulica es función de la altura que separa el nivel estabilizado del nivel freático (h_n), cuando lo hay, o bien a la mitad del tramo de ensayo (S) cuando el nivel freático está por encima del fondo del taladro.

Además, se determina los parámetros inherentes al bulbo de ensayo, como el diámetro y la longitud (S/Φ).

2. Cálculo del Valor de la Permeabilidad

Conocidos los parámetros referidos en el párrafo anterior, se procede al cálculo del valor de permeabilidad.

Para el cálculo de la permeabilidad de una prueba, se tiene en cuenta el factor de forma del bulbo de ensayo (S/Φ).

Para el cálculo de las pruebas se considera dos rangos de la relación S/Φ .

S : Tramo de ensayo

Φ : Diámetro interior de la tubería

B. Lefranc de Carga Variable

El procedimiento utilizado para la prueba de permeabilidad con carga variable consiste en realizar la perforación a una profundidad designada, llenar el pozo de perforación con agua limpia, y monitorear la velocidad a la que desciende el agua en el pozo de perforación, se realizan medidas del descenso de agua en un lapso de una hora.

Si el tramo de prueba está por encima del nivel freático, se deberá añadir la cantidad suficiente de agua a la perforación para saturar el tramo de prueba antes de realizar la prueba.

El ensayo Lefranc de carga variable utiliza los mismos criterios del ensayo de carga constante respecto a la preparación del bulbo de ensayo e instalación de equipo.

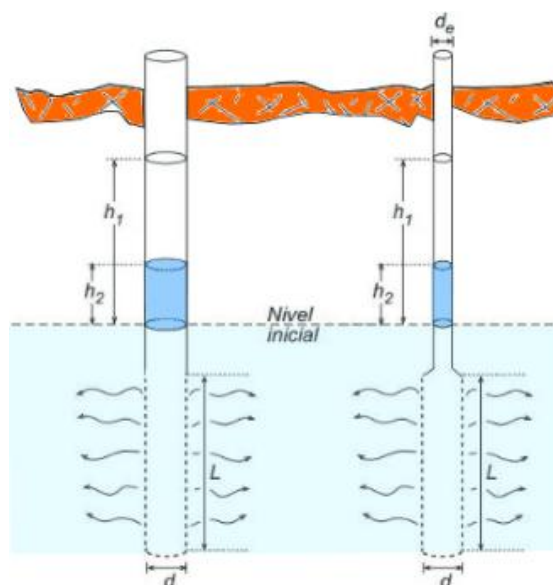


Figura 2.31. *Ensayo Lefranc a carga variable.*

El procedimiento de las lecturas en el ensayo de carga variable marca la diferencia entre los dos ensayos; en el ensayo de carga variable después de alcanzado un nivel constante dentro del revestimiento, se corta el suministro de agua y se empieza a medir el descenso del agua en la tubería, al inicio del ensayo en lapsos de tiempo cortos y después más largos, a medida que el nivel de agua se acerque a la estabilización.

Para el cálculo de la prueba también se considera la siguiente formula:

$$K = \frac{d_e^2 \ln\left(\frac{2L}{d}\right)}{8Lt} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Donde:

K = conductividad hidráulica

h1, h2 = altura del agua al principio y al final del ensayo

t = tiempo transcurrido entre la observación de los niveles h1 y h2

L = longitud de la zona filtrante

d = diámetro de la zona filtrante

Con respecto al diámetro de entubación, d_e = diámetro de la entubación

2.5 INYECTADO CONTROLADO POR COMPUTADORA.

El uso de una computadora como apoyo durante el proceso de inyección es una herramienta importante, ya que se puede controlar de manera continua el proceso en tiempo real, midiendo por integración la presión de inyección P y el gasto de inyección o flujo. Por

medio de ésta se puede obtener el volumen acumulado V por unidad de longitud de barreno inyectado, desde el inicio de la progresión, o a partir de la derivación de la velocidad de flujo.

2.5.1 Equipo de Registro Electrónico - *LOGAC G5*

El LOGAC G5 está concebido para registrar el tiempo, el caudal, el volumen y la presión durante las operaciones de inyección o similares.



Figura 2.32. Registrador electrónico Logac G-5.

Donde:

1. Bastidor de acero.
2. Registrador LOGAC G5.
3. Unidad de medición CFP.

El LOGAC de Atlas Copco es un sistema de registro automatizado para muestreo y almacenamiento de datos durante las operaciones de inyección o similares. El sistema LOGAC se caracteriza por su fiabilidad y sencillez de funcionamiento.

El hardware del LOGAC consta del registrador LOGAC G5 y de la unidad de medición CFP, y se suministra como unidad independiente portátil o como parte integrada en un sistema de inyección. También se puede suministrar equipamiento opcional para inyectar de acuerdo con el método GIN.



Figura 2.33. Composición del equipo - Logac G-5.

Donde:

1. Cable de alimentación principal.
2. Interruptor principal ON/OFF.
3. Conexiones de los cables de los sensores.
4. Puerto USB.
5. Cable de tierra.

La unidad registra de forma estándar hasta una presión de 100 bar y un caudal de 100 l/min. La electrónica del registrador está incorporada en un armario con una pantalla de cristal líquido. En la parte inferior del armario hay conexiones de cable y un puerto USB con una tapa hermética para insertar la memoria USB suministrada. Todos los datos guardados en el Logac G5 se pueden transferir a un ordenador a través de la memoria USB o una conexión de red.

A. Programa Logac Monitor

El programa informático Logac Monitor forma parte del sistema Logac. Está concebido para una inspección rápida y sencilla de los datos registrados.

Cada archivo de registro de datos representa una operación de inyección específica realizada en un sondeo específico. Los datos registrados se guardan como archivos de texto y se pueden exportar fácilmente a través del programa Logac Monitor a Microsoft Excel para ver y analizar los datos o para hacer presentaciones gráficas y copias impresas.

Todo lo que se necesita es un ordenador compatible IBM con Microsoft Windows XP o un sistema más antiguo y un puerto USB.

B. Unidad C.F.P.

La unidad de medición CFP, está compuesta por un caudalímetro y un medidor de presión que están montados en línea con roscas de 1 pulgada en ambos lados, una para conectar la manguera a la bomba de inyección y otra para conectar la manguera a la salida.



Figura 2.34. Unidad de medición CFP - Logac G-5.

El medidor de presión consiste en un sensor de presión montado en un transmisor de presión. El caudalímetro electromagnético tiene dos sensores inductivos en una carcasa de cerámica, este caudalímetro no tiene movimiento interno y posee una electrónica integrada bien protegida para garantizar un funcionamiento seguro.

El LOGAC está diseñado para una a cuatro líneas de inyección, los parámetros registrados son: caudal, presión, volumen, tiempo de registro, fecha, hora y número de sondeo.

En la siguiente imagen se observa el modelo de datos del registrador electrónico en donde se almacena información como la hora, la presión de inyección, el caudal de inyección y el volumen inyectado, además de los datos de reconocimiento para el punto de inyección.

```

worksite;P PUNAMAYO
Section;MARG DERECHO
HoleNo;C216
HoleLen;5.0
Stage;1
Recipe;1
Injection;2
Date;2014:09:06
Time;      Pressure;Mom. Flow; Volume
HH:MM:SS;  Bar; Litros/minute; Litros
12:04:25;  0.0;  0.0;  0.0
12:04:35;  0.1;  74.7;  1.6
12:04:46;  0.2;  14.2;  5.4
12:04:56;  0.4;  7.5;  6.8
12:05:06;  0.6;  7.5;  8.0
12:05:16;  0.8;  7.5;  9.4
12:05:27;  1.6;  0.0;  10.0
12:05:37;  3.2;  4.2;  10.5
12:05:47;  3.3;  12.5;  12.0
12:05:57;  3.2;  13.3;  14.2
12:06:08;  3.1;  13.4;  16.3
12:06:18;  3.1;  14.2;  18.9
12:06:28;  3.2;  13.4;  21.1
12:06:38;  3.3;  13.4;  23.4
12:06:49;  3.2;  14.2;  25.7

```

Figura 2.35. Modelo de registro de datos

CAPÍTULO III

MATERIAL DE ESTUDIO

3.1 GENERALIDADES

Como materiales de estudio o herramientas de investigación se considera la descripción del túnel, el control de inyección aplicando el método JET GROUTING y un equipo computacional que facilita el control de la inyección y que además es un medio electrónico que registra los datos en tiempo real siendo visualizados en un display con el fin de discernir cuando se debe detener la inyección.

La descripción del túnel obtenida del Estudio definitivo y elaboración del expediente técnico del proyecto de regulación del río Pumamayo, en esta parte se incluyen las características más relevantes y las condiciones iniciales del macizo rocoso de fundación.

El control y análisis del túnel de desvío de la presa Pumamayo fue ejecutado usando el principio JET GROUTING, la aplicación de este método por tratarse de una zona de relleno y sellado indican que el método es económica y técnicamente efectivo. Este método permite utilizar diferentes tipos de mezcla, donde la presión jugará un papel importante puesto que en base a la presión se determinará en qué momento detener la inyección.

3.2 GEOLOGÍA LOCAL

A. Geomorfología

La geomorfología en la zona del embalse está constituida por pendientes suaves y superficies onduladas que contrastan con otros sectores agrestes de alta montaña. El área del embalse está limitada mayormente por depósitos glaciales (morrenas), fluvio-glaciales, aluviales y bofedales, con afloramientos aislados de areniscas Huancané y tobas riolíticas de la formación Quenamari. El río Pumamayo forma un valle encañonado donde se emplazará la presa proyectada.

Esta unidad corresponde a la garganta topográfica, tallada paralela a horizontes meteorizados, foliados y erosionables de limolitas, limolitas carbonosas y limolitas lutáceas del Grupo Ambo.

El sitio para el eje de presa, identificado en los estudios previos, ha sido ubicado en una garganta rocosa en la cual se ha labrado el cauce del río Pumamayo, muy estrecho, en forma de “V” cerrada y siguiendo su cauce algunos estratos de limolitas, limolitas carbonosas y limoarcillitas erosionables. Por consiguiente, no existen sitios alternativos comparativamente más favorables al eje de presa ubicado en la etapa de factibilidad, ratificándose dicho eje como el más adecuado.

La base del valle en el eje de presa se encuentra sobre los 4 550 msnm. El talud izquierdo presenta pendiente bastante regular con unos 40° a 45° de inclinación, coincidente con el rumbo y buzamiento de los estratos, mientras que el talud derecho es bastante irregular con pendientes de 80 - 60° en la base del valle y taludes de 50 a 40° en la parte superior, lo cual está asociado a las características litológicas y a que la estratificación es contraria al talud.

A partir de la cota 4 580 el talud del valle cambia bruscamente y sus pendientes descienden a 10° y 20°, en razón que las limolitas lutáceas se erosionan fácilmente.

B. Lito-estratigrafía

Litológicamente las rocas representativas están conformadas por limolitas, limolitas carbonosas, limoarcillitas (limolitas lutáceas), areniscas y zonas de transición entre las limolitas y areniscas pertenecientes al Grupo Ambo (Ci-a1, a2 y a3). Sobreyacen en discordancia al Grupo Ambo un paquete de areniscas blanquecinas de la formación Huancané (Ki-hu), la estratificación presenta un rumbo N10°E y buzamiento de 35° a 45°NO (Ver Figura 2.4). Los depósitos cuaternarios reconocidos están constituidos por:

1. Acumulaciones morrénicas (Q-mo)

Ubicadas en ambos flancos del área de embalse, separando como un tabique natural a las lagunas Ajoyajota y Parinajota. Su litología consiste de suelos areno limosos ligeramente arcillosos, con inclusiones de gravas, cantos, bolos y bloques, de tonalidades marrón claras a gris claras. Presentan buena consistencia, son densos, poco permeables a impermeables.

2. Depósito coluvial - lagunar (Q-co-la)

Corresponde a las terrazas ubicadas en la parte noreste del embalse. Su litología consiste de bancos de cantos, gravas y arena, muy semejantes a los depósitos de origen aluvial.

3. Las acumulaciones lacustrinas (Q-la)

Se han formado en el fondo del área de embalse de la laguna Ajoyajota y área del eje de presa Pumamayo; están constituidas por arenas limo arcillosas con materia vegetal descompuesta formando zonas pantanosas, que se han caracterizado como acumulaciones de bofedales (Q-bo). Cerca del eje de presa se han delimitado acumulaciones lagunares cubiertas por depósitos coluviales (Q-co-la).

4. Depósitos fluviales (Q-fl)

Localizados en el cauce del río Pumamayo está conformado por limitado material fluvial. En la cola del embalse, denominada Zona de Encuentro, en el cauce del río, se encuentran acumulaciones de gravas y cantos con relleno arenoso y limo arenoso, cuyo espesor se infiere en más de 5 m.

Las acumulaciones aluviales (Q-al) rellenan los lechos de los cauces dentro del embalse proyectado, como zona anegadiza de los ríos. Están constituidos por la acumulación de cantos rodados, gravas, arenas y, en menor cantidad, finos. Estos materiales se encuentran sueltos a medianamente densos, no plásticos, húmedos y de color beige.

C. Geología Estructural

Regionalmente, el mapa geológico y la imagen satelital muestran que hay un basamento rocoso, con cobertura local de depósitos cuaternarios, glaciares y fluvio-glaciares. Desde el punto de vista morfológico no se ha reconocido sobre el terreno alineamientos con evidencias de escarpas que representen el desplazamiento producido por una falla cuaternaria.

En ambos flancos del valle se expone el basamento rocoso, donde fueron registradas las principales características de las discontinuidades, como son los planos de estratificación y fracturamiento, dirección de buzamiento, ángulo de buzamiento, tipo de discontinuidad, entre otras características.

El trazo del túnel ubicado por el flanco derecho atraviesa íntegramente al macizo rocoso constituido por limolitas, limolitas lutáceas y areniscas duras. Además, el túnel atravesará rocas en un mayor porcentaje que varían de mala a regular calidad, así como en tramos cortos atravesará rocas de buena a muy mala calidad.

La calidad de la roca que atraviesa el túnel por la margen derecha, definido por geología local, perforaciones diamantinas, estaciones geomecánicas, es la siguiente: en el portal de

entrada hasta los 6,00 m la roca es mala, luego continua de regular a buena calidad hasta aproximadamente los 50 m y desde este punto al portal de salida la calidad de la roca es mala.

D. Geodinámica Externa

En las cercanías del proyecto no se observan fenómenos de deslizamientos y asentamientos de talud rocoso, que constituyan elementos de peligro hacia la estructura de la presa de regulación y/o el embalse. El territorio involucrado con las obras de regulación se muestra estable y seguro. Sin embargo, se han mapeado dos depósitos coluviales, originados por el proceso de erosión en la base de los estratos, provocando el derrumbe de talud siguiendo el plano de estratificación. En cambio, en la margen derecha el proceso de erosión ha provocado ocasionales desprendimientos de vuelco de estratos.

En la zona del embalse y eje de presa propuesto, no existen fenómenos geodinámicos importantes, ni agentes geológicos, que representen peligros para el proyecto. Solamente se han podido observar en la cuenca, huellas de erosión pluvial y de escorrentía. Las laderas en el embalse se mantienen estables y no existen evidencias de deslizamientos recientes ni antiguos.

Únicamente se recomienda que a lo largo del valle encañonado del Pumamayo, en época de estiaje, se efectúe limpieza, desquinche de bloques inestables y remediación en zonas con socavamiento de estratos de limolitas y potencial inestabilidad de paquetes de roca estratificada, entre aguas arriba y aguas debajo de la presa.

E. Riesgo Sísmico y Vulnerabilidad.

El presente informe, sustenta los resultados de la revisión y el análisis de la información de la actividad sísmica en la región sudoriental del Perú, en el departamento de Puno que limita con los departamentos de Cusco y Madre de Dios. Específicamente en el área que comprende los estudios para el proyecto.

La evaluación del peligro sísmico se ha realizado por medio de los métodos Probabilístico y Determinístico, definiendo niveles de aceleraciones máximas del movimiento sísmico del terreno para el Sismo Máximo Creíble (MCE) y para el Sismo Base de Operación (OBE) de acuerdo al International Building Code IBC 2006. Además, se han determinado los Espectros de Peligro Uniforme para diferentes periodos de retorno considerando un amortiguamiento crítico del 5% y se proponen valores de coeficientes sísmicos para el diseño pseudoestático de estructuras.

E. Clima

El clima que predomina en el área estudiada es frío de alta montaña y de acuerdo a la posición geográfica y al relieve, los factores climáticos varía de un lugar a otro. Según la clasificación de Köppen, W. (1931) se han diferenciado 4 tipos de climas.

1. Clima Templado Moderado Lluvioso

Este tipo de clima es seco e invierno con temperaturas que oscilan entre 3° y 18°C, siendo esta última su temperatura promedio. Las precipitaciones en los meses más lluviosos son abundantes.

2. Clima Frio

La temperatura media que presenta este clima es superior a los 10°C durante la temporada lluviosa, mientras que en el periodo de sequía que es bien marcado, se presenta las heladas con temperaturas más bajas que llega comúnmente a los 0°C. Este clima predomina en casi toda el área de estudio.

3. Clima de Tundra Seco de Alta Montaña

El clima está caracterizado por una fuerte oscilación térmica entre el sol y la sombra, y entre el día y la noche. Las temperaturas más bajas se dan entre los meses de Mayo y Agosto (entre -9°C a -25°C) y las máximas entre Setiembre y Abril (hasta 22°C). Las precipitaciones (lluvia, nieve y granizo) se dan en los meses de Octubre a Abril. Es un clima de aire seco que generalmente le corresponde a la región Puna.

4. Clima de Nieves Perpetuas de Alta Montaña

Presenta violetas oscilaciones térmicas entre el sol y la sombra, y entre el día y la noche. Las temperaturas bajan hasta menos de 25°C bajo cero. El aire es muy seco (rarificado). Las precipitaciones son sólidas, generalmente todo el año, siendo comunes las zonas de nieves perpetuas, este clima corresponde a la región Janca.

