

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS



T E S I S

Requerimientos técnicos de perforación e inyección de lechada de cemento, para sellar las fisuras del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina Cota 4135 m.

Para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. Josué Diber QUITO MARCOS

Asesor:

Mg. Edwin Elías SANCHEZ ESPINOZA

Cerro de Pasco - Perú - 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS



T E S I S

Requerimientos tecnicos de perforacion e inyeccion de lechada de cemento, para sellar las fisuras del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina Cota 4135 m.

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Mg. Silvestre Fabian BENAVIDES CHAGUA
PRESIDENTE

Mg. Nelson MONTALVO CARHUARICRA
MIEMBRO

Mg. Wilfried Bryan PEREZ PARRAGUEZ
MIEMBRO



UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

Facultad de Ingeniería de Minas

Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas

"Año de la Recuperación y Consolidación de la Economía Peruana"



INFORME DE ORIGINALIDAD N° 075-2025

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión ha realizado el análisis con exclusiones en el Software Turnitin Originality, que a continuación se detalla:

Presentado por:

Bach. QUITO MARCOS Josué Diber

Escuela de Formación Profesional
Ingeniería de Minas

Tipo de trabajo:

Tesis

Título del trabajo

"REQUERIMIENTOS TECNICOS DE PERFORACION E INYECCION DE LECHADA DE CEMENTO, PARA SELLAR LAS FISURAS DEL MACIZO ROCOSO EN EL DISEÑO DEL RECRECIMIENTO DE LA PRESA DE RELAVE ANTAMINA COTA 4135 M."

Asesor:

Mg. Edwin Elías SANCHEZ ESPINOZA

Índice de Similitud: **19 %**

Calificativo

APROBADO

Se adjunta al presente el informe y el reporte de evaluación del software similitud.

Cerro de Pasco, 29 de diciembre de 2025.

Sello y Firma del responsable
de la Unidad de Investigación

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, a mi esposa y mis hijos, quienes han sido mi apoyo incondicional en cada paso de este proceso. Su amor, paciencia y comprensión me han dado la fuerza para superar los desafíos y continuar adelante. Este logro es tanto mío como de ellos.

A mi asesor Edwin Elías Sanchez Espinoza, quien, aunque ya no está con nosotros, siempre será una guía fundamental en mi camino académico. Su dedicación, conocimiento y pasión por la enseñanza han dejado una huella imborrable en mi vida. Este trabajo es también un homenaje a su legado.

A la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, por ser la casa de estudios que me brindó las herramientas necesarias para llegar a este momento. Gracias por su formación y por ofrecerme la oportunidad de desarrollar mis habilidades tanto académicas como profesionales.

Este logro es fruto del esfuerzo y apoyo de todos ustedes, y a todos les dedico este trabajo con el corazón lleno de gratitud

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más profundo agradecimiento a mi familia, en especial a mi esposa e hijos, quienes han sido mi apoyo incondicional a lo largo de todo este proceso. Su amor, paciencia y comprensión han sido fundamentales para afrontar cada desafío y culminar este logro.

A mi asesor, Edwin Elías Sanchez Espinoza, quien, aunque ya no se encuentra físicamente con nosotros, dejó una valiosa enseñanza y guía en mi formación académica. Su dedicación, compromiso y pasión por la enseñanza han marcado significativamente mi desarrollo profesional, y su legado perdurará siempre en mi camino.

A la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, por brindarme la formación académica y las herramientas necesarias para alcanzar esta meta, así como por contribuir a mi crecimiento personal y profesional.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo y culminación de este trabajo.

RESUMEN

Esta investigación, titulada “REQUERIMIENTOS TECNICOS DE PERFORACION E INYECCION DE LECHADA DE CEMENTO, PARA SELLAR LAS FISURAS DEL MACIZO ROCOSO EN EL DISEÑO DEL RECRECIMIENTO DE LA PRESA DE RELAVE ANTAMINA COTA 4135 M.”.tuvo como objetivo principal: Determinar si las consideraciones técnicas de la perforacion e inyección de lechada de cemento en los taladros, influyen en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m. La hipótesis sostiene que Las consideraciones técnicas de la perforacion e inyección de lechada de cemento en los taladros, si influyen directamente en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m

Metodológicamente, el estudio es de tipo aplicada, con nivel descriptivo- explicativo y un diseño no experimental. La muestra está constituida por el proyecto pantalla de impermeabilización blanket estribo derecho cota 4135 presa de relaves Compañía Minera Antamina.

Como conclusión principal, tenemos El programa completo de inyecciones abarcó 5,985 m perforados en roca y un gasto de cemento de 501 t. La pantalla principal del estribo derecho requirió 3,500 m de perforación en roca y 263 t de cemento, en tanto que la pantalla auxiliar sumó 671 m y 38.6 t de cemento. Para completar la pantalla del estribo izquierdo se perforaron 1,689 m en roca y colocadas 192 t de cemento, más 126 m de taladros de consolidación los cuales fueron inyectados con 7.7 t de cemento.

Palabras claves: Impermeabilización, taladros, inyección, fisuras, recrecimiento de presa, relavera

ABSTRACT

This research, entitled “TECHNICAL REQUIREMENTS FOR DRILLING AND CEMENT GROUT INJECTION TO SEAL ROCK MASS FISSURES IN THE DESIGN OF THE ANTAMINA TAILINGS DAM RAISING AT 4135 M,” had the main objective of determining whether the technical considerations of drilling and cement grout injection in the boreholes influence the waterproofing (sealing of fissures) of the rock mass in the design of the Antamina tailings dam raising at 4135 m. The hypothesis states that the technical considerations of drilling and cement grout injection in the boreholes do directly influence the waterproofing (sealing of fissures) of the rock mass in the design of the Antamina tailings dam raising at 4135 m.

Methodologically, this study is applied, descriptive-explanatory, and employs a non-experimental design. The sample consists of the right abutment waterproofing blanket project at elevation 4135 of the Antamina Mining Company's tailings dam.

The main conclusion is that the complete grouting program encompassed 5,985 m drilled in rock and a cement consumption of 501 t. The main right abutment wall required 3,500 m of rock drilling and 263 t of cement, while the auxiliary wall totaled 671 m and 38.6 t of cement. To complete the left abutment wall, 1,689 m were drilled in rock and 192 t of cement were placed, plus 126 m of consolidation holes which were grouted with 7.7 t of cement.

Keywords: waterproofing, drilling, injection, cracks, dam raising, tailings pond

INTRODUCCION

En el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina cota 4135 m. se ve que geológicamente está emplazado en formación de calizas Celendín, susceptible a la intemperización kárstica causada por la disolución de la caliza, generalmente a lo largo de las fracturas (conductos de flujo). Esto da origen a la presencia de cavidades y grutas dentro de las formaciones de caliza,

Problema que tiene injerencia en la demora de avance y entrega del trabajo de perforación e inyecciones sujeta a penalidades económicas.

La presente investigación contiene los resultados y análisis finales del programa de inyecciones de impermeabilización, para la construcción de los plintos, perforaciones e inyecciones de la fase V de la presa de relaves de la mina Antamina, propiedad de la Compañía Minera Antamina S. A. (Antamina).

Respecto al desarrollo de la tesis, esta se organiza de la siguiente manera:

El Capítulo I comprende el planteamiento del problema, formulando el problema general y los problemas específicos relacionados con perforaciones e inyecciones de lechada de cemento para sellar fisuras de la roca. Asimismo, detalla los objetivos generales y específicos, la justificación e importancia del estudio, las hipótesis planteadas, la descripción de variables, y la delimitación e identificación de limitaciones de la investigación.

El Capítulo II desarrolla el Marco Teórico, analizando los antecedentes de investigaciones previas sobre inyecciones de lechada de cemento en fisuras rocosas. Adicionalmente, se exponen las bases teóricas y conceptuales fundamentales que sustentan el tema de estudio.

El Capítulo III describe la Metodología empleada, especificando el método, tipo y nivel de investigación, el diseño de estudio seleccionado, la definición de la población y muestra, así como las técnicas e instrumentos de recolección de datos y los procedimientos para su procesamiento y análisis.

El Capítulo IV presenta los Resultados y el Análisis de los datos obtenidos respecto

a impermeabilización del macizo rocoso, mediante inyección de lechadas de cemento.

Finalmente, se exponen las Conclusiones y Recomendaciones derivadas del estudio, seguidas de las Referencias Bibliográficas que sustentan la investigación

ÍNDICE

Página

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCION

ÍNDICE

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Delimitación de la investigación	2
1.2.1. Delimitación espacial.....	2
1.2.2. Delimitación temporal	2
1.3. Formulación del problema.....	2
1.3.1. Problema general	2
1.3.2. Problemas específicos.....	3
1.4. Formulación de objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Justificación de la investigación	3
1.6. Limitación de la investigación.....	4

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio.....	5
2.1.1. Antecedentes nacionales.....	5
2.2. Bases teóricas científicas.....	9
2.2.1. Inyección de lechada.....	9

2.2.2. Métodos tradicionales de inyección	11
2.2.3. Materiales de inyección	21
2.2.4. Propiedades de los materiales que componen las inyecciones de cemento ...	23
2.2.5. Equipo a utilizar	24
2.3. Definición de términos conceptuales.....	26
2.4. Enfoque filosófico - epistémico.....	27

CAPITULO III

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1. Tipo de investigación	31
3.2. Nivel de investigación	31
3.3. Características de la investigación.....	31
3.4. Métodos de investigación.....	31
3.5. Diseño de investigación	32
3.6. Población y muestra	32
3.6.1. Población	32
3.6.2. Muestra	32
3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	32
3.7.1. Técnicas.....	32
3.7.2. Instrumentos.....	32
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	33
3.9. Orientación ética.....	33

CAPITULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	34
4.1.1. Características físicas del sitio de la presa Antamina	34
4.1.2. Parámetros técnicos de diseño de la fase V	36
4.2. Discusión de resultados.....	47
4.2.1. Resultados técnicos de la etapa constructiva	47

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

	Pagina
Tabla 1. <i>Operacionalización de variables e indicadores</i>	30
Tabla 2. <i>Diseño de lechadas empleadas en la fase V</i>	45
Tabla 3. <i>Requerimientos de control de calidad fase V</i>	46
Tabla 4. <i>Metrajes y consumos de cemento de la pantalla principal estribo derecho</i>	51
Tabla 5. <i>Metrajes y consumos de cemento de la pantalla auxiliar estribo derecho.</i>	59
Tabla 6. <i>Metrajes y consumos de cemento de la pantalla principal estribo izquierdo</i>	62
Tabla 7. <i>Resumen de permeabilidades promedio según estribo</i>	75
Tabla 8. <i>Comparación de los macizos rocosos del estribo derecho e izquierdo</i>	76

INDICE DE FIGURAS

	Pagina
Figura 1. <i>Esquema bombeo de lechada</i>	10
Figura 2. <i>Circuito de inyección</i>	10
Figura 3. <i>Esquema y circuito de inyección aplicando el Método de Jet Grouting</i>	12
Figura 4. <i>Esquema de jet simple. Rodio Cimentaciones Especiales</i>	12
Figura 5. <i>Esquema de jet doble con agua. Rodio Cimentaciones Especiales</i>	13
Figura 6. <i>Esquema de jet doble con agua. Rodio Cimentaciones Especiales</i>	13
Figura 7. <i>Esquema de jet triple. Rodio Cimentaciones Especiales</i>	14
Figura 8. <i>Esquema de varillaje con broca de percusión. Boart Longyear</i>	15
Figura 9. <i>Esquema de varillaje con broca de rotatoria. Boart Longyear</i>	16
Figura 10. <i>Diagrama conceptual de inyección por compensación típico</i>	17
Figura 11. <i>Esquema típico de inyección por compactación</i>	18
Figura 12. <i>Chemical Grouting</i>	19
Figura 13. <i>Cement Grouting</i>	20
Figura 14. <i>Inyecciones ascendentes y descendentes</i>	21
Figura 15. <i>Panorámica desde la margen derecha mostrando los rasgos morfológicos característicos del sitio de presa</i>	34
Figura 16. <i>Evolución global del consumo de cemento registrado en la Fase IV.</i>	37
Figura 17. <i>Ubicación de la pantalla del estribo derecho e izquierdo</i>	39
Figura 18. <i>Plataformas vistas desde la parte superior del plinto derecho</i>	40
Figura 19. <i>Plataforma móvil estacionada en la parte superior del plinto izquierdo</i>	41
Figura 20. <i>Bomba Moyno y tanque almacenador de agua utilizados para las pruebas de permeabilidad</i>	42
Figura 21. <i>Equipo registrador en proceso de verificación de la calibración presión/caudal.</i>	42
Figura 22. <i>Monitoreo y adquisición de datos en tiempo real</i>	44
Figura 23. <i>Plataforma de inyección propiedad de Geotecnia Peruana utilizada en la Central No. 1</i>	44

Figura 24. <i>Estribo derecho vista 1, distribución de cortina de inyecciones - planta.....</i>	48
Figura 25. <i>Estribo derecho vista2, distribución de cortina de inyecciones - planta.....</i>	48
Figura 26. <i>Control de eyecciones.....</i>	49
Figura 27. <i>Vista de perfil mostrando la pendiente de la ladera y el camino de acceso a la base del plinto</i>	50
Figura 28. <i>Configuración del plinto y condiciones del terreno propias del estribo derecho .</i>	51
Figura 29. <i>El testigo del tramo 33-43 m muestra una buena calidad física de la roca caliza</i>	53
Figura 30. <i>Detalle de la estructura kárstica con relleno limoso ubicada entre los 37.67 y 37.98</i>	54
Figura 31. <i>Muestra la geometría del sumidero kárstico que aceptó un caudal de 60 L/min a gravedad</i>	54
Figura 32. <i>Plano de la falla estratigráfica con 45° de inclinación que da origen al conducto kárstico.....</i>	55
Figura 33. <i>Interpretación de entramado kárstico del estribo derecho</i>	55
Figura 34. <i>Vista panorámica del estribo izquierdo mostrando las plataformas instaladas sobre el plinto</i>	60
Figura 35. <i>Costado de aguas arriba del plinto que ilustra la inclinación del mismo.....</i>	61
Figura 36. <i>Fracturamiento con intemperismo fuerte típico de la zona superficial del taladro LP-P32</i>	63
Figura 37. <i>Núcleo del LP-P30 mostrando una condición que es característica hallar a profundidad</i>	64
Figura 38. <i>Limonita deleznable expuesta en talud generado por la excavación de la fundación.....</i>	65
Figura 39. <i>Proceso de degradación que sufren los testigos de roca luego de tres o cuatro días de extraídos.....</i>	65
Figura 40. <i>Testigo de roca afectado por fracturas inducidas por el torque de la máquina ..</i>	67
Figura 41. <i>Fractura planar ubicada a 67.50 m que fue objeto de la inyección del tramo 65 a 75 m</i>	68

Figura 42. Consumo de cemento contra profundidad en estribo derecho.....	71
Figura 43. Consumo de cemento contra profundidad en estribo derecho.....	72
Figura 44. Evolución global del consumo de cemento registrado en la fase V	73
Figura 45. Roca caliza mostrando el contraste de coloración entre la roca sana y meteorizada.....	77
Figura 46. Testigo del taladro RP-S 22 que ilustra la condición de roca inalterada	77
Figura 47. Falla geológica ubicada cerca de la parte superior de la estructura del plinto derecho	78
Figura 48. Pequeña caverna situada a unos 300 m al sureste del plinto del estribo derecho	78
Figura 49. Ilustra el perfil de meteorización típico del macizo rocoso del estribo izquierdo.	80
Figura 50. Derrame recurrente de lechada ubicado hacia aguas abajo del plinto.....	80

CAPITULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Planteamiento del problema

En el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina cota 4135 m. se ve que geológicamente está emplazado en formación de calizas Celendín, susceptible a la intemperización kárstica causada por la disolución de la caliza, generalmente a lo largo de las fracturas (conductos de flujo). Esto da origen a la presencia de cavidades y grutas dentro de las formaciones de caliza,

Problema que tiene injerencia en la demora de avance y entrega del trabajo de perforación e inyecciones sujeta a penalidades económicas.

Por lo que será necesario realizar:

- Perforación e Inyección de lechada de cemento para sellar las fisuras del macizo rocoso en los taladros perforados desde los plintos de concreto o desde la superficie de concreto dental dentro de las formaciones de roca para disminuir las filtraciones en los estribos de la presa.
- Perforación para exploración y para instrumentación.
- Durante la ejecución de los taladros existe la posibilidad de interceptar zonas de alto flujo en los sistemas kársticos del macizo rocoso en el estribo derecho de la presa.

La investigación consistirá en la inyección de lechada de cemento al macizo rocoso de la fundación a lo largo del pie aguas arriba de la presa en los estribos derecho e izquierdo para construir un sistema de bloqueo de filtraciones.

Incluyendo, entre otras cosas, la perforación, de taladros de inyección, limpieza, pruebas de agua, e inyección a presión de la lechada de cemento en dichos taladros.

La cortina de inyección consistirá en la perforación de una o más filas de taladros con la inyección de la mezcla de lechada especificada para crear una cortina de baja permeabilidad. La cortina de inyección se construirá por tramos y se empleará el método de cierre progresivo.

Todos estos aspectos hacen que se realice la presente investigación.

1.2. Delimitación de la investigación

1.2.1. Delimitación espacial

La investigación se realizará en la Empresa Minera Antamina, presa de relaves Antamina cota 4135, ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huarí en la Región Ancash, a 200 km. de la ciudad de Huaraz y a una altitud promedio de 4,300 msnm.

1.2.2. Delimitación temporal

Sera de 6 meses de enero a julio del 2024.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Las consideraciones técnicas de la perforación e inyección de lechada de cemento en los taladros influyen en la impermeabilización, (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m?

1.3.2. Problemas específicos

Problema específico a

¿Las consideraciones técnicas de la perforación en los taladros influyen en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m?

Problema específico b

¿Las consideraciones técnicas de inyección de lechada de cemento en los taladros influyen en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar si las consideraciones técnicas de la perforación e inyección de lechada de cemento en los taladros, influyen en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m.

1.4.2. Objetivos específicos

Objetivo específico a

Determinación si las consideraciones técnicas de la perforación en los taladros, influyen en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m.

Objetivo específico b.

Determinar si las consideraciones técnicas de inyección de lechada de cemento en los taladros, influyen en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m.

1.5. Justificación de la investigación

Planteamos las siguientes justificaciones. Justificación Teórica

Justifica su realización porque se podrá obtener información o nuevos conocimientos y a la vez aplicar conocimientos de sellar fisuras en macizos rocosos que se hallan fracturados o fisurados mediante la inyección de lechada de cemento.

Justificación Práctica

La investigación nos permitirá optimizar la secuencia de perforación para habilitar tramos perforados en menor tiempo y mejores condiciones para la inyección de lechada de cemento.

Justificación Económica

Con la investigación se quiere contribuir mejorando el proceso de perforación e inyección, así evitar retrasos, pérdidas y anulación de taladros perforados e inyectados ya que el plazo de entrega de la obra es limitado y sujeta a penalidades económicas.

1.6. Limitación de la investigación

La limitación que se tiene en el presente trabajo de investigación es no contar con suficiente sustento documental e información teórico, por lo tanto la investigación se basará en trabajos de campo utilizando herramientas y técnicas de recuperación de información.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Antecedentes nacionales

Primer antecedente:

En el artículo presentado por (EXTREMERA, SANTOS, MUÑOZ,ESPEJO, 2015), titulado MEJORA Y CORRECCIÓN DE LA IMPERMEABILIZACIÓN EN EL CIMIENTO DE LA PRESA DE LAS FITAS, cuyo objetivo es la ejecución de una pantalla de bentonita-cemento para reducir el gradiente hidráulico entre aguas arriba y aguas abajo de la misma y poder reducir la permeabilidad.

Como conclusión se tiene:

Al realizar la prueba con dos tipos de bentonita se eligió el empleo de Bentonil CV-15; y del empleo de dos tipos de cemento se prefiere el empleo de cemento Tudela Veguin.

La dosificación seleccionada tanto de la bentonita como del cemento para obtener los resultados esperados fueron:

- 1000 litros de agua
- 30 – 35 kg de bentonita CV-15
- 220 kg de cemento CEM-III-B 32.5 de Tudela Veguin

Segundo antecedente

En el artículo de la revista (GIACONI, FLORES, GIACONI, 2012), titulado Tratamiento geotécnico de la fundación de la presa del Ramal H, Tandil mediante inyecciones cementíceas; tiene como objetivo describir la geología y geotecnia del macizo rocoso de la Presa del Ramal H de la ciudad de Tandil – Buenos Aires y el tratamiento mediante inyecciones cementíceas y lograr mejorar las condiciones geomecánicas e hidráulicas de la roca.

Como conclusión se llegó a:

Se logró el objetivo impuesto de homogenización de las condiciones mecánicas e hidráulicas del macizo de apoyo de la presa, siendo que las intensidades GIN adoptadas bajo control del sistema computarizado de las inyecciones permitió llevar a cabo los trabajos con un alto grado de eficacia y seguridad controlándose los volúmenes inyectados y fundamentalmente las presiones del tratamiento en tiempo real evitando desplazamientos no queridos y la consecuente posibilidad de hidrofracturación dadas las características comentadas del macizo rocoso de fundación

Tercer antecedente

En la tesis de (HERRERA, 2019) titulado “IMPERMEABILIZACIÓN MEDIANTE INYECCIONES DE CEMENTO EN MACIZO ROCOSO PARA EVITAR LA SURGENCIA DE AGUA EN EXPLOTACIÓN SUBTERRÁNEA

CAJAMARCA, 2019, cuyo objetivo fue: evitar la presencia de agua en las labores mineras mediante la impermeabilización con cemento del macizo rocoso.

Como conclusión indica:

Se llegó a la conclusión en lugares donde hay abundante agua se debe usar mezclas con agregados gruesos para sellar las estructuras abiertas, para tratar luego con inyecciones de lechada de cemento.

El procedimiento a realizar para la impermeabilización debe llevarse a cabo bajo la necesidad del macizo rocoso, para obtener una mezcla resistente al lavado debiendo ser la mezcla densa y estable.

