

Estudio de alternativas de depósitos de relaves como geo polímeros en zona no urbanas ni agrícolas en Chile central

Juan Carlos Olivares Castro

2025

Requisito parcial para obtener el título de:
Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía:
Dr. Víctor Encina Montenegro (UTFSM)

Comisión:
Dra. Karem Tello Araya (UTFSM)

Santiago, Enero de 2025.

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería de Metalúrgica y Materiales
Santiago, Chile



Estudio de alternativas de depósitos de relaves como geo polímeros en zona no urbanas ni agrícolas en Chile central

Juan Carlos Olivares Castro

2025

«Una lección sin dolor no tiene sentido. Eso es porque no se puede ganar algo sin sacrificar algo a cambio. Sin embargo, una vez que hayas soportado el dolor y lo hayas superado, ganarás un corazón que es más fuerte que todo lo demás. Así es, un corazón de acero».
— *E.E.*

Resumen

Si bien en el título de esta tesis se menciona la utilización de geo polímeros, a lo largo de la investigación se descartó esta opción. La decisión se tomó debido a la incertidumbre en el comportamiento geomecánico y de secado de los geo polímeros en condiciones extremas de alta cordillera. Como alternativa, se adoptó el uso de relaves cementados, los cuales demostraron mayor estabilidad y viabilidad técnica para el emplazamiento propuesto.

El presente trabajo aborda el desafío de optimizar la disposición de relaves mineros en alta cordillera como alternativa técnica y sostenible frente a los depósitos tradicionales en el valle central. En el contexto de la minería chilena, la creciente producción de relaves plantea problemas ambientales y territoriales, destacando la necesidad de métodos más seguros y eficientes que cumplan con las normativas actuales.

El estudio tuvo como objetivo general proponer un modelo de disposición de relaves cementados en alta cordillera, evaluando su viabilidad técnica mediante análisis estructurales, de impermeabilidad y estabilidad sísmica. Para lograrlo, se definieron características físicas del relave, se identificaron condiciones topográficas idóneas y se verificó el desempeño del diseño propuesto frente a normativas chilenas como el DS248.

La metodología incluyó un enfoque técnico que excluyó factores económicos y ambientales detallados, centrándose en el comportamiento estructural del depósito. Los resultados evidenciaron que los relaves cementados alcanzaron un coeficiente de seguridad de 1.81 bajo condiciones sísmicas de hasta 0,54 g y una impermeabilidad de $2,0 \times 10^{-11}$ cm/s, valores significativamente superiores a los requerimientos normativos. Además, el diseño escalonado optimizó la adaptación al terreno montañoso, garantizando una disposición estable y eficiente.

La propuesta de relaves cementados es técnicamente viable y representa una alternativa sostenible para la gestión de relaves en alta cordillera. Este método reduce la dependencia de muros de contención externos, ofreciendo una solución alineada con las normativas vigentes y los desafíos actuales de la industria minera.

Palabras Clave: Relaves cementados, alta cordillera, diseño escalonado, estabilidad estructural, impermeabilidad, minería sostenible.

Abstract

Although the title of this thesis mentions the use of geopolymers, this option was discarded during the course of the research. The decision was made due to uncertainties regarding the geomechanical behavior and drying performance of geopolymers under the extreme conditions of the high Andes. Instead, cemented tailings were adopted, as they demonstrated greater stability and technical feasibility for the proposed site.

This study addresses the challenge of optimizing the disposal of mining tailings in the high Andes as a technical and sustainable alternative to traditional valley-based deposits. In the context of Chilean mining, the increasing production of tailings raises environmental and territorial issues, emphasizing the need for safer and more efficient methods that comply with current regulations.

The main objective of this study was to propose a cemented tailings disposal model for the high Andes, evaluating its technical feasibility through structural, impermeability, and seismic stability analyses. To achieve this, the physical characteristics of the tailings were defined, suitable topographical conditions were identified, and the performance of the proposed design was verified against Chilean regulations, such as DS248.

The methodology focused on a technical approach, excluding detailed economic and environmental factors, and concentrated on the structural performance of the deposit. The results showed that cemented tailings achieved a safety factor of 1.81 under seismic conditions of up to 0.54 g and an impermeability coefficient of $2,0 \times 10^{-11}$ cm/s, values significantly above regulatory requirements. Additionally, the stepped design optimized adaptation to mountainous terrain, ensuring stable and efficient disposal.

The proposed cemented tailings method is technically viable and represents a sustainable alternative for tailings management in the high Andes. This approach reduces the dependence on external containment walls, offering a solution aligned with current regulations and the industry's challenges.

Keywords: Cemented tailings, high Andes, stepped design, structural stability, impermeability, sustainable mining.

Glosario

Coefficiente de Seguridad: Valor que indica la resistencia del depósito a fallas estructurales.

Decreto Supremo N° 132 (DS132): Reglamento de Seguridad Minera del Ministerio de Minería.

Decreto Supremo N° 248 (DS248): Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos de Relaves.

Deslizamiento: Movimiento de materiales que puede comprometer la estabilidad del depósito.

Escalonamiento: Diseño progresivo del depósito para optimizar su estabilidad y reducir riesgos de deslizamiento.

Erosión: Desgaste del terreno o del depósito debido al flujo de agua.

Evaluación de Impacto Ambiental (EIA): Proceso de análisis ambiental requerido por la Ley 19.300 y el DS248.

Estabilidad Geotécnica: Evaluación de la resistencia y estabilidad del depósito ante factores externos, como sismos.

Impermeabilización: Proceso para evitar la infiltración de agua en depósitos de relaves.

Ley 19.300: Ley de Bases Generales del Medio Ambiente.

Monitoreo Continuo: Sistema de control constante para verificar la estabilidad y calidad ambiental del depósito.

Mt: Millones de toneladas.

Muros de Contención: Estructuras diseñadas para soportar los depósitos de relaves durante su proceso de construcción.

PAS 135: Permiso Ambiental Sectorial relacionado con embalses y tranques de relaves.

Relaves Cementados: Residuos mineros mezclados con cemento para mejorar sus propiedades estructurales y de impermeabilidad.

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN): Institución encargada de regular y fiscalizar los depósitos de relaves.

Sismicidad: Estudio y consideración de los movimientos sísmicos en el diseño estructural.

Índice de Contenidos

Introducción	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcances y limitaciones	2
1.3.1. Alcances.....	2
1.3.2. Limitaciones	3
2. Antecedentes	4
2.1. Relaves.	4
2.1.1. Depósito de relave.	4
2.1.2. Tipos de depósitos de relave.	4
2.2. Regulación depósito de relave.	6
2.2.1. Decreto supremo 248.....	6
2.3. Relaves cementados.	8
2.3.1. Aplicaciones actuales.....	8
2.4. Problema y propuesta de resolución.....	8
2.4.1. relaves cementados como una alternativa técnica,.....	8
2.4.2. Casos actuales de deposición de relave en alta cordillera.....	9

3. Metodología	11
3.1. Metodología.....	11
3.1.1. Revisión bibliográfica y análisis documental.....	11
3.1.2. Selección del emplazamiento en alta cordillera	11
3.1.3. Diseño conceptual del depósito de relaves	12
3.1.4. Validación de la propuesta	12
3.1.5. Discusión ética y sostenibilidad	12
4. Desarrollo	13
4.1. Decisión del Método de Colocación y Estado.....	13
4.1.1. Método Seleccionado: Relaves Cementados.....	13
4.1.2. Métodos Descartados.	14
4.2. Secuencia de Construcción	15
4.3. Análisis técnico del depósito de relave cementado.....	17
4.3.1. Estabilidad de los muros de concentración en depósitos cementados (Artículo 14 y 54 del DS248).....	19
4.3.2. Impermeabilización del Depósito Cementado (Artículo 56 del DS248). 22	
4.3.3. Deslizamiento del depósito	24
4.3.4. Resistencia a Eventos Sísmicos (Artículos 5 y 14 del DS248).....	26
5. Resultados y Discusiones	32
5.1. Resultados.....	32
5.2. Discusión.....	33
6. Conclusiones y Recomendaciones	34
6.1. Conclusiones	34
6.2. Recomendaciones.....	35
Bibliografía	36
7. Anexos	38

Índice de Figuras

2.1.	Principales métodos de construcción de depósitos de relaves según la construcción de los muros de contención [1]	6
4.1.	Exigencias normativas para un depósito de relave. [2]	17
4.2.	Diagrama de flujo requerimiento de PAS 135. [3].....	19
4.3.	Modelo de propuesta de depósito de relave cementado.	20
4.4.	Fuerzas fijas en propuesta de depósito de relave cementado.	21
4.5.	Coefficiente de seguridad propuesta de depósito de relave cementado bajo fuerzas normales y fuerza de gravedad.....	22
4.6.	Diagrama de cuerpo libre sobre deslizamiento del depósito.....	26
4.7.	Coefficiente de seguridad depósito de relave cementado en presencia de un sismo.	30

Índice de Tablas

1.1.	Principales depósitos de relaves de la zona centro de Chile.	1
4.1.	Datos utilizados para el cálculo de estabilidad en sismos.....	27
7.1.	Parámetros geomecánicos ingresados al software INVENTOR.....	38

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La gestión de relaves mineros representa uno de los mayores desafíos ambientales y técnicos de la minería a nivel mundial. En el contexto chileno, donde la actividad minera es un pilar económico, el manejo de los desechos derivados del procesamiento de minerales se ha vuelto una prioridad debido a su impacto sobre el medio ambiente, las comunidades y el uso del territorio. Tradicionalmente, estos relaves se almacenan en tranques y embalses en el valle central, lo que ha generado tensiones sociales, conflictos por el uso del suelo y riesgos asociados al cambio climático y los sismos frecuentes en el país.