F. Temperaturas

La zona de vida correspondiente al área de estudio es el Páramo Muy Húmedo – Subalpino Subtropical, es la más extensa de la Región alto andina. Se distribuye entre los 3,900 msnm y 4,500 msnm, y se caracteriza por presentar un clima perhúmedo y frío, con una biotemperatura media anual que oscila entre los 4°C y 6°C; se registran ocurrencias diarias de temperaturas de congelación.

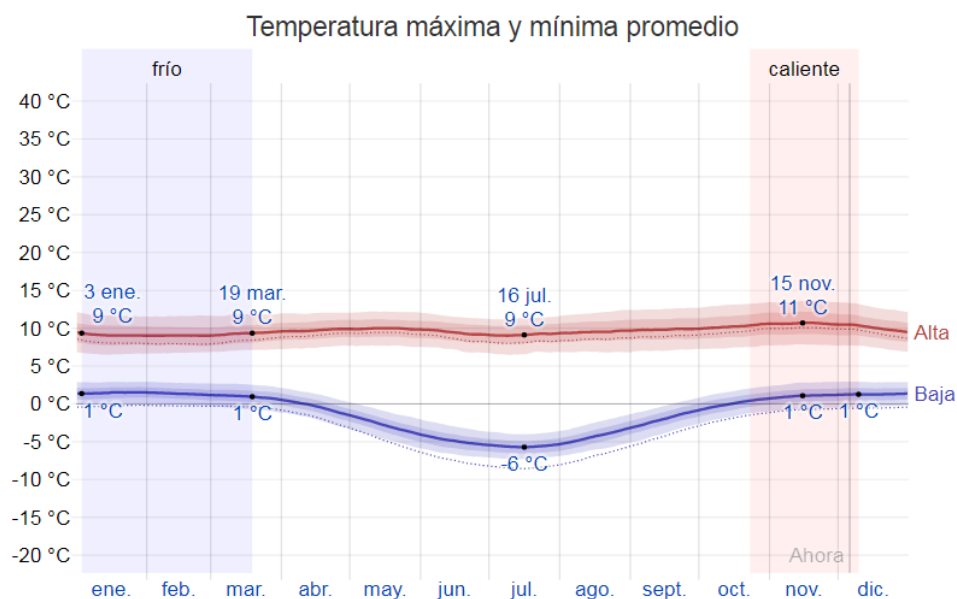


Figura 3.1 *Temperaturas anuales de Macusani (Fuente: Weather Spark 2016)*

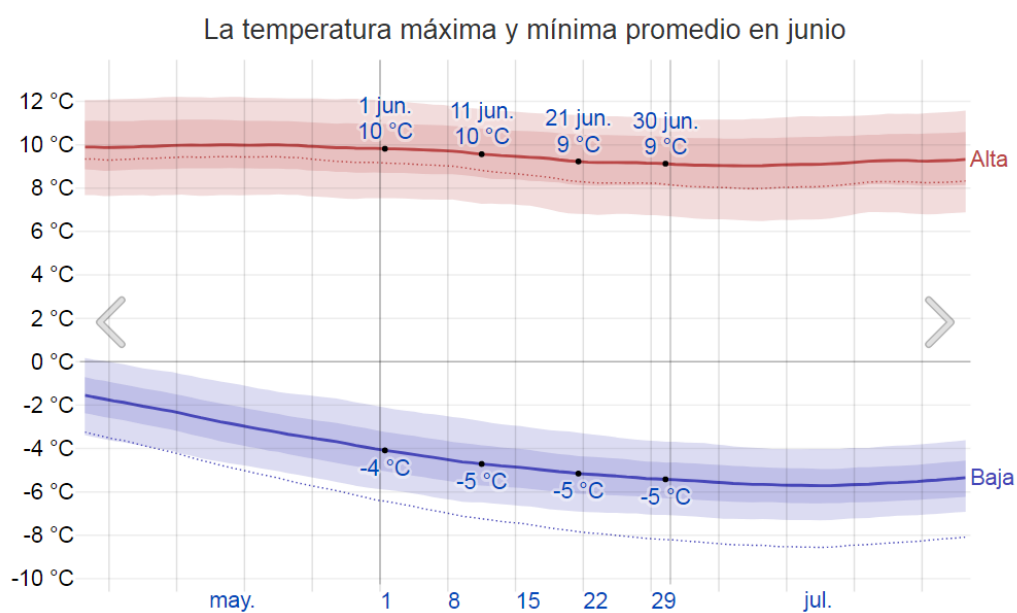


Figura 3.2 *Temperaturas máximas y mínimas para el mes de junio en Macusani (Fuente: Weather Spark 2016)*

G. Precipitaciones

Se presenta en los meses de diciembre y abril (régimen tropical), y se manifiesta en lluvias, nieve y granizo, las que comúnmente están acompañadas de fenómenos eléctricos y sonoros. Las lluvias son estacionales, se concentra en los meses de enero y marzo y parcialmente en diciembre.

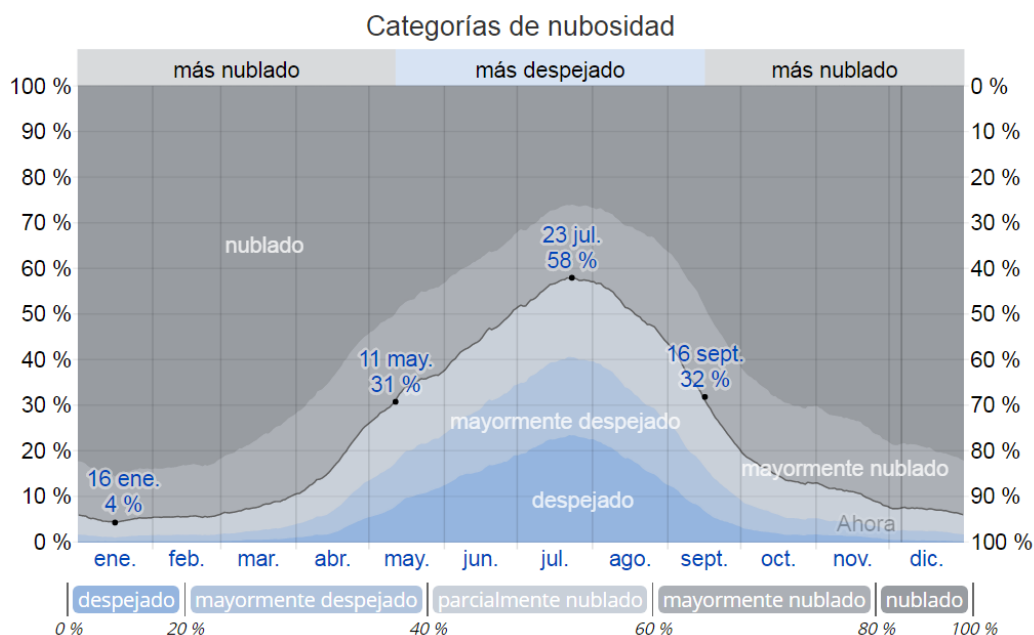


Figura 3.3 *Categorías de nubosidad anual en Macusani (Fuente: Weather Spark 2016)*

El periodo seco comprende los meses de abril a octubre, acentuándose entre los meses de mayo y agosto. Estos fenómenos tienen gran incidencia en el caudal de los ríos, los que son generalmente de régimen irregular (Ver Figura 3.4).

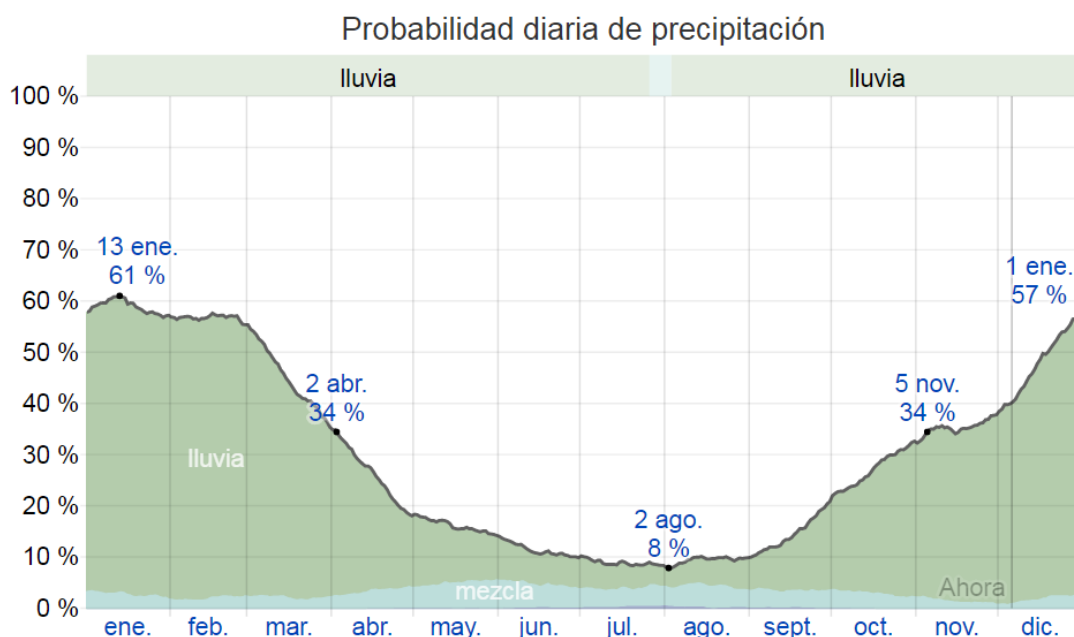


Figura 3.4 *Precipitación histórica anual en Macusani (Fuente: Weather Spark 2016)*

El promedio máximo de precipitación total por año es de 750mm, y el mínimo de 500mm. Se ha estimado que la evapotranspiración potencial por año varía entre la cuarta parte y la mitad del promedio de precipitación pluvial total por año, lo que la ubica dentro de la clasificación de: Per húmedo.

H. Vegetación

En esta zona de vida la configuración topográfica es variada, desde suave hasta empinada; la vegetación natural está compuesta por asociaciones herbáceas, de gramíneas perennes, en las que los géneros dominantes son *Festuca*, *Stipa*, *Calamagrostis*, *Hypochoeris*, *Scirpus* y *Aciachne*.



Figura 3.5 *Distichia muscoides* en la zona de Pumamayo – Macusani.

En los sectores hidromórficos, conocidos como bofedales, son predominantes y con una cobertura de 90% la juncácea *Distichia muscoides*. También se presentan zonas donde predomina el género *Margyricarpus*, ejemplares de los géneros *Brachiotum* y *Ribes*, entre otros. El valor pecuario de esta zona de vida es de particular importancia, debido a que en esta se concentra la mayor actividad ganadera, principalmente de ovinos y de camélidos sudamericanos (alpacas y llamas).

La flora en la zona de estudio es bastante pobre. Sin embargo, en sus tres regiones se puede distinguir algunas especies; así:

En la región Suni, la vegetación está compuesta de pequeños arbustos como el Quinual (*Polylepis racemosa*).

En la región Puna predominan las gramíneas con los nombres genéricos de Ichu y Ocsa. La totora y otras plantas acuáticas, crecen en torno a las lagunas y los bofedales. Existen además varias especies rastreras que se apiñan formando almohadillas, es el caso de lo que se conoce comúnmente como “Huaraco”.

La región Janca tiene una flora constituida generalmente por hierbas aisladas, musgos y líquenes. También se encuentran aquellas plantas que forma almohadillas como los Huaracos, las Yaretas (*Azorella yarita*). Otra planta importante es la Chunchuayta (*Gentiana gearlatiarostriate*) de flores rojas.

ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES	BIBLIOLOGIA	GRÁFICO	DESCRIPCIÓN	
CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno	Depósitos Fluviales	Q-fl		Gravas, cantos con relleno arenoso y limo	
			Depósitos Coluvial	Q-co		Arenas limosas con cantos subangulosos	
			Dep. coluvial - lagunar	Q-co-l		Deposito lagunar cubierto por coluviales	
			Deposito lagunar	Q-la		Arenas limoarcillosas con material vegetal	
MESOZOICO	Cretáceo	Inferior	Formación Huancane	Kl-hu		Arenisca gris blanquecina	
PALEOZOICO	Carbonífero	Inferior	Grupo Ambo	Ambo 1	Ci a1		Limolita, gris amarillenta foliada moderadamente meteorizada y fracturada
				Ambo 2	Ci a2	Limolita carbonosa color gris oscuro a negro	
				Ambo 3	Ci a3	Arenisca de grano fino Moderadamente fracturado y buzamiento	

Figura 3.6. Columna estratigráfica local. (Fuente: Modificado INGEMMET, 1996)

Plano 3. *Geología Local*

PLANO 03 – GEOLOGIA LOCAL

3.3 DESCRIPCIÓN DEL TUNEL DE DESVÍO

3.3.1 Aspectos Generales

La presa Pumamayo se ubica en el río Ajoyajota o Pumamayo, afluente por la izquierda del río Macusani, Tributario del río San Gabán, el Túnel de desvío o Túnel de descarga de fondo se encuentra en el margen derecho del río Pumamayo teniendo este una extensión de 236 m hasta la válvula de salida; en el trayecto del túnel presenta dos curvas hacia la derecha (Ver Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1 *Características físicas del túnel.*

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL TUNEL	
Altura del Túnel	2.50 m.
Ancho del Túnel	3.00 m.
Longitud del Túnel	236.00 m.
Base del Túnel	Concreto de Regulación
Válvula de Salida	Media Luna

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2 Diseño del Túnel

El diseño del túnel de desvío de la presa Pumamayo, es un túnel de concreto de geometría circular con base plana, a lo largo del cual presenta dos curvas en la progresiva 0+070 y en la progresiva 0+170 antes de su válvula de salida.

3.3.3 Geometría y Características del Túnel de desvío

Ancho del Túnel: El ancho se encuentra entre los 2.90 - 3.00 m a lo largo de toda su extensión, aclarando que presenta un largo de 236m (Ver Figura 3.7).

Altura del Túnel: El Túnel de desvío presenta una altura promedio de 2.50m, la base del túnel es un concreto de regulación plana (Ver Figura 3.7).

Inyecciones en el Túnel de desvío: El diseño de las inyecciones a aplicar contempla un tratamiento mediante secciones transversales con 8 puntos divididos simétricamente en cada anillo de la sección, a lo largo del túnel las cuales se irán inyectando de manera progresiva y mediante el sistema de cerradas, con la finalidad de sellar de la mejor manera la zona de contacto en el túnel (Ver Figura 3.7).

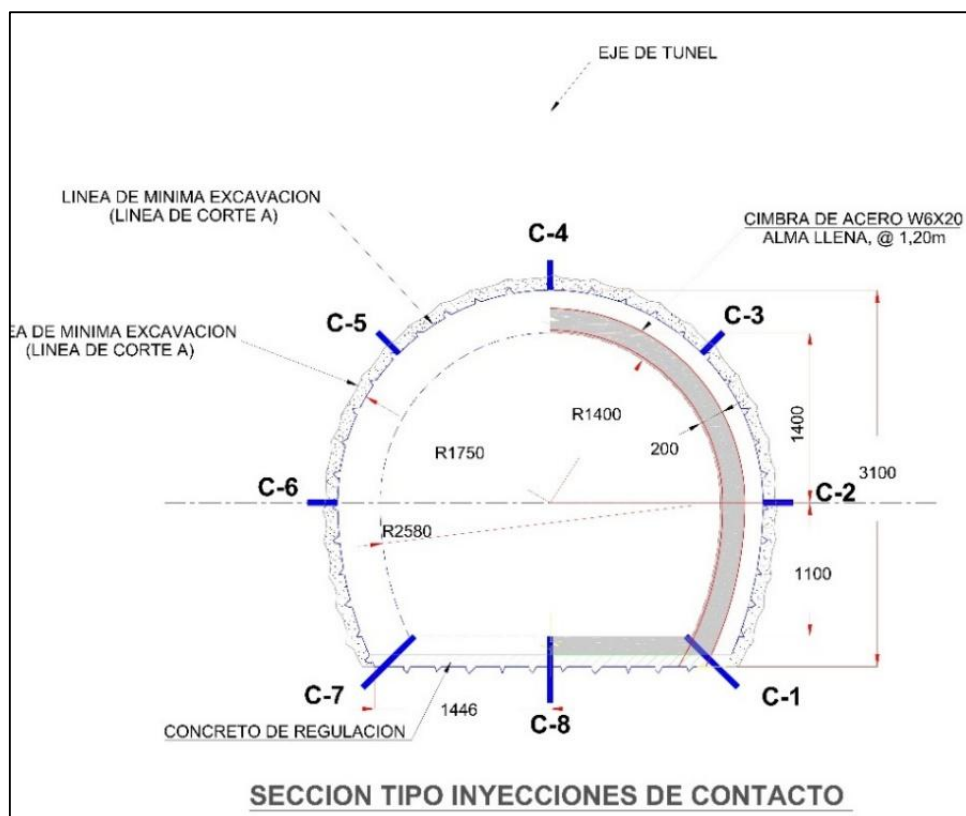


Figura 3.7. Esquema del diseño de sección del túnel (Fuente: Perforaciones e Inyecciones en el Túnel de desvío Proyecto Pumamayo).

Zonas de trabajo para aplicar inyecciones: La extensión del túnel de desvío la dividimos en 4 zonas de avance que se dividirá de la siguiente manera (Ver Figura 3.6):

- **Zona A.**-Desde la progresiva 0+020 hasta la progresiva 0+070
- **Zona B.**-Desde la progresiva 0+070 hasta la progresiva 0+120
- **Zona C.**-Desde la progresiva 0+120 hasta la progresiva 0+170
- **Zona D.**-Desde la progresiva 0+170 hasta la progresiva 0+220

3.4 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROSOCO

Para evaluar las características y el comportamiento mecánico del macizo rocoso se han realizado diez (10) estaciones geomecánicas (ver Cuadro 3.2) adicionales a las investigaciones realizadas en el Estudio Geotécnico. Asimismo, se ejecutaron diez (10) perforaciones diamantinas (Ver Cuadro 3.3), distribuidas de manera adecuada, para la zona de cimentación de la presa y para el túnel de derivación propuesto.