Cuarto antecedente

La tesis de (ZEGARRA, 2020) titulado “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” como objetivo planteo: impermeabilizar el túnel mediante el metodo JET GROUTING DE INYECCIONES de la presa Pumamayo.

Como conclusión se tuvo:

Se llevo a aplicar el metodo de JET GROUTING con presiones de 2 a 2,5 bares y mezclas de cemento tipo IP en diferentes dosificaciones.

Las características geológicas de la ubicación de la presa y túnel de desvío es limonita, limonita carbonosa, limonita lutaceo, arenisca cuarzosa.

El consumo de lechada de cemento disminuye tanto en la primera, segunda, tercera etapa, siendo variado su consumo.

El control de la lechada dio como resultado lo siguiente fluidez 32 segundos, cohesión 0.0326 gr/cm², decantación 3 %, densidad 1.5 gr/cm³

Quinto antecedente

La tesis de (FLORES, 2023) titulado Tratamiento geotécnico de fundación de la presa Silicucho y su relación con la impermeabilización mediante inyecciones de lechada de cemento, Crucero, Puno, su objetivo fue mediante inyecciones de lechada de cemento en la presa Silicucho reducir la permeabilidad de la cimentación.

Como conclusión se tiene:

El grado de permeabilidad alcanzado en el eje de la presa 1 es de 10E-5 cm/seg. Lo que lo hace impermeable, en la margen derecha la permeabilidad llega a 10E-3 cm/seg lo que lo hace permeable, en la zona critica cuya permeabilidad es de

10E-2 cm/seg después del tratamiento se llegó a 10E-4 cm/seg convertido en zona impermeable.

Los ensayos de Lugeon muestran una reducción de la permeabilidad de 98.35 % en PS-SC/01, de 94.62 % en PS-SC/02, de 98.31 % en PS-SC/03, de 93.59 % en PS-SC/07 y de 91.00 % en PS-SC/08 indicando una reducción mayor al 90 % de permeabilidad.

Sexto antecedente

la tesis de (QUITO, 2019) titulado "INFLUENCIA DEL MÉTODO - INYECCIÓN TRADICIONAL DE IMPERMEABILIZACIÓN EN LA REDUCCIÓN DE FILTRACIÓN - PRESA DE RELAVE EL PORVENIR MAPSAC - 2018" cuyo objetivo es reducir la impermeabilidad de la presa de relaves mediante la inyección tradicional como conclusión se tuvo:

Se pudo controlar la impermeabilización mediante el metodo tradicional de la presa de relave reduciéndose en un 75 % la captación del agua, debido a que hay poca filtración.

Se logro reducir la permeabilidad de la presa en los tramos siguientes:

- área de Sondaje DH_EP11-115 (Tramo 62.95 - 58.00 m) se redujo de 1.4 cm/seg a 1.2 cm/seg de permeabilidad.
- área de Sondaje DH_EP11-118 (Tramo 80.05 - 74.00 m) se redujo de 7.1 cm/seg a 0.5 cm/seg de permeabilidad.
- área de Sondaje DH_EP11-121 (Tramo 34.00 - 29.00 m) se redujo de 3.2 cm/seg a 2.7 cm/seg de permeabilidad.

También se logro reducir la emanación de efluentes a la presa de relaves de 5% en algunos momentos de 8% a 0.5% de reducción después de 2 meses de la implantación de los taladros de inyección

2.2. Bases teóricas científicas

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.

Penetración de la Inyección 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.

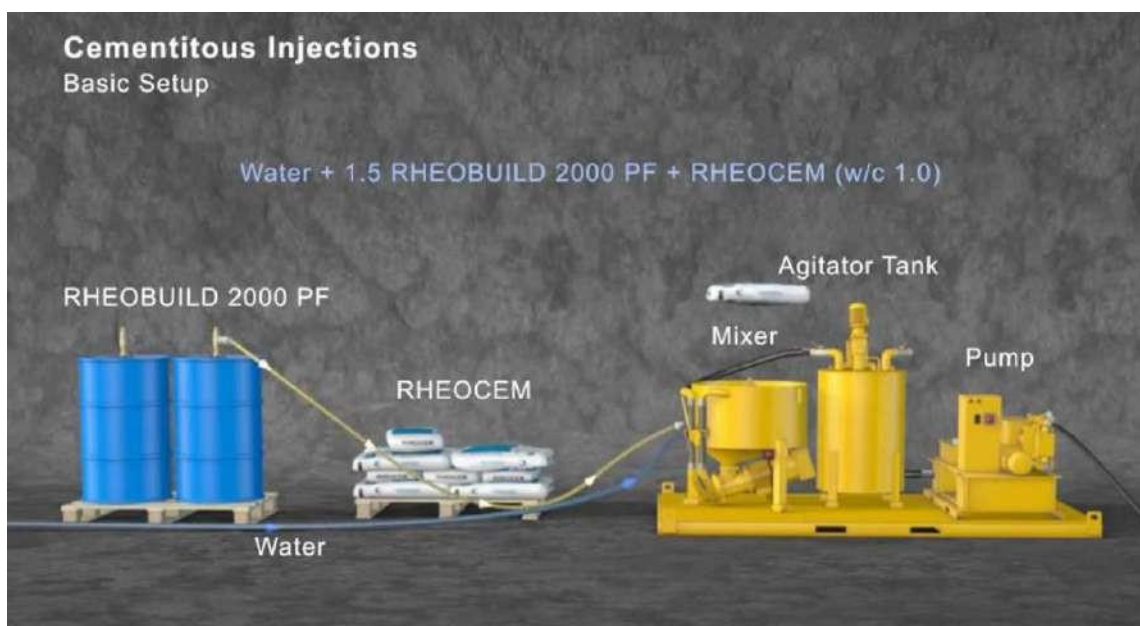
Circuito de inyección

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.

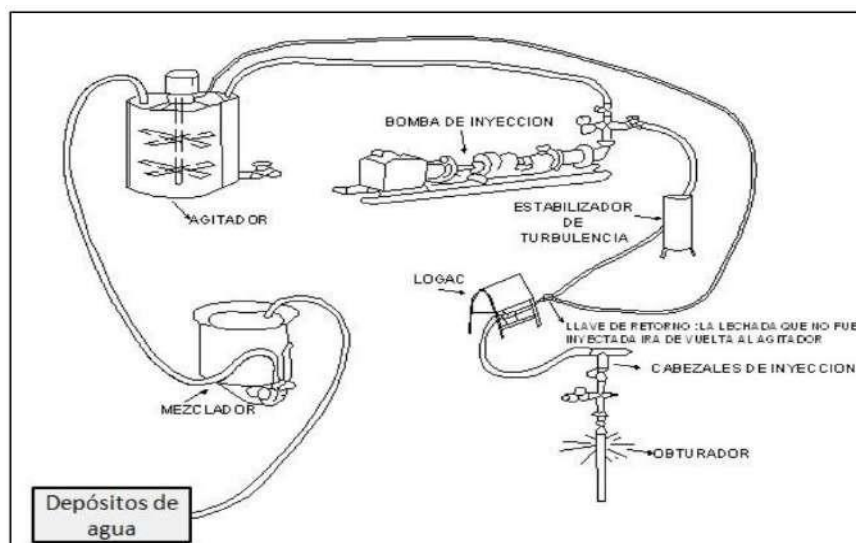
El operador de válvulas dará paso a la lechada desde el agitador hacia la bomba de inyección que bombeará la mezcla hacia el punto perforado.

Figura 1. Esquema bombeo de lechada



Fuente: MEYCO Expanding Horizons Underground

Figura 2. Circuito de inyección



2.2.2. Métodos tradicionales de inyección

Tenemos:

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

Procedimiento de la inyección

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, formando 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.

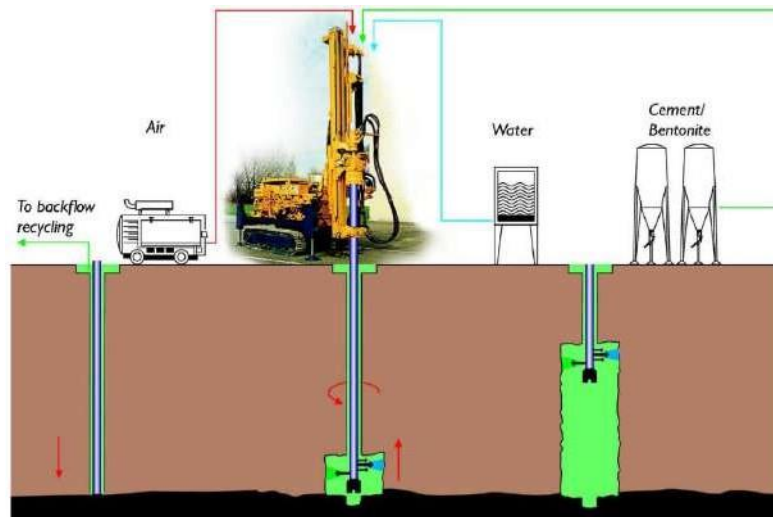
Una vez que se ha llegado a la longitud deseada, comienza el proceso de inyección de fluidos, que sale a alta velocidad por toberas laterales que giran y ascienden solidarias al tubo de perforación en su lenta extracción. Los fluidos van disgregando el suelo y mezclándolo con la lechada de cemento.

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

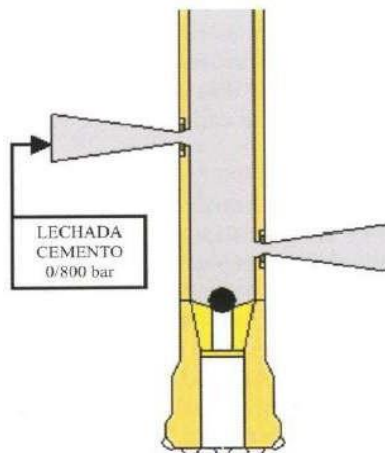
Figura 3. Esquema y circuito de inyección aplicando el Método de Jet Grouting



Materiales

Según los materiales usados, hay tres variantes de jet grouting. El sistema básico es el de fluido simple (Ver Figura 4), que usa lechada para cortar el suelo además como material estructural también es empleado.

Figura 4. Esquema de jet simple. Rodio Cimentaciones Especiales



El de doble fluido introduce agua (Ver Figura 5) 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.

La lechada, además de agua y cemento, puede incluir bentonita en la mezcla

Figura 5. Esquema de jet doble con agua. Rodio Cimentaciones Especiales.

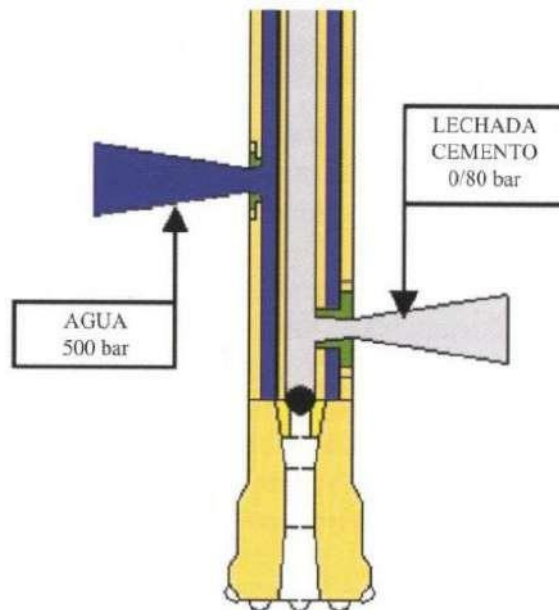


Figura 6. Esquema de jet doble con agua. Rodio Cimentaciones Especiales

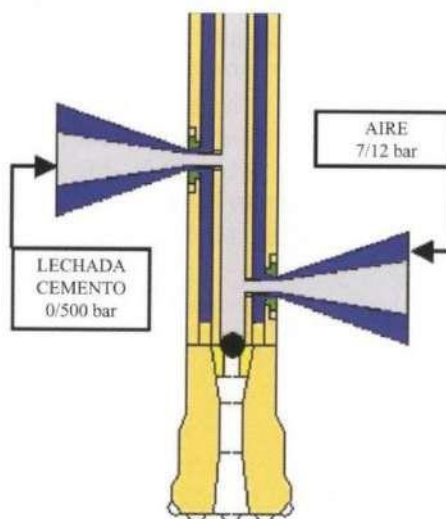
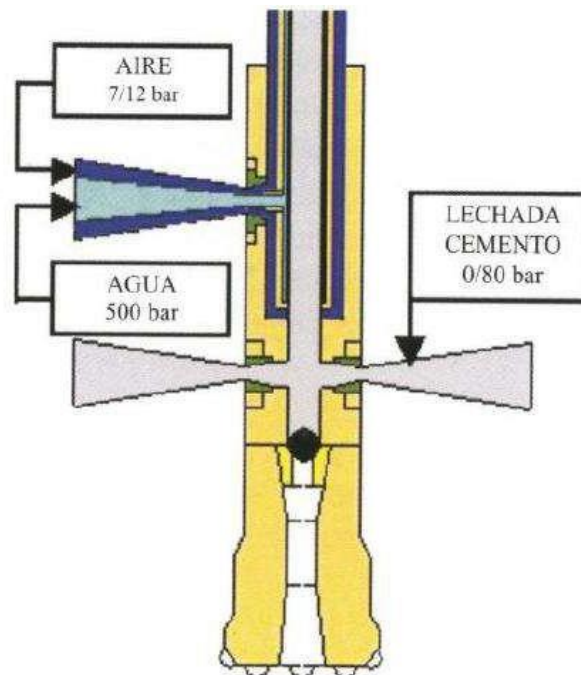


Figura 7. Esquema de jet triple. Rodío Cimentaciones Especiales



Maquinaria

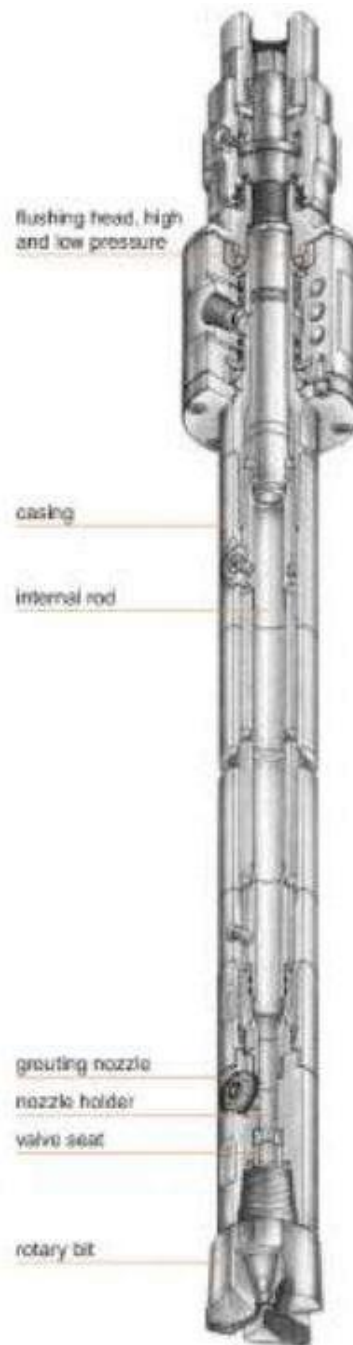
Como se ha podido deducir de la descripción del proceso, la maquinaria necesaria se compone de un varillaje de diámetro adecuado en relación a la longitud útil del corte, para la evacuación del "spoil", los elementos mecánicos mueven y regulan el varillaje en rotación y traslación desde el carro de perforación, 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.

Figura 8. Esquema de varillaje con broca de percusión. Boart Longyear



Figura 9. Esquema de varillaje con broca de rotatoria. Boart Longyear



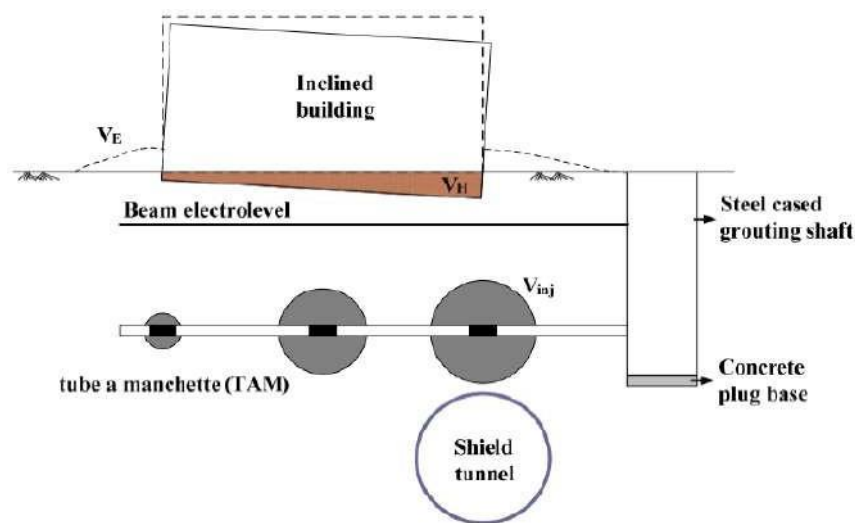
Por lógica, forma parte también del mismo sistema hidráulico del jet, el dispositivo para la inyección de fluidos de sondeo, que puede ir en el portatoberas o añadiendo una tobera sobre la trialeta de perforación.

b. 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 10).

Figura 10. Diagrama conceptual de inyección por compensación típico



c. Inyección por Compactación

La inyección de compactación es una técnica de mejora de suelo que tiene como fin, tanto aumentar la capacidad portante 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.

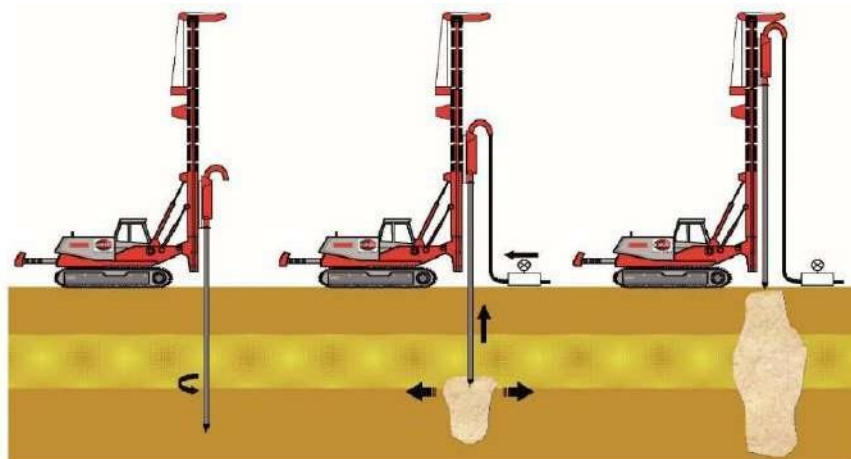
Usos frecuentes

- 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 pórtate.

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.

Figura 11. Esquema típico de inyección por compactación



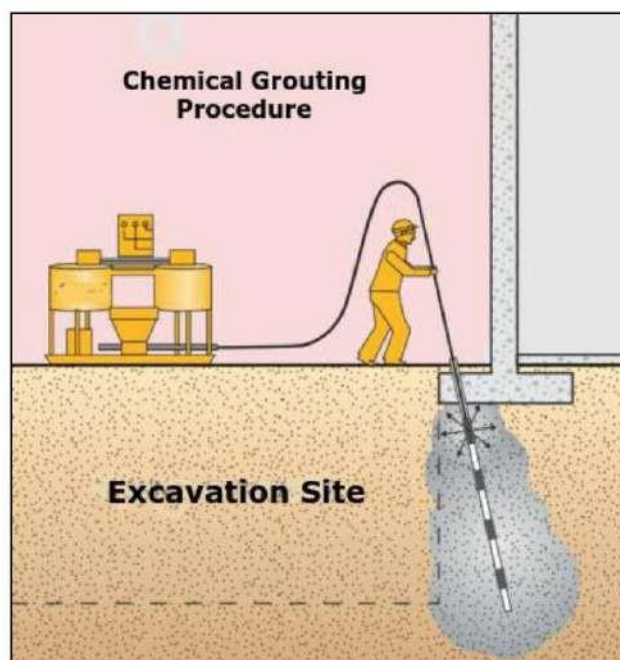
d. Chemical Grouting

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.

Figura 12. Chemical Grouting



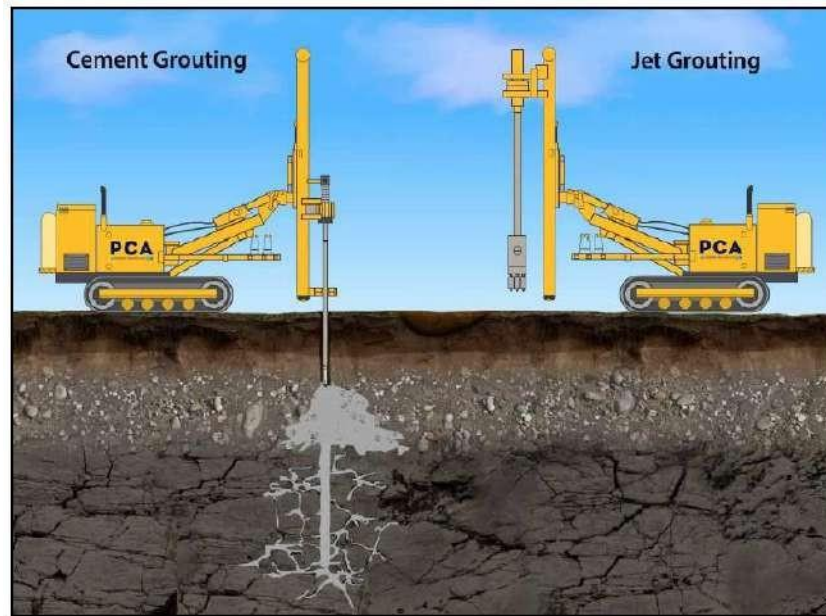
e. Inyecciones de Cemento o Cement Grouting.

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.

Figura 13. Cement Grouting



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.