Actualmente, los depósitos de relaves de las 4 mineras más grandes abarcan una superficie aproximada de 5 760 hectáreas en el valle central de Chile, acumulando 8 mil millones de toneladas de residuos mineros. Esta ocupación masiva no solo ha limitado el desarrollo urbano y agrícola en estas áreas, sino que también plantea riesgos significativos para la seguridad de las comunidades cercanas y los recursos hídricos. Los desastres asociados a fallas en tranques de relaves, como filtraciones o colapso, se han intensificado en escenarios de eventos sísmicos y climáticos extremos, generando preocupación tanto a nivel local como global [4].

Tabla 1.1
PRINCIPALES DEPÓSITOS DE RELAVES DE LA ZONA CENTRO DE CHILE.

EMPRESA	FAENA	REGION	DEPOSITO	Mt
CODELCO	ANDINA	RM	OVEJERIA	1930
ANTOFAGASTA MINERALS	LOS PELAMBRES	IV	EL MAURO	1700
ANGLO AMERICAN	LOS BRONCES	RM	LAS TORTOLAS	1000
CODELCO	EL TENIENTE	VI	CAREN	3332

Estos depósitos deberían llegar a su máximo para el año 2036 por lo que se deberá localizar nuevas zonas en las cuales depositar los desechos generados por la industria minera se espera que como mínimo se abarcaran las mismas hectáreas las cuales se utilizan actualmente, en termino de dimensiones se puede decir que desde el año 2036 las empresas de gran minería en la zona centro requerirán un terreno del porte de 3,5 veces la comuna de Ñuñoa la cual es capaz de aportar terrenos para que puedan vivir 934 000 personas.

Por otro lado, la alta cordillera de los Andes, caracterizada por su topografía y condiciones geológicas únicas, ofrece una alternativa viable para la disposición de estos residuos. Sin embargo, la complejidad de implementar tecnologías seguras y sostenibles en estas zonas ha limitado hasta ahora su uso.

La implementación de depósitos de relaves cementados en la alta cordillera representa una solución que permite abordar las limitaciones de los métodos tradicionales. Los relaves cementados, formados por una mezcla de desechos mineros, agua y aglomerantes hidráulicos, ofrecen características como alta impermeabilidad, resistencia estructural y adaptabilidad a terrenos inclinados. Aunque esta tecnología ha sido aplicada principalmente como relleno en operaciones subterráneas, su potencial para depósitos superficiales en zonas de alta montaña permanece poco explorado [5].

Además, la relocalización de los depósitos desde el valle central hacia la alta cordillera contribuiría a liberar tierras para usos más sostenibles, reducir conflictos socioambientales y mejorar la gestión territorial en una de las regiones más productivas de Chile.

El problema central que aborda esta investigación radica en la necesidad de desarrollar y validar un modelo técnico para la disposición segura de relaves mineros en zonas de alta montaña. Esto implica superar desafíos relacionados con la estabilidad estructural, impermeabilidad y adaptabilidad a condiciones extremas, asegurando el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales vigentes.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Proponer una alternativa de depósito de relaves en alta cordillera de los Andes, que cumpla con los estándares técnicos y normativos aplicables.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los relaves cementados para uso en depósitos superficiales.
- Diseñar un prototipo de depósito escalonado, considerando las condiciones geotécnicas de la cordillera de los Andes.
- Validar el diseño mediante simulaciones técnicas de estabilidad y resistencia a eventos sísmicos.

1.3. Alcances y limitaciones

1.3.1. Alcances

El presente estudio se centra en desarrollar una propuesta técnica para la disposición de relaves cementados en la alta cordillera como alternativa a los depósitos en el valle central de Chile. Los alcances del proyecto incluyen:

1. Selección de características físicas del depósito de relaves

Se evaluarán las propiedades técnicas de los relaves, como cohesión, permeabilidad y resistencia mecánica, necesarias para asegurar la estabilidad estructural del depósito bajo las condiciones geotécnicas específicas del sitio seleccionado.

2. Identificación del lugar de colocación

Se determinarán las condiciones geológicas y topográficas idóneas para la disposición de los relaves cementados en la alta cordillera. Esta selección se realizará considerando factores como la pendiente, el tipo de suelo, la estabilidad geotécnica y la ausencia de elementos que puedan comprometer la seguridad estructural.

3. Verificación de la estabilidad del depósito de relaves

Se llevará a cabo un análisis técnico de la estabilidad del depósito propuesto, evaluando su comportamiento frente a:

- Cargas estáticas, para garantizar la resistencia estructural bajo condiciones normales.
- Cargas dinámicas, simulando escenarios sísmicos para cumplir con las normativas vigentes en Chile.
- Condiciones de impermeabilidad, verificando que el diseño minimice la infiltración hacia capas subterráneas.

4. Enfoque técnico y normativo

El trabajo se guiará exclusivamente por criterios técnicos y normativos, dejando de lado evaluaciones de impacto ambiental detallado, análisis económicos y costos de implementación.

1.3.2. Limitaciones

El alcance del estudio está limitado por los siguientes factores, que establecen los márgenes dentro de los cuales se desarrolla la investigación:

1. Exclusión del análisis económico

No se considerará el costo asociado a la implementación del depósito, incluyendo gastos en transporte, construcción o insumos. El foco se mantendrá en la viabilidad técnica y estructural.

2. Sin evaluación de impacto ambiental completo

Aunque se propone una relocalización hacia la alta cordillera, no se realizará un análisis exhaustivo del impacto sobre flora, fauna o ecosistemas circundantes. Se asume que estas consideraciones se abordarían en fases posteriores del proyecto.

3. Enfoque técnico limitado a estabilidad estructural

La evaluación se restringirá a aspectos de estabilidad estática y dinámica, excluyendo otros factores que podrían afectar la operación a largo plazo, como procesos de sedimentación o cambios en las propiedades mecánicas

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Relaves.

Los relaves son residuos producidos durante el procesamiento de minerales extraídos.

Es una mezcla donde varios componentes, que dependen del tipo de mineral procesado y los tratamientos utilizados en la operación minera. En general, los relaves contienen arena y agua. Pueden también contener minerales y una pequeña cantidad de productos químicos.

En general, los relaves se almacenan en estructuras especiales, conocidos como depósitos de relaves, diseñados para contenerlos de manera segura y minimizar su impacto ambiental [6].

2.1.1. Depósito de relave.

Es una obra de ingeniería diseñada para satisfacer exigencias legales nacionales, de modo que se aisle completamente los sólidos (relaves) depositados del ecosistema circundante.

2.1.2. Tipos de depósitos de relave.

En Chile, los depósitos de relaves se clasifican según la cantidad de agua presente en el relave y la forma de contención utilizada. Las principales tipologías son:

1. Tranques de Relave: En estos depósitos, el muro de contención se construye utilizando la fracción más gruesa del relave, conocida como arena, la cual se compacta después de ser separada mediante hidrociclones. La fracción fina, denominada lama, se deposita en la cubeta del depósito [7].

2. Embalse de Relave: Estos depósitos cuentan con un muro de contención construido con materiales de empréstito, como tierra y rocas alledañas. En algunos casos, se ubican en depresiones naturales del terreno, lo que puede eliminar la necesidad de construir un muro de contención adicional [7].

3. Depósitos de Relave Espesado: En este tipo, los relaves son sometidos a un proceso de espesamiento que permite recuperar una parte significativa del agua antes

de su deposición. Este proceso aumenta la concentración de sólidos, resultando en una mayor estabilidad física del depósito y una pendiente más pronunciada en las playas formadas [7].

4. Depósitos de Relave Filtrado: Utilizan tecnologías de filtración para extraer casi la totalidad del agua de los relaves, reduciendo su contenido de humedad a niveles inferiores al 20 %. Los relaves secos se depositan en forma de apilamientos compactos y estables, lo que minimiza el riesgo de deslizamientos o fallas estructurales [7].

5. Depósitos de Relave en Pasta: Consisten en una mezcla de agua y sólidos con alto contenido de partículas finas y bajo contenido de agua, logrando una consistencia espesa similar a una pulpa de alta densidad. Esta característica reduce la movilidad del relave y mejora la estabilidad del depósito [8].

6. Otros Tipos: Incluyen depósitos ubicados en minas subterráneas, en rajos abandonados y otras configuraciones específicas adaptadas a las condiciones geográficas y operativas de cada proyecto minero.

Además de la clasificación por tipo de depósito, los métodos de construcción de los muros de contención también varían (ver Figura 2.1).

1. Crecimiento Aguas Abajo: El muro se expande hacia el lado aguas abajo, apoyándose sobre la pendiente exterior del muro existente. Este método es considerado el más seguro y estable, aunque requiere más material para su construcción [7].

2. Crecimiento Aguas Arriba: El muro se construye hacia el lado aguas arriba, apoyándose sobre la playa de relaves depositada previamente. Este método es menos costoso, pero presenta mayores riesgos de estabilidad y no está autorizado en Chile [9].

3. Crecimiento de Eje Central: El muro se eleva verticalmente, manteniendo su eje central, combinando características de los métodos anteriores. Ofrece una estabilidad intermedia y se utiliza en situaciones específicas [7].