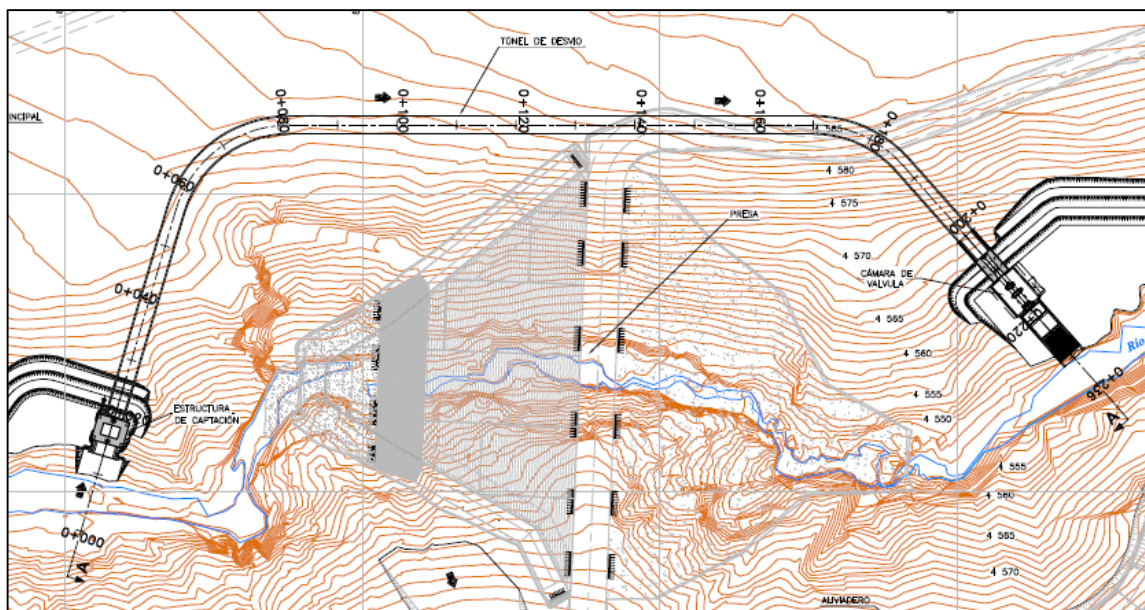


Figura 3.8. Vista en planta del Túnel de desvío de la presa Pumamayo

Las unidades litológicas características para la ubicación de la presa y túnel de desvío, han sido definidas por la evaluación geológica, siendo las siguientes: limolita, limolita carbonosa, limolita lutácea y arenisca cuarzosa. (Ver Figura 3.8), estas unidades se presentan en toda la extensión del túnel de desvío.

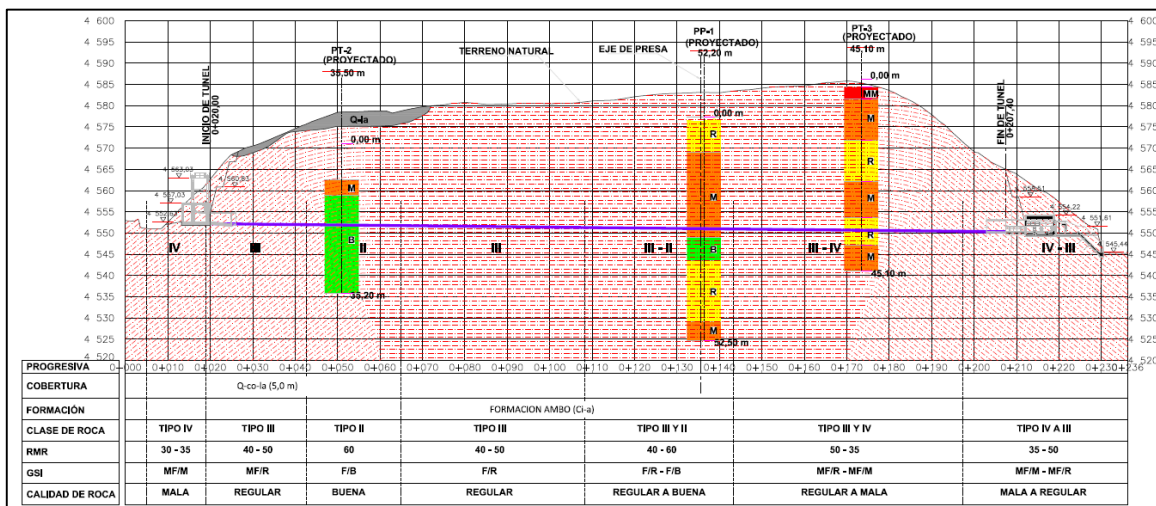


Figura 3.9. Sección longitudinal del Túnel de desvío de presa (Fuente: Perforaciones e Inyecciones en el túnel de desvío proyecto regulación río Pumamayo).

Cuadro 3.2 Estaciones geomecánicas.

Estación geomecánica	Ubicación	Litología	Coordenadas		Profundidad
			Norte	Este	
EG-1A	Cauce	Limolita carbonosa	8 443 907,178	353 666,250	Superficial
EG-2A	Cauce - Estribo derecho	Limolita carbonosa	8 443 928,977	353 665,037	Superficial
EG-3A	Cauce - Estribo izquierdo	Limolita carbonosa	8 443 964,009	353 673,790	Sin muestra
EG-4A	Cauce	Limolita	8 443 910,337	353 675,792	Superficial
EG-5A	Estribo derecho	Limolita carbonosa	8 443 912,769	353 659,613	Superficial
EG-6A	Estribo derecho	Limolita carbonosa	8 443 881,421	353 642,716	Superficial
EG-7A	Cauce	Limolita	8 443 816,681	353 688,758	Superficial
EG-8A	Estribo izquierdo	Limolita	8 443 952,784	353 694,122	Superficial
EG-9A	Estribo izquierdo	Arenisca cuarzosa	8 443 979,306	353 749,006	Superficial
EG-10A	Cauce	Limolita	8 444 048,616	353 658,201	Superficial

Fuente: *Modificado del Estudio definitivo y elaboración del expediente técnico del proyecto de regulación del río Pumamayo*

Cuadro 3.3 Perforaciones diamantinas.

Sondeo	Ubicación	Coordenadas		Línea de perforación	Prof. perforada
		Norte	Este		
PP - 1	Estribo izq.	8 443 907,94	353 719,15	NQ	52,50
PP - 2	Cauce eje	8 443 911,15	353 670,13	NQ	57,80
PP - 2A	Ladera der.	8 443 911,65	353 644,21	NQ	50,00
PP - 3	Estribo der.	8 443 914,65	353 613,38	NQ	45,25
PP - 4	Cauce plinto	8 443 953,32	353 667,80	NQ	54,25
PP - 5	Ladera der. plinto	8 443 932,47	353 637,14	NQ	50,30
PT-1	Estribo izq.	8 444 057,58	353 661,03	NQ	15.20
PT-2	Estribo izq.	8 443 993,66	353 694,96	NQ	35.20
PT-3	Estribo izq.	8 443 870,42	353 714,15	NQ	45.20

Fuente: *Modificado del Estudio definitivo y elaboración del expediente técnico del proyecto de regulación del río Pumamayo.*

3.4.1 Propiedades de la Roca Intacta

A. Gravedad Específica

Para la determinación de la gravedad específica se tomaron muestras de las estaciones geomecánicas y de las perforaciones diamantinas, asumiendo los siguientes parámetros del macizo rocoso:

- Limolita 0.0240 MN/m³
- Limolita carbonosa 0.0235 MN/m³
- Limolita lutacea 0.0228 MN/m³
- Arenisca Cuarzosa 0.0255 MN/m³

B. Resistencia a la Compresión Simple

En base a los ensayos de carga puntual se determina una resistencia de:

- Limolita 37.0 MPa
- Limolita carbonosa 28.0 MPa
- Limolita lutacea 25.0 MPa
- Arenisca Cuarzosa 115.0 MPa

3.4.2 Clasificación Geomecánica del Macizo Rocosó

La clasificación del macizo rocoso se realizó mediante la caracterización del afloramiento haciendo uso del método Scanline, los testigos de perforación se caracterizaron de acuerdo al grado de fracturamiento propuesta por Deere, que indica la calidad de la roca según el índice de RQD (Ver Cuadro 3.4), el sistema de clasificación GSI Modificado de Hoek & Brown, y la clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR).

En los cuadros siguientes, se aprecia la similitud de los resultados obtenidos para ambos sistemas de clasificación, el sistema de clasificación GSI, obtiene como resultado un promedio de calidad del macizo entre fracturado y muy fracturado; mientras que el sistema de clasificación geo mecánica de Bienawski; genera una mala calidad del macizo.

Cuadro 3.4 *Resumen de las clasificaciones geomecánica – Estaciones geomecánicas.*

EST. GEOMECÁNICA	GSJ	CALIDAD DEL MACIZO	RMR	CALIDAD DEL MACIZO
EG-1A	MF / M	Muy Fracturado / Mala	1	Muy Mala
EG-2A	MF / M	Muy Fracturado / Mala	2	Muy Mala
EG-3A	MF / M	Muy Fracturado / Mala	0	Muy Mala
EG-4A	F / R	Fracturado / Regular	2	Mala
EG-5A	MF / M	Muy Fracturado / Mala	2	Mala
EG-6A	IF / M	Intensamente Fract. / Mala	1	Muy Mala
EG-7A	F / M	Fracturado / Mala	2	Mala
EG-8A	F / R	Fracturado / Regular	3	Mala
EG-9A	F / B	Fracturado / Buena	5	Regular
EG-10A	MF / M	Muy Fracturado / Mala	2	Mala

Fuente: *Informe Geotécnico - CESEL S.A.*

Con las consideraciones de la caracterización y los métodos de clasificación del macizo rocoso, se ha determinado la calidad del macizo por tipo de litología; los datos encontrados se presentan en el Cuadro 3.5.

Cuadro 3.5 *Calidad del macizo rocoso según la litología*

Litología	Clase del Macizo	Calidad del Macizo	Fuente
Limolita	Tipo III	Media o regular	Perforaciones diamantinas
	Tipo IV	Mala	Estaciones geo mecánicas
Limolita carbonosa	Tipo IV	Mala	Perforaciones diamantinas
	Tipo V	Muy mala	Estaciones geo mecánicas
Limolita lutacea	Tipo IV	Mala	Estaciones geo mecánicas
	Tipo V	Muy mala	Estaciones geo mecánicas
Areniscas cuarzosas	Tipo II	Buena	Perforaciones diamantinas
	Tipo III	Media o regular	Estaciones geo mecánicas

Fuente: *Modificado del Estudio definitivo y elaboración del expediente técnico del proyecto de regulación del río Pumamayo*

3.4.3 Condiciones Hidrogeológicas

En esta etapa de perforación diamantina, para el expediente técnico, se ejecutaron pruebas de permeabilidad a diferentes profundidades a fin de conocer las condiciones hidrogeológicas del macizo rocoso, estas en su mayoría corresponden a pruebas de permeabilidad tipo Lefranc dado el grado de fracturamiento del macizo (Ver Cuadro 3.6).

Plano 4. *Perfil geológico - geotécnico.*

PLANO 04 PERFIL GEOLOGICO – GEOTECNICO SECCION 1-1 Y 2-2

Plano 5. *Perfil geológico - geotécnico.*

PLANO 05 PERFIL GEOLOGICO - GEOTECNICO SECCION 3-3 Y 4-4

Plano 6. *Perfil geológico - geotécnico.*

PLANO 06 PERFIL GEOLOGICO - GEOTECNICO SECCION 5-5 Y SVS

Plano 7. Perfil geológico - geotécnico.

PLANO 07 PERFIL GEOLOGICO - GEOTECNICO SECCION 6-6 Y 7-7

Plano 8. *Perfil geológico - geotécnico.*

PLANO 08 PERFIL GEOLOGICO - GEOTECNICO SECCION 8-8

Cuadro 3.6 *Ensayos de permeabilidad del sondeo PP-1.*

Sondeo	Tipo de carga	Prof. De	Prof. A	Nivel de agua	Caudal (cm ³ /s)	Permeabilidad (cm/s)
PP - 1 (E. Izquierdo)	Constante	4,50	5,00	3,80	156,67	2,79 E-03
	Constante	9,50	10,00	3,80	17,17	3,06 E-04
	Variable	14,50	15,00	4,70	0,64	8,74 E-04
	Constante	Y19,50	20,00	53,17	53,17	6,48 E-04
	Variable	24,50	25,00	2,00	1,91	9,75 E-04
	Constante	29,25	29,75	2,60	9,75	2,66 E-04
	Constante	34,50	35,00	3,50	445,00	7,30 E-04
	Constante	39,50	40,00	3,60	450,00	2,20 E-03
	Constante	44,50	45,00	3,50	10,27	1,98 E-04
	Constante	49,50	50,00	3,70	460,00	2,45 E-03

Fuente: *Modificado del Estudio definitivo y elaboración del expediente técnico del proyecto de regulación del río Pumamayo*

Fueron instalados piezómetros Casagrande en tres sondeos a fin de determinar con mayor precisión el nivel freático, se tomó lecturas 3 meses después de las investigaciones geotécnicas y los valores obtenidos son presentados en el siguiente cuadro.

Cuadro 3.7 *Control del nivel freático.*

Sondeo	Ubicación	Fecha Control	N. F. (m)	Cota de Boca	Fondo de Piezómetro
PP - 1	Estribo izq.	26/01/2011	29,64	4 584,80	52,50
PP - 2'	Ladera Der.	26/01/2011	9,25	4 575,02	17,50
PP - 3	Estribo Der.	26/01/2011	Seco	4 584,71	28,50

Fuente: *Modificado del Estudio definitivo y elaboración del expediente técnico del proyecto de regulación del río Pumamayo*

Del cuadro de control freático se rescata lo siguiente, las condiciones hidrogeológicas son heterogéneas, aunque existe una similitud en los resultados de los ensayos para cada tipo litológico, por lo cual se agrupó como unidades hidrogeológicas.

Se determinaron 3 unidades hidrogeológicas:

- Unidad hidrogeológica A – Limolita
- Unidad hidrogeológica B – Areniscas finas y areniscas con limolita
- Unidad hidrogeológica C – Arenisca cuarzosa

Cuadro 3.8 *Unidades hidrogeológicas y su permeabilidad.*

N°	Unidad Hidrogeológica	Permeabilidad (cm/s)				N° Ensayos
		Med Geo	Mediana	Max	Min	
1	Limolita	1,4E-04	1,9E-04	4,6E-04	7,1E-06	28
2	Arenisca Gris	7,1E-04	7,3E-04	1,1E-03	4,6E-04	37
3	Arenisca cuarzosa	3,2E-03	3,2E-03	9,9E-03	1,2E-03	33

Fuente: *Modificado del Estudio definitivo y elaboración del expediente técnico del proyecto de regulación del río Pumamayo.*

La unidad hidrogeológica A (Limolita), presenta rangos de permeabilidad que se encuentran entre 1.4 E-04 cm/s y 4.6 E-04 cm/s calificado como “acuitardo” con materiales de baja conductividad. La unidad hidrogeológica B (Areniscas finas y areniscas con limolitas), presenta rangos de 7.1 E-04 y 1.11 E-03 cm/s por lo cual las areniscas presentan fracturas y pueden generar filtraciones de agua subterránea calificado como “acuífero fisurado”.

La unidad hidrogeológica C (Areniscas cuarzosas), presenta coeficientes de permeabilidad en el orden de 3.2 E-03 y 9.93 E-03 cm/s, los que considera a estas rocas como “acuífero fisurado permeable” y con condiciones para almacenar y transmitir agua subterránea.

Los resultados obtenidos en la unidad hidrogeológica C, ocasionan que nuestro túnel de desvío presente estas condiciones puesto que el portal de entrada del túnel y la extensión del mismo corren por la cota 4554m aproximadamente a 28m de la superficie en el sondeo PP-1, el cual presenta su nivel freático a 29m de profundidad.

3.5 DISEÑO DE LAS SECCIONES DE INYECCION

Para la perforación de los taladros para las inyecciones de contacto, se empleará el sistema de perforación rotoperkusiva, el cual consiste en el empleo de una broca y adaptaciones especiales en la punta de la perforación, se contempla la ejecución de una secuencia de treinta (30) secciones, cada sección abarca ocho puntos a perforar y posteriormente inyectar; estas secciones estarán a lo largo del túnel de desvío de la presa.

La secuencia de perforación en una sección consiste en perforar inicialmente los taladros del suelo (C-7, C-8, C-1) posteriormente, los taladros de los hastiales (C-6 y C-2) y finalmente los taladros de la bóveda (C-5, C-4 y C-3), (Véase Figura 3.9).

Es posible realizar o escoger un grupo de taladros dentro de ciertas progresivas, según lo permita la zona; sin embargo, estos deberán estar debidamente autorizados para su ejecución.

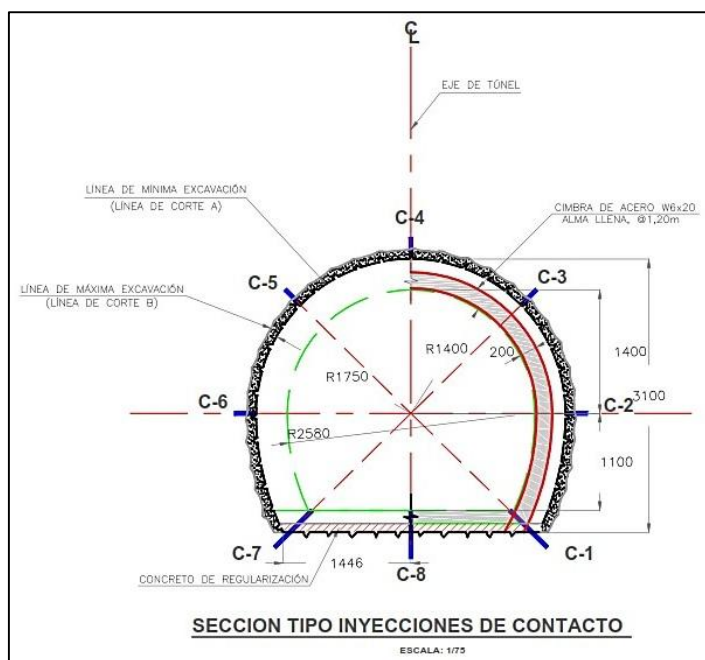


Figura 3.10. Sección transversal del túnel y distribución de taladros.