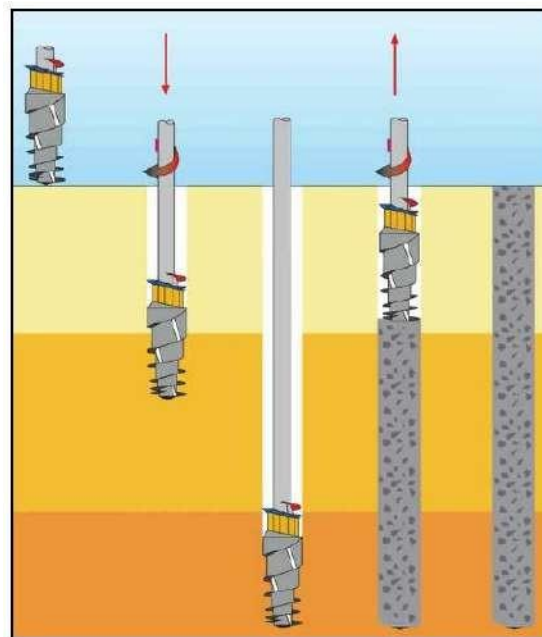
Un tubo, típicamente de PVC o acero de 38mm a 75mm de diámetro, contiene varios conjuntos de pequeños orificios a lo largo de su longitud que están envueltos por mangas protectoras de goma expansible.

f. 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 14).

Figura 14. *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.

2.2.3. Materiales de inyección

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

Cemento

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

Puzolanas

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

Debido a que las Puzolanas son desechos, el costo es muy bajo. Sin embargo, ello no las limita para el tipo de aplicación.

Fly Ash

El Fly Ash son partículas finas de cenizas producidas por la combustión de combustibles sólidos, como el carbón

Bentonita

Mineralógicamente, la bentonita es una arcilla impura. Esta arcilla es capaz de absorber el agua en su estructura cristalina, expandiéndose en el proceso entre el 400% a 700%. La bentonita es utilizada como un constituyente menor en las lechadas de cemento y es agregada con el propósito de producir una suspensión relativamente estable. La bentonita reduce el asentamiento de las partículas de cemento en la lechada y aumenta la viscosidad y la cohesión de la lechada.

Arcilla

El uso de la arcilla como material de relleno en las lechadas de inyección de cemento presenta una ventaja por tener una menor sedimentación que las lechadas solo son con cemento, lo cual ayuda a alcanzar un mayor relleno no vacíos.

Aditivos Químicos

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

Dispersantes

Los dispersantes químicos son utilizados con el propósito de reducir la tendencia de aglomeración de las partículas de cemento, aumentando la habilidad de la lechada para penetrar las fracturas

Acelerantes

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

Agua

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

2.2.4. Propiedades de los materiales que componen las inyecciones de cemento

Viscosidad

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

En cuanto a las unidades, la viscosidad dinámica se expresa en pascal – segundo (pa-s). en los trabajos de inyección la viscosidad se mide en segundos utilizando el cono de Marsh.

Cohesión

La cohesión es la fuerza de atracción que existe entre las moléculas que mantienen unidas a las partículas de la lechada. Así mismo, está demostrado que la

cohesión de la lechada es un factor importante en la distancia que la lechada debe penetrar

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

Gravedad Específica

las lechadas formuladas con ingredientes de densidad baja tales como el Fly Ash serán más estables (menos susceptibles a la sedimentación) que, si son formuladas con ingredientes más densos como la arena, por ejemplo

Granulometría

La granulometría de las partículas que conforman la lechada de cemento tiene un mayor efecto sobre la habilidad de la lechada para penetrar en materiales granulares o rocas fracturadas. El 15% de partículas más gruesas (el tamaño D85) de una lechada. Generalmente es considerado el factor dominante en la habilidad de la lechada para penetrar materiales granulares o para penetrar fracturas.

2.2.5. Equipo a utilizar

Para la fabricación y almacenamiento de las mezclas de inyección, se requiere la utilización de los siguientes equipos:

Equipo mezclador

Consta de:

Turbo mezclador de altas revoluciones (1250 rpm) del tipo de bomba centrífuga, para la fabricación de lechadas. Debe contar con un tanque de almacenamiento con capacidad mínima de 150 litros

Agitador o mezclador de bajas revoluciones (60 rpm). Se utiliza para fabricar morteros o para depositar la mezcla previamente preparada en el turbo mezclador, manteniendo en suspensión las partículas sólidas y eliminando las burbujas de aire de la mezcla, de tal manera que la operación o proceso de inyectado sea continua. Se recomienda que la capacidad mínima de estos agitadores sea de 200 litros.

Tuberías:

Las tuberías que se utilicen deben ser metálicas, con el diámetro, acoplamientos y cambios de dirección adecuados para disminuir en lo posible las pérdidas por fricción; con las válvulas adecuadas para el tipo de fluido que transporten y las protecciones contra la intemperie, contra las voladuras y el paso de vehículos de transporte

Mangueras

Las mangueras que se utilicen deben ser capaces de resistir un tratamiento rudo, para lo cual deben seleccionarse las que estén reforzadas por capas helicoidales de trenzado de alambres de acero, que las hagan resistentes a las sobrepresiones y paso de vehículos pesados y cuya capacidad mínima a la rotura sea de cinco veces la presión de trabajo.

Medidores de gasto

Deben ser sistemas registradores automáticos de presión y del caudal de inyecciones, dotados de un registrador de línea continua para la presión y el caudal, así como también de un totalizador para la cantidad consumida

Manómetros

Los manómetros son dispositivos para medir la presión, deben tener una capacidad de 1,5 veces la presión máxima especificada de operación, estar protegidos contra el golpe hidráulico (de glicerina) y utilizar protectores de membrana plana o de membrana tubular; además, deben estar debidamente calibrados y certificados por un laboratorio de calibración acreditado

Tanque de aforo.

Este debe de contener sin ningún problema por lo menos para la preparación de dos lechadas continuamente, es de suma importancia el tenerlo en optimas condiciones teniendo cuidado de no golpearlo pues esto haría que el volumen del miso cambiara y es una parte fundamental para la preparación de la mezcla de

inyección, se debe de revisar por lo menos una vez por mes o a l realizar alguna maniobra o cambiarlo de lugar.

Obturador.

Son dispositivos que se colocan dentro del barreno al final de la tubería de inyección, cuya finalidad es la de aislar el tramo que se vaya a inyectar.

Pueden ser neumáticos, mecánicos o de copas de cuero, dependiendo de las condiciones del sitio de inyección

2.3. Definición de términos conceptuales

Exudación

La exudación son brotes líquidos o gaseosos que a través de la temperatura y almacenamiento de agua de diferente tipo relucen superficialmente en cantidades mínimas

Filtraciones.

La Filtración son emanaciones líquidas no deseadas que surgen bajo presiones de diferente índole que emergen a través de espacios vacíos

Hidrofracturamiento

El hidrofracturamiento está relacionado a la formación y apertura de nuevas fracturas o fisuras en la roca Inyección lechada

Hidrogateo

Hidrogateo está relacionado a la apertura de fisuras y fracturas pre existentes en el macizo.

Inyección de cemento

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 rotoperusión a través de las cuales se bombea lechada a determinadas presiones según las condiciones geológicas del medio

Impermeabilización.

Es la protección contra efectos que el agua pueda causar con la capacidad de ser anticorrosiva tiene el objetivo de no dejar pasar el agua e impedir su paso para efectos colaterales que el agua pueda causar.

Lechada

Se definen la lechada de cemento, como la pasta muy fluida de cemento y agua, y eventualmente adiciones, utilizada principalmente para inyecciones de terrenos, cimientos, túneles, etc.

Sedimentación

La Sedimentación actúa con la gravedad que realiza la remoción de pequeñas partículas en forma muy natural hacia una base determinada de rocas.

Tramo

En el estudio realizado podemos definir que un tramo es una parte inyectada de una perforación, que pudo elegirse bajo el marco de condición de su entorno antes o después de la perforación, y ese utiliza con el fin de evaluar y seleccionar datos de agua y/o inyecciones

2.4. Enfoque filosófico - epistémico

El enfoque filosófico está relacionado con la crítica, lógica y un método que busca aclarar la totalidad de las experiencias de hechos concretos y reales, caracterizar las fortalezas de los requerimientos técnicos de perforación e inyección de lechada de cemento, para sellar las fisuras del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina. En primer lugar, es fundamental adoptar un enfoque de sostenibilidad y responsabilidad ambiental. Asimismo, se debe tener en cuenta la equidad y la justicia social en la realización de este estudio. Por último, la transparencia y la comunicación responsable deben ser prioridades. Resultados encontrados se deben compartir de manera clara y accesible con todas las partes interesadas

Formulación de hipótesis

Hipótesis general

Las consideraciones técnicas de la perforación e inyección de lechada de cemento en los taladros, si influyen directamente en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m

Hipótesis específicas

Hipótesis específica a

Las consideraciones técnicas de la perforación en los taladros, si influyen directamente en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m.

Hipótesis específica b

Las consideraciones técnicas de inyección de lechada de cemento en los taladros, si influyen directamente en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m.

Identificación de variables

Variables para la hipótesis general

Variable independiente

Consideraciones técnicas de perforación y de inyección de lechada de cemento.

Variable dependiente

Impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso.

Variables para la hipótesis específicas

Variables para la hipótesis específica a

Variable independiente Consideraciones técnicas de perforación.

Variable dependiente

impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso.

Variables para la hipótesis específica b

Variable independiente

consideraciones técnicas de inyección de lechada de cemento.

Variable dependiente

impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso.

Definición operacional de variables e indicadores

Tabla 1. Operacionalización de variables e indicadores

OPERACIONALIZACION DE VARIABLES E INDICADORES				
VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENCION	INDICADORES
<p>Identificación de variables</p> <p>Variables para la hipótesis general</p> <p>Variable independiente</p> <p>Consideraciones técnicas de perforacion y de inyección de lechada de cemento.</p> <p>Variable dependiente</p> <p>Impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso.</p> <p>Variables para la hipótesis específicas</p> <p>Variables para la hipótesis específica a.</p> <p>Variable independiente</p> <p>Consideraciones técnicas de perforacion.</p> <p>Variable dependiente</p> <p>impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso.</p> <p>Variables para la hipótesis específica b</p> <p>Variable independiente</p> <p>consideraciones técnicas de inyección de lechada de cemento.</p> <p>Variable dependiente</p> <p>impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso.</p>	<p>Inyección de cemento</p> <p>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 rotoperCUSión a través de las cuales se bombea lechada a determinadas presiones según las condiciones geológicas del medio</p>	<p>En la investigación sobre técnicas de la perforacion e inyección de lechada de cemento en los taladros, veremos si estos parámetros influyen directamente en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Técnicas de perforacion de taladros - inyección de lechada de cemento en los taladros 	<ul style="list-style-type: none"> - N° de taladros -Tiempo de inyección -Volumen -Presión -Caudal -Temperatura -Sedimentación -Calidad -Resistencia a la compresión 3,7,14,28 días

CAPITULO III

METODOLOGIA Y TECNICAS DE INVESTIGACION

3.1. Tipo de investigación

La investigación será de tipo APLICADA porque vamos determinar técnicas de la perforación e inyección de lechada de cemento en los taladros, si influyen directamente en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m (BAENA , 2017).

3.2. Nivel de investigación

El nivel, será de un nivel descriptivo, explicativo; porque vamos a describir y explicar aspectos sobre impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso (HERNANDEZ, FERNANDES, BAPTISTA, 2014)

3.3. Características de la investigación

En el desarrollo de la investigación descriptiva de tipo explicativo, es con la finalidad de describir la perforación e inyección de lechada de cemento en los taladros con la finalidad de formular alternativas de solución y mejorar el nivel de impermeabilización

3.4. Métodos de investigación

El método de investigación será el método científico basado en los métodos específicos inductivo-deductivo; (BERNAL, 2010) .

3.5. Diseño de investigación

Aplicaremos el diseño no experimental porque no haremos ninguna variación de las variables de la investigación solo nos avocaremos a observar y recoger datos (SANCHEZ, REYES, MEJIA, 2018)

3.6. Población y muestra

3.6.1. Población

La población está constituida por todos los frentes en donde se emplea la técnica de perforación e inyección en la presa de relaves en la Compañía Minera Antamina.

3.6.2. Muestra

Se determinó tomar como muestra específica el proyecto pantalla de impermeabilización blanket estribo derecho, izquierdo cota 4135 presa de relaves Compañía Minera Antamina.

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.7.1. Técnicas

- Observación directa
- Análisis de documentos
- Técnicas de perforación
- Técnicas de Inyección de lechada de cemento

3.7.2. Instrumentos

Tenemos:

- Guía de observación
- Ficha de registro
- Perforadoras
- Equipo mezclador
- Tuberías:
- Mangueras

- Medidores de gasto
- Manómetros
- Tanque de aforo.
- Obturador.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para poder obtener los resultados y conclusiones ordenaremos los datos de campo en base a la información recogida usando Excel, Word.

3.9. Orientación ética

Durante el desarrollo de la investigación tendremos presente la parte de la Ética que todo profesional debe mantener considerando la veracidad, honestidad, confidencialidad y respeto a las instituciones y personas.

CAPITULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Presentación, análisis e interpretación de resultados

4.1.1. Características físicas del sitio de la presa Antamina

Ubicación y características morfológicas

El sitio de presa se caracteriza por laderas medianamente inclinadas entre los 30 y 45°, con amplia exposición rocosa, depósitos morrénicos y coberturas de topsoil. La Fotografía 15 ilustra los rasgos morfológicos del sitio de presa.

Figura 15. *Panorámica desde la margen derecha mostrando los rasgos morfológicos característicos del sitio de presa*



Modelo geológico-geotécnico

De acuerdo con la información geológico-geotécnica suministrada por Antamina y elaborada por Golder Associates S.A. (Golder), la fundación rocosa del estribo derecho está conformada por una intercalación de estratos calizos y limolíticos con buzamiento fuerte al norte, que se ven afectados por un sistema de fallamiento inverso con inclinación al sureste. Dicha secuencia litológica está asociada con la formación Celendín Inferior (Golder, 2012).

Por su parte, el estribo izquierdo presenta principalmente rocas estratificadas con dominio argilítico de buzamiento fuerte al suroeste, asociadas con la formación Celendín Superior. Exhiben aparentemente una menor afectación por fallamiento geológico (Golder, 2012).

Modelo hidrogeológico

Del informe de inyección de la fase IV (Golder, 2012) se desprende que las fallas geológicas que afectan ambos estribos ejercen importantes controles sobre la permeabilidad, y por tanto sobre la hidrogeología de las fundaciones.

En el caso del estribo derecho se suma el proceso de desarrollo de disolución y formación de estructuras kársticas, notorias en los afloramientos rocosos y que inciden de manera determinante en la conductividad hidráulica del macizo.

Es importante señalar con base en el registro de niveles piezométricos del sitio de la presa (Golder, 2014), el efecto nulo o muy atenuado del ascenso del nivel del embalse a lo largo de los años en relación con los niveles de agua de los piezómetros ubicados tanto aguas abajo como aguas arriba de la presa. Esta condición mostrada en el registro de piezómetros, sugiere que el vaso de agua del embalse no ejerce modificación o control significativo en el sistema hidrogeológico natural del entorno.

Estructura geológica y necesidades de impermeabilización

Las experiencias de fases anteriores corroboran que la permeabilidad del terreno está gobernada por las estructuras geológicas (tectónicas y sedimentarias) representadas por fallas geológicas, contactos estratigráficos y los juegos de fracturación.

El mayor grado de desarrollo y presencia frecuencial de estos elementos determinan la probabilidad de una mayor conductividad hidráulica del macizo rocoso, que a su vez incide en el establecimiento de las redes de flujo y el sentido de movimiento de las aguas subterráneas, las cuales tienen su recarga fundamentalmente a partir de la precipitación pluvial.

El tránsito de las aguas meteóricas a través del sistema fisurado del macizo rocoso a lo largo del tiempo geológico, ha sido precursor del proceso de disolución kárstica acentuado en los estratos de composición más rica en carbonato de calcio (rocas calizas y lutitas calcáreas). De esta forma, las estructuras geológicas dieron lugar a pasos comunicantes de mayor jerarquía dentro del terreno, que configuran entramados tridimensionales los cuales pueden tener interconexión con pequeñas cavernas de distribución aleatoria.

Finalmente, tanto las estructuras geológicas permeables como los diferentes conductos de disolución kárstica, representan los objetivos de relleno y sellado con las suspensiones de agua-cemento a utilizar en la inyección de las pantallas, las cuales tienen como función el bloqueo y contención de filtraciones de fluidos provenientes del relave. En esencia, la matriz de las diferentes variedades litológicas no presenta requerimientos de inyección, considerándose para efectos prácticos, como impermeable.

4.1.2. Parámetros técnicos de diseño de la fase V

A continuación, se mencionan los diferentes aspectos que determinan o sirvieron de base para garantizar el aseguramiento de la calidad del programa de inyecciones de impermeabilización de la fase V.

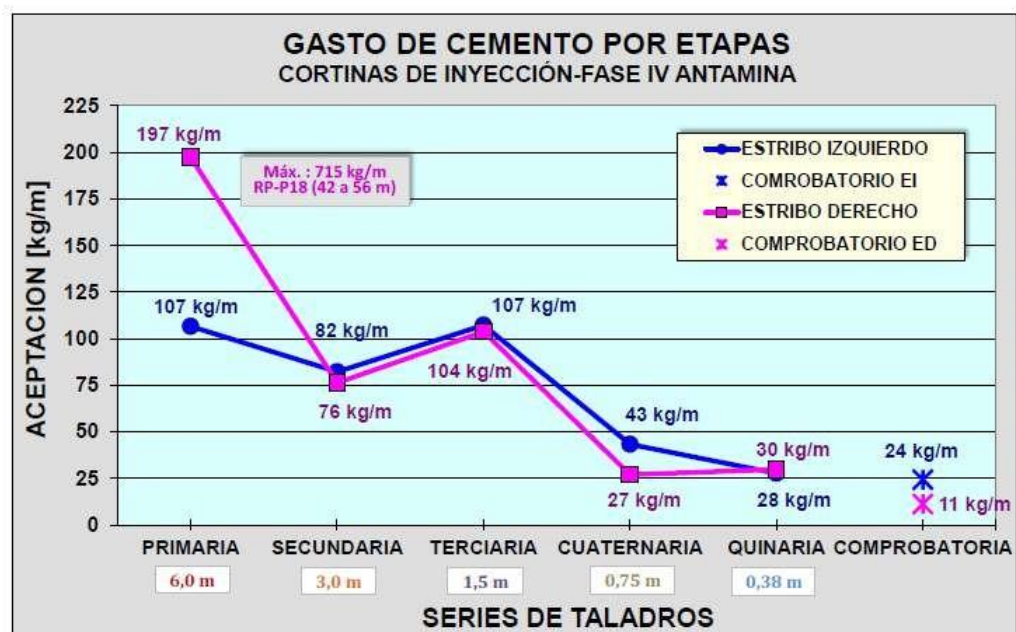
Generalidades relevantes del programa de inyecciones de la fase IV

De acuerdo con los valores Lugeon y los consumos de cemento documentados a lo largo del programa de inyecciones de la fase IV (Golder, 2012), además del conocimiento geológico obtenido de afloramientos del sitio de la presa, permitieron identificar los siguientes elementos geoestructurales como los objetivos del tratamiento con inyecciones:

- Juegos o familias de fracturas tectónicas;
- Fracturas de relajación / descompresión;
- Zonas de falla y fracturación asociada;
- Conductos y/o cavidades kársticas.

La siguiente representación gráfica ilustra la evolución global en el consumo de cemento inyectado por serie de taladros de la fase IV. En dicho gráfico se aprecia que la margen derecha demandó un mayor consumo de cemento en la serie primaria, con un valor máximo de 715 kg/m registrado entre los 42 y 56 m del taladro RP-P 18. En las subsecuentes series, los consumos tendieron a igualarse entre la margen derecha y la izquierda, con la particularidad de registrar un incremento significativo en el consumo de cemento al pasar de la serie secundaria a la terciaria

Figura 16. Evolución global del consumo de cemento registrado en la Fase IV.



En relación con el patrón en la evolución de los consumos, cabe resaltar el siguiente párrafo del informe fuente (Golder, 2012): “El patrón de alto consumo en primarias, bajo en secundarias, alto en terciarias y bajo en cuaternarias, es reconocido como característico de la inyección de una fundación kárstica, en donde el sellado de conductos tortuosos abiertos con alto consumo de cemento en una secuencia de perforaciones de inyección dada, no se repite en la secuencia de perforaciones de orden inmediato superior”.

Definición y geometría de las pantallas de impermeabilización

En las fases anteriores, Golder optó por pantallas de impermeabilización unilineales, con disposición de taladros verticales. La extensión de las pantallas es limitada por la proyección en las respectivas laderas de cada estribo y la elevación de los recrecimientos.