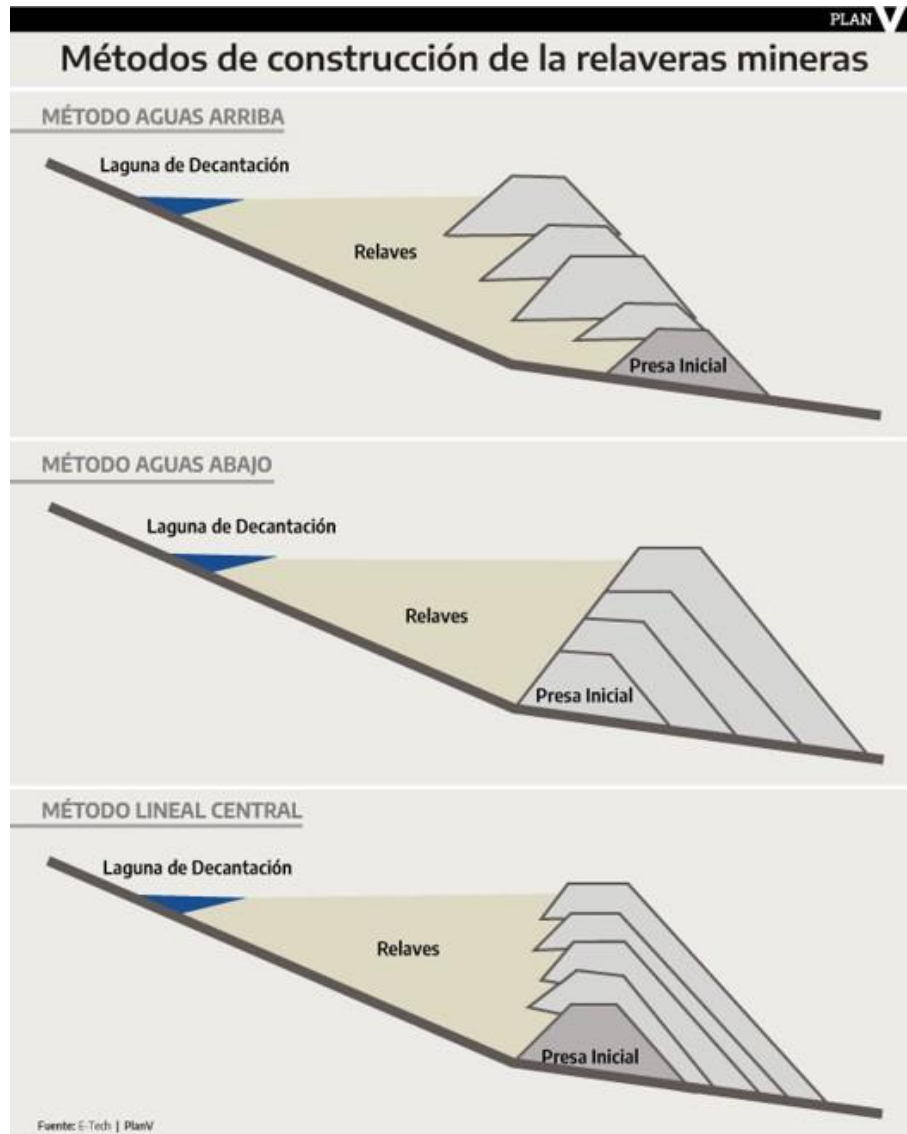


Figura 2.1. Principales métodos de construcción de depósitos de relaves según la construcción de los muros de contención [1]

2.2. Regulación depósito de relave.

Los depósitos de relaves son regulados de acuerdo con el D.S 248/2007

La institución a cargo de esta regulación es el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), a través del departamento de depósitos de relaves, el Departamento de gestión ambiental y cierre de faenas y el departamento de seguridad minera y fiscalización.

2.2.1. Decreto supremo 248

El Decreto Supremo N° 248, promulgado en 2007, establece el Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos

de Relaves en Chile. Este documento normativo, emitido por el Ministerio de Minería, regula los requisitos técnicos, ambientales y de seguridad necesarios para gestionar los depósitos de relaves mineros, con el objetivo de minimizar los riesgos asociados a su operación y garantizar la protección del medio ambiente y las comunidades cercanas [10].

1. Definición y clasificación de depósitos de relaves:

Define las diferentes configuraciones posibles de depósitos de relaves, como tranques, embalses, depósitos espesados y filtrados.

Incluye consideraciones para depósitos construidos en minas subterráneas o en rajos abandonados.

2. Requisitos para la aprobación de proyectos:

Todo proyecto de depósito de relaves debe ser sometido a aprobación por parte del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) antes de su construcción. La documentación requerida incluye:

Estudios de estabilidad geotécnica.

Evaluaciones de impacto ambiental (en cumplimiento de la Ley 19.300).

Planes de monitoreo de aguas subterráneas y superficiales.

Programas de cierre y abandono.

3. Especificaciones técnicas:

Detalla los parámetros que deben cumplir los diseños, como factores de seguridad mínimos frente a sismos, métodos de construcción de muros, y consideraciones sobre la impermeabilidad del depósito para evitar la infiltración de agua contaminada.

Exige un diseño estructural capaz de soportar eventos sísmicos con períodos de retorno definidos por la normativa.

4. Monitoreo y control operacional:

Durante la vida útil del depósito, se requiere la implementación de sistemas de monitoreo continuo para controlar la estabilidad estructural y la calidad de las aguas.

Obliga a mantener registros operacionales, los cuales deben estar disponibles para inspecciones de SERNAGEOMIN.

5. Planes de cierre:

El reglamento especifica que los proyectos deben incluir un plan de cierre desde su diseño inicial. Este plan debe garantizar la estabilidad física y química del depósito tras el término de sus operaciones.

Establece las responsabilidades del titular del proyecto para mantener el cierre en condiciones seguras a largo plazo.

6. Sanciones y fiscalización:

El incumplimiento de las disposiciones establecidas en el DS N° 248 puede derivar en sanciones administrativas, como multas y paralización de operaciones.

SERNAGEOMIN es la entidad responsable de fiscalizar y supervisar el cumplimiento de este reglamento.

2.3. Relaves cementados.

Los relaves cementados son una técnica utilizada en la minería subterránea que consiste en la mezcla de relaves mineros con aglomerantes hidráulicos, generalmente cemento, y agua. Esta combinación genera una pasta con propiedades mecánicas adecuadas para su uso como material de relleno en cavidades generadas por la ex- tracción de mineral. La concentración de sólidos en la mezcla oscila entre un 75 % y un 85 %, mientras que el contenido de cemento varía entre un 3 % y un 8 % en peso seco, dependiendo de las condiciones geotécnicas específicas de cada proyecto [11].

2.3.1. Aplicaciones actuales.

El uso de relaves cementados es común en minas subterráneas que emplean métodos de explotación como túneles y pilares. Estos relaves se depositan en las cavidades subterráneas para mejorar la estabilidad estructural de la mina, lo que permite recuperar pilares mineralizados y reducir el riesgo de colapso. Además, contribuyen a optimizar la ventilación y seguridad en las operaciones [12].

2.4. Problema y propuesta de resolución

El manejo de relaves mineros en Chile enfrenta una presión creciente debido al incremento de la actividad minera y la necesidad de garantizar una disposición sostenible. En los próximos 25 años, se proyecta que los depósitos de relaves en el valle central podrían ocupar hasta 5 760 hectáreas adicionales si se continúa utilizando el mismo enfoque tradicional de tranques y embalses. Esto representa un desafío crítico para la gestión territorial, dado que estas áreas tienen un alto valor agrícola, ambiental y urbano.

Los depósitos tradicionales, como tranques de relaves, presentan riesgos asociados que se intensifican en un país como Chile, caracterizado por su actividad sísmica y eventos climáticos extremos. Entre los principales desafíos están:

- 1. Riesgos estructurales:** Los depósitos existentes en el valle han demostrado ser vulnerables a fallas catastróficas en eventos sísmicos, lo que genera preocupación por la seguridad de comunidades cercanas.
- 2. Impactos ambientales:** La filtración de contaminantes hacia cuerpos de agua subterráneos y superficiales pone en peligro ecosistemas y fuentes de agua potable.
- 3. Presión sobre el uso del suelo:** La competencia por el territorio entre actividades agrícolas y urbanas intensifica los conflictos socioambientales.

La relocalización de los futuros depósitos de relaves hacia zonas menos habitadas, como la alta cordillera, emerge como una alternativa viable que debe ser explorada desde un enfoque técnico y ambientalmente responsable.

2.4.1. relaves cementados como una alternativa técnica,

Los relaves cementados constituyen una tecnología que transforma los desechos mineros en estructuras sólidas, estables y de baja permeabilidad. Esta técnica, basada

en la mezcla de relaves con agua y aglomerantes hidráulicos, ha sido aplicada principalmente como relleno en minería subterránea, pero su potencial para depósitos superficiales en alta montaña será estudiado y analizado en el presente estudio.

2.4.2. Casos actuales de deposición de relave en alta cordillera.

El Embalse Los Leones.

Es una infraestructura clave para la gestión de relaves de la División Andina de Codelco, ubicada en la alta cordillera de los Andes, en la Región de Valparaíso, Chile. Este depósito de relaves se encuentra a una altitud aproximada de 2 150 metros sobre el nivel del mar, en las coordenadas UTM: Norte 6351000, Este 382700. Su emplazamiento fue seleccionado estratégicamente para minimizar el impacto en zonas pobladas del valle central, aprovechando las condiciones geográficas y geotécnicas de la alta montaña [13].

El diseño del embalse incorpora un muro de contención de tipo aguas arriba, construido a partir de materiales provenientes de los propios relaves, alcanzando una altura aproximada de 108 metros. Este diseño es representativo de la tendencia en minería de integrar técnicas que optimicen los recursos disponibles en el proceso de construcción de la infraestructura. Además, el embalse está destinado a contener relaves en estado líquido, lo que exige estrictos estándares de impermeabilidad y estabilidad estructural para mitigar riesgos de filtración y fallas en condiciones de alta sismicidad, características de la zona.