Los taladros verticales o inclinados, deberán asegurar su inclinación con el empleo de una tornamesa especial, la cual deberá de orientar cada taladro tomando como centro el túnel. Los diámetros de perforación podrán efectuarse entre las 2 y 2.5 pulgadas.

La distribución de los taladros para una sección son equi-angulares, con el objetivo se abarcar toda la zona de contacto en busca del espacio vacío; el diseño que se plantea para inyectar los puntos perforados es en ascenso; para la bóveda la inyección se realizará comprobando el consumo de lechada de cemento previamente; puesto que llenado en primera instancia el volumen inyectado descenderá progresivamente por gravedad y/o presencia de bolsonadas de agua o agua subterránea.

Durante la perforación para inyectar el contacto, se debe penetrar la longitud de 60 cm sobre la roca o llegar a la zona de contacto; esta perforación es simétrica para todo el túnel (véase cuadro 3.9 y cuadro 3.10).

Las mezclas estarán constituidas de agua, cemento. Las dosificaciones de las mezclas para las inyecciones de contacto serán de una proporción 1:1, (en peso), sin embargo, estas pueden ser ajustadas o de acuerdo a sus características reológicas estudiadas en laboratorio de campo, o en función del avance inyectado en cada sección.

Todo el cemento usado en la inyección será cemento Portland y deberá cumplir con los requerimientos ASTM C.595 para cemento Portland tipo IP.

Se especifica la ejecución de perforaciones con un diámetro entre 2 y 2.5 pulgadas, en sistema rotopercusivo.

Cuadro 3.9 *Resumen de perforaciones del Túnel de desvío.*

TALADROS DE LAS SECCIONES DE LA BOCA DEL TUNEL A LA PANTALLA						
Sección	Progresiva	Código de Taladro	Profundidad	Total de Pozos	Total de Pozos por sección	Longitud de perforación
1	0+026.5	CT01/01	0.60	7	8	4.20
		CT01/02	0.60			
		CT01/03	0.60			
		CT01/04	0.60			
		CT01/05	0.60			
		CT01/06	0.60			
		CT01/07	0.60			
		CT01/08	0.55	1		0.55
2	0+029.5	CT02/01-CT02/07	0.60	7	8	4.20
		CT02/08	0.55	1		0.55
3	0+035.5	CT03/01-CT03/07	0.60	7	8	4.20
		CT03/08	0.55	1		0.55
4	0+041.5	CT04/01-CT04/07	0.60	7	8	4.20
		CT04/08	0.55	1		0.55
5	0+050.5	CT05/01-CT05/07	0.60	7	8	4.20
		CT05/08	0.55	1		0.55
6	0+062.5	CT06/01-CT06/07	0.60	7	8	4.20
		CT06/08	0.55	1		0.55
7	0+074.5	CT07/01-CT07/07	0.60	7	8	4.20
		CT07/08	0.55	1		0.55
8	0+086.5	CT08/01-CT08/07	0.60	7	8	4.20
		CT08/08	0.55	1		0.55
9	0+098.5	CT09/01-CT09/07	0.60	7	8	4.20
		CT09/08	0.55	1		0.55
10	0+101.5	CT10/01-CT10/07	0.60	7	8	4.20
		CT10/08	0.55	1		0.55
11	0+104.5	CT11/01-CT11/07	0.60	7	8	4.20
		CT11/08	0.55	1		0.55
12	0+107.5	CT12/01-CT12/07	0.60	7	8	4.20
		CT12/08	0.55	1		0.55
13	0+110.5	CT13/01-CT13/07	0.60	7	8	4.20
		CT13/08	0.55	1		0.55
14	0+113.5	CT14/01-CT14/07	0.60	7	8	4.20
		CT14/08	0.55	1		0.55
15	0+116.5	CT15/01-CT15/07	0.60	7	8	4.20
		CT15/08	0.55	1		0.55

Fuente: *Modificado del Estudio definitivo y elaboración del expediente técnico del proyecto de regulación del río Pumamayo.*

La ejecución de los trabajos, se realizaron desde la válvula de salida hacia el portal de entrada; cada sección será trabajada hasta culminar con el inyectado; las secciones serán obturadas en su totalidad, tanto la sección a trabajar como las dos posteriores, para el caso de comunicación de taladros.

Cuadro 3.10 *Resumen de Perforaciones del túnel de desvío.*

TALADROS DE LAS SECCIONES DE LA PANTALLA A LA VALVULA DE SALIDA						
Sección	Progresiva	Código de Taladro	Profundidad	Total de Pozos	Total de Pozos por sección	Longitud de perforación
16	0+119.5	CT16/01-CT16/07	0.60	7	8	4.20
		CT16/08	0.55	1		0.55
17	0+122.5	CT17/01-CT17/07	0.60	7	8	4.20
		CT17/08	0.55	1		0.55
18	0+125.5	CT18/01-CT18/07	0.60	7	8	4.20
		CT18/08	0.55	1		0.55
19	0+128.5	CT19/01-CT19/07	0.60	7	8	4.20
		CT19/08	0.55	1		0.55
20	0+131.5	CT20/01-CT20/07	0.60	7	8	4.20
		CT20/08	0.55	1		0.55
21	0+134.5	CT21/01-CT21/07	0.60	7	8	4.20
		CT21/08	0.55	1		0.55
22	0+137.5	CT22/01-CT22/07	0.60	7	8	4.20
		CT22/08	0.55	1		0.55
23	0+140.5	CT23/01-CT23/07	0.60	7	8	4.20
		CT23/08	0.55	1		0.55
24	0+143.5	CT24/01-CT24/07	0.60	7	8	4.20
		CT24/08	0.55	1		0.55
25	0+155.5	CT25/01-CT25/07	0.60	7	8	4.20
		CT25/08	0.55	1		0.55
26	0+167.5	CT26/01-CT26/07	0.60	7	8	4.20
		CT26/08	0.55	1		0.55
27	0+179.5	CT27/01-CT27/07	0.60	7	8	4.20
		CT27/08	0.55	1		0.55
28	0+191.5	CT28/01-CT28/07	0.60	7	8	4.20
		CT28/08	0.55	1		0.55
29	0+197.5	CT29/01-CT29/07	0.60	7	8	4.20
		CT29/08	0.55	1		0.55
30	0+203.5	CT30/01-CT30/07	0.60	7	8	4.20
		CT30/08	0.55	1		0.55

Fuente: *Modificado del Estudio definitivo y elaboración del expediente técnico del proyecto de regulación del río Pumamayo*

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 GENERALIDADES

En este capítulo se describe el tipo de investigación aplicado en la presente tesis así como los instrumentos de los cuales se valió para demostrar el estudio, para la recolección de datos y posterior análisis, se empleó la investigación documental o recopilación bibliográfica, que se define como la observación o consulta directa de fuentes documentales previas, posteriormente se procedió a la etapa de trabajo de campo registrándose los datos del cierre de la cortina y elaboración de planos de control e interpretación; finalmente en la etapa de gabinete se analizan los datos obtenidos.

4.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación empleado de acuerdo al fin que se persigue, es la investigación aplicada, donde se busca conocer y aplicar el método JET GROUTING de inyecciones a la problemática de permeabilidad en el túnel de desvío de la presa Pumamayo.

Para demostrar la hipótesis aplicamos una investigación no experimental descriptiva donde se toman las condiciones de permeabilidad iniciales y se contrastan con las condiciones finales una vez aplicado el método JET GROUTING de inyección, se evalúa las absorciones de lechada en cada etapa de inyección además de las curvas de trayectoria de inyectado que demuestran un sellado de la zona de contacto, el espacio vacío entre la roca y la cara interior de la estructura.

4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

4.3.1 Recopilación Bibliográfica

La recopilación bibliográfica y documental ocupa un lugar importante, ya que garantiza la calidad de los fundamentos teóricos de la investigación, constituye una estrategia operacional y sistemática sobre la realidad de las condiciones en el área de proyecto.

Dentro de la recopilación bibliográfica se ha considerado la revisión de las condiciones geológicas las estructuras analizadas anteriormente, las condiciones geotécnicas y su caracterización geotécnica, principalmente la clasificación geomecánica RMR en el eje de presa, los perfiles geológicos - geotécnicos y las condiciones hidrogeológicas encontradas durante las exploraciones diamantinas efectuadas para el Estudio Definitivo y Elaboración del Expediente Técnico, elaborado por CESEL ingenieros en el año 2012, cabe indicar que las condiciones regionales fueron tomados del cuadrángulo de Macusani 29-v, boletín A 79, publicado por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, en 1996.

4.3.2 Trabajo de Campo

Se consideran los trabajos de campo al periodo de tiempo en el cual se desarrolló el tratamiento geotécnico, el mismo que fue ejecutado por la subcontratista HZP Consultores E.I.R.L. entre los meses de marzo del 2018 a junio del 2018. El tratamiento geotécnico por medio de inyecciones de lechada es una práctica establecida en la ingeniería, para este proyecto se aplica el método JET GROUTING de inyecciones. El tratamiento geotécnico se desarrolló posterior al llenado del cuerpo de la presa; y se desarrolló en base a los planos de diseño establecidos en el expediente técnico.

El trabajo de campo realizado incluye las siguientes actividades:

- Perforaciones.
- Diseño de mezcla de lechada.
- Inyecciones de lechada.
- Elaboración de curvas de trayectoria de inyectado.
- Elaboración de Perfiles para la interpretación de resultados.

A. Instrumentos

- Equipo de perforación diamantina y rotoperCUSión.
- Equipo de prueba de permeabilidad.
- Equipo de inyección de cemento.
- Registrador electrónico de datos de inyección.

4.3.3 Trabajo de Gabinete

Esta etapa de trabajo consiste en realizar un análisis e interpretación del comportamiento de los volúmenes de inyectado para inyecciones de primera etapa, segunda etapa, tercera etapa, y la etapa propuesta de altos consumos. El análisis y la síntesis de la información recopilada fue trabajada con la utilización de software: Microsoft Excel, AutoCAD.

Los parámetros geotécnicos fueron evaluados por medio del porcentaje de calidad de roca (Rock Quality Designation – RQD).

CAPÍTULO V

IMPERMEABILIZACIÓN DEL TÚNEL DE DESVÍO

5.1 GENERALIDADES

Las inyecciones de cemento es una de las técnicas empleadas para el mejoramiento e impermeabilización de suelos y macizos rocosos, por medio de bombeo de lechada a base de agua cemento y aditivos, previamente se define la profundidad de tratamiento y se realiza perforaciones en rotoperCUSION a través de las cuales se bombea lechada a determinadas presiones según las condiciones geológicas del medio. Un tratamiento de impermeabilización busca introducir lechada en las fracturas interconectadas a fin de sellar posibles conductos que pudieran ser vías de filtraciones de agua, hacia el Túnel de desvío.

La impermeabilización del túnel de desvío de la presa Pumamayo contempla como punto principal la ejecución del método JET GROUTING, determinando el diseño de mezcla adecuado y la elección de la dosificación adecuada, es por esto que en este capítulo se detalla los criterios adoptados y el desarrollo de la impermeabilización en las diferentes secciones hasta el término del tratamiento con las inyecciones de cuarta etapa; posteriores a una verificación de las inyecciones terciarias.

5.2 ELECCIÓN DEL MÉTODO JET GROUTING DE INYECCIONES EN EL TUNEL DE DESVÍO

Como primer punto principal se menciona que el objetivo es sellar la zona de contacto del túnel de desvío y la roca existente, únicamente con la finalización de la inyección se lograra lo planteado, cabe decir una vez alcanzada la presión máxima de inyección (límite de presión), correspondiente a los 2 bares, se garantiza que la zona de contacto ha sido rellenada con el volumen adecuado. Como segundo punto, el método JET GROUTING aplica diferentes dosificaciones, con la finalidad de que inicialmente la lechada cubra o rellene las fisuras existentes con una mezcla fluida, y posteriormente con una dosificación más densa terminar de sellar el contacto, o espacio vacío, con la finalidad de no perder mezcla. Las diferentes mezclas

o dosificaciones empleadas se van agregando en función del espacio vacío existente que se vaya encontrando en la zona de contacto, finalizando el tratamiento con una mezcla moderadamente espesa obtenida en ensayos de laboratorio.

5.3 ENSAYOS DE LABORATORIO EN CAMPO

Para el diseño de mezclas de la lechada y el control permanente de la misma, se montó un laboratorio en campo con los ensayos básicos requeridos como: viscosidad, decantación, cohesión, densidad y resistencia a la compresión simple.

Las propiedades reológicas de las mezclas son decisivas en el tratamiento de inyecciones tal como sugiere Lombardi; es importante mencionar que la adicción de aditivos puede modificar las propiedades de la mezcla acorde al requerimiento de la obra; el laboratorio en campo permite un control adecuado antes, durante y después de las inyecciones a fin de garantizar que se utiliza una mezcla que cumpla las especificaciones técnicas establecidas.

El laboratorio de campo está compuesto por ensayos básicos pero útiles para tal labor, se procedió tomando una muestra del mezclador cada día y toda vez que se encontrase repleto; a continuación, se describe cada una de las pruebas efectuadas.

5.3.1 Cohesión con Placa



Figura 5.1. *Ensayo de cohesión.*

Se determina por medio de una placa de acero inoxidable cuadrada de 10cm x 10cm y un espesor de 2mm, rayada en ambas caras, el rayado se recomienda que sea cuadrículas cada 0.5 cm. Se procede de la siguiente forma: se pesa la placa seca, después se introduce totalmente en la mezcla por 5 segundos, se saca, escurre y pesa nuevamente, se obtiene la diferencia de

los pesos seco y con mezcla y se divide entre el área de la placa obteniéndose así la cohesión en gr/cm^2 .

5.3.2 Ensayo de Fluidez Marsh - Viscosidad Dinámica (ASTM D6910-04)

Es una medida cuantitativa de la resistencia de un fluido a moverse. En otras palabras, la viscosidad dinámica determina la velocidad de deformación del fluido cuando se le aplica un esfuerzo cortante dado. El equipo para realizar este ensayo se denomina como Marsh, cuya función consiste en medir el tiempo en segundos que tarda en escurrir 946 ml de lechada de un total de 1500 ml.

El procedimiento para realizar la prueba consiste en humedecer el cono y el vaso, se tapa con un dedo el orificio de salida del cono, se pasa la mezcla a través de la malla del cono y se llena hasta llegar al nivel de aforo marcado en la parte inferior de la malla, correspondiente a 1500 ml.



Figura 5.2. *Ensayo de viscosidad.*

Posteriormente se deja caer libremente la mezcla a través del orificio mientras que se acciona simultáneamente el cronómetro hasta que en el vaso donde se está vertiendo la mezcla se llegue a la marca de los 946 ml. Una vez alcanzada la marca se detiene el tiempo

(cronometro) y se obtiene directamente la viscosidad al cono Marsh. Este parámetro fue medido en cada tipo de mezcla / cambio de mezcla. El valor del tiempo en segundos para el diseño empleado en la ejecución de las inyecciones en el túnel de desvío se encuentra entre el rango de 29 a 33 segundos cumpliendo con la especificación; se realizará uno cada 3 días.

5.3.3 Densidad de la Mezcla (ASTM D4380-84)

La densidad o peso específico de la mezcla es determinada con el aparato denominado balanza de lodos, el cual es un aparato bastante preciso. Este procedimiento fue descrito por Weaver (1991) y es el siguiente:



Figura 5.3. *Medición de la densidad*

Se coloca la balanza en una mesa horizontal y estable; se llena la taza del instrumento con un volumen de mezcla de 200 ml. Se coloca cuidadosamente la tapa de la taza, rotándola para expulsar el excedente. Se limpia todo exceso de mezcla. Se coloca el brazo graduado en el soporte del instrumento y se balancea moviendo el indicador por el brazo hasta que se equilibre el nivel tubular. La densidad se determina leyendo directamente sobre la escala del brazo una vez balanceado.

El valor de la densidad en t/m^3 para el diseño empleado en la ejecución de las inyecciones para las inyecciones de contacto en el túnel de desvío se encuentra entre el rango de 1.55 a 1.65 t/m^3 , parámetro obtenido de las especificaciones técnicas a desarrollar.

5.3.4 Factor de Decantación o Exudación (ASTM C243-95)

Una lechada se considera estable si sus partículas permanecen en suspensión el tiempo suficiente para realizar la inyección. Se considera inestable si la sedimentación ocurre inmediatamente después de que la lechada se deja de agitar en la mezcladora. Comúnmente este

proceso de sedimentación, que es la separación de las partículas sólidas de la parte líquida, se conoce como exudación.



Figura 5.4. *Ensayo de decantación*

La sedimentación de una lechada se determinará con la siguiente prueba de laboratorio.

- En una probeta graduada de 1000 cc, se coloca el mismo volumen de lechada, esta debe estar en posición vertical sobre una mesa horizontal nivelada.
- Registrar el tiempo de inicio de la prueba para que, al paso de 2 horas, una vez que la mezcla se haya estabilizado, tomar la lectura correspondiente por la relación h/H en porcentaje, donde H es la altura inicial de la mezcla (suspensión) y h es la altura del agua libre existente en la probeta o calcular la decantación con la siguiente fórmula:

$$D = \frac{V_o - V_f}{V_o} \times 100$$

Donde:

D= Sedimentación en %

V_0 = volumen inicial en ml

V_f = volumen final en ml

Este parámetro fue medido en cada tipo de mezcla / cambio de mezcla.