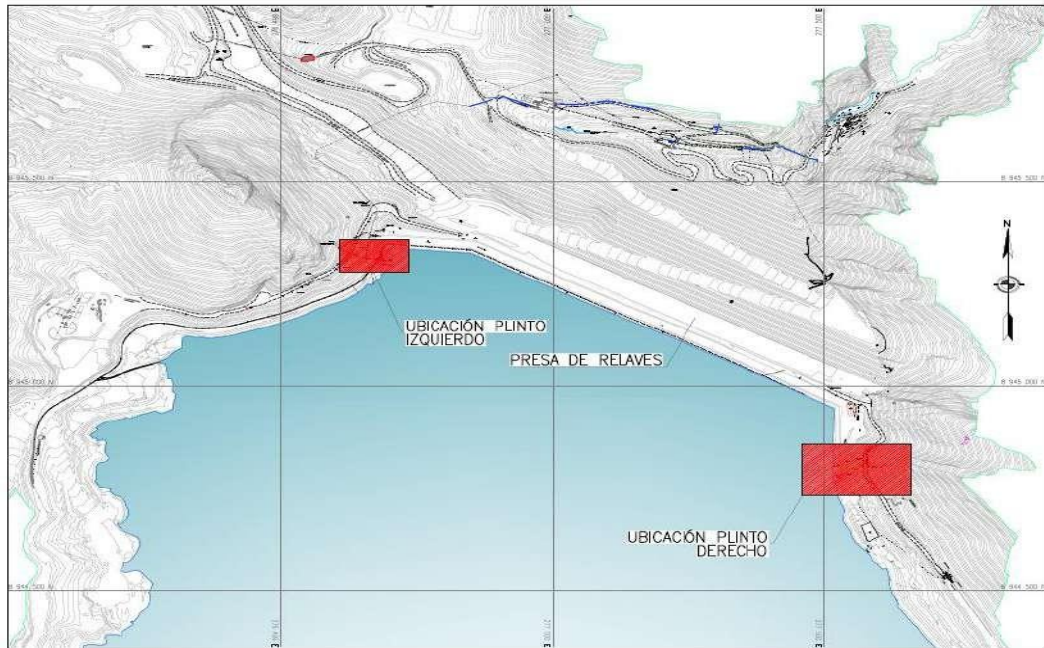
Preliminarmente, para la fase V se contempló continuidad geométrica en ambos estribos ver figura 17. No obstante, durante la ejecución del segmento horizontal de la pantalla del estribo derecho (cota 4,105 msnm), Golder corrigió la geometría de una línea a tres líneas de taladros. Al final, la modificación aceptada consistió en una pantalla conformada por una línea principal y una auxiliar ubicada aguas abajo, más otra línea de taladros de consolidación situada en el límite de aguas arriba del plinto.

La profundidad de los taladros primarios de la pantalla central del estribo izquierdo se estableció en 80 m, en tanto que para el estribo derecho, en 125 m, tal como se describe en los planos antes citados.

En el caso de la pantalla del estribo derecho, especifica una profundidad de los taladros primarios ubicados en las líneas exteriores (aguas arriba y aguas abajo) de 60 m. Sin embargo, Golder determinó finalmente que solo la línea de aguas abajo complementaríala pantalla de impermeabilización con taladros primarios y secundarios a 60 m, mientras que en la línea de aguas arriba fueron propuestos taladros de consolidación de 20 m de profundidad, los cuales debían ser ejecutables

en series primaria y secundaria de conformidad con los consumos registrados en los taladros primarios de la línea central.

Figura 17. Ubicación de la pantalla del estribo derecho e izquierdo



PLANTA GENERAL
1:5,000

Separación entre series progresivas y longitud de los tramos de inyección

Para los dos estribos se definió una separación entre los taladros de serie primaria de 8 m con cierre progresivo de las series subsecuentes.

En general, se utilizaron tramos con longitudes de 10 m para la inyección de las diferentes series de taladros de las pantallas de ambos estribos.

Equipos y técnica de perforación

Las especificaciones técnicas para perforaciones e inyecciones determina la ejecución de taladros exploratorios en cada margen con equipo de diamante HQ y recuperación de los testigos de roca. Para el proceso productivo de los taladros de inyección y consolidación se especificó un equipo rotopercusivo, empleando agua limpia como fluido de perforación y sin permitir la perforación en seco. La desviación medida al final de cada taladro no debía ser mayor al 5%,

Para efectos de perforar sobre la superficie de los plintos, SMCG empleó un sistema de plataformas metálicas movilizadas sobre rondines guiados por rieles, que se hacían subir o bajar mediante winches de gran capacidad. En la etapa final del tratamiento y con el fin de acortar tiempos constructivos en ambos estribos, las plataformas móviles fueron complementadas con plataformas estáticas armadas con estructura tubular. La fotografías 18, 19 muestran aspectos relacionados con las plataformas y las máquinas perforadoras utilizadas en el proceso.

La Supervisión debió hacer cumplir un tiempo mínimo de fragua de ocho horas entre tramos inyectados y tramos en proceso de perforación separados a menos de 8 m.

Figura 18. *Plataformas vistas desde la parte superior del plinto derecho*



En la fase V al igual que en la fase anterior, fue necesario implementar el procedimiento de lavado a presión en aquellos tramos donde fueron identificadas estructuras geológicas (fallas o conductos kársticos) con presencia importante de rellenos finos, normalmente compuestos por limos normalmente arrastrados desde horizontes superiores por los flujos de agua en percolación asociados con las precipitaciones.

Figura 19. *Plataforma móvil estacionada en la parte superior del plinto izquierdo*



Pruebas de agua a presión tipo Lugeon

Las pruebas de agua a presión tuvieron como propósito diagnosticar la permeabilidad natural del terreno durante la ejecución de la serie primaria y anticipar los requerimientos de inyectabilidad de las fundaciones rocosas de cada estribo. Subsecuentemente, por medio de este tipo de prueba se evaluó la evolución del tratamiento de inyecciones y alcance del valor especificado del cierre o acabado de la impermeabilización (2 uL).

Se ejecutaron en tramos de 10 m armonizados con la inyección con el fin de facilitar las correlaciones e interpretaciones entre la permeabilidad y el consumo de cemento. Las mismas se llevaron a cabo normalmente contra fondo y en cinco estadios de presión con duración de cinco minutos cada uno. La presión de las pruebas se definió con base en un factor de 0.2 bar por metro vertical de profundidad referida al punto medio de cada tramo ensayado, teniéndose como límite máximo de presión 8 bar.

El caudal fue administrado y regulado con uso de bombas de cavitación progresiva marca Moyno. En las Fotografías 20, 21 se observa parte de los equipos utilizados para ejecutar las pruebas de agua a presión tipo Lugeon.

Figura 20. Bomba Moyno y tanque almacenador de agua utilizados para las pruebas de permeabilidad.



Figura 21. Equipo registrador en proceso de verificación de la calibración presión/caudal



Metodología de inyección

La metodología de inyección consistió en el espesamiento progresivo de la lechada agua-cemento, de acuerdo con el esquema de volúmenes y respuesta de presiones establecido en las especificaciones técnicas.

El esquema de cambios de lechadas y volúmenes de inyección en función de la evolución de la presión utilizado en la fase V es mostrado en el Anexo 2.

Como requerimiento específico del control rutinario de las inyecciones, fue necesario que el sistema de adquisición de datos en tiempo real mostrara a escalas adecuadas en la pantalla del computador los gráficos P-Q y el valor Lugeon de inyección contra el tiempo.

Indistintamente del estribo, la presión de inyección fue definida a partir del factor de 0.5 bar por metro vertical de profundidad referida al punto medio de cada tramo a inyectar, fijando un límite máximo de 20 bar.

Aunque en fases anteriores, los contratistas prefirieron aplicar la técnica de inyección en tramos ascendentes para ejecutar los tratamientos, en el caso de la fase V la Supervisión planteó la conveniencia de priorizar la inyección en tramos descendentes en las series primarias y secundarias, con particular interés en todos aquellos tramos con valores altos de permeabilidad (mayores a 5 uL) y con afectación de fallamiento geológico (intenso fracturamiento y presencia de finos) o con estructuras kársticas. De igual manera, ante la presencia de una pérdida completa de fluido de perforación o inestabilidad geológica de las paredes del taladro que pudieran generar el atrapamiento de la sarta de perforación, la Supervisión daba la aprobación para que se ejecutara la inyección y así garantizar el avance seguro del taladro.

Similar a las pruebas de agua a presión, los datos de presión / caudal de las inyecciones se obtuvieron digitalmente con lecturas a cada segundo, según se muestra en la Fotografía 22. El caudal fue administrado y regulado con uso de bombas de cavitación progresiva marca Moyno. La preparación de las mezclas se llevó a cabo en centrales de inyección integradas por mezcladores y agitadores fabricados por ChemGrout Inc. Una ilustración de la central No. 1 situada en el estribo derecho se aprecia en la Fotografía 23.

Figura 22. *Monitoreo y adquisición de datos en tiempo real*

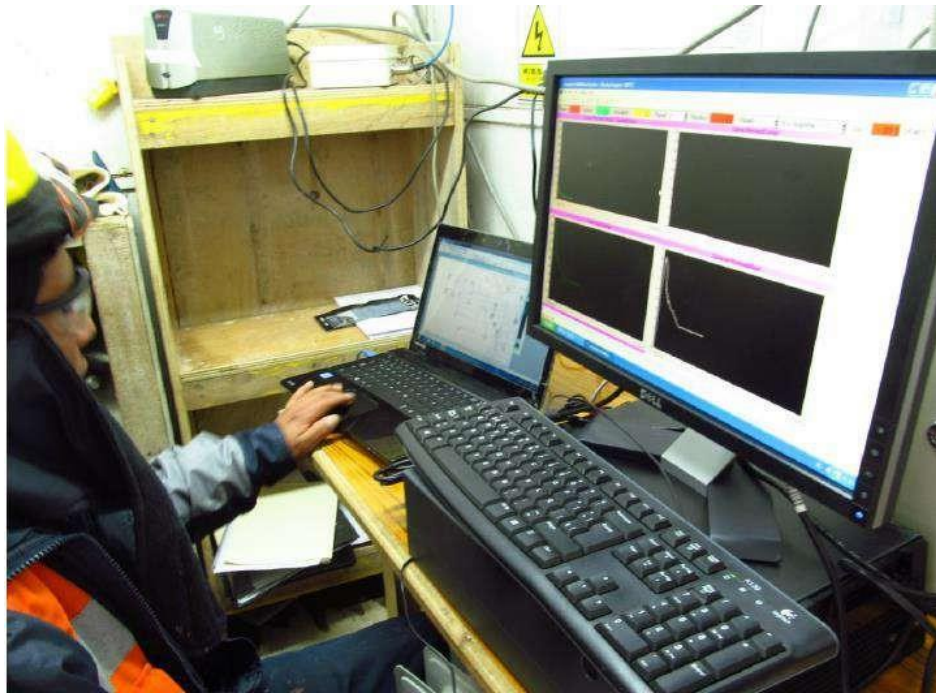


Figura 23. *Plataforma de inyección propiedad de Geotecnia Peruana utilizada en la Central No. 1*



Lechadas de inyección y características físico-reológicas

La supervisión propuso la adquisición de productos disponibles en el mercado local, optándose por fluidificante Euco 37 y antilavado Euco AWA, conservándose el acelerante original Pozzolith NC 534.

Una vez adquiridos los aditivos y trasladados a campo, se inició el diseño a escala natural las nuevas mezclas que consistió de cinco tipos de lechadas elaboradas con agua, cemento y los aditivos químicos,

Posteriormente, se especificó dos tipos de mezclas especiales de características muy viscosas, que fueron reformuladas por un tema de aceptación de fluidez. La Tabla 2 contiene el detalle composicional de las lechadas empleadas a lo largo del programa de inyecciones y sus rangos de aceptación de los parámetros físico-reológicos básicos.

Tabla 2. *Diseño de lechadas empleadas en la fase V*

Mezcla	Relación A/C	Aditivos químicos			Rangos de aceptación			
		EUCO 37	EUCO AWA	Pozzolith NC534	Fluidez Marsh (seg)	Densidad (gr/cm ³)	Prensa Filtro API (min ^{-1/2})	Sediment. (%)
A	0.95:1	1.30%	0.15%	1.00%	30-33	1.54 ± 0.03	< 0.05	< 5
B	0.90:1	1.30%	0.30%	1.00%	35-38	1.56 ± 0.03	< 0.05	< 5
C	0.70:1	1.30%	0.60%	-	45-50	1.66 ± 0.04	< 0.04	< 3
D	0.55:1	1.30%	0.60%	-	60-75	1.78 ± 0.04	< 0.04	< 3
E	0.50:1	1.30%	1.20%	-	90-105	1.82 ± 0.04	< 0.04	< 3
F	0.50:1	0.50%	1.30%	-	115-130	ND	< 0.04	< 3
G	0.50:1	0.20%	1.85%	-	> 150	ND	< 0.04	< 3

Para la preparación de lechadas, se utilizó cemento Portland puzolánico tipo IP de marca Atlas, fabricado por Cementos Lima S.A.A. (Cementos Lima). De acuerdo con los informes de calidad de la cementera, dicho producto se caracterizó por una fineza Blaine normalmente superior a 4,500 cm²/g y cumplimiento de las normas NTP 334.090 y ASTM C-595. La entrega en campo se hizo en bolsas de 42.5 kg de producto fresco, con empaque de tres pliegos de papel.

Valor residual de permeabilidad

Las especificaciones técnicas definieron como valor residual o cut off de la conductividad hidráulica un valor de dos unidades Lugeon, equivalentes aproximadamente a 1×10^{-7} m/s, sin ningún ensayo individual mayor a 4 uL.

Parámetros generales de control de calidad

Los requerimientos de control de calidad del programa de inyecciones se describieron en la Tabla 3. Fundamentalmente, la Supervisión ejerció control sobre los aspectos y frecuencias presentados en la siguiente tabla:

Tabla 3. Requerimientos de control de calidad fase V

Aspecto controlado	Ensayo y criterio	Frecuencia
Ubicación y magnitudes	Levantamiento topográfico de la boca del taladro.	Cada taladro
Calibración de equipos	Verificación de calibración de transductores de presión y manómetros.	Una vez por semana comparando con un manómetro de referencia.
	Verificación de calibración de caudalímetros.	Una vez por semana con aforo volumétrico
Mezcla de inyección		
Fluidez	Cono de Marsh.	Una cada 10 tandas y en cada cambio de tipo de mezcla.
Densidad	Balanza de lodos.	Una cada 10 tandas y en cada cambio de tipo de mezcla.
Sedimentación	Medida en un periodo de 2 horas hasta obtener agua clara en la parte superior de una probeta de 500 mL.	Una cada turno de trabajo por central de inyección y para cada tipo de lechada.
Temperatura	Medición en agua de mezclado y lechada con termómetro digital.	Una cada 10 tandas y en cada cambio de tipo de mezcla.
Filtrado por presión	Prensa filtro API.	Una cada turno de trabajo por central de inyección y para cada tipo de lechada.
Tiempo de fragua	Corte de veleta.	Una cada mezcla propuesta durante los ensayos iniciales o cuando se realice algún ajuste de los diseños de mezcla.
Resistencia compresión	Seis cilindros de 2" x 4".	Una cada mezcla propuesta durante los ensayos iniciales o cuando se realice algún ajuste de los diseños de mezcla.
Inyección de lechada y ejecución de pruebas de agua a presión tipo Lugeon		
Monitoreo de los valores de caudal, presión, volumen y Lugeon de inyección	Monitoreo en tiempo real y adquisición de datos computarizada.	Monitoreo visual continuo.

4.2. Discusión de resultados

4.2.1. Resultados técnicos de la etapa constructiva

En este capítulo se hace el recuento y análisis de los resultados generales del programa de inyecciones, obtenidos conforme fueron completadas cada una de las series de taladros que determinaron la evolución y el acabado final de las pantallas de impermeabilización de cada estribo de la presa.

Los diferentes formatos usados para documentar los controles de calidad y resultados del proceso de perforación e inyección de cada tramo tratado, fueron compilados en los anexos 2 y 3, correspondiendo respectivamente con la información del estribo derecho y el estribo izquierdo. Los formatos están ordenados secuencialmente por serie y número taladro para cada uno de los estribos, siendo sus contenidos temáticos los siguientes:

- Reporte diario de perforación;
- Registro de perforación;
- Log de perforación;
- Fotos de los testigos de perforación;
- Ensayos de permeabilidad (Lugeon);
- Reporte de presión;
- Reporte diario de inyecciones;
- Resumen de perforación Lugeon e inyección;
- Reporte de ensayos de campo sobre lechadas.

Por otra parte, las figuras (los planos) 24, 25, permiten apreciar respectivamente la ubicación y las geometrías de las pantallas de ambos estribos.

Figura 24. Estribo derecho vista 1, distribución de cortina de inyecciones - planta

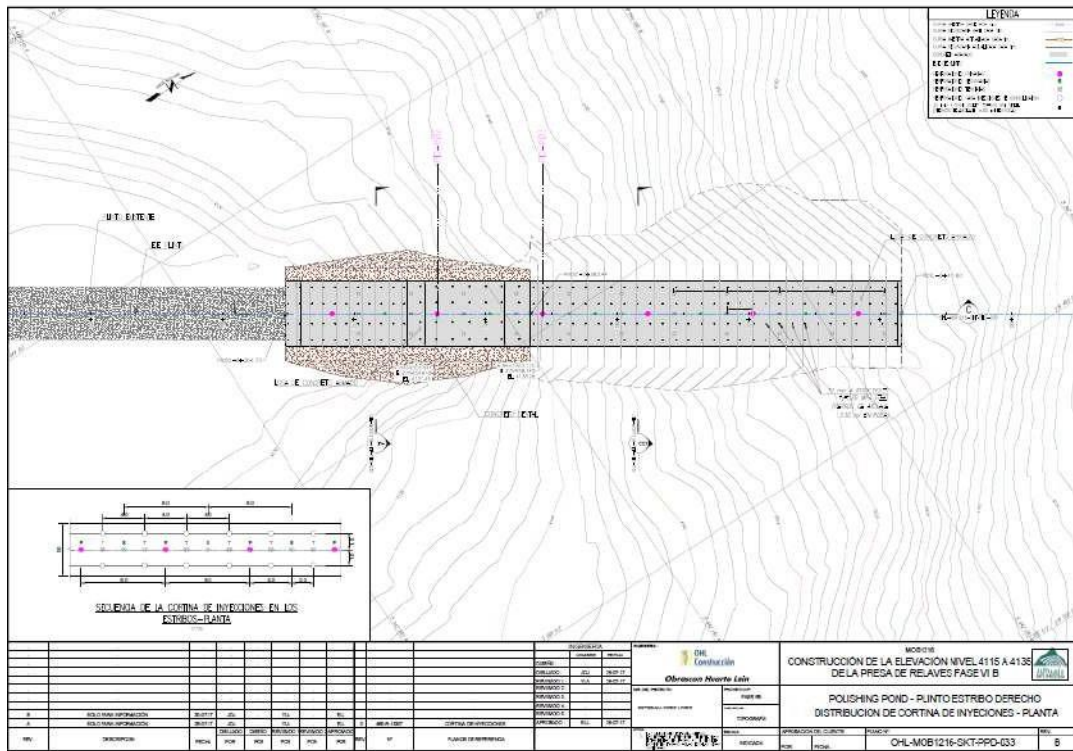
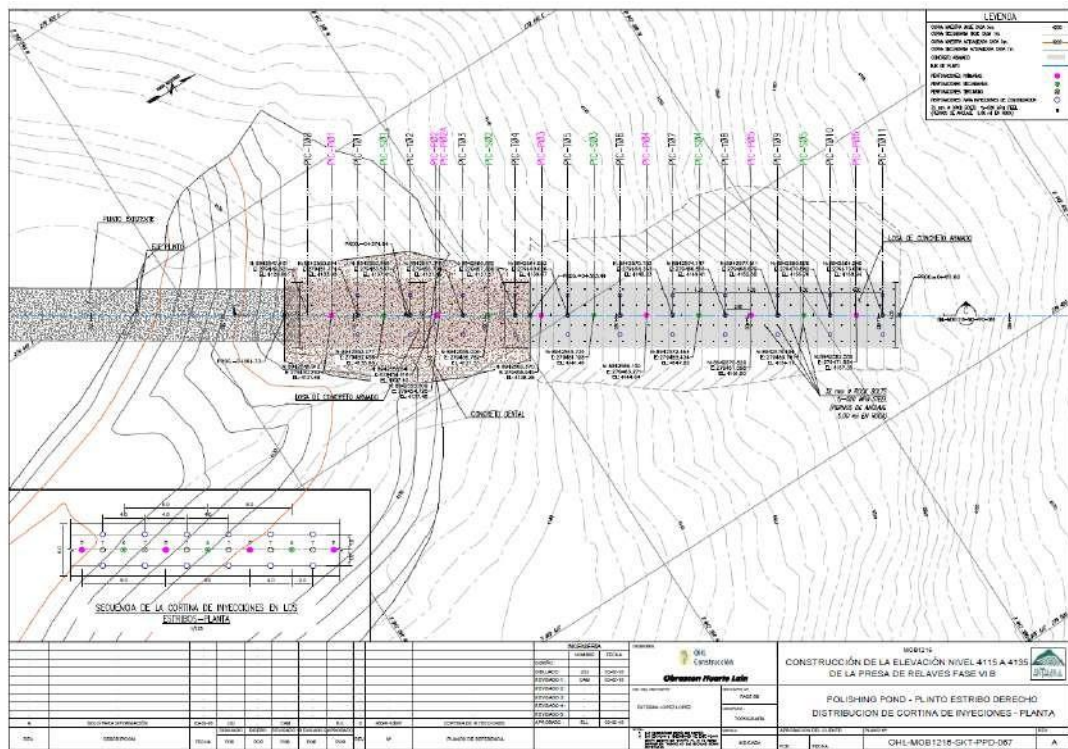
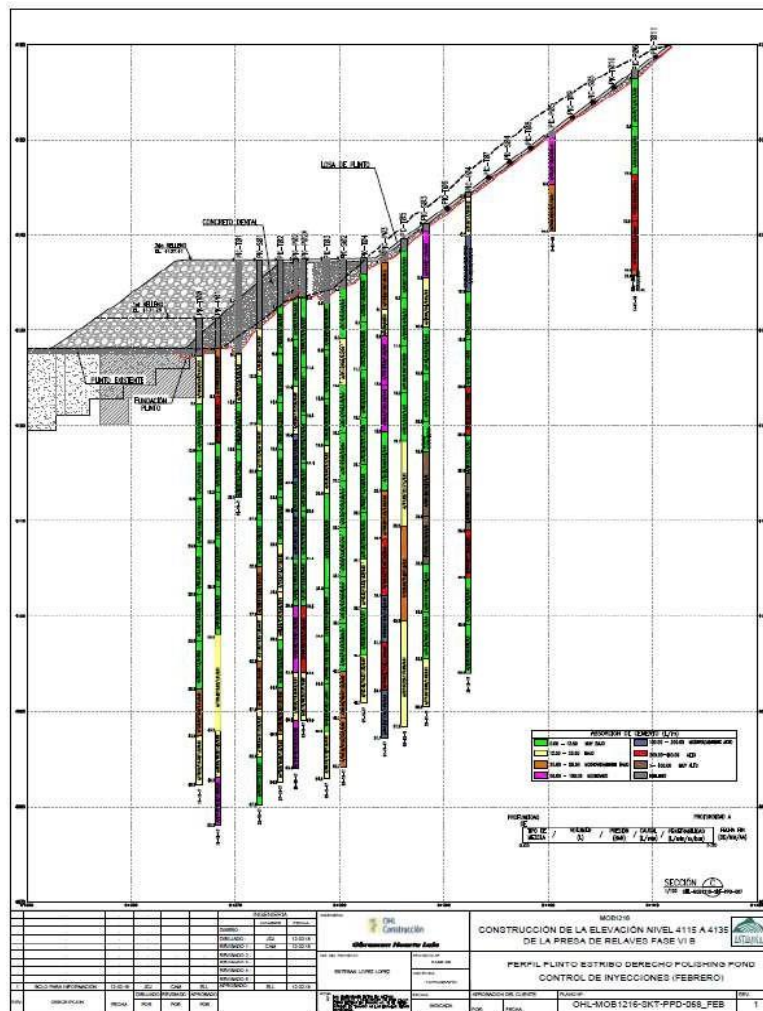


Figura 25. Estribo derecho vista2, distribución de cortina de inyecciones - planta



En el perfil del (plano) figura 26 se describen los consumos de cemento unitario en kilogramos por metro para cada tramo inyectado. En tales perfiles se hace uso de cinco rangos de consumos unitarios de cemento, los cuales son codificados según una gradación de colores fríos a colores cálidos. Esta gradación representa la variación de consumos bajos a altos, donde el amarillo determina el valor de referencia de 155 kg/m o su equivalente de 200 L/m, para tramos que justifican la necesidad de taladros terciarios o de orden superior en cualquier lado del taladro secundario existente.