Una de las ventajas de su ubicación en alta cordillera es la reducción de conflictos por el uso de tierras agrícolas o urbanas en el valle central. Sin embargo, la operación del embalse enfrenta desafíos asociados a las condiciones climáticas extremas de la cordillera, como temperaturas bajas, nevadas estacionales y alta exposición a eventos sísmicos. Estos factores obligan a un diseño robusto y a un monitoreo constante para garantizar su seguridad operativa.

El Embalse Los Leones es un ejemplo destacado de la transición hacia depósitos de relaves en alta montaña, donde las características topográficas permiten confinar residuos mineros de manera más aislada. Sin embargo, su método de disposición líquida, a diferencia de tecnologías más recientes como los relaves cementados, implica mayores riesgos ambientales, como la potencial infiltración de contaminantes hacia los acuíferos subyacentes o el riesgo de colapso en caso de fallas estructurales.

Este caso resalta la necesidad de continuar explorando alternativas técnicas más avanzadas, como la cementación de relaves, para garantizar la sostenibilidad y seguridad de los depósitos en alta cordillera, alineándose con las normativas nacionales e internacionales.

Depósito de relaves de la mina Las Bambas.

Ubicado en la región de Apurímac, Perú, es una de las infraestructuras más destacadas para la disposición de relaves en alta montaña. Este depósito está diseñado con un muro de contención de tipo aguas abajo.

El muro de contención alcanza una altura aproximada de 100 metros, con una longitud de 4 kilómetros y un ancho de 60 metros en su punto más estrecho y aproximadamente 506 metros en su punto más ancho. Estas dimensiones aseguran la contención de los relaves, maximizando la seguridad estructural en una región

caracterizada por su alta actividad sísmica y su compleja topografía.

El depósito cubre una superficie de 3,76 km² y está diseñado para manejar grandes volúmenes de relaves generados durante el procesamiento de concentrados de cobre. Su ubicación a más de 4 000 metros sobre el nivel del mar garantiza que se minimicen los impactos en zonas habitadas, alejándolo de áreas agrícolas y urbanas. Sin embargo, los relaves depositados se mantienen en estado de pulpa, lo que plantea desafíos técnicos y ambientales adicionales, especialmente en condiciones extremas como las de alta cordillera [14].

La Presa de Relaves de Antamina.

Es una de las principales instalaciones de almacenamiento de relaves en el Perú, diseñada para manejar los residuos procesados en la planta concentradora de Yanacancha de la mina Antamina. Está ubicada en el barranco de Huincush, a 55 kilómetros al este de la Cordillera Blanca, en el distrito de San Marcos, provincia de Huari, región Áncash.

La Presa de Relaves de Antamina combina una base de relleno de roca con una cara de concreto, lo que proporciona una alta estabilidad estructural en un entorno montañoso. El diseño incluye un sistema de elevación progresiva mediante relleno de roca, con el lado aguas arriba protegido por una losa de hormigón para mayor seguridad. La presa tiene una altura final proyectada de 240 metros y una longitud de 1300 metros, lo que permite contener un volumen total de 570 millones de toneladas de relaves [15].

Capítulo 3

Metodología

3.1. Metodología

La metodología para el presente estudio se diseñó bajo un enfoque aplicado, orientado a proponer una solución técnica, medioambiental viable y alineada con las normativas vigentes para el manejo de relaves en zonas montañosas. Se estructuró en fases secuenciales, cada una fundamentada en principios técnicos y documentales, según se describe a continuación:

3.1.1. Revisión bibliográfica y análisis documental

Esta fase consistió en recopilar y analizar información relevante sobre los siguientes aspectos:

- **Métodos actuales de disposición de relaves:** Se estudiaron técnicas como relaves en pasta, pilas compactadas, cementados y geo polímeros, evaluando sus ventajas, limitaciones y costos según la literatura científica reciente y normativas aplicables.
- **Normativa aplicable:** Se revisaron el Decreto Supremo 248/2007 (reglamento para depósitos de relaves) y el Decreto Supremo 132/2004 (reglamento de seguridad minera), que establecen requisitos técnicos y ambientales mínimos para la operación y cierre de depósitos.
- **Casos de estudio nacionales e internacionales:** Se analizaron proyectos similares en minería en alta montaña, incluyendo experiencias en Chile y Perú.

Resultado esperado: Identificar estándares mínimos y buenas prácticas aplicables a la disposición de relaves en Chile central, especialmente en zonas de alta montaña.

3.1.2. Selección del emplazamiento en alta cordillera

En esta etapa, se establecieron criterios objetivos para seleccionar sitios adecuados en la cordillera de los Andes. Estos criterios incluyeron:

- a) **Altitud y proximidad:** Zonas a más de 2000 metros sobre el nivel del mar y cercanas a faenas mineras activas, para minimizar costos logísticos.

- b) **Factores geotécnicos:** Análisis preliminar de tipo de suelo, pendiente, y estabilidad estructural con base en estudios previos.

3.1.3. Diseño conceptual del depósito de relaves

Se desarrolló un diseño conceptual basado en relaves cementados con la geometría escalonada propuesta. Este diseño incluye:

- **Capacidad de carga del suelo:** Evaluación mediante simulaciones en software de estabilidad estructural, considerando el peso del depósito y la resistencia del terreno.
- **Impermeabilidad:** Diseño de impermeabilización basado en el cálculo del coeficiente de permeabilidad, garantizando un valor inferior al establecido por SERNAGEOMIN (10^{-9} cm/s).
- **Estabilidad sísmica:** Simulación del comportamiento del depósito bajo eventos sísmicos con aceleraciones máximas de 0.54 g, según normativas chilenas.

Resultado esperado: Prototipo de diseño conceptual que cumpla con las normativas técnicas y ambientales.

3.1.4. Validación de la propuesta

La propuesta se validó mediante:

- Comparación con los estándares normativos vigentes (DS248 y DS132).
- Simulaciones computacionales de estabilidad y resistencia a sismos, utilizando software Inventor.

Resultado esperado: Validación técnica de la propuesta.

3.1.5. Discusión ética y sostenibilidad

Se consideraron los posibles impactos ambientales y sociales del traslado de relaves a la alta cordillera:

- Evaluación de beneficios para liberar tierras agrícolas y urbanas en el valle central.
- Mitigación de riesgos ambientales asociados a la disposición en zonas montañosas.
- Justificación del proyecto en el marco de la sostenibilidad minera.

Capítulo 4

Desarrollo

4.1. Decisión del Método de Colocación y Estado.

El diseño de un depósito de relaves en alta cordillera presenta un desafío técnico y ambiental que requiere la selección adecuada del método de disposición y el estado físico del material. Estas decisiones no solo determinan la viabilidad operativa del depósito, sino que también impactan directamente en su estabilidad estructural, la eficiencia en el uso de recursos y el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales.

La alta cordillera de los Andes, caracterizada por su topografía accidentada, su actividad sísmica y sus condiciones climáticas extremas, demanda soluciones que se adapten al entorno y que, al mismo tiempo, minimicen los riesgos para el medio ambiente. Para este proyecto, se evaluaron las alternativas disponibles, incluidas la disposición de relaves en estado de pulpa y el uso de geo polímeros, concluyendo que la disposición mediante relaves cementados es la opción más adecuada.

4.1.1. Método Seleccionado: Relaves Cementados.

El método de disposición de relaves cementados consiste en mezclar los relaves con un aglomerante hidráulico (como cemento) y agua, creando una masa sólida y estable al endurecerse. Esta tecnología ha sido seleccionada por las siguientes razones:

- a) **Estabilidad estructural y resistencia sísmica.** La solidificación del material proporciona una rigidez que permite que el depósito funcione como una estructura monolítica. Esto elimina los riesgos asociados a la licuefacción, que es una preocupación importante en regiones sísmicas como la cordillera de los Andes. Además, los relaves cementados son capaces de soportar cargas estáticas y dinámicas significativas, lo que garantiza la seguridad estructural del depósito a largo plazo.
- b) **Impermeabilidad y protección ambiental.** Los relaves cementados reducen significativamente las filtraciones al subsuelo gracias a la cementación, que sella los poros del material. Esto protege los acuíferos locales, evita la contaminación de cuerpos de agua y cumple con los estándares ambientales establecidos por el marco normativo chileno.

- c) **Adaptabilidad al terreno.** La rigidez del material permite su disposición en depósitos escalonados, aprovechando al máximo la topografía inclinada de la alta cordillera. Este diseño no solo mejora la estabilidad del depósito, sino que también optimiza el uso del terreno disponible, reduciendo la huella ambiental de la instalación.
- d) **Reducción de la dependencia de muros externos.** Los relaves cementados no requieren muros de contención de gran altura, ya que el material consolidado se convierte en una estructura autoportante. Esto elimina la necesidad de usar grandes cantidades de materiales externos, como roca o concreto, reduciendo los costos y el impacto ambiental asociado al transporte y uso de estos insumos.