Las mezclas de cemento con factor de sedimentación de hasta 5% son consideradas estables. En la práctica, los valores permisibles deben ser menores a un 5%, esta práctica se realizará cada 10 días.

5.3.5 Resistencia a la Compresión Simple (ASTM C349 -02)

Las probetas se prepararon en moldes cilíndricos de PVC de 2" de diámetro x 4" de alto. Para ello se vertía la lechada sobre los moldes hasta llegar al ras se golpea suavemente con martillo de goma, se deja reposar por dos horas y se vuelve a rellenar al ras el volumen que sedimenta. Después de 12 horas cuando la lechada se encuentre en estado pastoso se procede a enrasar para homogenizar la altura de las probetas.



Figura 5.5. Briquetas para el ensayo de compresión simple.

Cuando la lechada se encuentre fraguado (24 horas) se procede a desmoldar con cuidado para no dañar las probetas, luego se codifica con el número del taladro, hora y fecha de muestreo.

Finalmente, las probetas son llevadas a un depósito con agua para el curado, sumergiéndolos en agua limpia hasta completar los días 7, 14 y 28 correspondientes a las edades de ensayos de resistencia a la compresión. Según Lombardi para un diseño normal de mezcla endurecida se tiene lo siguiente:

de 9 -10 MPa a los 7 días, y de 13 a 17 MPa a los 28 días.

La prueba consiste en aplicar un esfuerzo máximo a una muestra cubica con relación de esbeltez (H/D), aplicando incrementos de carga constante kg/min hasta llegar al punto de falla. Las probetas fueron ensayadas preferencialmente a las edades de 7, 14 y 28 días. En el laboratorio SECCONSAR, ubicado en el distrito de Hunter - Arequipa.

5.4 DISEÑO DE MEZCLA

Para obtener el diseño de mezclas adecuado se realizó una serie de ensayos de laboratorio en campo, con diferentes relaciones agua/cemento y diferentes aditivos en porcentaje variable, con el fin de obtener valores de fluidez, densidad, cohesión y decantación con valores aceptables para una lechada estable.

Los aditivos son usados para mejorar las condiciones de la lechada y alcanzar las características deseadas del fluido, el aditivo de mayor uso es el superplastificantes que reduce la cohesión y la viscosidad de la mezcla y por lo tanto aumenta la penetrabilidad de la inyección.

Cuadro 5.1 *Diseño de mezclas para el Túnel de desvío.*

Descripción	Tipo de ensayo	Valor	Unidades
Cohesión	Placa metálica	0.03	gr/cm ²
Fluidez	Cono de Marsh	29-33	Segundos / litro
Decantación	Método de probeta	3	%
Densidad	Método de probeta	1.58	gr/cm ³

Fuente: *Modificado Consorcio SyC.*

Las mezclas estarán constituidas de agua, cemento con o sin plastificantes apropiados cuando sea necesario, puesto que en esta ejecución el objetivo es garantizar el relleno de la

zona de contacto, las inyecciones de contacto tienen por objetivo rellenar las grietas dejadas entre el concreto de revestimiento y la roca circundante del túnel, las dosificaciones de las mezclas para las inyecciones de contacto serán de una proporción 1:1, en peso, sin embargo, estas pueden ser ajustadas de acuerdo con sus características reológicas estudiadas en laboratorio de campo. Todo el cemento usado en la inyección será cemento Portland tipo IP.

La razón agua/cemento será variable entre 0.66 a 1.00, aproximadamente. Los aditivos son usados para mejorar las condiciones de la lechada y alcanzar las características deseadas del fluido, el aditivo de mayor uso es el superplastificante que reduce la cohesión y la viscosidad de la mezcla y por lo tanto aumenta la penetrabilidad de la inyección; dicho esto se emplearán 4 dosificaciones establecidas en peso; iniciando con una mezcla fluida con una relación 1/1, progresivamente durante la inyección se podrá aumentar la densidad de la lechada cambiando a una mezcla más densa, 0,8/1, dependiendo de la absorción de lechada incluso usaremos lechadas con relación 0,7/1, hasta optar finalmente con lechadas con relación 0,6/1, para ciertos puntos de inyección.

5.5 DESARROLLO DE LAS PERFORACIONES

Para la perforación de los taladros para las inyecciones de contacto, se empleará el sistema de perforación rotoperkusiva, el cual consiste en el empleo de una broca y adaptaciones especiales en la punta de la perforación. Las perforaciones se realizarán siguiendo un procedimiento sistemático tanto para la designación de estos como para su ubicación.



Figura 5.6. Ubicación de taladros con Pacómetro.

Los diámetros de perforación podrán efectuarse entre las 2 y 2.5 pulgadas.

Para identificar los puntos a perforar dentro de la estructura, estos puntos serán ubicados por un pacómetro que nos ayudara a marcar a precisión la ubicación adecuada de cada sondeo; el pacómetro muestra la zona libre de la cimbra existente, posteriormente procederemos a marcar dichos puntos para poder dar inicio a la perforación. Las perforaciones se ejecutaron desde el portal de entrada hasta la válvula de salida, debido a que se debía generar una contención con el fin de rellenar progresivamente la zona de contacto.

La secuencia del proceso de perforación será por sección del túnel y del piso hacia la bóveda. Durante la perforación para Contacto, solo se debe de penetrar una longitud de 60 cm sobre la roca.

5.6 DESARROLLO DE INYECCIONES

5.6.1. Inyecciones Primarias de la Zona de Contacto

1. Trecho desde la Válvula hasta la Pantalla

Las inyecciones en el túnel de desvío darán inicio en la válvula de salida, precisamente en la sección CT-30, con la finalidad de generar una pared impermeable al final del túnel y avanzar con las inyecciones hacia la entrada del mismo puesto que la litología buza en dirección del río. El trecho en mención abarca 15 secciones, desde la sección CT-30 hasta la sección CT-16.



Figura 5.7. *Instalación del equipo de inyección.*

Las secciones planteadas a perforar e inyectar que figuran en los planos del expediente técnico, presentan perforaciones de 0.60 metros de profundidad, así como diferentes ángulos

de inclinación de los taladros propuestos; en total se ejecutaron 66.72 metros de perforación hasta este punto.

2. Trecho desde la Pantalla hasta el Portal de Entrada.

Las inyecciones de este tramo se inician en la sección CT-15 finalizando en la sección CT-01, este tramo hacia la boca del túnel da por finalizada la etapa de inyecciones en las 30 secciones propuestas inicialmente. Sin embargo, debido a que conforme han transcurrido los días y las secciones que se han inyectado inicialmente presentaron nuevamente filtraciones y manchas de humedad en los anillos trabajados, se propone adicionar una nueva etapa que denominaremos secciones secundarias.

El consumo de cemento al finalizar las inyecciones de las secciones primarias es de 2546.72 bolsas de cemento; equivalente a 108.24 toneladas.

CONTACTO SECCIONES PRIMARIAS				
N° Seccion	Progresiva	Consumo Litros	Consumo Bolsas	Consumo Toneladas
CT - 01	0+026.5	7.5	0.13	0.006
CT - 02	0+029.5	980.1	18.2	0.774
CT - 03	0+035.5	2945.9	32.32	1.374
CT - 04	0+041.5	6425	187.17	7.955
CT - 05	0+050.5	16.4	0.29	0.012
CT - 06	0+062.5	4570	160.8	6.834
CT - 07	0+074.5	5895	135.06	5.740
CT - 08	0+086.5	4610.4	106.88	4.542
CT - 09	0+098.5	2368.4	50.2	2.134
CT - 10	0+101.5	3439.8	76.28	3.242
CT - 11	0+104.5	5869	168.57	7.164
CT - 12	0+107.5	273.6	5.68	0.241
CT - 13	0+110.5	1633.4	40.46	1.720
CT - 14	0+113.5	273.4	4.88	0.207
CT - 15	0+116.5	4593.3	107.18	4.555
CT - 16	0+119.5	2740.3	66.65	2.833
CT - 17	0+122.5	264.1	4.71	0.200
CT - 18	0+125.5	3864.5	87.22	3.707
CT - 19	0+128.5	1186.9	24.77	1.053
CT - 20	0+131.5	2365.2	50.76	2.157
CT - 21	0+134.5	4003.3	91.41	3.885
CT - 22	0+137.5	3660.7	82.9	3.523
CT - 23	0+140.5	5322.7	115.5	4.909
CT - 24	0+143.5	4716.7	103.33	4.392
CT - 25	0+155.5	4098.3	92.2	3.919
CT - 26	0+167.5	10927	272.31	11.573
CT - 27	0+179.5	6885.6	163.54	6.950
CT - 28	0+191.5	4706.64	121.93	5.182
CT - 29	0+197.5	3649.6	84.58	3.595
CT - 30	0+203.5	4197.7	90.81	3.859
TOTAL		106490.44	2546.72	108.2356

Figura 5.8. Consumos de lechada de cemento para las secciones primarias

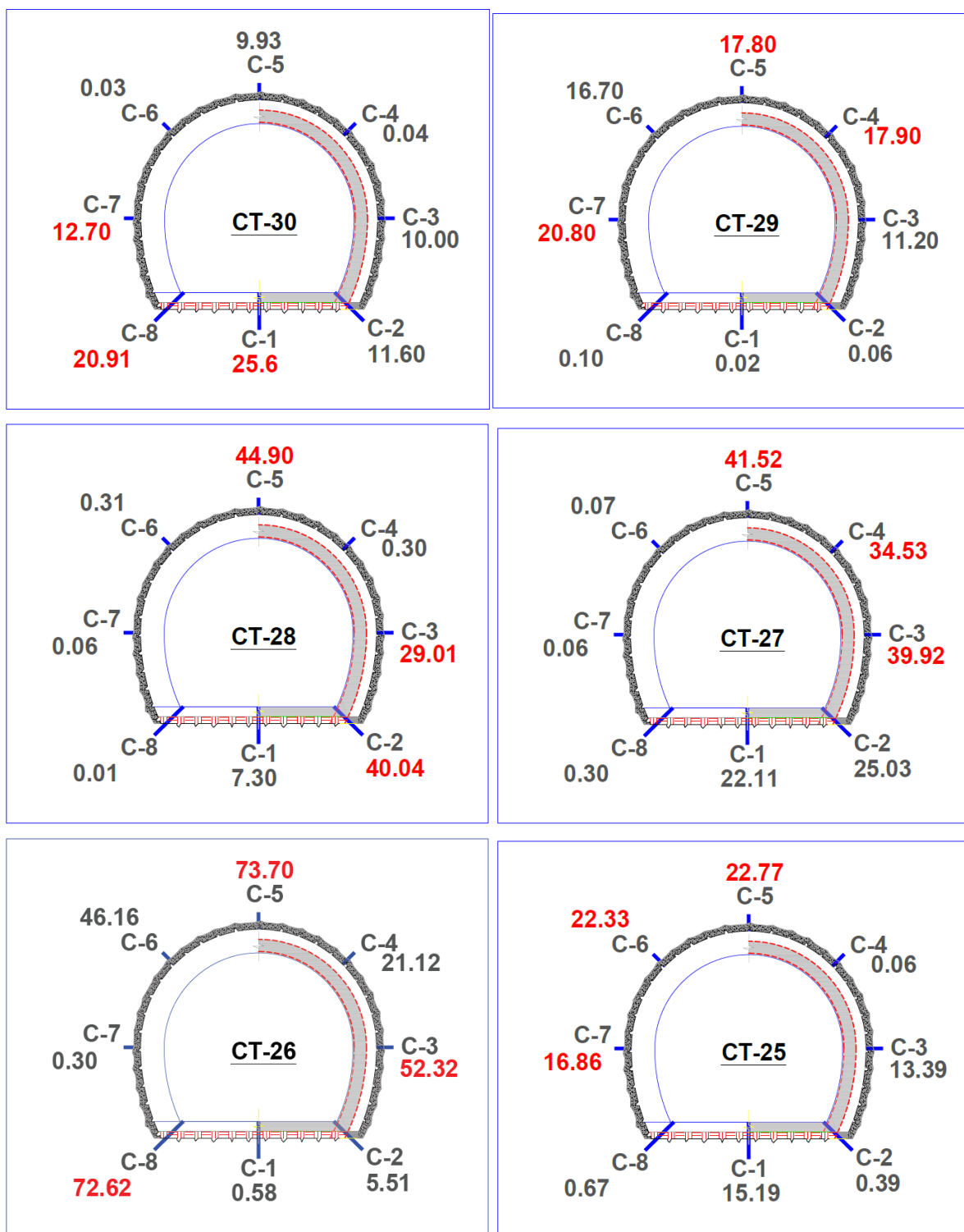


Figura 5.9. Índice de consumos de las inyecciones primarias para cada uno de los taladros de cada sección. (CT30, CT29, CT28, CT27, CT26, CT25)

Las 6 secciones de las inyecciones primarias que se muestran, desarrollan una tendencia de consumos altos de bolsas de cemento para la zona de la bóveda del túnel, con consumos que alcanzan picos de hasta 73.70 bolsas. La sección CT-26 muestra un consumo elevado de más de 190 bolsas de cemento solo para esta sección.

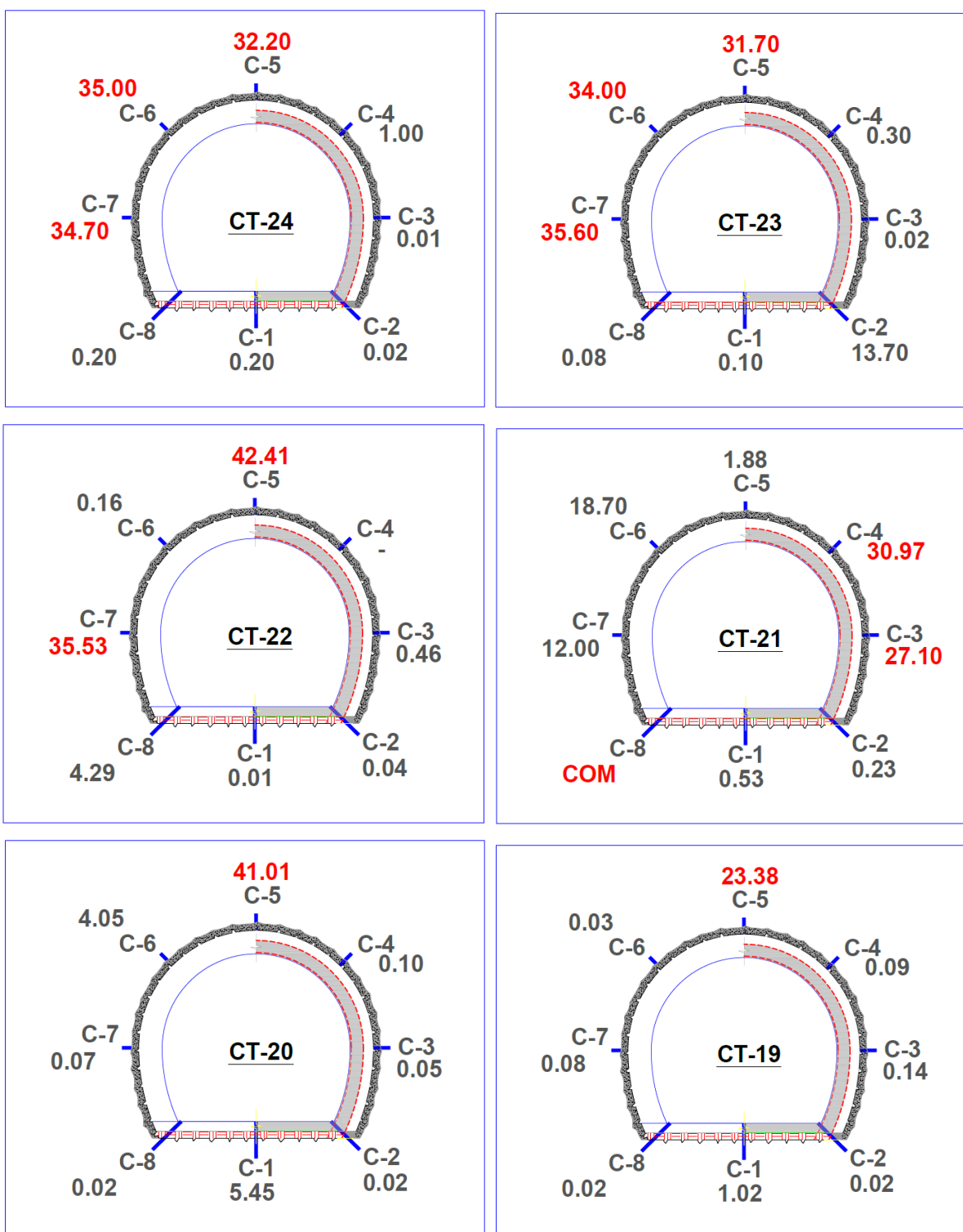


Figura 5.10. Índice de consumos de las inyecciones primarias para cada uno de los taladros de cada sección. (CT24, CT23, CT22, CT21, CT20, CT19)

En estas 6 secciones se puede observar que los consumos en los hastiales del flanco izquierdo ocurren con mayor intensidad, mencionaremos también que la absorción de cemento en el techo o bóveda del túnel es constante, este consumo se viene manteniendo desde la sección CT 28, lo que podría indicar la presencia de aguas subterráneas.