Figura 26. Control de eyecciones



Estribo derecho

La pantalla de impermeabilización del estribo derecho estuvo configurada por una cortina principal o de línea central, complementada por una cortina auxiliar

situada en la línea de aguas abajo del plinto y una línea de taladros de consolidación ubicada aguas arriba. Las profundidades especificadas fueron de 125 m en roca para los taladros de la línea central, de 60 m para los de la cortina auxiliar y de 20 m cuando se tratara de taladros de consolidación.

Cortina principal o de línea central

La pantalla principal o de línea central del estribo derecho estuvo compuesta geoméricamente por dos secciones; una inferior de aproximadamente 15 m de longitud con disposición horizontal referida a la cota 4,105 msnm y conformada por la estructura inclinada del plinto, con longitud cercana a 30 m y comprendida entre las cotas 4,105 y 4,120 msnm. Las fotografías 4-1 y 4-2 ilustran la configuración del plinto y condiciones del terreno típicas del estribo derecho.

Figura 27. *Vista de perfil mostrando la pendiente de la ladera y el camino de acceso a la base del plinto*



Figura 28. Configuración del plinto y condiciones del terreno propias del estribo derecho



La pantalla de impermeabilización fue culminada con un total de 32 taladros que sumaron 3,500 m de perforación en roca, en los que se inyectaron poco más de 263 toneladas métricas de cemento, para un gasto promedio de 75.2 kg/m. La Tabla 4 muestra los metrajes de perforación y consumos de cemento parciales demandados en la ejecución de la pantalla del estribo derecho.

Tabla 4. Metrajes y consumos de cemento de la pantalla principal estribo derecho

Series de taladros	Perforación			Inyección			
	Número	Longitud perforada (m)	Relación metraje (%)	Gasto de cemento (kg)	Relación consumo (%)	Consumo unitario (kg/m)	Reducción progresiva (%)
Primaria	5	625.2	17.9	143,739.3	54.0	229.9	-
Secundaria	5	639.8	18.3	75,941.4	27.0	118.7	48.4
Terciaria	10	1,237.1	35.4	30,599.9	12.5	24.7	79.2
Cuatemaria	5	611.9	17.5	9,448.2	3.6	15.4	37.6
Quinaria	2	92.1	2.6	606.5	0.2	6.6	57.3
Comprobatoria	5	293.5	8.4	6,926.6	2.6	23.6	-258.4
Promedios	32	3,499.5	100.0	267,262.1	100.0	76.4	66.8

Evolución del cierre progresivo de la cortina principal

La cortina central evolucionó hasta la serie quinaria y correspondientes taladros de comprobación. No obstante, el cierre o impermeabilización se logró fundamentalmente mediante la progresión de las series primaria, secundaria y terciaria, según se describe a continuación.

Serie Primaria

La serie primaria estuvo compuesta por cinco taladros que suman una longitud perforada en roca de 628.5 m que representa un 18% del metraje total, según describe la Tabla 4-1. El gasto de cemento en primarias alcanzó poco más de 144 t del total de las 267 t, es decir que consumió el 54% de todo el cemento inyectado en el estribo derecho a lo largo de la fase V.

El consumo unitario de cemento en esta serie alcanzó los 230 kg/m (poco más de cinco sacos), con un valor máximo de 2,326 kg/m (cerca de 55 sacos) documentado en el tramo de 43 a 53 m del taladro RP-P23. Los taladros RP-P22, RP-P 23 y RP-P 24, registraron los mayores gastos de cemento en tramos comprendidos entre los 0 y los 67 m.

El tratamiento de inyecciones inició el 3 de enero con la perforación del taladro RP-P22, el cual presentó consumos de más de 1,000 kg/m entre los 56 y 67 m de profundidad. Este taladro fue perforado parcialmente en tramos de 5 m de longitud, más la experiencia obtenida permitió reajustar a tramos de 10 m, valor empleado con normalidad en las inyecciones de ambos estribos hasta el final del proceso.

De las observaciones hechas se desprende que el alto consumo registrado en el tramo de 43 a 53 m del taladro RP-P23, fue distribuido a través de un entramado tridimensional de conductos kársticos, cuya inyección fue clave para la reducción significativa de la permeabilidad natural de la fundación rocosa a nivel de serie primaria y que favoreció la difusión de lechadas espesas a distancias superiores a los 35 m, según fue comprobado con la comunicación al taladro RP-

P26. Al final se perforó e inyectó el taladro definitorio RP-P23B, el cual registró consumos normalmente bajos menores a un saco de cemento por metro, a excepción de los tramos de 63 a 73 m y de 23 a 33 m que tuvieron consumos respectivos de 528 y 351 kg/m, siempre asociados a la zona de alto consumo afectada por conductos kársticos.

En la prueba realizada, resultó que la aceptación de agua en los primeros estadios no superó los 34 L/min; sin embargo, al alcanzar la presión efectiva de 7.6 bar en el estadio tres, sucedió que el caudal aumentó súbitamente a un valor de 165 L/min, manteniéndose alto hasta el final de la prueba con clara evidencia de un proceso erosivo. Consecuentemente, la permeabilidad que inició con un valor inferior a 5 uL, alcanzó al término de la prueba 34 uL. Cuando se procedió a evaluar el testigo de roca, fue patente que el comportamiento de la prueba obedeció a la erosión progresiva del relleno limoso contenido en una estructura de disolución kárstica cuya abertura se estimó en 30 cm, según se ilustra en las Fotografías 29 y 30.

Figura 29. El testigo del tramo 33-43 m muestra una buena calidad física de la roca caliza



Figura 30. *Detalle de la estructura kárstica con relleno limoso ubicada entre los 37.67 y 37.98*



Las fotografías 31 y 32 muestran los rasgos de las estructuras kársticas expuestas en la fundación del plinto derecho, los cuales fueron interpretadas como un entramado de conductos hidráulicamente comunicantes controlado por fallas estratigráficas, la cual fue presentada por la Supervisión cuando se hacía la preparación de la fundación del terreno para vaciar el bloque de concreto dental 3 (cota superior 4,110.4 msnm).

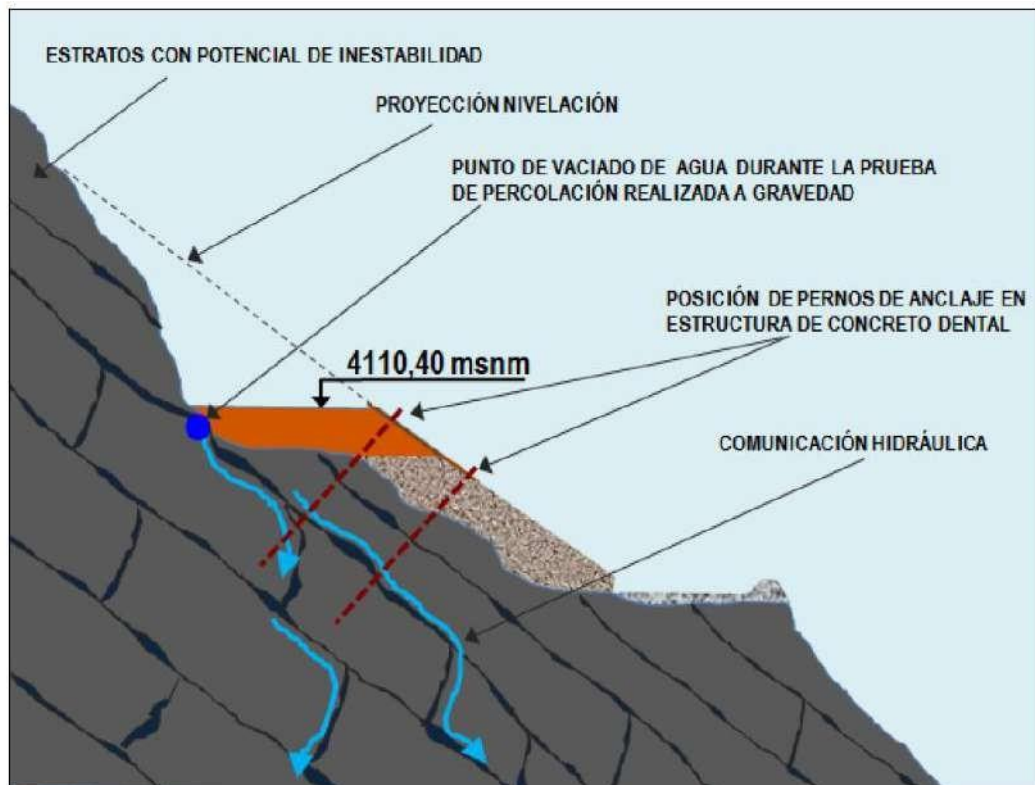
Figura 31. *Muestra la geometría del sumidero kárstico que aceptó un caudal de 60 L/min a gravedad*



Figura 32. Plano de la falla estratigráfica con 45° de inclinación que da origen al conducto kárstico



Figura 33. Interpretación de entramado kárstico del estribo derecho



Serie Secundaria

Se perforaron cinco taladros secundarios para una longitud efectiva de 639.8 m, equivalente al 18% del metraje total, según describe la Tabla 4. El gasto de

cemento en secundarias totalizó 76 t, que representa el 28% de todo el cemento inyectado.

De acuerdo con la Tabla 4 el consumo unitario de cemento llegó a 119 kg/m (cerca de 2.8 sacos), con un valor máximo de 462 kg/m (casi 11 sacos) registrados en el tramo de 31 a 47 m del taladro RP-S25, en el cual se dio by-pass y fue necesario subir el obturador.

Los consumos unitarios globales entre las series primaria y la secundaria reportan una reducción del 48.4%, valor que demuestra un buen resultado en la evolución del cierre de la impermeabilización.

Serie Terciaria

En la serie terciaria se perforaron 10 taladros; es decir, el equivalente de primarias y secundarias. Sumaron 1,237.1 m correspondientes al 35.4% del metraje total ejecutado en el estribo derecho, tal como muestra la Tabla 4. El gasto de cemento de la serie terciaria fue de casi 31 t, que significan el 11.4% del cemento inyectado en el estribo derecho.

La Tabla 4 señala un consumo unitario de cemento de 24.7 kg/m (poco más de medio saco), con un valor máximo aislado de 437 kg/m (poco más de 10 sacos) referido al tramo situado entre los 127 y 140 m del taladro RP-T21- 22.

Entre la serie secundaria y la terciaria se determinó una reducción progresiva del consumo de cemento en 79.2%, la más alta registrada a lo largo del programa de inyecciones del estribo derecho.

Los resultados en la reducción del consumo de cemento de 0.6 sacos por metro de perforación, ya definían una evolución del cierre de la impermeabilización respaldada por valores Lugeon mayoritariamente inferiores al valor residual especificado (2 uL).

Serie Cuaternaria

Representada por cinco taladros, los cuales sumaron una longitud efectiva de inyección de 611.9 m equivalentes al 17.5% del metraje total del estribo derecho

(Tabla 4). El gasto de cemento de la serie cuaternaria fue de 9.4 t, las cuales representan apenas el 3.5% del cemento colocado en la fundación rocosa del estribo derecho.

La Tabla 4 documenta un consumo unitario de cemento de 15.4 kg/m (0.4 sacos), con un valor máximo aislado de 343 kg/m (poco más de ocho sacos) obtenido en el tramo de 35 a 45 m del taladro RP-Q24-2425. Este consumo elevado presentado en forma aislada en la serie cuaternaria fue relacionado con el conducto kárstico que permitió la comunicación entre los taladros primarios RP-P23 y RP-P26.

En este caso, la reducción progresiva del consumo de cemento entre la serie terciaria y la cuaternaria fue de 37.6%.

Serie Quinaria

Se ejecutaron tan solo dos taladros de serie quinaria y con profundidades aproximadas de 50 m. Ambas tuvieron el objetivo de evaluar el cierre del tramo de 35 a 45 m del taladro cuaternario RP-Q24-2425, que reportó un consumo de 343 kg/m asociado con la inyección del conducto kárstico que facilitó la comunicación detectada al inicio del tratamiento entre los taladros primarios RP-P23 y RP-P26.

La longitud inyectada de los dos taladros sumó 92.1 m, la cual representa el 2.6% del metraje total de la pantalla. El consumo de cemento fue el más bajo registrado durante el tratamiento: apenas de 6.6 kg/m. Por otra parte, la reducción progresiva del consumo de cemento entre la serie cuaternaria y la quinaria fue de 57.3%. Los resultados están resumidos en la Tabla 4.

Sección en plinto (entre elevaciones 4,110 y 4,120 msnm)

El cubrimiento de la mayor parte de la pantalla de impermeabilización de la sección del plinto, se ejecutó durante el mes de junio de 2024. La fundación rocosa presentó en general condiciones de baja aceptación, que favorecieron un avance rápido de las inyecciones de las diferentes series de taladros. El 2 de julio finalizó la inyección del taladro quinario RP-K242425-2425, que determinó el inicio del segundo taladro comprobatorio programado para el estribo derecho, denominado RP-WT8.

El taladro comprobatorio fue ubicado entre los taladros RP-P24 y RP- T24-24, proyectado con inclinación de 73° referida a la horizontal y una profundidad de 42 m en sentido este (contra ladera). Su objetivo consistió en evaluar los tramos de alto consumo situados entre los 35 y 53 m de profundidad de los taladros RP-P25, RP-P26 y RP-S25. Los valores comprobatorios de permeabilidad y aceptación de cemento cumplieron con la expectativa del cierre especificado.

Los taladros comprobatorios RP-WT7 y RP-WT8 sumaron 90.45 m de perforación efectiva de inyección; sin embargo, tal como se comentó anteriormente a la serie de comprobación del estribo derecho fueron adicionados los taladros: RP-Q22-2223, RP-Q2223-23B y RP-Q23B-2323, alcanzando una longitud en conjunto de 293.5 m que equivale al 2.6% de todo el metraje de la pantalla. El consumo unitario de cemento de los cinco taladros alcanzó los 23.6 kg/m (0.6 sacos), significando un incremento respecto al promedio de la serie quinario del 258% (Tabla 4). Sobre dicho valor, conviene resaltar los consumos particulares obtenidos en los dos tramos del taladro RP- WT7 y un tramo del RP-Q23B-2323, pero que al final el consumo unitario global de todos los taladros considerados apenas supera el medio saco de cemento por metro inyectado, valor completamente aceptable como criterio de cierre.

Cortina auxiliar (línea de taladros de aguas abajo)

La pantalla auxiliar estuvo configurada únicamente por taladros primarios con separación de 8 m y secundarios en cierre progresivo, proyectados verticalmente a una profundidad máxima de 60 m. Se dispuso perforar en tramos de 10 m con pruebas de agua a criterio y metodología de inyección de conformidad con las especificaciones técnicas 104-11416-433- ESP-C-10 y las instrucciones complementarias emitidas por la Supervisión.

Las labores de perforación e inyección se iniciaron el 31 de marzo y finalizaron el 2 de mayo de 2024 con el acabado del taladro RD-CS2525.

Los resultados de metrajes perforados y análisis estadísticos del tratamiento de impermeabilización auxiliar se describen en la siguiente tabla.

Tabla 5. Metrajes y consumos de cemento de la pantalla auxiliar estribo derecho.

Series de taladros	Perforación			Inyección			
	Número	Longitud perforada (m)	Relación metraje (%)	Gasto de cemento (kg)	Relación consumo (%)	Consumo unitario (kg/m)	Reducción progresiva (%)
Primaria	5	305.6	45.5	29,386.3	76.1	96.2	-
Secundaria	6	365.5	54.5	9,246.7	23.9	25.3	73.7
Totales promedio	11	671.1	100.0	38,633	100.0	57.57	40.1

Los resultados globales muestran que los requerimientos de inyección de la línea de inyección de la pantalla auxiliar resultaron en general bajos, tal como constatan los datos de consumo de cemento representados en la tabla 5. La serie de taladros primarios registró un consumo unitario de 96 kg/m, es decir, poco más de dos sacos de cemento por metro de perforación.

En los secundarios el consumo bajó a 25.3 kg/m (poco más de medio saco), correspondiendo con una reducción progresiva de 73.7%. El mayor consumo de cemento coincidió con el primer tramo del taladro RD-CP2324, el cual alcanzó los 569 kg/m. De manera general, los resultados de aceptación de cemento y de permeabilidad confirmaron el cierre de la impermeabilización de la cortina auxiliar.

Tratamiento de consolidación (línea de taladros de aguas arriba)

Se dispuso ejecutar una línea de taladros de consolidación ubicada aguas arriba de la pantalla principal, la cual alcanzaría una profundidad máxima de 20 m y separación mínima de 4 m. Dado que las perforaciones primarias y secundarias de la sección horizontal ya habían finalizado sin requerimientos de consolidación al momento de emitirse el instructivo, su aplicabilidad sería efectivo para el proceso de inyección a realizar a lo largo de toda la estructura del plinto derecho.

Finalmente, la evolución de los consumos de cemento de los tramos superiores de los taladros primarios perforados en el plinto y la ausencia de fugas

significativas de lechada a la superficie, hicieron innecesario la ejecución de taladros de consolidación.

Estribo izquierdo

En el estribo izquierdo, la pantalla de impermeabilización consistió de una línea central configurada por tres taladros primarios, delimitada en ambos costados por líneas de taladros de consolidación, las profundidades especificadas fueron de 80 m en roca para los taladros de la línea central y de 10 m para taladros de consolidación. En general, la perforación se realizó en tramos de 10 m de longitud, disposición que tuvo como uno de sus objetivos aligerar el proceso constructivo a fin de cumplir con la fecha de finalización programada

Figura 34. *Vista panorámica del estribo izquierdo mostrando las plataformas instaladas sobre el plinto*



Figura 35. Costado de aguas arriba del plinto que ilustra la inclinación del mismo



El programa de inyecciones dio inicio el día 26 de marzo de 2024 con la perforación del taladro primario LP-P32, el cual tuvo un carácter exploratorio. El proceso de ejecución de la pantalla, incluidas las consolidaciones, requirió de tres meses y medio, llegando a concluir el 12 de julio con el acabado del taladro comprobatorio RP-WT 3. El documento 12401-MTE2113-RCA-067, emitido por la Supervisión el 12 de julio de 2024, da por finalizado el proceso de perforaciones e inyecciones del estribo izquierdo,

Para lograr el cierre definitivo de la pantalla de impermeabilización central del estribo izquierdo fue necesario perforar un total de 32 taladros, los cuales contabilizaron 1,689 m efectivos de perforación y un gasto de cemento de casi 192 t.

El consumo unitario global de la pantalla fue de 113.5 kg/m. La Tabla 6 muestra el resumen de metrajes de perforación y consumos de cemento parciales requeridos en el proceso constructivo descrito.

Tabla 6. Metrajes y consumos de cemento de la pantalla principal estribo izquierdo

Series de taladros	Perforación			Inyección			
	Número	Longitud perforada (m)	Relación metraje (%)	Gasto de cemento (kg)	Relación consumo (%)	Consumo unitario (kg/m)	Reducción progresiva (%)
Primaria	3	243.2	6.9	74,754.9	39.0	307.4	-
Secundaria	4	324.1	9.3	31,684.9	17.0	100.7	68.2
Terciaria	7	416.4	11.9	53,695.0	29.2	134.2	-31.9
Series de taladros	Perforación			Inyección			
	Número	Longitud perforada (m)	Relación metraje (%)	Gasto de cemento (kg)	Relación consumo (%)	Consumo unitario (kg/m)	Reducción progresiva (%)
Cuatemaria	11	457.8	13.1	18,924.9	9.9	41.6	67.9
Quinaria	6	169.9	4.9	8,714.6	4.4	49.5	-24.1
Comprobatoria	1	76.9	2.2	893.7	0.5	11.6	77.3
Promedios	32	1,689.0	100.0	188,668.1	100.0	111.8	63,6

Evolución del cierre progresivo

Al igual que en el estribo derecho, el cierre de la pantalla del estribo izquierdo requirió de taladros quinarios, concluyendo definitivamente con la ejecución de un taladro comprobatorio. No obstante, la impermeabilización de esta pantalla se logró hasta los taladros terciarios, registrándose en las tres primeras series los más altos consumos de cemento globales de todo el programa de inyecciones de la fase V.