4.1.2. Métodos Descartados.

Se consideraron y descartaron dos alternativas principales: los relaves en estado de pulpa y el uso de geo polímeros. A continuación, se presentan las razones técnicas y operativas que llevaron a descartar estas opciones:

Relaves en Estado de Pulpa

Se consideraron y descartaron dos alternativas principales: los relaves en estado de pulpa y el uso de geo polímeros. A continuación, se presentan las razones técnicas y operativas que llevaron a descartar estas opciones:

- a) **Altura excesiva de los muros de contención:** Como se evidenció en los antecedentes (el Embalse Los Leones, muro de contención de 100 metros de altura), los depósitos de pulpa requieren muros de contención extremadamente altos para garantizar la estabilidad del material líquido. Estos muros deben ser construidos con materiales externos, lo que genera un impacto logístico significativo y representa un desperdicio de recursos no derivados del relave.
- b) **Presión hidrostática elevada:** La proporción de agua en los relaves de pulpa genera fuerzas laterales importantes sobre los muros, aumentando la complejidad del diseño estructural y los costos de construcción.
- c) **Riesgo de licuefacción:** En regiones sísmicas, la naturaleza no consolidada de los relaves en pulpa los hace vulnerables a fenómenos de licuefacción, lo que representa un riesgo crítico para la seguridad del depósito y el entorno circundante.
- d) **Gestión hídrica compleja:** El manejo de grandes volúmenes de agua residual es un desafío importante en zonas de alta montaña, donde el recurso hídrico es limitado. Además, el tratamiento de esta agua requiere instalaciones adicionales que incrementan los costos operativos y complican la logística del proyecto.

Geo polímeros

Los geo polímeros son una tecnología emergente que se utiliza en la estabilización de materiales. Si bien presentan beneficios en ciertas aplicaciones, fueron descartados para este proyecto debido a las siguientes limitaciones:

- a) **Falta de información en condiciones de alta montaña:** Actualmente, no existen estudios concluyentes que evalúen el comportamiento de los geo polímeros.

de relave cuando son secados y curados a temperaturas inferiores a los 20°C, lo que podría ser un factor de riesgo en zonas de gran altitud.

- b) **Disponibilidad de insumos:** La producción de geo polímeros a gran escala requiere insumos específicos, aún falta un análisis detallado sobre la viabilidad de la producción en masa de estos geo polímeros.

4.2. Secuencia de Construcción

La construcción del depósito de relaves cementados en alta cordillera seguirá un enfoque escalonado, diseñado para optimizar la estabilidad estructural y minimizar el impacto en el terreno circundante. El proceso será el siguiente:

- a) **Transporte del relave cementado**
El relave cementado, preparado en la planta procesadora, será transportado a través de un sistema de tuberías hasta la zona designada para el depósito. Estas tuberías estarán diseñadas para manejar mezclas de alta densidad y garantizarán un flujo continuo hacia los puntos de disposición.
- b) **Colocación inicial y construcción de muros provisionales**
En la zona de disposición, se construirán muros de contención provisionales para confinar el material durante la etapa inicial de vertido. Estos muros estarán diseñados para soportar la presión generada por la mezcla hasta que se complete su solidificación.
- c) **Solidificación del material**
Una vez colocado, el relave cementado será sometido a un proceso de curado que le permitirá alcanzar su resistencia estructural final. Este periodo de solidificación será monitorizado para garantizar que el material cumpla con los estándares de resistencia e impermeabilidad.
- d) **Extensión escalonada del depósito**
Una vez que el material de la primera etapa se haya solidificado, se procederá a construir nuevos niveles escalonados sobre el depósito inicial. Este proceso se repetirá siguiendo un patrón progresivo, donde cada nuevo escalón será confinado temporalmente por muros provisionales y se solidificará antes de agregar el siguiente nivel.
- e) **Monitoreo y control continuo**
Durante todas las fases de construcción, se implementará un sistema de monitoreo continuo para evaluar la estabilidad del depósito y las condiciones del material. Esto incluirá inspecciones regulares de los muros provisionales, pruebas de resistencia del material cementado y controles de filtraciones para garantizar la seguridad operativa.

Este enfoque escalonado permite un control preciso del proceso de disposición, asegurando que cada nivel del depósito cumpla con los estándares técnicos antes de avanzar al siguiente. Además, maximiza la adaptabilidad del diseño al terreno montañoso, minimizando el uso de espacio y reduciendo el impacto ambiental.

Dicho lo anterior una solución en este enfoque es la disposición de los relaves en una geometría de escalones. Esta configuración permite construir el depósito de manera

progresiva, adaptándolo a la pendiente natural del terreno y distribuyendo las cargas de forma uniforme, lo que mejora el control del flujo de agua superficial y minimiza la erosión. además, los escalones se van creando a medida que es necesario, utilizando muros provisionales que sostienen el relave durante el proceso de solidificación. Una vez que el material alcanza su resistencia completa, se puede prescindir de estos muros, logrando una estructura robusta, auto portante y adecuada para los desafíos de los terrenos montañosos

Los beneficios que se puede encontrar con la geometría planteada se encuentran las siguientes:

- a) **Optimización del Tiempo y Recursos de Construcción:** Al construir los escalones de manera progresiva y solo cuando sea necesario, se optimiza el uso de materiales y recursos. Los muros provisionales permiten mantener el control de la forma y la estabilidad del escalón en el proceso de solidificación, sin necesidad de construir todo el depósito a la vez.
- b) **Reducción de Riesgos de Deslizamiento:** Al ir consolidando cada sección y remover los muros provisionales solo cuando el material ha endurecido, se mantiene el control sobre la estabilidad del depósito, minimizando el riesgo de deslizamientos en el proceso de construcción. Esto es particularmente útil en terrenos inclinados, donde la gravedad ejerce fuerzas adicionales sobre cada nueva capa de material.
- c) **Adaptación Flexible al Progreso de Operaciones Mineras:** Este sistema escalonado permite ajustar la construcción del depósito en función de la cantidad de relave generado. Los muros provisionales actúan como contenedores temporales, permitiendo añadir más relave y construir nuevos escalones solo cuando sea necesario, ajustándose dinámicamente a las necesidades operativas de la mina.
- d) **Seguridad y Control en el Proceso de Solidificación:** Los muros temporales permiten que cada escalón se solidifique en condiciones controladas antes de cargar la siguiente capa. Esto garantiza que la resistencia de cada escalón sea adecuada para soportar el peso y las cargas de las capas superiores, asegurando la estabilidad general del depósito.
- e) **Escurrimiento Natural del Agua:** La forma escalonada permite que el agua de lluvia o deshielo escurra de manera controlada sobre cada nivel, lo que reduce la acumulación y evita la presión hidrostática sobre el depósito. Este escurrimiento gradual minimiza la infiltración y el riesgo de erosión, protegiendo tanto la estructura cementada como el suelo adyacente.
- f) **Minimización de la Erosión:** La geometría escalonada ralentiza la velocidad de la escorrentía y controla la cantidad de agua que pasa por cada nivel, reduciendo así el riesgo de erosión en el depósito y en el terreno circundante. Esta característica ayuda a mantener la integridad del depósito y prolonga su durabilidad en ambientes montañosos, además que se buscará un porcentaje de cemento con relave que cumpla con las condiciones establecidas por el decreto supremo 248 sobre la impermeabilización.

Para poder posicionar un depósito de relave cementado en forma escalonada estos depósitos, deben superar las exigencias normativas para un proyecto de depósitos

de relave, la cual debe aprobar las exigencias dadas por el decreto supremo 248, el decreto supremo 132 y la normativa legal reglamentaria y disposiciones vigentes siguiendo los pasos presentados en el siguiente esquema (Figura 4.1):

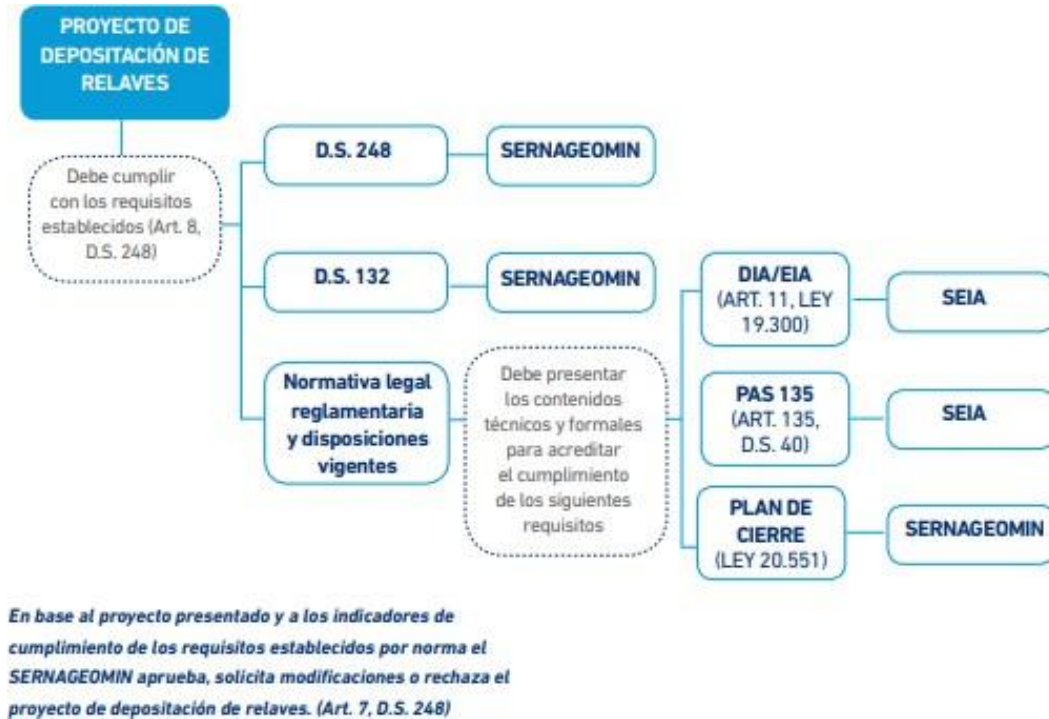


Figura 4.1. Exigencias normativas para un depósito de relave. [2]

Dicho lo anterior se debe hacer un análisis de los puntos más importantes entregados tanto por el DS248, el DS132 y la normativa legal reglamentaria y disposiciones vigentes, y revisando los parámetros a los cuales un relave cementado puede llegar, para afirmar que este tipo de depósitos puede ser considerado apto para ser implementado en Chile.