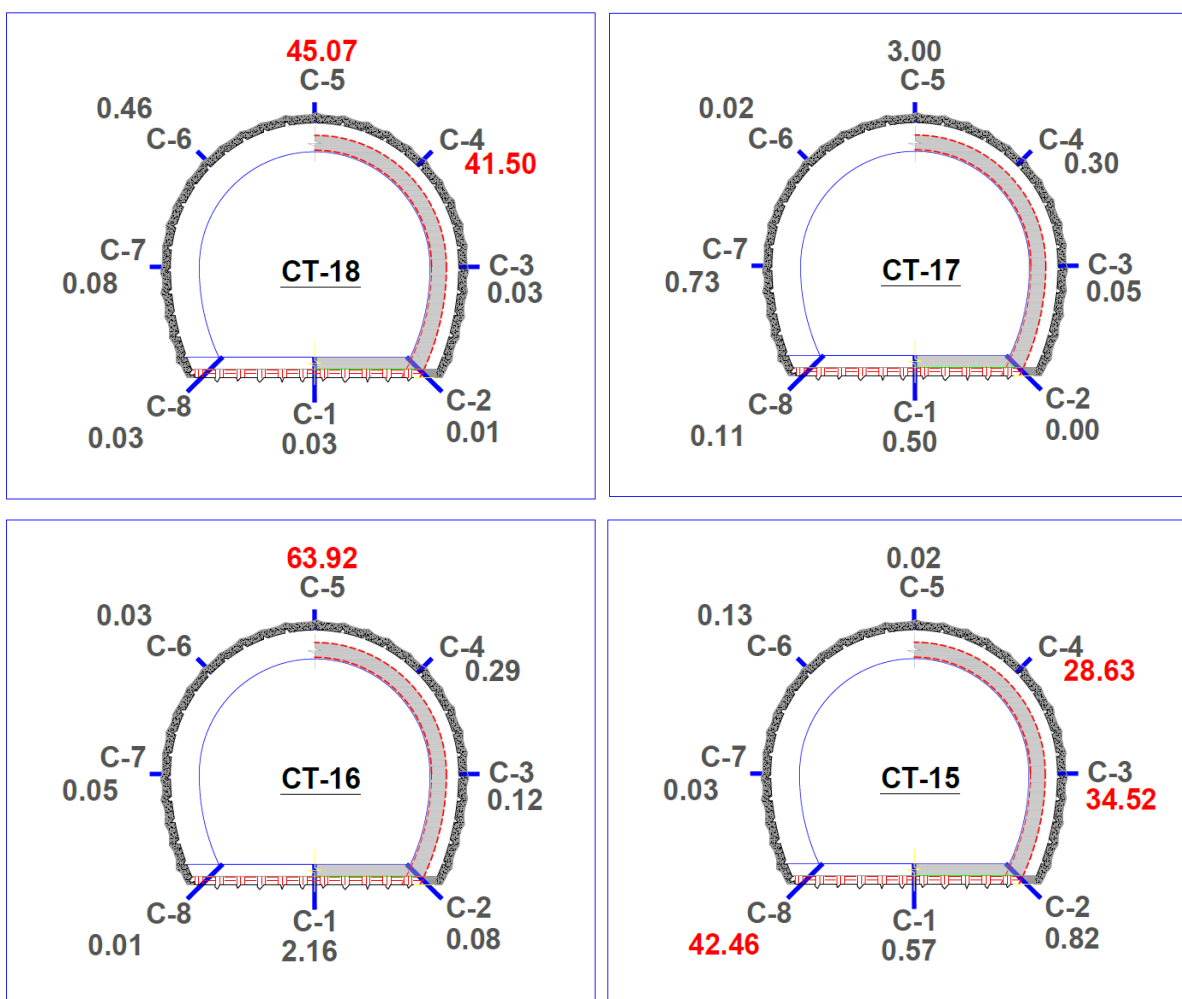


Figura 5.11. Índice de consumos de las inyecciones primarias para cada uno de los taladros de cada sección. (CT18, CT17, CT16, CT15)

En la sección CT-16, se alcanza el punto medio de la extensión del túnel; la sección CT-18 muestra un consumo muy bajo salvo los 2 taladros en la zona de la bóveda, este indicio se confirma en la sección CT-17, donde el consumo total de bolsas de cemento para toda la sección no llegaría a las 5 bolsas.

La sección CT-16 de la misma manera mantiene un consumo bajo, salvo en el taladro N°5, donde el consumo de cemento es de casi 65 bolsas.

El consumo elevado que se presentaba secciones atrás en el flanco izquierdo ha cesado, los consumos en el resto de taladros son bajos, salvo en zonas puntuales como se muestra en los taladros T3, T4 y T8 de la sección CT-15; si bien solo dos taladros del flanco izquierdo presentan consumos, estos son de consideración, pudiéndose tratar de una bolsa de agua, puesto que la roca en esta zona es considerada como muy fracturada.

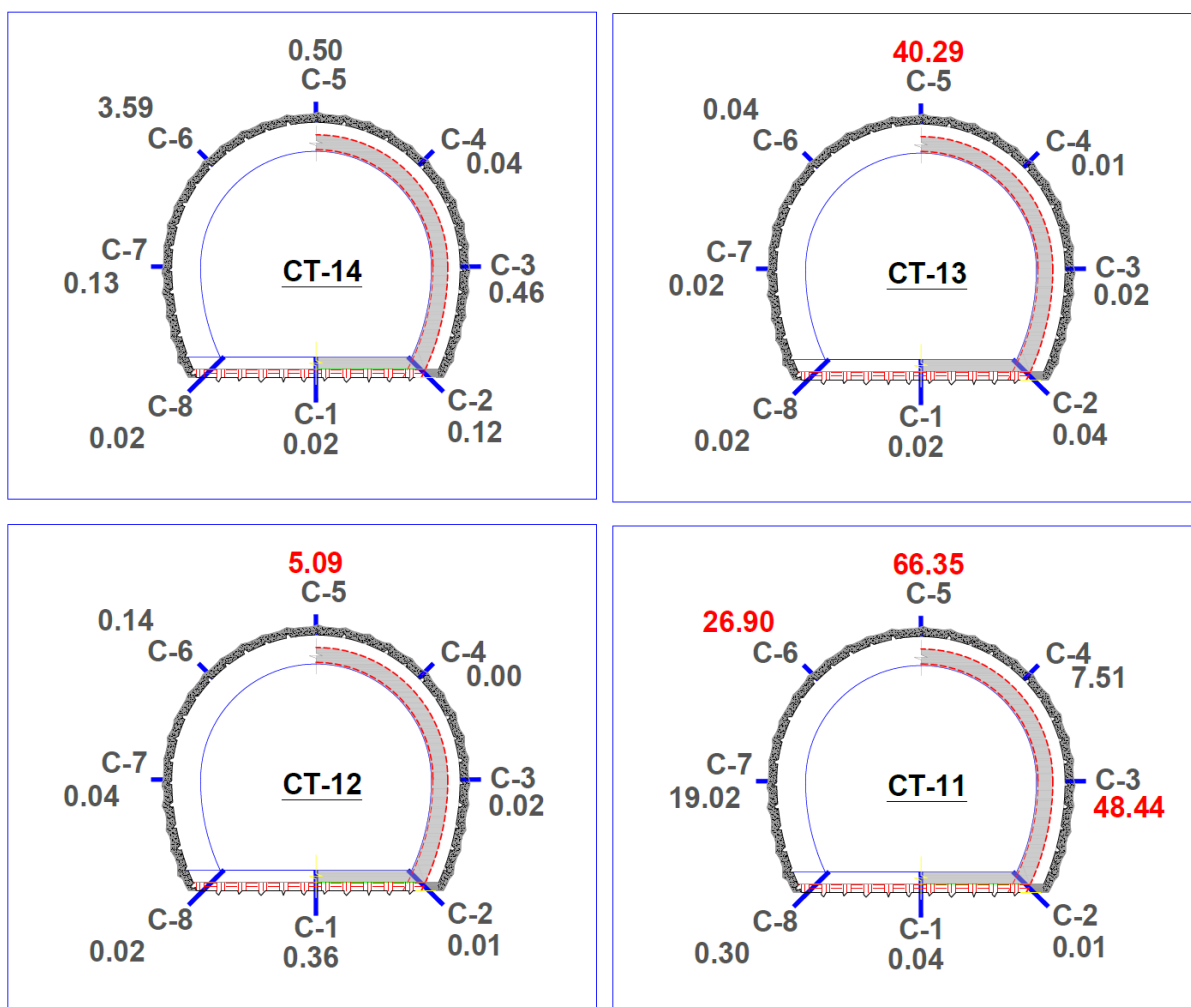


Figura 5.12. Índice de consumos de las inyecciones primarias para cada uno de los taladros de cada sección. (CT14, CT13, CT12, CT11)

Se distribuyen en estas 4 secciones consumos muy bajos en las secciones CT-14 y CT-12 respectivamente, la sección CT-13 ostenta 40 bolsas de consumo solo en la bóveda.

La sección CT-11 vuelve a mostrar un consumo elevado de más de 130 bolsas de cemento solo para esta sección.

Rellenar el espacio vacío en la bóveda requiere de un método más a detalle; las inyecciones primarias que ahora se mencionan se deben dejar fraguar, posteriormente se volverá a perforar hasta volver a encontrar el espacio vacío y realizar una nueva inyección, se volverá a perforar e inyectar aquellas zonas donde se observa filtraciones, puntos de goteo y manchas de humedad.

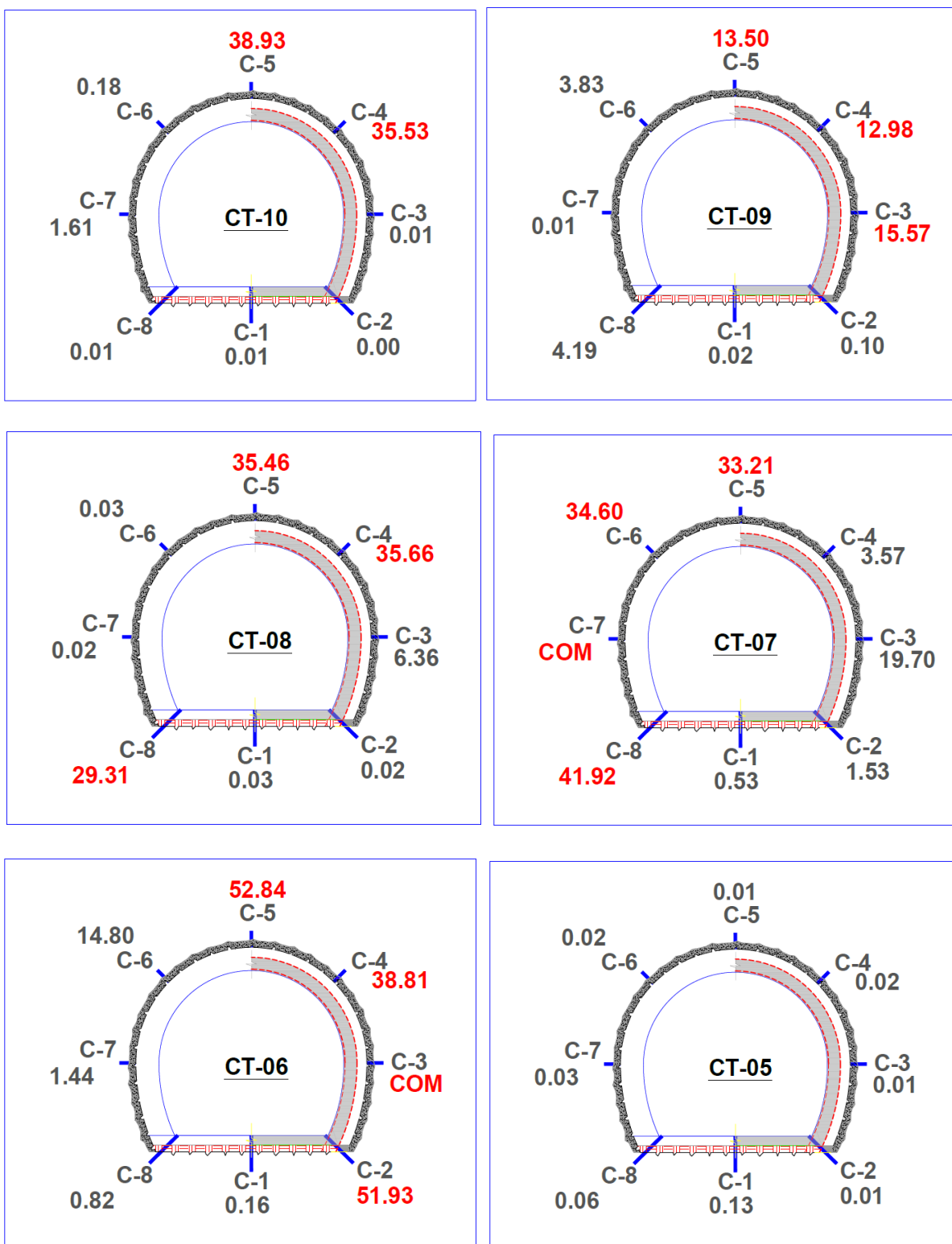


Figura 5.13. Índice de consumos de las inyecciones primarias para cada uno de los taladros de cada sección. (CT10, CT09, CT08, CT07, CT06, CT05)

A partir de la sección CT-11, la absorción se ha mantenido regularmente, con más de 70 bolsas inyectadas en cada sección hasta la sección CT-06, las bolsas de cemento

consumidas solo en la bóveda, estas secciones difieren con la cantidad proyectada de consumo para una sección, que en un inicio era de solo 50 bolsas por sección.

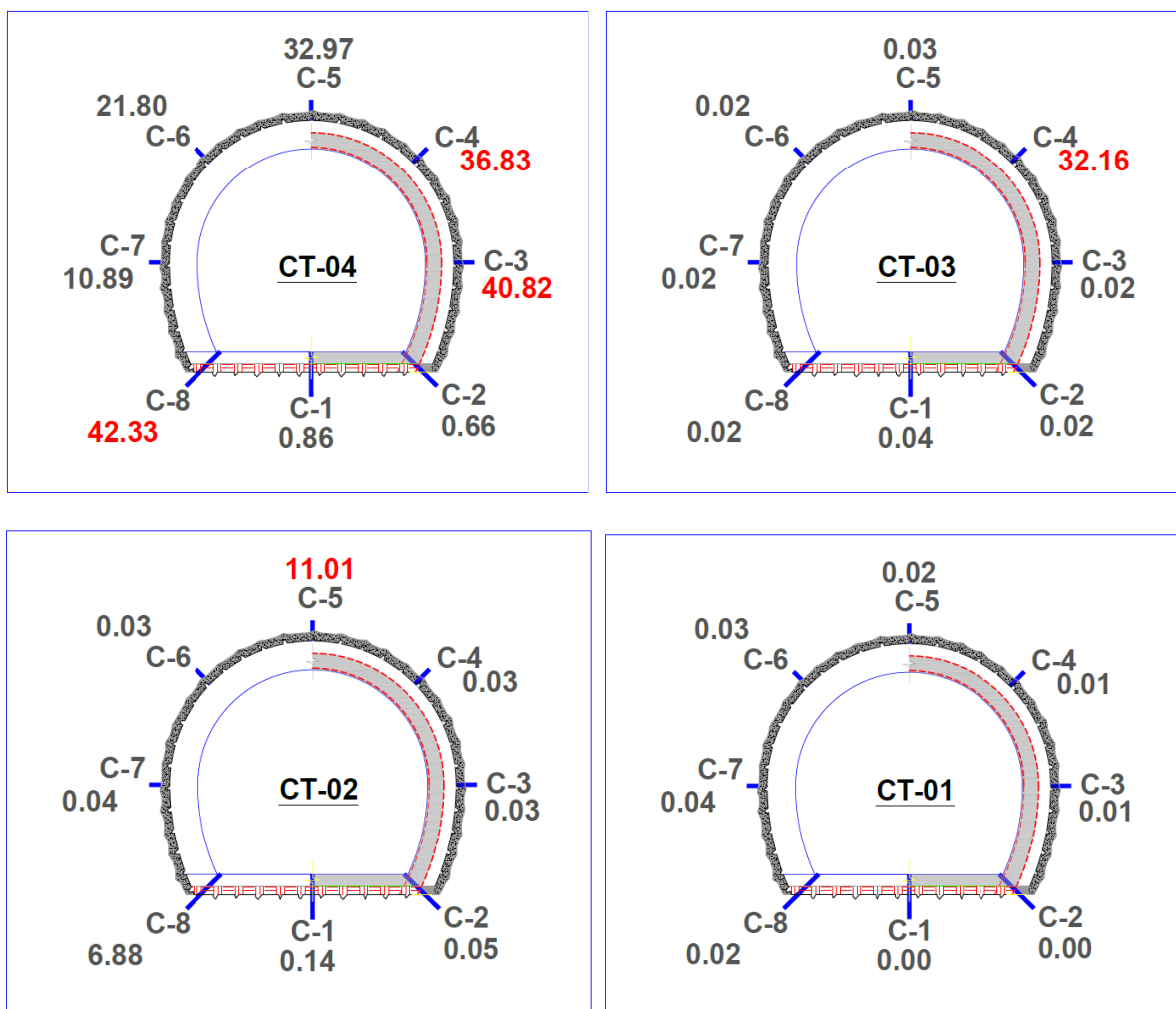


Figura 5.14. Índice de consumos de las inyecciones primarias para cada uno de los taladros de cada sección. (CT04, CT03, CT02, CT01)

Las absorciones de cemento para estas inyecciones descienden con respecto a las que se han ido desarrollando anteriormente, esto debido a que dichas secciones ya se encuentran cerca al portal de entrada del túnel de desvío, el cual está revestido de concreto, por lo que las absorciones son mínimas.

A pesar de que la sección CT-05 presentó un consumo casi nulo de cemento, para la sección CT-04, la absorción se hace notar puntualmente en el flanco derecho de la estructura, se debe tener en cuenta estos parámetros que se van presentando, puesto que será de utilidad para designar la serie de inyecciones secundarias a inyectar y la ubicación que tomarán las nuevas secciones.

5.6.2. Inyecciones Secundarias de la Zona de Contacto

Una vez finalizada la inyección de las secciones de contacto se ejecutan las secciones secundarias, las que se han distribuido en las zonas donde se ha hecho presente nuevamente las filtraciones y vestigios de presencia de humedad en el túnel.

Cabe indicar que dichas secciones secundarias serán tomadas como tal, siempre y cuando al perforar dentro de la bóveda (llámese el taladro T-5), este abarque un consumo mayor a los 40 lt., si el taladro consume este volumen se perforaran e inyectaran el resto de taladros de esta sección.