Serie Primaria

La serie primaria estuvo compuesta por tres taladros que suman una longitud efectiva perforada de 628.5 m, valor representativo del 6.9% del metraje total, según se describe en la Tabla 6. El gasto de cemento en primarias alcanzó cerca de las 75 t del total de las 189 t, consumo que equivale al 40% del tonelaje inyectado en la fundación rocosa del estribo izquierdo.

De la inyección de los taladros primarios se obtuvo un consumo unitario de cemento de 307 kg/m (poco más de siete sacos), con un valor máximo de 1,276 kg/m (30 sacos) documentado en el tramo de 34 a 44 m del taladro LP- P32. Este

taladro registró la mayor cantidad de tramos con alto consumo de cemento: tres tramos por encima de los 600 kg/m.

De acuerdo con el análisis de los testigos recuperados en los taladros primarios, fue posible diferenciar una cobertura de unos 20 m de espesor, compuesta por roca de condiciones físicas regulares a malas, siendo frecuente la fracturación intensa y el intemperismo avanzado asociado con rellenos limosos de color pardo.

Las fotografías 36 y 37 ilustran las condiciones geológicas de las dos zonas que caracterizan el perfil estratigráfico de la fundación tratada.

En general, los mayores consumos se documentaron en tramos ubicados por encima de los 45 m de profundidad y normalmente asociados con la presencia en el testigo de fracturas con evidencias de intemperismo y disolución kárstica. Las cuales fueron asociadas en afloramiento con fracturas alineadas con el rumbo de los estratos de roca, con orientación predominante de $330^{\circ}/150^{\circ}$ e inclinación fuerte de entre 60° y 80° al suroeste. Este sistema de fracturación tectónico-estratigráfico controló en gran medida los derrames de lechada en la superficie ocurridos durante el progreso de las inyecciones.

Figura 36. *Fracturamiento con intemperismo fuerte típico de la zona superficial del taladro LP-P32*



Figura 37. Núcleo del LP-P30 mostrando una condición que es característica hallar a profundidad



Por último, cabe resaltar el rasgo particular que presentan las rocas del estribo izquierdo cuando son expuestas a la intemperie, ya sea a nivel de afloramientos o de testigos. Tales rocas, constituidas principalmente por estratos limolíticos con intercalación de calizas y lutitas calcáreas, son susceptibles en especial las limolitas a un proceso de rápida degradación como resultado de la pérdida de confinamiento, teniendo como consecuencia la fragmentación y disgregación de la matriz. El proceso descrito se ilustra en las fotografías 38 y 39

Figura 38. *Limonita deleznable expuesta en talud generado por la excavación de la fundación*



Figura 39. *Proceso de degradación que sufren los testigos de roca luego de tres o cuatro días de extraídos*



Serie Secundaria

Se perforaron cuatro taladros secundarios para una longitud efectiva de 324.1 m, equivalente al 9.3% del metraje total, según describe la Tabla 6. El gasto de cemento en secundarias totalizó casi 32 t, que representan el 17% de todo el cemento inyectado.

De acuerdo con la Tabla 6 el consumo unitario de cemento fue de 97.8 kg/m (2.3 sacos), con un valor máximo de 708 kg/m (casi 17 sacos) registrados en el tramo de 25 a 35 m del taladro LP-S32. Interesa resaltar los resultados del taladro LP-S30 y LP-S33, los cuales reportaron consumos en general bajos.

Los consumos unitarios globales entre las series primaria y la secundaria reportan una reducción del 68.2%, valor superior al registrado en el proceso de inyecciones del estribo derecho.

Serie Terciaria

En la serie terciaria se perforaron siete taladros; es decir, el equivalente de primarias y secundarias juntas. Totalizaron una longitud de 416.4 m, correspondientes al 11.9% del metraje total ejecutado en el estribo izquierdo, tal como muestra la Tabla 6. El gasto de cemento de la serie terciaria fue de casi 53 t, que significan el 28.5% del cemento inyectado en el estribo derecho

El consumo unitario de cemento alcanzó los 129 kg/m (tres sacos), valor significativamente superior al de la serie terciaria del estribo derecho. El consumo máximo fue de 2,195 kg/m (52 sacos) referido al tramo situado entre los 20 y 30 m del taladro LP-T31-32. Este consumo se consideró un caso excepcional al tratarse de un taladro de serie terciaria, que superó el máximo medido en primarias del estribo izquierdo y casi igualado al máximo del estribo derecho (2,326 kg/m).

Serie Cuaternaria

La mayor cantidad de taladros perforados en el estribo izquierdo pertenecen a la serie cuaternaria con un total de 11 taladros. Éstos sumaron una longitud efectiva de inyección de 458 m, equivalentes al 13.1% del metraje total perforado

(Tabla 6). El gasto de cemento de la serie cuaternaria fue de 19 t, las cuales representan el 10% del cemento inyectado en la fundación.

La Tabla 6 refiere un consumo unitario de cemento de 41.3 kg/m (próximo a un saco), con un valor máximo aislado de 379 kg/m (casi nueve sacos) registrado en el tramo de 65 a 70 m del taladro LP-Q29-2930.

Con base en el análisis del testigo de roca, se determinó que esta inyección actuó fundamentalmente sobre una fractura aislada localizada a los 67.5 m de profundidad, según ilustran las fotografías 40 y 41. Dicha fractura es plana y presenta un claro halo de decoloración y oxidación de la matriz de la roca, que se relaciona con un paso de agua activo. La abertura se estimó entre 5 y 10 mm, de tal forma que el volumen inyectado aseguró una difusión apreciable de la lechada respecto al eje del taladro, garantizando un adecuado sellado e impermeabilización de la misma.

En este caso, la reducción progresiva del consumo de cemento entre la serie terciaria y la cuaternaria fue de 68%.

Figura 40. Testigo de roca afectado por fracturas inducidas por el torque de la máquina



Figura 41. *Fractura planar ubicada a 67.50 m que fue objeto de la inyección del tramo 65 a 75 m*



Serie Quinaria

La serie quinaria incluyó seis taladros, todas con profundidades someras menores a 45 m. La longitud inyectada de los seis taladros sumó 169.9 m, la cual representa el 4.9% del metraje total de la pantalla. El gasto de cemento de la serie quinaria fue de 8.9 t, para un 4.6% de todo el cemento colocado en la fundación.

El consumo unitario registró 51.3 kg/m, valor que experimentó un ligero incremento de 24.1% con respecto al consumo promedio de las cuaternarias. Los resultados están resumidos en la Tabla 4.

Serie Comprobatoria

En el estribo izquierdo se programó la ejecución de un solo taladro comprobatorio definido como LP-WT3, el cual fue ubicado aproximadamente a una separación de 20 cm aguas arriba del taladro LP-Q32-3233. Este taladro se perforó con una inclinación cercana a los 73° respecto a la horizontal, orientada con un

rumbo paralelo al plano de la cortina en sentido y dirigida con dirección al este (hacia el embalse). Su longitud total fue de 80 m, suficientes para explorar gran parte de la pantalla donde se registraron los mayores consumos de cemento. La perforación del taladro inició el 08 de julio y su inyección completa finalizó el 12 de julio de 2024.

Taladros de consolidación

En relación con el estribo derecho, se dispuso dos filas de taladros para tratamiento de consolidación superficial, ubicadas a cada lado del eje central de la pantalla. Fueron proyectados con una profundidad de 10 m y su ejecución estuvo condicionada a tomas superiores a 200 L/m en los taladros primarios, o bien por ocurrencia reiterada de fugas de lechada a la superficie.

Al ejecutar los taladros primarios, la Supervisión confirmó la necesidad del tratamiento de consolidación, por cuanto se presentaron consumos importantes en los tramos iniciales de los taladros LP-P30 y LP-P32, además repetidas fugas a la superficie. Aunque se especificó una profundidad de 10 m, los taladros de consolidación alcanzaron en su mayoría los 15 m con el propósito de reducir las fugas de lechada.

Al término de las consolidaciones, los consumos de cemento en las dos líneas de consolidación resultaron inferiores a 155 kg/m, excepto por el tramo ubicado entre los 7 y los 14 m del taladro LD-CP3132 de la línea de aguas abajo. En total se perforaron 100 m en roca, obteniéndose un gasto de cemento de 7,642 kg y un consumo unitario global de 76.6 kg/m.

Análisis e interpretación de resultados globales

El análisis estadístico de los datos de los parámetros fundamentales de permeabilidad y aceptación de cemento, permite interpretar los rasgos característicos que rigieron y controlaron el desarrollo evolutivo del programa de inyecciones, los cuales finalmente confirman el alcance del grado de impermeabilización requerida en las especificaciones técnicas, según se comenta en los siguientes aspectos.

Permeabilidad versus consumo de cemento

De manera general, es posible afirmar que existe una buena correlación entre valores de permeabilidad altos (>10 uL) con consumos importantes de cemento que superan los 300 kg/m. En este caso particular, la aceptación alta de cemento está asociada con la interceptación de conductos kársticos abiertos que evidentemente poseen una elevada conductividad hidráulica, reflejada muchas veces por pérdida parcial o total del fluido de retorno de la perforación.

Por otra parte, los valores bajos de permeabilidad medidos en tramos con evidentes condiciones de roca sana, es decir, matriz inalterada y mínimas fracturas tectónicas (menos de tres fracturas cerradas), corresponden con inyecciones de consumos mínimos equivalentes con el llenado físico del taladro. Esto demuestra en parte, la mínima o nula sensibilidad al hidrofracturamiento de las rocas calizas del estribo derecho.

En los casos donde se presentaron permeabilidades bajas asociadas con altos consumos de lechada, tal aparente contradicción es posible explicarla por el efecto combinado de la presión de inyección y la respuesta físico mecánica débil de los rellenos blandos retenidos en las fracturas tectónicas, zonas de falla y conductos kársticos, que en una primera instancia resistieron o fueron parcialmente erosionados por las pruebas de agua.

Es normal que la presión de inyección supere la presión máxima empleada en el desarrollo de las pruebas de agua Lugeon. Por tal razón, presiones de inyección moderadas (comprendidas entre 10 y 20 bar) actuando sobre una lechada reológicamente penetrante, pueden incidir en discontinuidades que están selladas con rellenos blandos, provocando un “aparente” desplazamiento y súbito incremento en la aceptación de cemento.

Consumo de cemento vrs. profundidad

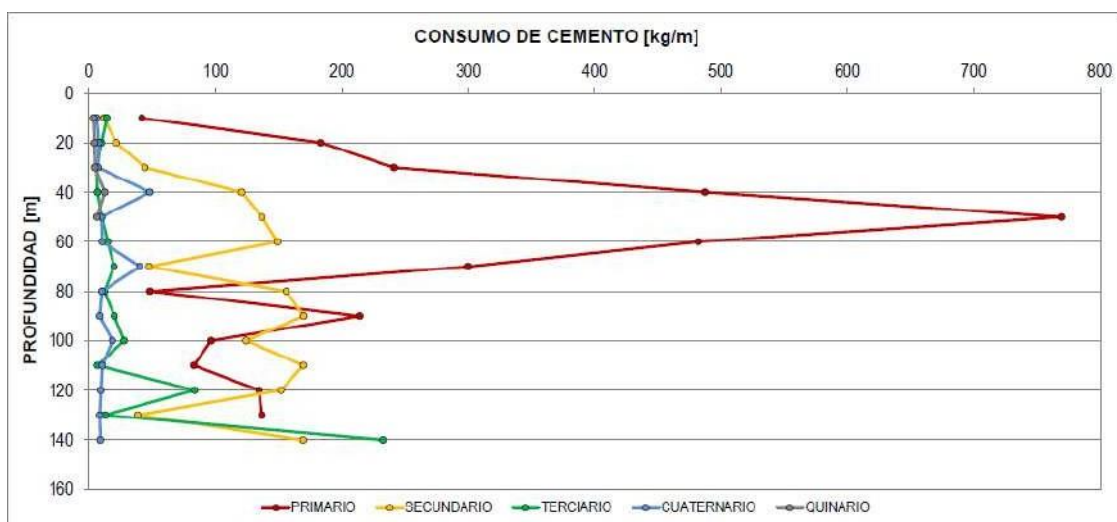
El análisis gráfico de los valores promedio de consumos de aceptación de cemento respecto a la profundidad del tratamiento, se presenta a continuación según cada estribo:

Análisis del estribo derecho

La figura 43 muestra claramente un alto consumo de cemento entre los 40 y los 70 m de profundidad, que estuvo asociado con los taladros RP-P22, RP-P23 y RP-P26. El resto de las series registraron consumos por debajo de los 200 kg/m, con comportamientos bimodales a trimodales, donde resaltan valores más elevados a profundidades entre los 80 y 140 m. Las series cuaternaria y quinaria, confirman una condición de sello.

Se considera que los patrones descritos corresponden bien con una evolución de cierre normal, la cual es influenciada por la distribución aleatoria de conductos kársticos, cuya frecuencia y grado de conductividad hidráulica son mayores a niveles someros del macizo rocoso como producto de la susceptibilidad de las rocas calizas al proceso de disolución que ocasiona las aguas meteóricas en percolación

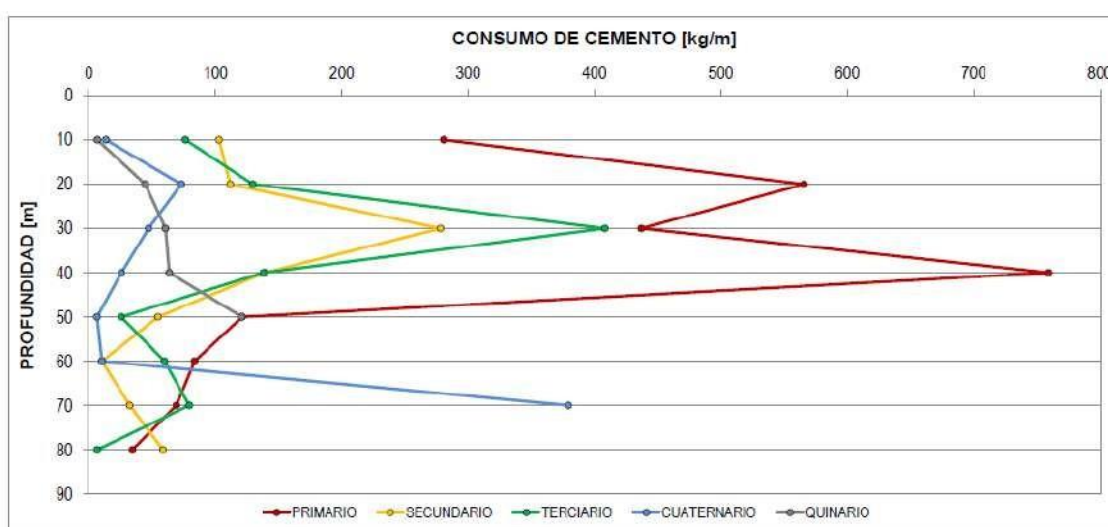
Figura 42. Consumo de cemento contra profundidad en estribo derecho



Análisis del estribo izquierdo

En cuanto al estribo izquierdo, el Gráfico 44 exhibe básicamente comportamientos bimodales cuyos máximos consumos en las tres series de orden menor se concentran sistemáticamente entre los 10 y los 40 m, donde los primarios prevalecen en consumo. Cabe destacar la inversión en el consumo que experimentó la serie terciaria en relación con la secundaria, la cual se debió básicamente al excepcional volumen injectado en el tramo de 20 a 30 m del taladro LP-T31-32.

Figura 43. Consumo de cemento contra profundidad en estribo derecho

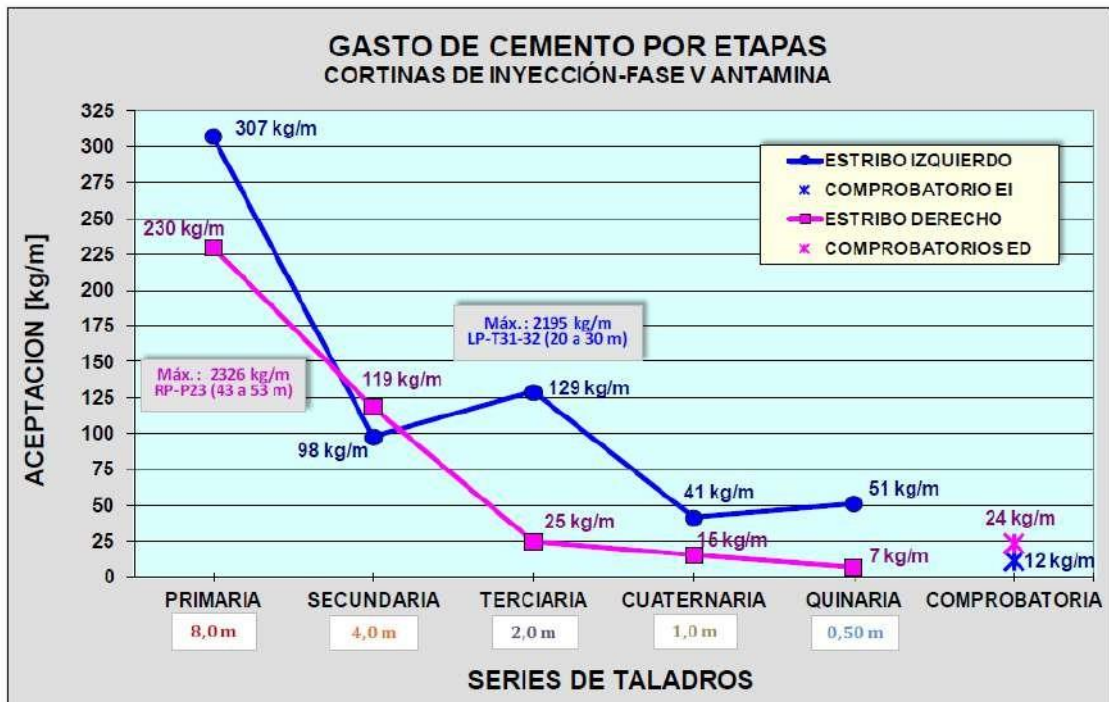


Por otra parte, la serie cuaternaria muestra un valor máximo a los 70 m, correspondiente con un único tramo de 5 m que aceptó 379 kg/m del taladro LP-Q29-2930

Análisis comparativo de la evolución en el consumo de cemento global

En las Tablas 4 y 5 se describieron los valores de consumos globales de cemento por cada serie de taladros para los estribos derecho e izquierdo respectivamente. A partir de dichos datos se elaboró el Gráfico 44, el cual muestra comparativamente la evolución estadística progresiva de los valores promedio globales del consumo de cemento de ambos estribos.

Figura 44. Evolución global del consumo de cemento registrado en la fase V



Del gráfico es posible apreciar dos diferentes patrones de evolución. En el caso del estribo derecho, es importante resaltar que la cantidad de datos obtenidos permiten una mejor representatividad estadística, en comparación con el menor metraje tratado en el estribo izquierdo, variable que incide parcialmente en el patrón resultante.

La margen derecha presenta un patrón perfectamente regular, el cual define dos rectas con pendientes bastante diferentes. El primer segmento, delineado por los consumos unitarios globales de las series de menor orden (primaria, secundaria y terciaria), posee un gradiente fuerte que implicó importantes reducciones en el consumo de cemento. El segundo segmento, aunque proporcionalmente tuvo porcentajes de reducción similares, sus consumos fueron bajos y determinaron la impermeabilización con los resultados de la serie terciaria.

En resumen, puede afirmarse que el sellado de los espacios abiertos principales y alcance de la impermeabilización de la fundación del estribo derecho, se logró con las inyecciones hechas desde los taladros primarios y secundarios, mientras que las series terciaria, cuaternaria y quinaria cumplieron una función de

simple verificación, con ataque y sellado de tramos abierto muy específicos. El ligero incremento en el consumo de los taladros de comprobación, ocurrió como resultado del proceso de desplazamiento y erosión de rellenos blandos (limosos) en fracturas aisladas bajo el efecto de presiones moderadas de inyección (entre 10 y 20 bar).

Por otra parte, el estribo izquierdo expuso un patrón irregular muy similar al obtenido de la inyección del estribo derecho en la fase IV . Es un patrón con una reducción significativa en el consumo al pasar de la serie primaria a la secundaria, más incrementa en 23 kg/m (cerca de un 33%) de la secundaria a la terciaria, luego vuelve a reducir de manera apreciable terciarias a cuaternarias; sin embargo, al cierre de quinarias crece de nuevo pero muy ligeramente en unos 8 kg/m (19%). La perforación de comprobación LP-WT3 promedió un consumo unitario de 12 kg/m (menos de medio saco), valor bajo que junto con los resultados favorables de permeabilidad confirman el cierre de la impermeabilización de la pantalla del estribo izquierdo, la cual se da por finalizada el 12 de julio de 2024.

Análisis comparativo de la evolución de la permeabilidad global

Las pruebas de agua a presión tipo Lugeon se implementaron de manera casi sistemática en las series primaria y secundaria de ambos estribos, con el fin de evaluar la permeabilidad natural de las fundaciones rocosas. Las pruebas se continuaron haciendo sistemáticamente en las series terciarias y cuaternarias de la sección horizontal de la pantalla del estribo derecho. Sin embargo, para los taladros de cortina tratados durante los meses de junio y julio, las pruebas de agua fueron hechas solo en tramos donde por características geológicas lo justificaron, siendo un requerimiento de especificaciones ejecutarlas sistemáticamente en los taladros comprobatorios como criterio base para definir los cierres de la impermeabilización.

De conformidad con los resultados de los valores Lugeon, en ambos estribos la permeabilidad evolucionó de manera progresiva desde los taladros primarios hasta los comprobatorios que definieron el cierre de la impermeabilización. La fundación del estribo derecho exhibió una permeabilidad natural más alta que el

izquierdo. Al final del tratamiento, la permeabilidad promedio residual medida en los taladros comprobatorios no superó una unidad Lugeon, con un valor máximo general de 1.5 uL registrado en la RP-WT8. La Tabla 7 resume los valores característicos de permeabilidad en condiciones de terreno natural y una vez lograda la impermeabilización según cada estribo.