4.3. Análisis técnico del depósito de relave cementado

Una vez Analizados el DS248 llamado “REGLAMENTO PARA LA APROBACIÓN DE PROYECTOS DE DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y CIERRE DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES”, el DS132 llamado REGLAMENTO DE SEGURIDAD MINERA MINISTERIO DE MINERÍA Normativa legal reglamentaria y disposiciones vigentes, donde el art. 11, ley 19.300; PAS 135 y Plan de cierre. Se puede notar que, dentro de estas exigencias, existe una que abarca el contenido de las demás la cual es el decreto supremo 248 ya que este establece el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental en Chile y se vincula indirectamente con el Decreto Supremo N° 132 y el Artículo 11 de la Ley 19.300, ya que ambos promueven la protección ambiental y la seguridad en las actividades industriales, especialmente en la minería.

El DS 132 define normas de seguridad en operaciones mineras, incluyendo la gestión de depósitos de relaves, para prevenir riesgos estructurales y ambientales. Por su parte, el DS 248 regula el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), que exige que cualquier proyecto minero que pueda generar impacto ambiental significativo sea evaluado y aprobado antes de su ejecución. Esto incluye revisar el impacto de los relaves, su manejo y control de riesgos, temas que el DS 132 cubre con un enfoque técnico. Al cumplir con el DS 248, se asegura que los requisitos de seguridad del DS 132 se cumplan como parte de la aprobación ambiental, dado que los estudios y permisos para los depósitos de relaves deben cumplir con estándares ambientales y de seguridad establecidos.

El Artículo 11 establece los requisitos para someter proyectos al SEIA, exigiendo la evaluación de aquellos que puedan generar efectos adversos en el medio ambiente, como riesgos para la salud de la población o deterioro de recursos naturales. Dado que los depósitos de relaves implican riesgos significativos, su evaluación bajo el SEIA, regulado por el DS 248, debe asegurar que el diseño y la operación cumplan con normas como las del DS 132.

El DS 248 abarca indirectamente al DS 132 y al Artículo 11 de la Ley 19.300 al requerir que proyectos mineros, como los que involucran depósitos de relaves, sean evaluados para asegurar que cumplen con normas de seguridad y de protección ambiental antes de su ejecución. Por lo que si se cumplen las normativas establecidas en el DS 248 por consecuencia aprobará lo establecido por los otros dos puntos.

Con respecto a lo exigido por el PAS 135 no es requerido para lo establecido en este proyecto debido a que dentro de las normativas del PAS 135 solo aplica para casos en donde el depósito sea del tipo: Embalse de relaves, Tranque de relaves, Relaves en pasta, Relaves espesados o Relaves filtrados (ver Figura 4.2).

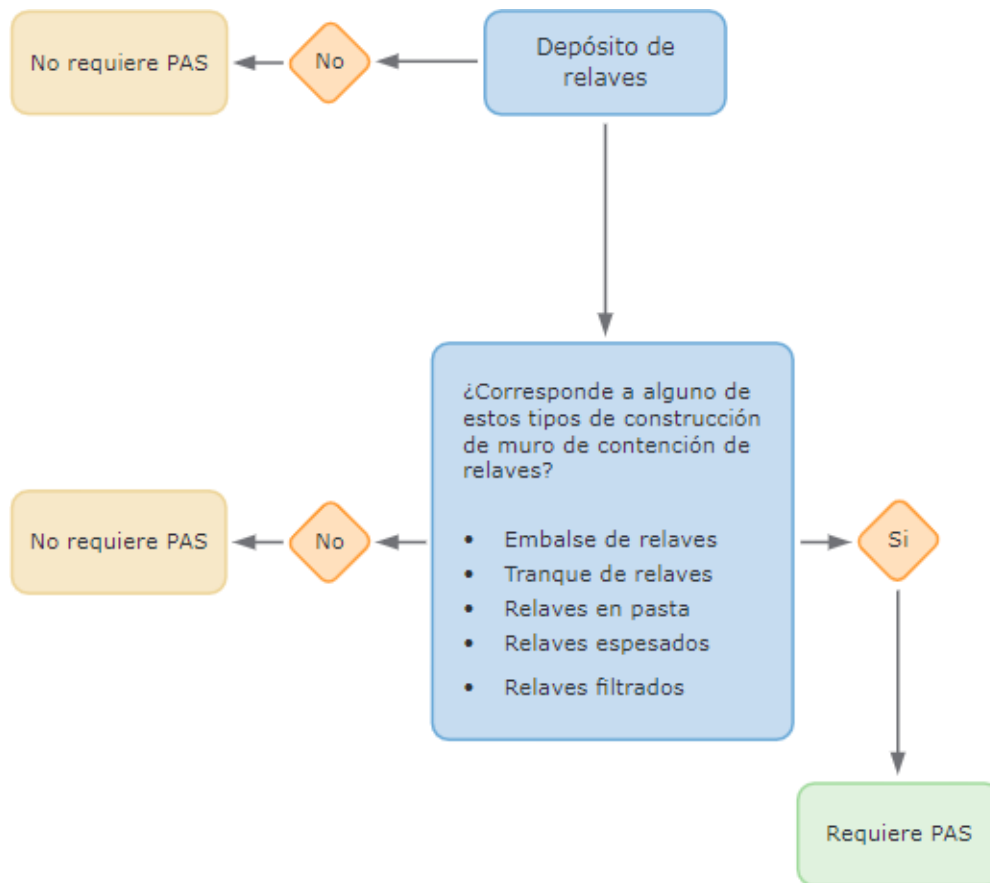


Figura 4.2. Diagrama de flujo requerimiento de PAS 135. [3]

Para efecto del plan de cierre, este estudio solamente se centrará en que sea factible el poder situar los depósitos en la alta cordillera por lo que no se ahondará en el plan de cierre.

Solo se realizará el estudio de DS248 y para esta debido a la geometría seleccionada la cual fue de forma escalonada y cementada se puede analizar el depósito como un solo conjunto en donde no existe un muro de contención y una cubeta por separado sino que será todo parte del conjunto de uno mismo, eso sí para el momento de depositar el relave cementado en estado líquido, este si debe estar encajonado por un muro de contención provisional el cual pueda ser retirado una vez se hay solidificado el relave cementado.

4.3.1. Estabilidad de los muros de concentración en depósitos cementados (Artículo 14 y 54 del DS248).

El Decreto Supremo N° 248 (DS248) en sus Artículos 14 y 54 exige que los muros de contención de los depósitos de relaves soporten las presiones internas sin poner en riesgo la seguridad ni la estabilidad del entorno, garantizando su integridad a largo plazo.

La cementación mejora la cohesión entre las partículas de los relaves, formando una estructura más resistente y compacta que disminuye la probabilidad de fracturas o desplazamientos en el depósito. A través de la adición de cemento, se refuerzan las propiedades mecánicas de los relaves, aumentando su capacidad para resistir las fuerzas internas y las cargas externas.

Además, como se mencionó anteriormente el depósito al ser un depósito cementado sólido, todo el depósito se comportará como un bloque en donde no existe la separación entre muro de contención y cubeta, sino que actuará como un muro completo. Por lo que se debe verificar que el depósito pueda mantenerse estable por sí solo y si cumple los coeficientes de seguridad mínimos exigidos por el DS248 el cual es de un mínimo de 1,2.

Para comprobar si el depósito de relave cementado es capaz de mantenerse en pie sin colapsar, se procede a evaluar su estabilidad a través de la modelación del depósito en el software de inventor y se utilizará la herramienta de análisis de este, para conocer las propiedades geomecánicas utilizadas en el software, revisar Tabla 7.1 de Anexos.

Lo primero que se hace es modelar un depósito de base de 1 millón de toneladas, de base cuadrada para efectos del estudio de 100 metros de lado y 15 metros de altura por escalón, y con un total de 4 escalones para llegar al peso buscado dando un total de altura de 60 metros y con un grado de inclinación de 35 grados en su base de apoyo a la ladera de la montaña. como se muestra en la Figura 4.3.

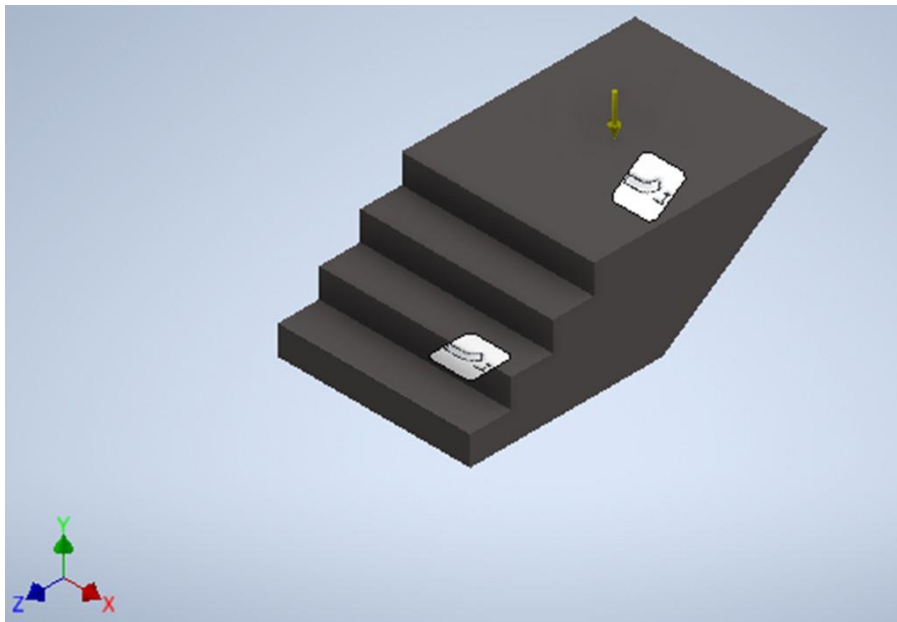


Figura 4.3. Modelo de propuesta de depósito de relave cementado.