Se ha propuesto 11 puntos los cuales presentan alto grado de filtración, así como machas de humedad y puntos de goteo; en la siguiente figura (véase figura 5.15), se observa los consumos que se ha obtenido para esta serie.

COMPROBACION PRIMARIAS				
N° Seccion	Progresiva	Consumo Litros	Consumo Bolsas	Consumo Toneladas
COMP-01	0+032.5	63	1.125	0.048
COMP-02	0+046	69	1.232	0.052
COMP-03	0+065	1628	39.54	1.680
COMP-04	0+077	42.5	0.89	0.038
COMP-05	0+101	3294	77.11	3.277
COMP-06	0+121	1.9	0.03	0.001
COMP-07	0+131	2.1	0.04	0.002
COMP-08	0+158	47	0.84	0.036
COMP-09	0+181	1977	38.79	1.649
COMP-10	0+196	3160	72.10	3.064
COMP-11	0+205	135	2.41	0.102
TOTAL		10419.90	234.11	9.95

Figura 5.15. Consumos de lechada de cemento para los puntos de comprobación propuestos de las secciones primarias.

Una vez se obtiene los consumos de los taladros de comprobación para estas secciones primarias, se identifica aquellos sondeos donde el consumo de lechada ha superado los 40 lt. necesarios para considerarse como las nuevas secciones secundarias.

Las secciones secundarias serán inyectadas en sus 8 taladros respectivamente; generando un consumo de lechada de 244.38 bolsas de cemento, equivalente a 10.39 toneladas.

SECCIONES SECUNDARIAS				
N° Seccion	Progresiva	Consumo Litros	Consumo Bolsas	Consumo Toneladas
TCOMP.01	0+032.5	120.00	2.53	0.107
TCOMP.02	0+046	19.20	0.41	0.017
TCOMP.03	0+065	58.80	1.24	0.053
TCOMP.04	0+077	5275.20	144.84	6.156
TCOMP.05	0+101	8.20	0.17	0.007
TCOMP.08	0+158	293.40	6.18	0.263
TCOMP.09	0+181	1233.85	22.04	0.937
TCOMP.10	0+196	3050.25	66.42	2.823
TCOMP.11	0+205	26.40	0.56	0.024
TOTAL		10085.30	244.38	10.39

Figura 5.16. Consumos de lechada de cemento para las secciones secundarias.

5.6.3. Inyecciones Terciarias de la Zona de Contacto

Finalizando la etapa de inyecciones secundarias nuevamente se volverá a efectuar la misma verificación puesto que se tiene a consideración que en ambas curvas en la trayectoria del túnel se informó de la presencia de chimeneas de consideración en la etapa de construcción, en los puntos que se determinen se estima considerar como inyecciones terciarias, a conformidad si presenta un consumo de 40 lt en la bóveda, en dicho caso este punto propuesto se trabajara como una nueva sección terciaria perforando e inyectándose el resto de taladros.

Los consumos de las comprobaciones de estos taladros propuestos se muestran a continuación en la siguiente figura (véase figura 5.17).

COMPROBACION SECUNDARIAS				
N° Seccion	Progresiva	Consumo Litros	Consumo Bolsas	Consumo Toneladas
COMP.TER.1	0+190	0.6	0.013	0.001
COMP.TER.2	0+180	795	18.154	0.772
COMP.TER.3	0+167	3.4	0.072	0.003
COMP.TER.4	0+162	55	1.158	0.049
COMP.TER.5	0+090	27	0.569	0.024
COMP.TER.6	0+085	2.5	0.053	0.002
COMP.TER.7	0+072	41	0.863	0.037
COMP.TER.8	0+170	27	0.569	0.024
TOTAL		951.50	21.45	0.91

Figura 5.17. Consumos de lechada de cemento para los puntos de comprobación de las secciones secundarias.

En función de los consumos de los puntos propuestos, se obtiene como secciones terciarias 3 secciones, las cuales se inyectarán en sus 8 taladros.

El consumo de estas secciones terciarias corrobora con la información obtenida anteriormente, puesto que la sección COMP.TER.4 presenta un consumo de 238 bolsas de cemento, en esta última captación de datos se observa que el consumo en algunos puntos específicos es considerable, teniendo en cuenta que estamos en una tercera etapa de secciones (véase figura 5.18).

SECCIONES TERCIARIAS				
N° Seccion	Progresiva	Consumo Litros	Consumo Bolsas	Consumo Toneladas
COMP.TER.2	0+180	28.6	0.599	0.025
COMP.TER.4	0+162	8200.9	238.20	10.12
COMP.TER.7	0+072	4185.10	38.81	0.039
TOTAL		12414.60	277.60	10.19

Figura 5.18. Consumos de lechada de cemento para las secciones terciarias.

5.6.4. Inyecciones de Altos Consumos de la Zona de Contacto

Al culminar estos trabajos se propone nuevos puntos de inyección basándose en ubicar estos nuevos puntos en zonas intermedias a taladros que hayan tenido alto consumo de lechada de cemento, dichos puntos se trabajaran puntualmente y no como sección estos taladros específicos tienen el objetivo de rellenar espacios donde aún no se haya aplicado correctamente el tratamiento geotécnico, la lista de estos nuevos puntos se muestra a continuación (véase figura 5.19):



Figura 5.19. Instalación del equipo de inyección para las inyecciones de cuarta etapa.

MAYORES METRADOS - ALTOS CONSUMOS				
N° Seccion	Progresiva	Consumo Litros	Consumo Bolsas	Consumo Toneladas
TMM-01	0+096.5			0.000
TMM-02	0+099.5			0.000
TMM-03	0+103			0.000
TMM-04	0+105.5	15.7	0.33	0.014
TMM-05	0+115	21.00	0.44	0.019
TMM-06	0+118.5	233.2	4.91	0.209
TMM-07	0+133	6.60	0.14	0.006
TMM-08	0+136	3127.0	88.60	3.766
TMM-09	0+154.5	992.00	23.74	1.009
TMM-10	0+156.5	377.8	8.06	0.342
TMM-11	0+166.5	471.50	10.19	0.433
TMM-12	0+168.5	13.8	0.29	0.012
TMM-13	0+190.5	9.80	0.21	0.009
TMM-14	0+194	5.1	0.11	0.005
TMM-15	0+196	29.50	0.62	0.026
TMM-16	0+199	8.20	0.17	0.007
TMM-17	0+202	1614.00	40.11	1.705
TOTAL		6925.20	177.92	7.56

Figura 5.20. *Consumos de lechada de cemento para los puntos de altos consumos.*

El consumo obtenido para los puntos propuestos asciende a las 177.92 bolsas de cemento equivalente a 7.56 toneladas; sin embargo, ello no garantiza que las etapas de inyección realizadas hasta el momento, llámese las inyecciones primarias, secundarias terciarias y cuaternarias, sean suficientes para satisfacer las condiciones de impermeabilización con respecto al túnel de desvío; debido a que aún persisten puntos o taladros donde la absorción de cemento sigue ocurriendo.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 GENERALIDADES

Los trabajos de inyección para este tipo de estructuras, a través de taladros, brinda la posibilidad de rellenar el espacio vacío, grietas, fisuras, oquedades, y si la inyección está cumpliendo su cometido; las filtraciones que se han encontrado inicialmente e incluso a pesar del tratamiento aplicado volvieron a presentarse, serán mitigadas.

En tal sentido el análisis del tratamiento del túnel de desvío de la presa Pumamayo es realizado llevando un control de inyección durante todo el proceso que posibilita la eficiencia y suficiencia del tratamiento, posteriormente se elaboran cuadros comparativos para las diferentes fases de inyección; con estos parámetros se concluye si el tratamiento es suficiente o necesita una fase de inyección extra.

6.2 EVALUACIÓN DE LA ZONA DE CONTACTO

Como ya se mencionó anteriormente al área de trabajo se dividió, en cuatro zonas de trabajo; desde la boca del túnel hasta la progresiva 0+070, desde la progresiva 0+070 hasta la pantalla, luego desde la pantalla hasta la progresiva 0+170 y finalmente desde la progresiva 0+170 hasta la válvula de salida, se trabajaron cuatro etapas de inyección llámese primarias, secundarias, terciarias y de altos consumos, con la finalidad de sellar y/o rellenar adecuadamente el espacio vacío encontrado y por el cual el flujo hídrico ingresaba a la estructura haciéndose presente mediante filtraciones en su mayoría en la zona de la bóveda.

A continuación, se presenta para cada zona, un análisis estadístico básico las perforaciones y absorciones, para determinar el tipo de absorción se usa la clasificación elaborada por Deere (1982), que se muestra en el siguiente cuadro:

Plano 9. *Perfil geológico - geotécnico.*

PLANO 09 PLANO DE CONSUMOS DE INYECCION

Cuadro 6.1. Clasificación elaborada por Deere (1982) para absorciones de lechada.

Clasificación Deere para absorciones		
Clase	Absorción en (kg/m)	Caracterización
Muy alta	>400	
Alta	201 – 400	
Moderadamente alta	101 – 200	
Moderada	51 – 100	
Moderadamente aja	26 – 50	
Baja	12.5 – 25	
Muy baja	0 – 12.5	

6.2.1. Zona A (Desde la progresiva 0+020 hasta 0+070)

Desde la progresiva 0+020 hasta la progresiva 0+070 tenemos 6 secciones primarias CT-01, CT-02, CT-03, CT-04, CT-05, CT-06; 3 secciones de comprobación; TCOMP.01, TCOMP.02, TCOMP.03 y 3 secciones secundarias; TCOMP.01, TCOMP.02 y TCOMP.03; las inyecciones primarias presentan un consumo de cemento muy alto; señalaremos a las secciones CT-04 y CT-06 como las más significativas en esta etapa por su consumo de 7954.73 y 6834.00 kg respectivamente, para las inyecciones de comprobación primaria haremos mención al consumo obtenido en el punto COMP-03, con 1680.45 kg de cemento; y en las inyecciones secundarias la sección TCOMP.03 nos da a entender que el consumo en este punto sigue siendo moderado, con una absorción de 2499.0 kg, (véase figura 6.1)

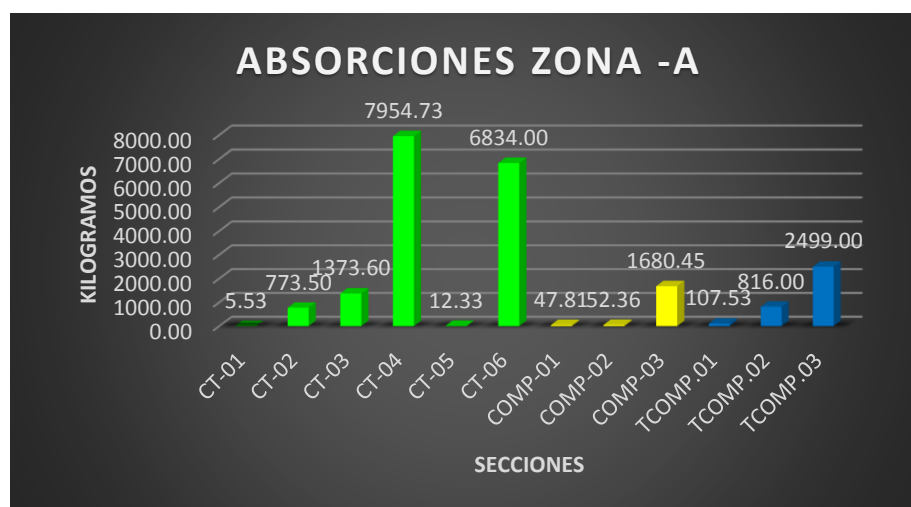


Figura 6.1. Absorciones de lechada en la zona – A del túnel de desvío.

En las comprobaciones primarias los consumos supera los 40 lt inyectados, razón por la que estos puntos son considerados posteriormente como inyecciones secundarias, inyectándose dichas secciones en sus 8 taladros correspondientes.

La tendencia que sigue al comparar los promedios de inyecciones en las 3 etapas ejecutadas, sugiere que las absorciones de cemento han disminuido considerablemente, sin embargo, las inyecciones secundarias aún muestran un índice alto de consumo (véase figura 6.2).

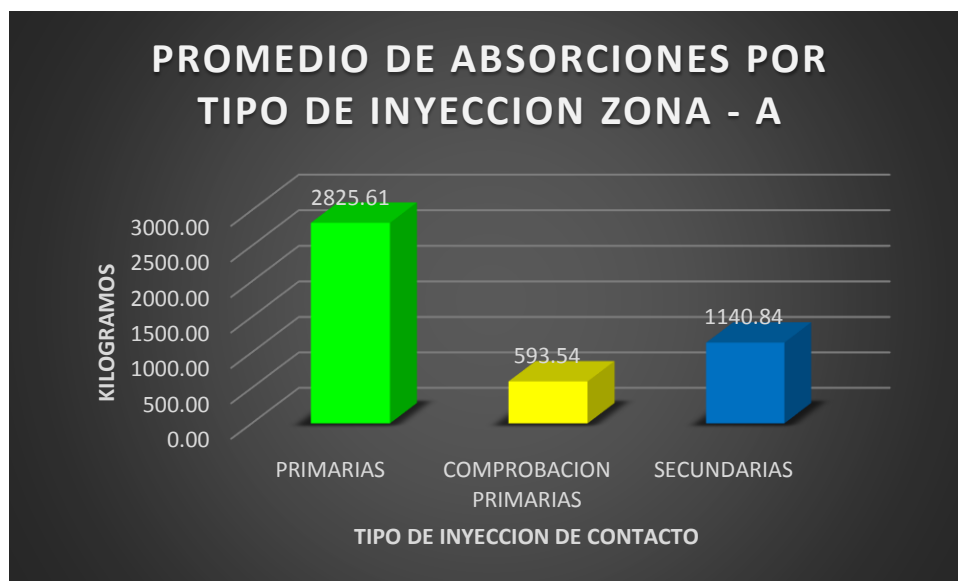


Figura 6.2. Promedio de absorciones de lechada en la zona – A del túnel de desvío.

Debido a que las presiones en esta última etapa llegaron a los 2 bares requeridos para considerar cerrados los taladros es que ya no se tomó a consideración una siguiente etapa de inyección.

6.2.1. Zona B (Desde la progresiva 0+070 hasta 0+120)

Esta zona presenta, un consumo muy alto para las inyecciones primarias, como se muestra en las secciones CT-11, CT-07 y CT-15, generando un consumo total en esta etapa de 32378.20 kg; en las comprobaciones realizadas a la etapa anterior, se obtiene una absorción de 3277.18 kg en el punto COMP-05, dato por el cual se establece las nuevas secciones para las inyecciones secundarias; dichas secciones corroboran los indicios mostrados en la etapa anterior, puesto que el consumo de cemento se mantuvo relativamente elevado; precisamente en la sección TCOMP.04 con 6155.70 kg.

Las absorciones posteriores disminuyen en consideración, mencionándose a las etapas terciarias y cuaternarias; justamente en las inyecciones terciarias, en la sección COMP.TER.7

se muestra que el consumo de cemento asciende hasta los 1649.43 kg; dicho dato se toma en referencia para incluir una cuarta etapa de inyecciones, etapa de mayores metrados, llamada así por temas contractuales y por fines de valorización, dicho esto se considerara esta etapa como inyecciones de cuarta etapa o cuaternarias.

Las inyecciones cuaternarias se han distribuido a lo largo del túnel únicamente en los puntos de alto consumo de lechada de cemento; en esta zona B se presenta 5 puntos de inyección los que mantienen un consumo moderado, con un total de 241.40 kg. (véase figura 6.3).

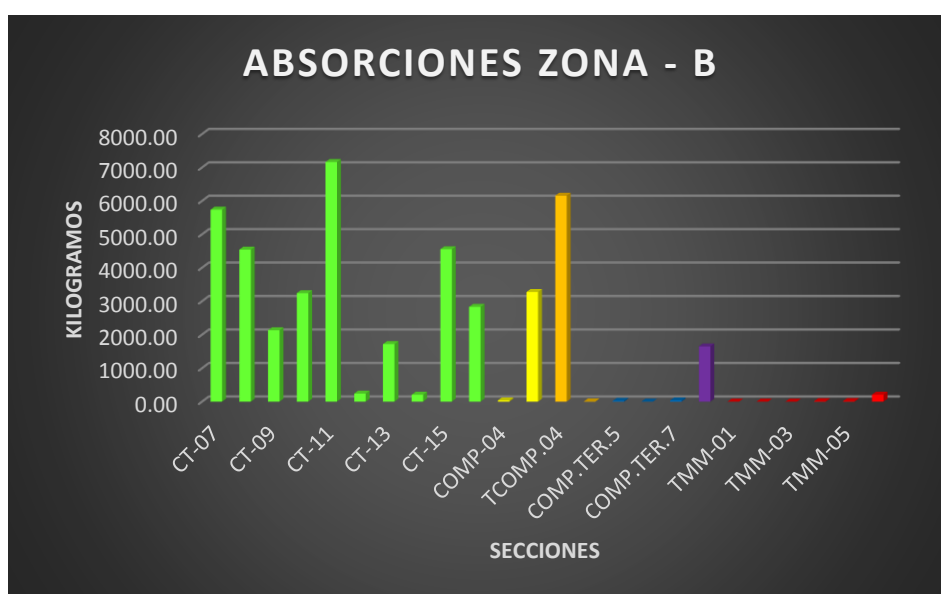


Figura 6.3. Absorciones de lechada en la zona – B del túnel de desvío.

La tendencia que siguen las progresivas de inyección para esta zona B son descendientes, a pesar de ello se tomara en cuenta que esta disminución de absorciones de cemento recién se aprecia en las inyecciones de tercera etapa, la siguiente figura muestra claramente estos promedios de consumos en la secuencia de etapas que se siguen; las inyecciones primarias y secundarias revelan datos de consumos elevados; 3237.82 y 3081.46 kg respectivamente, considerándose como consumos altos.