Tabla 7. Resumen de permeabilidades promedio según estribo

Sector	Permeabilidad natural			Condición de cierre		
	Promedio (uL)	Datos	Máximo (uL)	Promedio (uL)	Datos	Máximo (uL)
Plinto derecho	14	73	267	0.3	9	1.5
Plinto izquierdo	8	36	70	0.1	8	0.5

Inyectabilidad en relación con las estructuras geológicas y karstsismo

Durante la ejecución de las excavaciones para preparación de las fundaciones y vaciado de los concretos dentales para construcción de los plintos, ya se había advertido diferencias entre los macizos rocosos de cada estribo de la presa, entre las que pudieron distinguirse: litológicas, geomecánicas, geoestructurales y grado de alterabilidad exógena, todos aspectos que tienen incidencia en la ejecución de un programa de inyecciones de impermeabilización. La Tabla 8 resalta los rasgos característicos de las rocas aflorantes en cada estribo.

Tabla 8. Comparación de los macizos rocosos del estribo derecho e izquierdo

Aspecto evaluado	Macizo rocoso	
	Estribo derecho	Estribo izquierdo
Estatigrafía	Secuencia de estratos calizos con intercalaciones lutitas calcáreas	Secuencia de estratos de limolitas con intercalaciones de calizas
Litología dominante	Calizas	Limolitas
Rcs (mpa)	50	20
Tendencia deformabilidad	Frágil	Dúctil
Degradabilidad de la litología dominante	Moderada (por intemperismo y disolución química)	Alta (por intemperismo y liberación de estrés tectónico)
Perfil de meteorización	Superficial	Hasta 40 m
Desarrollo kárstico	Potencial alto	Potencial limitado
Relajación gravitacional de ladera	Baja	Moderada
Afectación tectónica	Alta (influencia directa de falla geológica regional de rumbo noroeste-sureste)	Baja (fracturación dominante con rumbo noroeste-sureste)
Nivel freático	Deprimido	Deprimido
Clasificación geomecánica rmr (bieniaswski, 1989)	Media (clase iii)	Mala (clase iv)
Principales elementos inyectables	Cavernosidades pequeñas, conductos kársticos aislados, entramados kársticos, fallas geológicas y zonas fracturadas	Fracturas tectónicas con disolución kárstica, fallas geológicas pequeñas y zonas fracturadas

A continuación, serán descritos los rasgos geológicos principales que controlan la inyectabilidad de los macizos rocosos que constituyeron los objetivos de inyección de cada estribo.

Zonas de falla y conductos kársticos del estribo derecho

El estribo derecho está conformado básicamente por estratos de roca caliza decimétricos a métricos, intercalados con horizontes menos potentes de lutitas calcáreas y limolitas. La secuencia estratigráfica presenta un rumbo de 310°-130° con buzamiento de entre 35 y 60° en sentido suroeste (hacia el embalse). La roca caliza muestra una buena calidad física y geomecánica. En condición sana la caliza se caracteriza por un color gris oscuro, el cual varía a un color crema por efecto del intemperismo, según ilustra las Fotografías 45 y 46.

Figura 45. Roca caliza mostrando el contraste de coloración entre la roca sana y meteorizada



Figura 46. Testigo del taladro RP-S 22 que ilustra la condición de roca inalterada



A nivel de los afloramientos del estribo derecho se observa un importante control estructural ejercido por un sistema de fallamiento estratigráfico muy

persistente, el cual parece tener una influencia regional con rumbo noroeste-sureste. Durante el proceso de inyecciones se determinó que dicho sistema de fallas controla la conductividad hidráulica del macizo y en consecuencia de la formación de las principales estructuras de disolución kárstica, que en conjunto definen el potencial de inyectabilidad. Tales características son apreciables en las Fotografías 47 y 48.

Figura 47. *Falla geológica ubicada cerca de la parte superior de la estructura del plinto derecho*



Figura 48. *Pequeña caverna situada a unos 300 m al sureste del plinto del estribo derecho*



Según datos de laboratorio obtenidos a partir de muestras de testigos extraídos a diferentes profundidades del taladro secundario RP-S22, comprueban que la roca caliza en condición sana, tal como se muestra en la Fotografía 46, puede superar los 50 MPa de resistencia a la compresión simple. Esta característica geomecánica está asociada a una baja porosidad de la matriz, siendo impermeable para efectos prácticos de inyección. Asimismo, una baja porosidad implica menos susceptibilidad a la meteorización física y química.

Las fallas geológicas estratigráficas y los conductos de disolución kárstica asociados, fueron las discontinuidades del macizo rocoso responsables de las mayores aceptaciones de lechada registradas principalmente durante la inyección de los taladros RP-P22, RP-P23 y RP-P26.

Fracturas con intemperismo y disolución kárstica del estribo izquierdo

La fundación del estribo izquierdo muestra variantes litológicas y estructurales en relación con su equivalente del estribo derecho.

Litológicamente existe una mayor presencia de estratos limolíticos de color gris oscuro que intercalan con lutitas calcáreas de tonos más claros. A nivel estructural, la secuencia se encuentra buzando al suroeste (contra la ladera) con un ángulo fuerte superior a 70° y rumbo estratigráfico 330°-150°, un tanto similar al encontrado en la margen derecha. Las diferencias importantes consisten en una menor incidencia de fallamiento geológico y dominio de fracturas aisladas paralelas a la estratificación, las cuales controlan la conductividad hidráulica de este macizo.

En los afloramientos es evidente que las rocas limolíticas son altamente susceptibles al efecto de descompresión por pérdida de confinamiento, rasgo, ilustrado en las Fotografías 38 y 39. Por otra parte, ensayos de resistencia a la compresión simple realizados en el laboratorio de Antamina, dieron a conocer que las limolitas inalteradas poseen una resistencia 2.5 veces menor respecto a las calizas.

La estratificación, lo mismo que las fracturas, interceptan al eje del plinto casi transversalmente, disposición geométrica que incidió en la difusión de las lechadas inyectadas durante todo el proceso de impermeabilización de la fundación. La disposición geométrica de los estratos y el sistema de fracturación dominante, más la susceptibilidad de las limolitas a la degradación por descompresión, evidentemente han favorecido el efecto de relajación de la ladera en tiempo geológico, ocasionando que las discontinuidades se abran y el perfil de meteorización profundice (Fotografía 49).

El proceso descrito antes permite explicar los mayores volúmenes de lechada inyectada en tramos comprendidos entre los primeros 20 m

Figura 49. *Ilustra el perfil de meteorización típico del macizo rocoso del estribo izquierdo*



Figura 50. *Derrame recurrente de lechada ubicado hacia aguas abajo del plinto*



Aseguramiento de la calidad (QA)

La Supervisión dispuso del personal técnico y profesional suficiente para llevar a cabo las labores de seguimiento, registro y comprobación de la adecuada ejecución, de las pruebas, ensayos y mediciones de los valores paramétricos relacionados con el control y aseguramiento de la calidad.

De acuerdo con las especificaciones técnicas, se establecieron controles de calidad de los diversos parámetros citados en la Tabla 3 y cuyos resultados se comentan en el presente capítulo.

Ubicación topográfica y magnitudes de los taladros

Como parte del control de calidad del proceso de perforación de los taladros de inyección, se debe proceder con la ubicación y levantamiento de coordenadas de los respectivos puntos con asistencia de su personal de topografía. Una vez finalizado el taladro, o por solicitud directa de la Supervisión, personal de soporte topográfico de Antamina, procedía con la verificación de los levantamiento.

Verificación de equipos

De manera periódica y programada, los equipos electrónicos de adquisición de datos en tiempo real fueron sometidos a pruebas de verificación de calibración.

La frecuencia de evaluación se estableció en una vez por semana. Sin embargo, por criterio de la Supervisión los equipos podían ser sometidos a verificación cuando mostraran signos de imprecisión en las lecturas, o en su defecto, se solicitaba el retiro de la unidad en caso de comprobar un mal funcionamiento. Igualmente, por indicación de la Supervisión cualquier otro equipo o instrumento usado en el proceso de perforación e inyección podía ser objeto de algún tipo de prueba de funcionamiento o medida de precisión.

Mezclas de inyección

Los parámetros esenciales de control de calidad de las mezclas de inyección se realizaron de conformidad con los controles y frecuencias que se describen en la

Tabla 3. La formulación de los diferentes tipos de mezcla y sus límites de aceptación se basaron en las especificaciones complementarias.

Los resultados compilados a lo largo del programa de inyecciones se comentan en los siguientes ítems.

Fluidez

Tanto los ensayos para verificación de los diseños de mezclas, como del control rutinario de preparación de lechadas, documentan valores de fluidez consistentes con los rangos de aceptación descritos en la Tabla 2 y de conformidad con las especificaciones.

La fluidez es el parámetro que mostró más dispersión de valores, comportamiento justificado en función del espectro amplio de aspectos que la gobiernan.

Los valores situados fuera de los rangos de aceptación especificados, fueron rechazados por la Supervisión, y en el caso de las mezclas de producción debía proceder a su desecho.

Densidad

El parámetro de densidad para las diferentes mezclas de verificación y producción, documentan valores de densidad consistentes con los rangos de aceptación descritos en la Tabla 2 y de conformidad con las especificaciones.

Los pocos valores situados fuera de los rangos de aceptación especificados fueron rechazados por la Supervisión, y en el caso de las mezclas de producción debía proceder a su desecho.

Sedimentación

El parámetro de sedimentación para las diferentes mezclas de verificación y producción, documentan valores consistentes con el rango de aceptación del 5% tras dos horas de reposo. Es quizá uno de los parámetros más estable del control de calidad.

En general, todas las preparaciones cumplieron adecuadamente con el requerimiento de la sedimentación, rasgo que se relaciona con las buenas características composicionales y granulométricas del cemento utilizado

Tiempo de fragua

El conjunto de datos estadísticos de los tiempos de fragua es pequeño; sin embargo, los resultados obtenidos para las diferentes mezclas de verificación y producción, documentan valores de tiempo de fragua consistentes con el rango de aceptación descrito en la Tabla 2 y de conformidad con las especificaciones.

Filtrado API

El parámetro de filtrado API para las diferentes mezclas de verificación y producción, documentan valores de densidad consistentes con el rango de aceptación descrito en la Tabla 2 y de conformidad con las especificaciones. En general, los valores medidos cumplieron adecuadamente con el requerimiento especificado

Resistencia a la compresión simple

Los ensayos de resistencia a la compresión simple se llevaron a cabo en el laboratorio de materiales de Antamina. Se recolectaron especímenes en probetas cilíndricas y moldes cúbicos de bronce, para roturas a 7, 14 y 28 días.

En general, se considera que el valor de análisis es a 28 días, el cual guarda relación con la calidad del cemento y la durabilidad de los rellenos de cemento emplazados en las grietas de la fundación rocosa.

Los resultados obtenidos indican en general resistencias promedio superiores a los 12 MPa para la lechada tipo A, mientras que las lechadas con más contenido de cemento llegaron a desarrollar a los 28 días resistencias superiores a los 20 MPa. El valor mínimo registrado en los ensayos fue de 4.6 MPa para una lechada de diseño tipo A.

Control de temperaturas

A lo largo de todo el proceso de inyecciones debió monitorear las temperaturas del agua utilizada en la elaboración de las mezclas, así como la temperatura de las lechadas una vez preparadas. Por otra parte, se monitoreó constantemente la temperatura del cemento en los contenedores temperizados utilizados para el almacenamiento.

En el caso del agua para mezclado, bajo condiciones de temperaturas menores que 8°C la Supervisión solicitaba al Constructor a utilizar las termas, aunque la especificación técnica refería 6°C. En este sentido, se constató que cuando el agua alcanzaba temperaturas menores a los 8°C, la viscosidad de la mezcla preparada se alteraba.

Control de pH

Este parámetro se monitoreó durante la preparación de la lechada usada para inyectar los pernos de anclaje de los plintos. De acuerdo con los datos registrados, el agua de mezclado presentó un rango de acidez relativamente estable entre 8 y 8.5.

Control de verticalidad / orientación de taladros

Debía realizar ensayos de verticalidad / orientación según requerimientos de las especificaciones técnicas, o por solicitud directa de la Supervisión

De acuerdo con los resultados obtenidos, los desvíos registrados a profundidades de 80 a 140 m normalmente no superaron un metro, valor ubicado muy por debajo del 5% especificado. Los reportes de las mediciones realizadas se presentan en el los Anexos B1 y B2 junto con el registro histórico de datos de cada taladro

Control de nivel de agua en taladros

En base a las especificaciones técnicas se monitoreó con la frecuencia necesaria el nivel de agua en cada taladro, con el fin de calcular las presiones

efectivas en las pruebas de agua y para la definición de la presión de rechazo de las inyecciones.

Los datos de los niveles están contenidos en los diferentes formatos de pruebas de agua e inyección que están compilados en los Anexos 3.

Proceso de inyección de lechada y ejecución de las pruebas de agua a presión

La ejecución de las inyecciones y las pruebas de agua, fueron objeto de una estricta supervisión de calidad. Quedaron ampliamente documentadas las diferentes problemáticas que se experimentó con sus equipos de adquisición de datos, las cuales impactaron de manera seria el programa de inyecciones, a tal punto que se debió replantear la fecha de finalización en más de una oportunidad.

Además, se sumaron las interferencias causadas por las tormentas eléctricas y las suspensiones de las inyecciones ordenadas por la Gerencia de Aguas & Relaves, que forzaron en incontables ocasiones a detener el proceso constructivo a pesar de las consecuencias técnicas y de calidad asociadas.

No obstante, las situaciones descritas fueron resueltas o superadas, y al final los resultados obtenidos confirmaron el adecuado cumplimiento del grado de impermeabilización especificado.

CONCLUSIONES

1. El 13 de enero de 2014 se dio inicio el programa de inyecciones de la fase V con la perforación del taladro primario RP-P22 perteneciente al estribo derecho;
2. Se dieron distintas problemáticas relacionadas principalmente con el desempeño y funcionamiento de los equipos de adquisición de datos de, que impactaron de manera sería el programa de inyecciones, a tal punto que se debió replantear la fecha de finalización en más de una oportunidad. Sin embargo, al final el perjuicio sobre el programa de inyecciones no fue significativo en términos de la calidad y la adecuada evolución del cierre. El programa de inyección se dio por concluido el 12 de julio de 2024;
3. Existen diferencias geológicas y estructurales entre los estribos derecho e izquierdo, que determinan condiciones particulares de inyectabilidad de los macizos rocosos, que conviene tomar en cuenta para el diseño del tratamiento de impermeabilización de la fase VI;
4. La perforación de los taladros y la preparación e inyección de la lechada, fueron actividades permanentemente monitoreadas y controladas por la Supervisión.
5. Los controles de calidad de las lechadas, desvío de taladros, verificación de calibraciones, entre otros, permitieron asegurar el cumplimiento de las especificaciones técnicas.
6. El programa completo de inyecciones abarcó 5,985 m perforados en roca y un gasto de cemento de 501 t. La pantalla principal del estribo derecho requirió 3,500 m de perforación en roca y 263 t de cemento, en tanto que la pantalla auxiliar sumó 671 m y 38.6 t de cemento. Para completar la pantalla del estribo izquierdo se perforaron 1,689 m en roca y colocadas 192 t de cemento, más 126 m de taladros de consolidación los cuales fueron inyectados con 7.7 t de cemento.
7. El consumo de cemento por metro de perforación y los valores de las pruebas de agua a presión (tipo Lugeon), muestran evoluciones adecuadas de los tratamientos de inyección realizados en cada uno de los estribos. Consumos de menos de medio saco

de cemento y permeabilidades por debajo de 1 uL, obtenidos en las perforaciones comprobatorias, confirman el sellado e impermeabilización de las fundaciones rocosas según los requerimientos de las especificaciones técnicas.

RECOMENDACIONES

1. Dar relevancia a la inyección descendente en aquellos tramos que presentaron intenso fracturamiento y/o pérdida de retorno del fluido de perforación,
2. Se recomienda optar por perforar con diamantina y recuperación de testigos, la cual facilita la obtención de valiosa información geológica que permitió la toma de decisiones de inyección más acertadas;
3. Dar relevancia a la inyección descendente en aquellos tramos que presentaron intenso fracturamiento y/o pérdida de retorno del fluido de perforación.


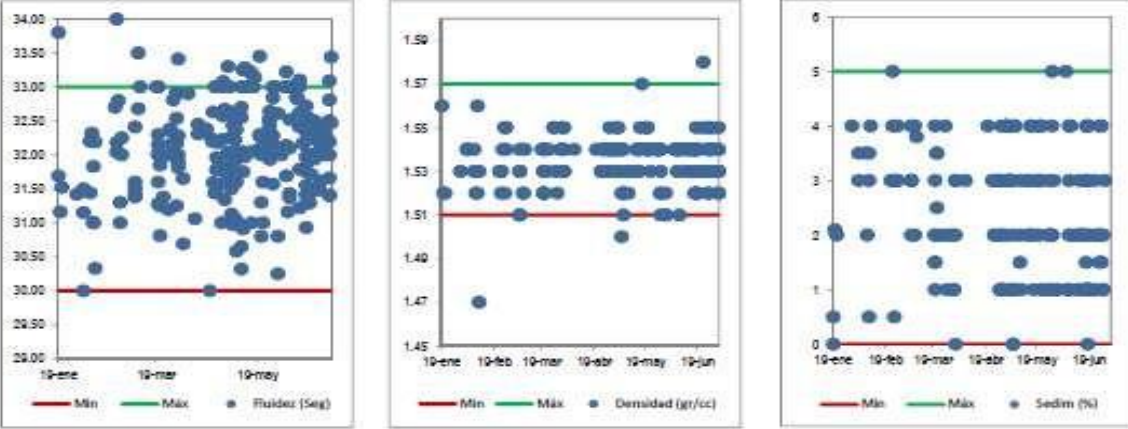
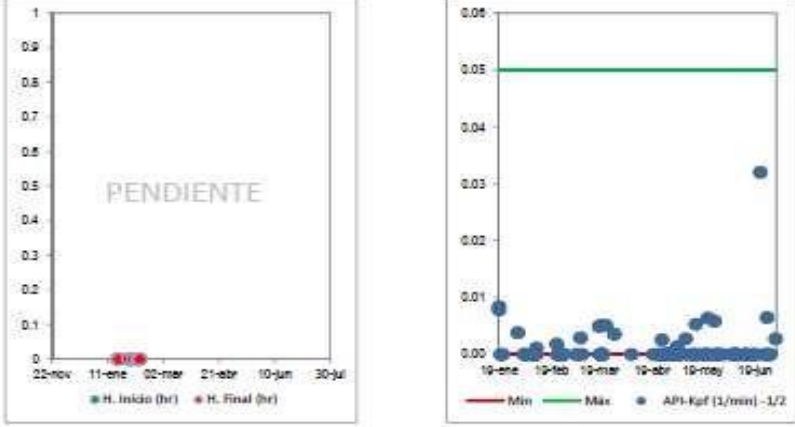
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baena , G. (2017). Metodología de la investigación. En G. E. PATRIA (Ed.). BERNAL, C. (2010). *Metodología de la investigación* (Tercera edición ed.). (P.Educación, Ed.)
- Extremera, Santos, Muñoz, Espejo, P. (2015). MEJORA Y CORRECCIÓN DE LA IMPERMEABILIZACIÓN EN EL CIMIENTO DE LA PRESA DE LAS FITAS. (C. N. PRESAS, Ed.) *X Jornadas de Presas*.
- Flores, J. (2023). *Tratamiento geotécnico de fundación de la presa Silicucho y su relación con la impermeabilización mediante inyecciones de lechada de cemento, Crucero, Puno*. [tesis de licenciamento Universidad Continental] repositorio Universidad Continental, Huancayo - Paru.
- Giaconi, Flores, Giaconi, L. (2012). Tratamiento geotécnico de la fundación de la presa del Ramal H, Tandil mediante inyecciones cementíceas. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, N° 29,39.
- Hernandez, Fernandes, Baptista, R. (2014). *Metodología de la investigación* (sexta edición ed.). (M. e. S.A., Ed.)
- Herrera, C. (2019). *“IMPERMEABILIZACIÓN MEDIANTE INYECCIONES DE CEMENTO EN MACIZO ROCOSO PARA EVITAR LA SURGENCIA DE AGUA EN EXPLOTACIÓN SUBTERRÁNEA CAJAMARCA, 2019*. [tesis de licenciamento Universidad Privada del Norte] repositorio institucional Universidad Privada del Norte, Cajamarca - Peru.
- Ministerio De Energía Y Minas (MEM). (2017). Reglamento de seguridad y salud ocupacional en minería , D.S. N° 024-2016-EM, MODIFICADO POR D.S. N° 023-2017-EM.
- Ministerio De Energía Y Minas (MINEM) . (2016). Decreto Supremo N° 024- 2016. Lima.
- Ministerio De Energía Y Minas. (2012). *D.S. 005-2012-TR. Reglamento de la Ley N°29783. Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo*.
- Quito, L. (2019). *“INFLUENCIA DEL MÉTODO - INYECCIÓN TRADICIONAL DE IMPERMEABILIZACIÓN EN LA REDUCCIÓN DE FILTRACIÓN - PRESA DE*

- RELAVE EL PORVENIR MAPSAC - 2018*". [tesis de licenciamiento Universidad Alas Peruanas] repositorio institucional Universidad Alas Peruanas, Pasco - Peru.
- Sanchez, Reyes, H. (2006). *Metodología y Diseños en la Investigación Científica*. (E. V. Universitaria, Ed.) Lima.
- Sanchez, Reyes, Mejia, H. (2018). *Manual de terminos de investigacion cientifica, tecnologica y humanistica*. Lima.
- Supo, Cavero, F. (2014). *FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y PROCEDIMENTALES DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ENCIAS SOCIALES*. (E. Universitario, Ed.)
- Zegarra, L. (2020). "*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 de licenciamiento Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa] repositorio institucional Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa - Peru.