Una vez realizada el modelo se aplican las fuerzas que estarán presentes en todo momento actuando en el depósito, dentro de las cuales están, la fuerza de gravedad y la fuerza normal ejercidas por el suelo y por la ladera de ladera de la montaña a la cual será depositado (ver Figura 4.4).

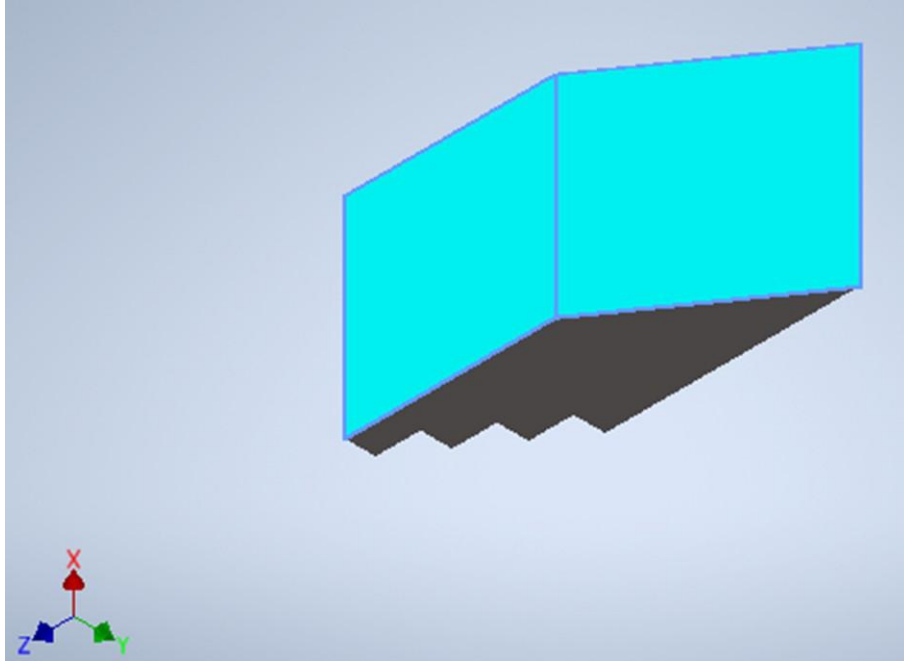


Figura 4.4. *Fuerzas fijas en propuesta de depósito de relave cementado.*

Estando ya definidas todas las fuerzas que se encuentran presentes en el depósito en un estado normal, sin ninguna fuerza externa, se procede a simular para verificar el cómo se comportará el depósito. Obteniendo los siguientes resultados (ver Figura 4.5).

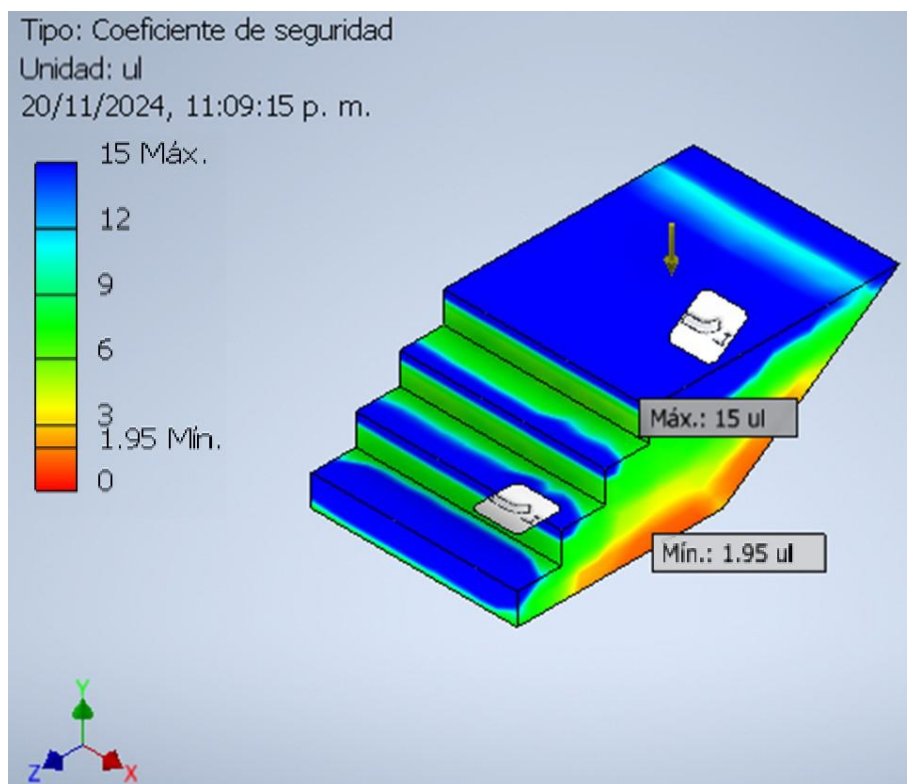


Figura 4.5. *Coeficiente de seguridad propuesta de depósito de relave cementado bajo fuerzas normales y fuerza de gravedad.*

Con el resultado del coeficiente de seguridad de 1,95, se supera el coeficiente de seguridad mínima requerida por SERNAGOEMIN es de 1,2 lo que indica la capacidad de un sistema para soportar cargas o esfuerzos sin sufrir fallas o deformaciones permanentes en un caso sin fuerzas externas. Por lo que se puede decir que este depósito puede mantener su propio peso sin colapsar.

4.3.2. Impermeabilización del Depósito Cementado (Artículo 56 del DS248).

El sistema de impermeabilización del fondo de la cubeta de los tranques y embalses de relaves o del área donde se depositan los relaves espesados, de ser necesario, deberá contemplar un tratamiento previo del terreno utilizado, por ejemplo, recubrimientos compactados compuestos con materiales del tipo arcillosos u otros con propiedades impermeabilizantes, o cualquier otro método (en el caso del Tranque de Relaves no es permitido el uso de una geomembrana), para impedir o minimizar filtraciones de agua contaminadas al exterior del depósito o infiltraciones a cursos de aguas subterráneas” [10]

Además, la guía técnica de operación de relave entregada por SERNAGEOMIN determina que se considera impermeable cuando el coeficiente de permeabilidad es de 10^{-9} cm/seg o menor [16]

Para el caso de este depósito el relave al estar cementado se debe analizar su permeabilidad del bloque completo ya que este al estar en estado sólido se comporta

como un solo cuerpo a deferencia de otros tipos de depósitos de relaves.

El proceso de cementación puede variar según el tipo de relave, el contenido de cemento y la cantidad de agua utilizada. Bai et al. argumenta que un contenido adecuado de cemento no solo mejora la cohesión, sino que también facilita la creación de poros de menor tamaño, lo que reduce la permeabilidad y evita la filtración de agua [17].

El cemento, al hidratarse y formar una estructura sólida, reduce considerablemente la permeabilidad del material, sellando los poros entre las partículas de los relaves. Esta mejora en la impermeabilidad es documentada en Helinski et al. Quien destaca que los depósitos de relaves cementados presentan una baja permeabilidad en comparación con los depósitos de relaves no cementados. [18]

Para afirmar que el depósito cumple con los valores del coeficiente de permeabilidad mínimo requerido por SERNAGEOMIN se debe calcular el coeficiente de permeabilidad del relave cementado para calcularlo se utilizará la ley de Darcy [19], bajo el supuesto de que los componentes mantienen una distribución uniforme en la cual sigue una relación de 95 % de relave y 5 % de cemento.

$$k_{mezcla} = \frac{1}{\sum_i \frac{\varphi_i}{k_i}}$$

Donde:

- k_{mezcla} es el coeficiente de permeabilidad de la mezcla.
- φ_i es la fracción volumétrica de cada componente.
- k_i es el coeficiente de permeabilidad de cada componente.

se asume que el cemento agregado forma parte del volumen total de 100 %. Así:

Relave:

$$\varphi_{relave} = 0,95, \quad k_{relave} = 10^{-7} \text{ cm/s.}$$

Cemento:

$$\varphi_{cemento} = 0,05, \quad k_{cemento} = 10^{-12} \text{ cm/s.}$$

Se sustituyen los valores para calcular k_{mezcla} :

$$k_{mezcla} = \frac{1}{\frac{\varphi_{relave}}{k_{relave}} + \frac{\varphi_{cemento}}{k_{cemento}}}$$

$$k_{mezcla} = \frac{1}{\frac{0,95}{10^{-7}} + \frac{0,05}{10^{-12}}}$$

Una vez realizado los cálculos, da un valor de $k_{mezcla} = 2,0 \times 10^{-11}$ cm/s. Este valor representa una significativa reducción en la permeabilidad comparado con el relave original, llegado a un valor el cual supera el mínimo requerido por SERNAGEOMIN (10^{-9}), lo que entra en la categoría de impermeable.

4.3.3. Deslizamiento del depósito

En el DS248 no existe alguna especificación sobre el deslizamiento, pero al ser un depósito sólido, este no debiese deslizar para garantizar su seguridad.