Las inyecciones terciarias presentan en promedio un consumo de 1649.43 kg y las inyecciones cuaternarias 40.23 kg de consumo (véase figura 6.4) se considera que en esta zona o se cumple el criterio de cierre puesto que los consumos se mantienen elevados incluso hasta en la tercera etapa de inyecciones, los volúmenes alcanzados en dichas etapas bordean los 4185 lt de lechada de inyección.

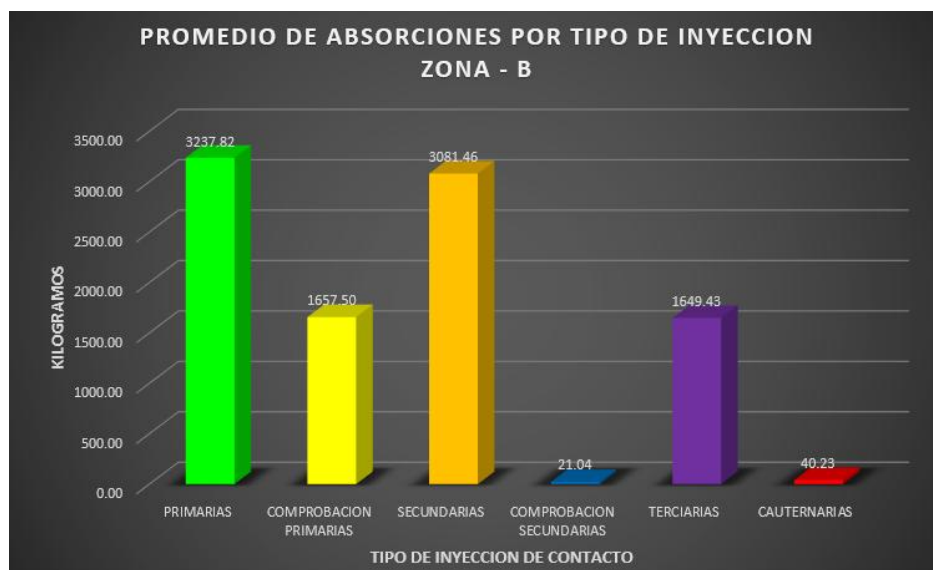


Figura 6.4. Promedio de absorciones de lechada en la zona – B del túnel de desvío.

6.2.1. Zona C (Desde la progresiva 0+120 hasta 0+170)

Las inyecciones para esta zona C muestran consumos de consideración puntuales, mencionaremos como modelo la sección CT-26 de las inyecciones primarias con una absorción de 11573.18 kg y los puntos TMM-08 y TMM-09 de las cuaternarias con 3765.50 y 1008.95 kg respectivamente (véase figura 6.5).

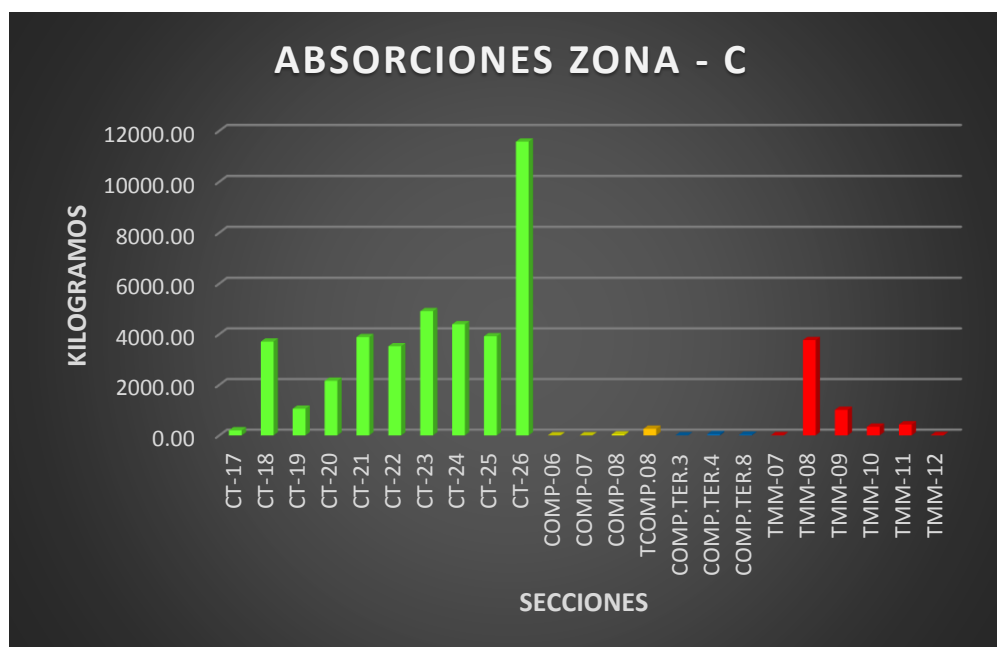


Figura 6.5. Absorciones de lechada en la zona – C del túnel de desvío.

Los promedios de inyección generan una tendencia de descenso hasta las inyecciones terciarias, sin embargo, los puntos propuestos para las inyecciones cuaternarias muestran una

elevación en el promedio de absorciones en esta etapa, este incremento de consumo de cemento no garantiza un cierre total de las inyecciones en la zona C (véase figura 6.6).



Figura 6.6. Promedio de absorciones de lechada en la zona – C del túnel de desvío.

La figura 6.6 muestra claramente este promedio de consumo elevado en relación a las inyecciones anteriores, donde mantenían datos con consumos bajos esta tendencia se quiebra en la cuarta etapa como se mencionó anteriormente, como resultado de este análisis no se garantiza el cierre de esta zona de inyección por presentar aún volúmenes altos de consumo en la última etapa.

6.2.1. Zona D (Desde la progresiva 0+170 hasta 0+220)

Para esta zona D se muestran consumos de consideración en las inyecciones primarias, mencionaremos la sección CT-2 7 de las inyecciones primarias con una absorción de 6950.45 kg los puntos de comprobación de estas inyecciones muestra un consumo moderado; este consumo es corroborado en las inyecciones secundarias, donde la sección TCOMP.10 es la más representativa; hasta el punto TMM-17 de las inyecciones de cuarta etapa, esta tendencia de un aumento de consumo en la cuarta etapa de inyecciones para las zonas que se ha ido analizado, no satisface las condiciones necesarias para considerarse como cerradas las inyecciones realizadas, a pesar de ello si se puede garantizar que los muy altos consumos que se presentaron en las inyecciones primarias y secundarias han descendido considerablemente (véase figura 6.7).

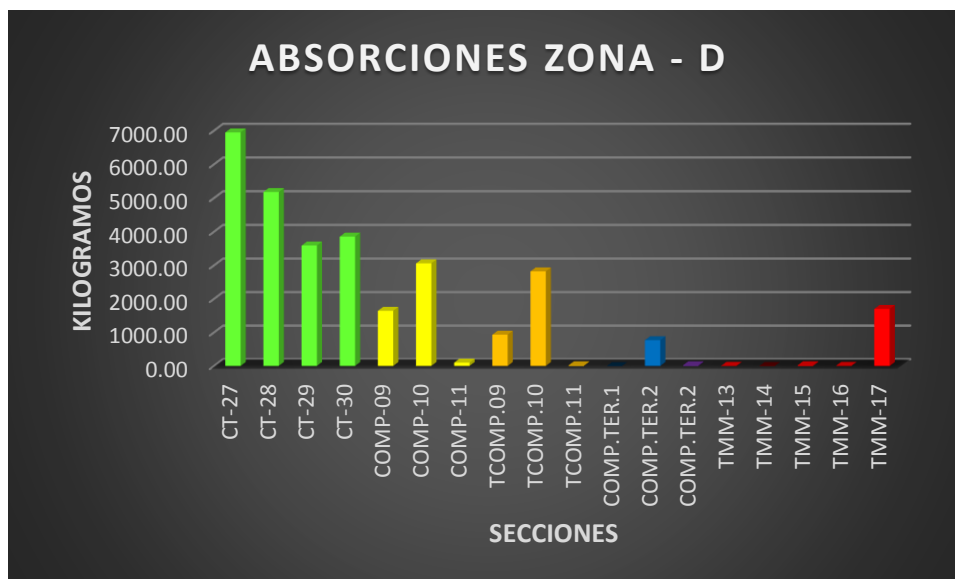


Figura 6.7. Absorciones de lechada en la zona – D del túnel de desvío.

La zona D del túnel de desvío presenta una tendencia descendiente basados en los promedios de consumo obtenidos, en la siguiente figura se muestra la tendencia mencionada donde la mayor notoriedad se da al pasar de las inyecciones primarias a secundarias, las inyecciones terciarias descienden hasta consumos moderadamente bajos, pero aumentan para la cuarta etapa (véase figura 6.8)

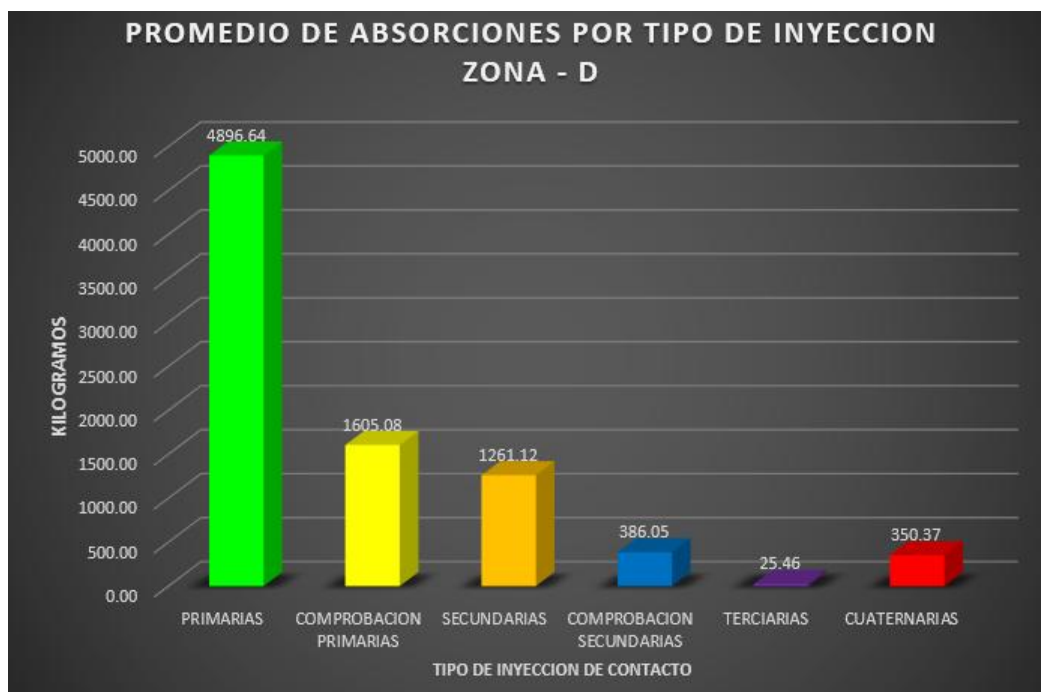


Figura 6.8. Promedio de absorciones de lechada en la zona – D del túnel de desvío.

Los resultados obtenidos infieren que será de mucha importancia el manejar un modelo de inyección de mayor intensidad sobre la zona de la bóveda, por tratarse de una zona con

absorción de lechada de carácter intensivo, dicho modelo de inyección se considera a continuación; bajo una distribución de taladros a diferente intensidad y bajo distintas condiciones de cierre o llenado de taladro.

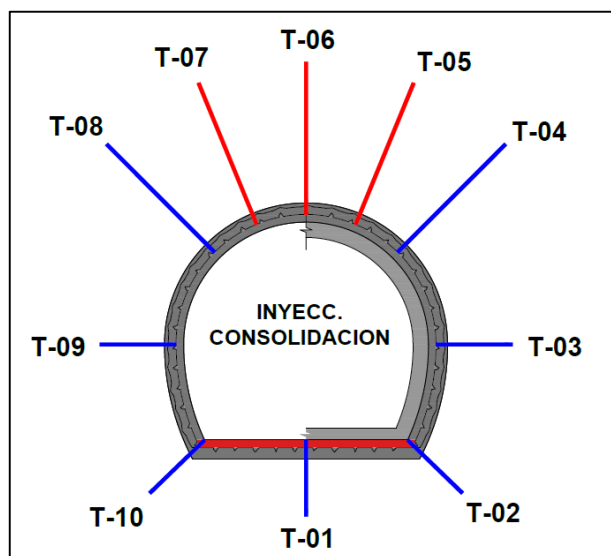


Figura 6.9. *Distribución de taladros propuestos para la etapa de consolidación.*

Las secciones propuestas para esta etapa posterior de consolidación, serán ubicadas en los puntos donde el tratamiento geotécnico de las inyecciones de contacto no se haya aplicado favorablemente, en este nuevo modelo propuesto se distingue dos tipos de taladros a trabajar, uno de 1.5 metros de profundidad y otro de 3 metros de profundidad; esta designación se realiza partiendo de los datos de absorciones de lechada de cemento obtenidas a lo largo de las diferentes etapas de inyección.

Para estos taladros se debe de considerar trabajar con presiones entre los 7 y los 9 bares de presión, debido a que se trata de profundidades variables se empleara los 7 bares para los taladros de los hastiales y el suelo; del mismo modo emplearemos presiones de cierre de 9 bares para los taladros de la bóveda.

CONCLUSIONES

1 Para la impermeabilización del túnel de desvío se aplicó el método de JET GROUTING bajo presiones máximas de inyecciones de 2 a 2.5 bares, para la mezcla se empleó cemento portland tipo IP con cuatro dosificaciones, 1:1, 0.8:1, 0.7:1, 0.6:1; las que fueron aplicadas de acuerdo a las necesidades presentadas.

2 Los resultados obtenidos para ambos sistemas de clasificación son los siguientes, tanto para el sistema de clasificación GSI, donde se obtiene como resultado un promedio de calidad del macizo entre fracturado y muy fracturado; mientras que el sistema de clasificación geo mecánica de Bienawski; genera una mala calidad del macizo.

3 Las unidades litológicas características para la ubicación de la presa y túnel de desvío, han sido definidas por la evaluación geológica, siendo las siguientes: limolita, limolita carbonosa, limolita lutácea y arenisca cuarzosa; estas unidades se presentan en toda la extensión del túnel de desvío.

4 Las variaciones de las absorciones de lechada para sondajes de primera, segunda, tercera y algunos casos cuarta etapa indican que existe una clara disminución del factor de consumo de lechada; a pesar de ello no es satisfactorio en todas las zonas de inyección.

5 Durante los trabajos de inyección se llevó un control permanente de la lechada, realizando ensayos en campo como fluidez, cohesión, decantación y densidad, obteniéndose los siguientes valores: 32 segundos para la fluidez, 0.0326 gr/cm² para la cohesión, 3% para la decantación y 1.5 gr/cm³ para la densidad.

6 Los sectores con mayor absorción de lechada corresponden a la zona de la válvula de salida, así como en la segunda curva en el trecho del túnel, llámese progresiva 0+167; donde incluso en la cuarta etapa se obtuvieron consumos elevados; aun así, si bien es cierto que la presencia de filtraciones ha disminuido considerablemente; no garantiza que la zona de contacto se haya llenado totalmente sobre todo en la zona de la bóveda.

RECOMENDACIONES

1 Se recomienda realizar una campaña posterior de inyecciones para garantizar el llenado total de la zona de contacto, sobre todo en los taladros de la bóveda. Las absorciones en los taladros de cuarta etapa son significativas por lo que se hace esta recomendación. El sistema posterior de inyección debe sostener un énfasis en la zona de la bóveda, por ser esta la que ha presentado mayor complicación de llenado.

2 Se debe tener en cuenta las condiciones geológicas y geotécnicas en cada labor de trabajo puesto que estas condiciones son únicas restringiendo el comportamiento de las inyecciones, por lo tanto, en la práctica es necesario realizar un diseño de inyecciones y diseño de mezclas acorde a estas propiedades.

BIBLIOGRAFÍA

- Ampuero, S. (2012). Mejoramiento de cimentaciones en suelos y rocas aplicando las técnicas de grouting (tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingenierías, Lima. Perú.
- Cesel Ingenieros (2012). Estudio definitivo y elaboración del expediente técnico del proyecto de regulación del río Pumamayo. Volumen IV - tomo II, III y IV; volumen V – tomo I.
- Deere, U. & Lombardi, G. (1985). Grout slurries thick or thin. Issued in dam grouting – ASCE convention, Denver.
- De la Cruz, J., López, J., León, W & Lara, M. (1996). Geología del cuadrángulo de Macusani. Boletín N° 79. serie A: Carta Geológica Nacional. INGEMMET.
- Ewert, F. (1985). Rock grouting with emphasis on dam sites. Springer-Verlag, Berlín, Germany.
- Ewert, F. (2003). Discussion of rock type related criteria for curtain grouting. Proceedings of the third international conference on grouting and ground improvement, ASCE special publication, No. 120.
- Houlsby, A.C. (1990). Construction and design of cement grouting: a guide to grouting in rock foundations. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Köppen, W & Geiger, R. (1932) Klimakunde von Mittel – und Sudeuropa, Handbuch der Klimatologie.
- Littejohn, G. (1992). Report on session 2: Consolidation grouting. Grouting in the ground, Conference proceedings. Institution of civil engineers, London. p.183-192.
- Vásquez, R. (2006). Tratamiento de la roca mediante inyecciones en el plinto del proyecto hidroeléctrico El Cajón (tesis de pregrado). Instituto Politécnico Nacional, México.
- Warner, J. (1992). Compaction grout: Rheology vs. Effectiveness. In grouting, soil improvement and geosynthetics. ASCE, Geotechnical Special Publication. New York, No. 30, p. 229-239

Weaver, K. & Bruce, D. (2007). Dam Foundation Grouting, revised and expanded ed.
ASCE press. 473 p.

Welsch, J. & Burke, G. (1991). Jet Grouting – Uses For Soil Improvement. Proc.
Geotechnical Engineering Congress 1991, GSP No. 27. Boulder, CO, p. 334-3