ANEXOS

Anexo 1 Formularios

	SNC-LAVALIN PERÚ	Revisión No.	
	FORMULARIO	PA	
No de Documento:		Fecha	
22022014			
GRÁFICO DE PARAMETROS DE LECHADAS VS TIEMPO - PRODUCCION			
Cliete:	Compañía Minera Antamina S.A.	Gráfico Nº:	
Proyecto:	Aseguramiento de la Calidad para la Construcción de Plintos, Perforaciones e Inyecciones.	Proyecto:	15410
Contratista:	San Martín Contratistas Generales S.A.	Subdivisión:	-0000
		Tema:	-640C
		Origen:	-I
		Correlativo:	-0001
		Proyecto Nº:	12401-MTE2113
		Fecha:	12/07/2014
		Hoja:	01 de 01
Ubicación:	<input type="checkbox"/> Estribo Derecho Presa de Relaves <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Estribo Izquierdo Presa de Relaves <input checked="" type="checkbox"/>		Mezcla:
		Para una tanda de 2.00 bolsas de cemento	
		Agua:	80.144 litros
		Cemento:	85 Kg
		Euco 37:	920 ml
		Euco AWA:	106 ml
		Pozzolith:	606 ml
		A	
			
			
Observaciones:	Los puntos cuyos valores aparecen fuera de los límites establecidos para cada parámetro en cada tipo de mezcla, fueron rechazados para el proceso de inyección.		
<hr/> <hr/> <hr/>			

Anexo 2 Reporte del taladro RP-P23B

Reporte diario de perforacion diamantina

SNC - LAVALIN		SNC-LAVALIN PERÚ				FORMULARIO		Revisión	
No de documento: P-649C-11201-001-01								No	00
								Fecha	2014-03-20
REPORTE DIARIO DE PERFORACION DIAMANTINA									
Cliente:	Compañía Minera Antamina S.A.			Reporte N°	15430	Proyecto	11307	Tema	649C
Contratista:	San Martín Contrataciones Generales S.A.			Proyecto:	12401-MTE2113	Fecha:	23/03/2014	Hoja	01 de 01
Nombre del Proyecto:	Aseguramiento de la Calidad para la Construcción de Plintos, Perforaciones e Inyecciones.								
Ubicación:	Estribo Derecho Presa de Relaves		<input checked="" type="checkbox"/> Turno	Día		Supervisor		A Muñoz / A Eguiguren	
	Estribo Izquierdo Presa de Relaves		<input type="checkbox"/> Noche	Noche		Operador		M. Bolívar	
						Equipo		Diamet: 202.04	
						Sondaje:		RP-P23B	
Profundidad (m)	Dc	A	Recuperación		Diametro (m)	Inclinación	Litología	Observaciones	
			(m)	(%)					
0.00	4.10	4.10	4.10	100.00	96.00	90°	Concreto		
4.10	5.25	1.15	1.10	95.65	96.00	90°	Caliza		
5.25	5.85	0.60	0.60	100.00	96.00	90°	Caliza		
5.85	6.65	1.00	1.00	100.00	96.00	90°	Caliza		
6.65	7.20	0.55	0.55	100.00	96.00	90°	Caliza		
7.20	8.40	1.20	1.20	100.00	96.00	90°	Caliza		
8.40	8.95	0.55	0.55	100.00	96.00	90°	Caliza		
8.95	10.15	1.20	1.20	100.00	96.00	90°	Caliza		
10.15	11.60	1.45	1.45	100.00	96.00	90°	Caliza		
11.60	12.90	1.30	1.30	100.00	96.00	90°	Caliza		
12.90	14.45	1.55	1.55	100.00	96.00	90°	Caliza		
14.45	16.10	1.65	1.55	100.00	96.00	90°	Caliza		
16.00	17.55	1.55	1.55	100.00	96.00	90°	Caliza		
17.55	19.10	1.55	1.55	100.00	96.00	90°	Caliza		
19.10	20.80	1.70	1.50	100.00	96.00	90°	Caliza		
20.80	22.15	1.35	1.55	100.00	96.00	90°	Caliza		
22.15	23.65	1.50	1.50	100.00	96.00	90°	Caliza		
23.65	25.10	1.45	1.45	100.00	96.00	90°	Caliza		
25.10	26.30	1.20	1.20	100.00	96.00	90°	Caliza		
26.30	28.15	1.85	1.55	100.00	96.00	90°	Caliza		
28.15	29.70	1.55	1.55	100.00	96.00	90°	Caliza		
Metros Perforados:		28.70							
Metros Recuperados:		0.00							
Muestra Recuperada:		28.65							
Observaciones: Contacto concreto-roca a las 04.10 metros.									

Registro de orientación de taladro

SMA san martin		SISTEMA DE GESTION DE CALIDAD		211-SGC-CQC-400-25	
Con la sólida experiencia de ICA		PROYECTO N° 12401 CONSTRUCCION DE PLINTOS, PERFORACIONES E INYECCIONES		Rev:	0
		REGISTRO DE MEDICION DE ORIENTACION DE TALADRO		Fecha:	27/11/2013
				Página:	1 de 3
Job No.: 007	Hole No.: RP-P23 B	Drilling Method: HQ3			
Client: Antamina	Dip (Deg): -90	Hole Diameter (m): 0,096			
Project:	Survey run on: Wireline	Angular units: Degrees			
Tested By: W.P.P.	Computed By: W.P.P.	Checked By: R. Cosma		Pag.: 01 de 03	
Date: 24-mar-2014	Date: 25-mar-2014	Date: 25-mar-2014		N° Reg.: 007	
Ubicación: Estribo derecho - Presa de Relaves					
Position at start of survey (0.00 metres)					
East	North	Elevation	Dip	Azimuth	
0,00	0,00	0,00	-89,80	141,50	
Position at end of survey (54.00 metres)					
East	North	Elevation	Dip	Azimuth	
-0,10	-0,19	54,00	-89,70	233,90	
Total deviation (54.00 metres)					
Total deviation:			0,21 m.		

Fotografías de perforación




SONDAJE NO. RP-P23B

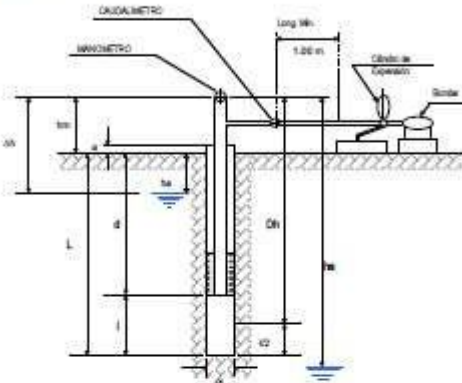
			
CAJA No. :	001 de 036	PROFUNDIDAD:	00.00 a 04.90 m.
FECHA:	2014-04-03	REALIZADO:	H. Costa

			
CAJA No. :	002 de 036	PROFUNDIDAD:	04.90 a 08.40 m.

			
CAJA No. :	003 de 036	PROFUNDIDAD:	08.40 a 11.85 m.

Ensayos de permeabilidad (Lugeon)

	SNC-LAVALIN PERÚ FORMULARIO						Folio No. 01
	No de Documento: F460-11384MPU-0						Fecha 2010-07-05
	ENSAYO DE PERMEABILIDAD A PRESIÓN TIPO LUGEON						
Cliente: Compañía Minera Antamina S.A.	Ensayo N°:	Proyecto N°: 15410	Subdivisión: -11004	Tema: -6A00	Origen: -1	Correlativo: -001	
Contratista: San Martín Contratación Generalista S.A.	Proyecto N°: 12401-MTE2113	Fecha: 27/03/2014	Hoja: 01 de 02	RP-P23B			
Nombre del Proyecto: Aseguramiento de la Calidad para la Construcción de Pilotes, Perforaciones e Inyecciones.	Tipo: <input type="checkbox"/> Día <input checked="" type="checkbox"/> Noche	Coordenada Norte: 8544798.82	Sondaje:				
Prof. Ensayo: 03.00	Hora Inicio: 00:56	Coordenada Este: 277544.11	RP-P23B				
Hora Fin: 01:10	Litología del tramo: Caliza	Inclinación (°): 30					
		Cota (m.s.n.m.): 4105.072					



hm	=	ALTURA DEL MANOMETRO	=	0.40	m
a	=	ALTURA SOBRE NIVEL DEL TERRENO	=	2.00	m
ha	=	PROFUNDIDAD NIVEL FREÁTICO	=	55.50	m
Dh	=	SOBRECARGA HIDRÁULICA	=	55.90	m
d	=	PROFUNDIDAD DEL OBTURADOR	=	53.00	m
L	=	PROFUNDIDAD DE PERFORACION	=	73.00	m
α	=	INCLINACION GOMORIZONTAL	=	30	°
Dh'	=	Dh CORREGIDA = Senα × Dh	=	55.90	m
l	=	LONGITUD TRAMO DE ENSAYO	=	10.00	m
Ø	=	DIAMETRO DEL BULBO DEL ENSAYO	=	9.60	cm
Pm	=	PRESION MANOMETRICA			
Pm'	=	PRESION EFECTIVA EN EL PUNTO MEDIO DEL TRAMO DEL ENSAYO			
Dp	=	PERDIDAS DE CARGA			
q	=	VOLUMEN DE AGUA EN LITROS POR MINUTO DURANTE EL ENSAYO			
qt	=	VOLUMEN TOTAL DE AGUA EN LITROS PARA CADA ESTADIO			
Q	=	CAUDAL EN LITROS POR MINUTO PARA CADA ESTADIO			
Q'	=	CAUDAL EN LITROS POR MINUTO POR M. DE TRAMO DE ENSAYO			
UL	=	UNIDAD LUGEON (Q' x 10 / Pm')			

TIEMPO EN MINUTO	Pm = 5.50 Kg/cm²		Pm = Kg/cm²		Pm = Kg/cm²		Pm = Kg/cm²		Pm = Kg/cm²	
	LECTURA CAUDAL	q (l)	LECTURA CAUDAL	q (l)	LECTURA CAUDAL	q (l)	LECTURA CAUDAL	q (l)	LECTURA CAUDAL	q (l)
0.00	1,025.50									
1.00	1,215.50	182.90								
2.00	1,400.40	181.90								
3.00	1,582.70	182.30								
4.00	1,754.00	181.90								
5.00	1,945.00	181.30								
6.00	2,128.00	180.10								
7.00	2,306.10	180.10								
8.00	2,486.10	180.00								
9.00	2,667.10	181.00								
10.00	2,846.10	181.00								
qt (l)	1,812.90									
Q (l/min)	181.29		0.00		0.00		0.00		0.00	
Dp (kg/cm²)	12.09		0.00		0.00		0.00		0.00	
Pm' (kg/cm²)	14.09									
UL										

$P_{m'} = P_m - D_p + D_h / 10$

REPRESENTACION GRAFICA


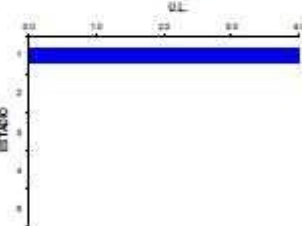


GRAFICO DE PATRON DE RESULTADOS PARA LA SELECCION DE UNIDADES LUGEON



UNIDAD LUGEON SELECCIONADA: **14.09** U.L.

K (PERMEABILIDAD): **1.95E-04** cm/s

OBSERVACIONES:

Permeabilidad alta

Con la capacidad de la bomba de agua se llega a la presión máxima de 5.5 bar por lo que se realiza 01 estudio de 5.5 bars.

Reporte diario de inyecciones de cemento

SNC-LAVALIN PERÚ		FORMULARIO										Revisión No 00 Fecha 2013-07-15									
No de Documento:		F-663C-2014-MPU-S																			
REPORTE DIARIO DE INYECCIONES DE CEMENTO																					
Cliente:		Compañía Minera Antamina S.A.		Reporte N°		Proyecto		Subdivisión		Tema		Origen		Correlativo							
Contratista:		San Martín Contratistas Generales S.A.		15410		-28414		-6430		-		-		-0001							
Nombre del Proyecto:				Aseguramiento de la Calidad para la Construcción de Plantas, Perforaciones e Inyecciones.				Proyecto:		Fecha:		Hoja:									
				12401-MTE2113				28/03/2014		01		de		02							
Ubicación:		Tramo:		63-73																	
Estadio Derecho Pesa de Relaves		Día		6:50		Pala final		Supervisor		A. Egúsquiza		Operador:		E. Castillo							
<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>												RP-P23B							
<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>																			
Tramo (m)	Da	A	Tiempo (hh:mm)			Tipo de Mezcla	Mezcla Inyectada					Volumen Inyectado (L)		Caudal (L/min)	Gul (L)	Presión (bar)				Masa Total (Kg)	Observaciones
			Inicio	Final	Duración		Cemento (Kg)	Agua (L)	Euco 37 (ml)	Euco AWA (ml)	Pozzolita N° 534 (ml)	Acumulado	Parcial			Prefectiva	Pe	Pg	Pm		
63.00	73.00		11:51	12:37	00:45	A	358.89	339.31	3880.81	444.81	2942.97	480.10	480.10	13.08	1.59	10.97	10.79	0.09	0.10	701.85	Cambio de mezcla.
63.00	73.00		12:57	13:08	00:30	B	326.92	509.51	2679.21	855.82	2423.48	882.03	421.92	15.80	1.80	10.97	10.79	0.09	0.10	652.18	Cambio de mezcla.
63.00	73.00		13:08	13:43	00:34	C	424.47	297.13	4594.27	2137.34	0.09	1323.06	443.03	14.00	2.01	11.18	10.79	0.09	0.31	728.58	Cambio de mezcla.
63.00	73.00		13:43	14:45	01:02	D	1124.11	818.26	12166.81	5980.21	0.00	2329.70	1094.65	17.47	2.34	16.02	10.79	0.06	5.14	1763.50	Se suelga caudal ca minima
63.00	73.00		14:48	15:26	01:50	D	1030.47	866.76	11153.29	5188.71	0.00	3259.86	920.96	2.30	0.25	19.94	10.79	0.09	9.07	1615.80	Problema por presión.
							04:44											5463.52			
Observaciones:																					

Reporte diario de inyecciones de cemento – graficos

SNC-LAVALIN PERÚ		FORMULARIO										Revisión No 00 Fecha 2013-07-15							
No de Documento:		F-663C-2014-MPU-S																	
REPORTE DIARIO DE INYECCIONES DE CEMENTO - GRÁFICOS																			
Cliente:		Compañía Minera Antamina S.A.		Reporte N°		Proyecto		Subdivisión		Tema		Origen		Correlativo					
Contratista:		San Martín Contratistas Generales S.A.		15410		-28414		-6430		-		-		-0001					
Nombre del Proyecto:				Aseguramiento de la Calidad para la Construcción de Plantas, Perforaciones e Inyecciones.				Proyecto:		Fecha:		Hoja:							
				12401-MTE2113				28/03/2014		02		de		03					
Equipo		Hora Inicio		Duración		Tramo de		Tramo total (m)		Pm-final (bar)		Q-final (L/min)		Vol. total (L)		Gul		Secado:	
REG-09-GT		11:51:44		02:53:58		63.00		10.00		5.14		17.47		2329.70		2.34			
																		RP-P23B	
Observaciones: Se suelga caudal y se reanuda.																			

Análisis unidades de Lugeon y absorción de cemento

SNC-LAVALIN PERÚ		FORMULARIO				Revisión No. 01 Fecha 2014-03-14
No de Documento: F-640C-11388-MPLU-S						
ANÁLISIS UNIDADES LUGEON Y ABSORCIÓN DE CEMENTO						
Cliente: Compañía Minera Antamina S.A.		Reporte N°:	Proyecto N°: 15410	Subdivisión: -11308	Tema: -640C	Origen: -1
Proyecto: Servicio de Aseguramiento de la Calidad para la Construcción de Pilotos, Perforaciones e Inyecciones.		Proyecto N°: 12401-MTE2113	Fecha: 03/04/2014	Hoja: 01 de 01		Correlativo: -0003
Contratista: San Martín Contratistas Generales S.A.						
Ubicación Sonidae: <input checked="" type="checkbox"/> Estribo Derecho Presa de Relaves <input type="checkbox"/> Estribo Izquierdo Presa de Relaves		Coordenadas: PSAD-56 Nota: 8944.796.620 Este: 277544.110 Cota: 4105.072	Azimut: - Rumbo: - Inclinación: 90°	Profundidad Máxima: 130.00 Diámetro Perforación: 96.00 mm Tipo Perforación: Rotativo	Sonidae: RP-P23B	
Fecha Inicio Perforación: 23/03/2014		Fecha Fin Perforación: 31/03/2014	Fecha Inicio Inyección: 28/03/2014	Fecha Fin Inyección: 03/04/2014		

<p style="text-align: center;">UNIDADES LUGEON</p>	<p style="text-align: center;">ABSORCIÓN CEMENTO (Kg/m)</p>	<p style="text-align: center;">ABSORCIÓN CEMENTO (Kg/m)</p>
---	--	--

Observaciones:

- 28/03/2014 turno día, se culmina con la inyección del tramo de 63.00 a 73.00 metros, paraliza inyección para continuar con la perforación del sonidaje hasta los 130.00 metros.
- En el tramo de 02.00 a 13.00 metros, de 13:50 a 14:50 horas, se tienen problemas con By-pass, se sube 01 metro la tubería y continúa el By-pass, se baja 01 metro y de la misma manera había luego; se cierra en la boquilla del taladro y empezó a salir mezcla por el sonidaje del costado, por lo que al final se cierra con packer mecánico, con lo que se culmina la inyección por presión de resaca (03/04/2014).

Reporte de ensayo mezcla en campo

SNC-LAVALIN PERÚ		FORMULARIO				Revisión No. 01 Fecha 2014-03-14
No de Documento: F-640C-11388-MPLU-S						
REPORTE DE ENSAYO DE MEZCLA EN CAMPO						
Cliente: Compañía Minera Antamina		Reporte N°:	Proyecto N°: 15410	Subdivisión: -11308	Tema: -640C	Origen: -1
Contratista: San Martín Contratistas Generales		Proyecto N°: 12401-MTE2113	Fecha: 28/03/2014	Hoja: 01 de 01		Correlativo: -0003
Nombre del Proyecto: Aseguramiento de la Calidad para la Construcción de Pilotos, Perforaciones e Inyecciones.						
Ubicación: Estribo Derecho Presa de Relaves <input checked="" type="checkbox"/> día <input checked="" type="checkbox"/> Noche <input type="checkbox"/>		Tubo: A. Espigón	Operador: E. Coadre	Sonidae: RP-P23B		

Tiempo (horas)	Método	Agua (Litros)	Cemento (Kg)	Esoo 27 (ml)	Esoo AFA (ml)	Fuecelit MC-158 (ml)	Temperaturas				Control de Calidad				Frecuencia Test		Prensa Fibra AP		N° Probetas	Observación		
							Ambiente (°C)	Agua (°C)	Cemento (°C)	Mezcla (°C)	Fluidez (Seg)	Densidad (kg/m3)	H. Inicial	H. Final	(%)	Hora Inicio	Hora Final	Tiempo (min)			Agua (ml)	Kgf (Vibras) / m
11:39	A	80.144	550	929	106	606	11.78	9.90	16.23	15.29	32.34	1.92	11.28	13.28	2.0			7.5	3.90	0.00336	9	
11:56	B	75.894	850	929	214	606	19.39	19.29	17.48	18.39	59.09	1.82	12.06	14.65	1.0			7.5	1.10	0.00190	4	
12:00	C	55.590	850	929	426	0	12.28	13.79	16.09	16.59	42.09	1.85	16.38	16.58	0.0			7.5	1.00	0.00391	4	
13:48	D	46.750	850	929	426	0	18.06	18.79	19.59	19.59	66.09	1.95	12.56	12.56	0.0			7.5	1.00	0.00391	-	No se muestreo por falta de inyectores. Se tienen inyectores para prueba de cada inyección

Observaciones:

Matriz de consistencia

Título “REQUERIMIENTOS TECNICOS DE PERFORACION E INYECCION DE LECHADA DE CEMENTO, PARA SELLAR LAS FISURAS DEL MACIZO ROCOSO EN EL DISEÑO DEL RECRECIMIENTO DE LA PRESA DE RELAVE ANTAMINA COTA 4135 M.”.				
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
<p>Problema general ¿Las consideraciones técnicas de la perforacion e inyección de lechada de cemento en los taladros influyen en la impermeabilización, (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m?</p> <p>Problemas específicos Problema específico a ¿Las consideraciones técnicas de la perforacion en los taladros influyen en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m?</p> <p>Problema específico b ¿Las consideraciones técnicas de inyección de lechada de cemento en los taladros influyen en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m?</p>	<p>Objetivo general Determinar si las consideraciones técnicas de la perforacion e inyección de lechada de cemento en los taladros, influyen en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m.</p> <p>Objetivos específicos Objetivo específico a Determinación si las consideraciones técnicas de la perforacion en los taladros, influyen en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m.</p> <p>Objetivo específico b. Determinar si las consideraciones técnicas de inyección de lechada de cemento en los taladros, influyen en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m.</p>	<p>Hipótesis General Las consideraciones técnicas de la perforacion e inyección de lechada de cemento en los taladros, si influyen directamente en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m</p> <p>Hipótesis específicas Hipótesis específica a Las consideraciones técnicas de la perforacion en los taladros, si influyen directamente en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m.</p> <p>Hipótesis específica b Las consideraciones técnicas de inyección de lechada de cemento en los taladros, si influyen directamente en la impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso en el diseño del recrecimiento de la presa de relave Antamina, cota 4135 m.</p>	<p>Identificación de variables Variables para la hipótesis general Variable independiente Consideraciones técnicas de perforacion y de inyección de lechada de cemento.</p> <p>Variable dependiente Impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso.</p> <p>Variables para la hipótesis específicas Variables para la hipótesis específica a Variable independiente Consideraciones técnicas de perforacion.</p> <p>Variable dependiente impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso.</p> <p>Variables para la hipótesis específica b Variable independiente consideraciones técnicas de inyección de lechada de cemento.</p> <p>Variable dependiente impermeabilización (sellar las fisuras) del macizo rocoso.</p>	<p>-Tipo de I. aplicativo.</p> <p>-Nivel de I. descriptivo, explicativo</p> <p>Diseño de I. no experimental</p> <p>muestra Se determinó tomar como muestra específica el proyecto pantalla de impermeabilización blanket estribo derecho cota 4135 presa de relaves Compañía Minera Antamina.</p>