Para calcular si el depósito es propenso a deslizarse, se deben conocer los siguientes datos:

Datos sobre el bloque de relave cementado

Peso del bloque o densidad y dimensiones:

Para efectos de este cálculo, se calculará un depósito tipo de un peso de 1 millón de toneladas.

Forma del bloque:

La forma del bloque es un depósito escalonado, impermeable. Datos

sobre la ladera: Ángulo de inclinación de la ladera (ϑ):

los ángulos promedio de inclinación en zonas cercanas a las faenas mineras, varía entre 15° y 35° en este caso se utilizará el mayor grado de inclinación (35°) para verificar si se desliza en el caso de mayor ángulo.

Estado de la superficie de la ladera:

Es rugosa.

Propiedades mecánicas: Coeficiente de fricción estática (μ_s):

El valor entre el material de la ladera y el relave cementado es de 0,7. Fuerza de cohesión del material en contacto:

La cohesión que existe entre el depósito de relave cementado y la ladera de la cordillera es de $2,25 \times 10^5 \text{ N/m}^2$.

Factores adicionales.

Condiciones climáticas: En la Cordillera de los Andes de la zona central de Chile, a una altitud de 2 000 msnm, predominan las condiciones climáticas de montaña con marcadas amplitudes térmicas diarias. Las temperaturas fluctúan entre -10°C en invierno y 20°C en verano, mientras que la humedad relativa permanece baja, entre el 30 % y el 60 %. Las precipitaciones anuales, concentradas entre mayo y septiembre, oscilan entre 300 y 600 mm, mayoritariamente en forma de nieve. La radiación solar es intensa durante todo el año, y los vientos predominantes alcanzan velocidades de hasta 50 km/h en invierno. Estas características hacen que la región tenga un clima riguroso y estacionalmente contrastante.

1. Descomposición de fuerzas

Peso del depósito (W)

El peso del depósito es:

$$W = 1 \text{ Mt} = 10^6 \text{ kg.}$$

La fuerza gravitacional se calcula como:

$$W = m \cdot g = 10^6 \cdot 9,8 = 9,8 \times 10^6 \text{ N.}$$

Componentes de la fuerza gravitacional

Componente paralela a la pendiente ($F_{paralela}$)

$$F_{paralela} = W \cdot \sin(\vartheta).$$

Componente perpendicular a la pendiente (F_{normal})

$$F_{normal} = W \cdot \cos(\vartheta).$$

Sustituyendo $\vartheta = 35^\circ$:

$$F_{paralela} = 9,8 \times 10^6 \cdot \sin(35^\circ),$$

$$F_{normal} = 9,8 \times 10^6 \cdot \cos(35^\circ).$$

2. Fuerza de fricción estática máxima

La fuerza de fricción estática máxima que puede resistir el deslizamiento es:

$$F_{fricción\ máx} = \mu_s \cdot F_{normal}.$$

3. Verificación de estabilidad por fricción

El bloque no desliza si:

$$F_{fricción\ máx} \geq F_{paralela}.$$

4. Consideración de cohesión

La cohesión añade una fuerza adicional de resistencia al deslizamiento:

$$F_{cohesión} = \text{Área de contacto} \cdot \text{Cohesión promedio}.$$

La cohesión promedio entre el bloque y la ladera es:

$$\text{Cohesión promedio} = \frac{3 \times 10^5 + 1,5 \times 10^5}{2} = 2,25 \times 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Si el bloque tiene un área de contacto aproximada de 1 m^2 :

$$F_{cohesión} = 2,25 \times 10^5 \text{ N}.$$

La fuerza total resistiva será:

$$F_{resistencia\ total} = F_{fricción\ máx} + F_{cohesión}.$$

5. Resultados:

- **Fuerza gravitacional paralela a la pendiente (F_{paralela}):** 5 621 049 N
- **Fuerza de fricción estática máxima ($F_{\text{fricción máx}}$):** 5 619 383 N
- **Fuerza de cohesión adicional ($F_{\text{cohesión}}$):** 225 000 N
- **Fuerza total resistiva ($F_{\text{resistencia total}}$):** 5 844 383 N

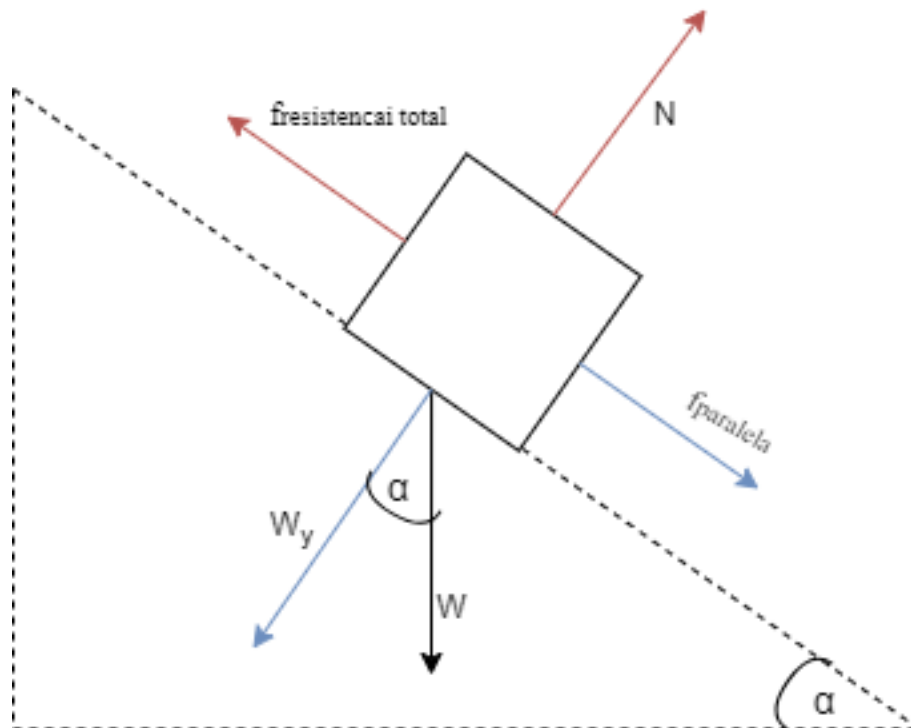


Figura 4.6. Diagrama de cuerpo libre sobre deslizamiento del depósito.

Donde:

- W es el peso del depósito
- f_{paralela} es la fuerza gravitacional paralela a la pendiente
- $f_{\text{resistencia total}}$ es la fuerza total resistiva
- N es la fuerza normal
- α es el ángulo de inclinación de 35°

El bloque no desliza. La fuerza resistiva total supera la fuerza paralela, por lo que el depósito puede mantenerse estable bajo estas condiciones.

4.3.4. Resistencia a Eventos Sísmicos (Artículos 5 y 14 del DS248)

El Decreto Supremo N° 248 (DS248) en sus Artículos 5 y 14 establece que los depósitos de relaves deben diseñarse para soportar eventos sísmicos, garantizando que la estabilidad de la estructura no se vea comprometida y que se minimice el riesgo

de colapso y daños al entorno. Esto es particularmente relevante en regiones como la cordillera de los Andes, donde la alta sismicidad exige que los depósitos estén preparados para resistir movimientos telúricos.

Helinski (2007) destaca que la presencia de cemento en los relaves mejora su capacidad de absorber y distribuir la energía sísmica, minimizando así el impacto de los movimientos telúricos en la estructura. La matriz cementada actúa como un sistema de refuerzo interno que aumenta la resistencia al corte del material y permite que el depósito mantenga su integridad, incluso durante terremotos de gran magnitud. Esta propiedad es consistente con los requisitos del DS248, que exige que los depósitos sean diseñados para soportar cargas sísmicas sin comprometer la seguridad.

Para evaluar cómo se comportará un depósito durante un sismo, se utilizarán los siguientes datos presentados en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1 Datos Utilizados para cálculo de estabilidad en sismos.

Propiedad	Unidad	Valor
Peso del depósito	N	1,6x10 ⁹
Densidad del material	kg/m ³	1 690
Área basal inferior	m ²	10 000
Área basal inclinada	m ²	7 325
Área de contacto total	m ²	1 7025
Ángulo de inclinación	°	35
Coefficiente de fricción	-	0,7
Cohesión del material	N/m ²	225 000
Aceleración sísmica máxima	m/s ²	5,292
Volumen del depósito	m ³	591 719
Duración del sismo	s	60
Frecuencia	-	7 826
Contenido espectral	s	0,04-2

Además, se tendrá en cuenta que la dirección de aceleración sísmica es en ambas direcciones tanto en vertical como en horizontal, el factor de importancia sísmica es media y existen factores los cuales no serán tomados en cuenta, la capacidad de carga del suelo no será aplicada en este caso las propiedades dinámicas del suelo tampoco serán tomadas, ya que se utilizarán valores estándar en caso de ser necesarios. En cuanto al drenaje y al agua no aplicaran ya que como de menciono anteriormente, el depósito de relave es impermeable por lo que no será utilizado en este caso y por último para efectos de borde e interacción, para efectos de este estudio se asumirá que no hay elementos.

Cálculo de la Estabilidad en Sismo

1. Fuerza Paralela (sin sismo)

La fuerza paralela es la componente del peso del depósito que actúa a lo largo de la pendiente utilizando los datos de la Tabla 7.1 de Anexos:

$$F_{\text{paralela}} = F_g \cdot \sin(\vartheta)$$

- **Peso del depósito (F_g):**

$$F_g = \gamma \cdot V = 2\,700 \text{ N/m}^3 \times 591\,719 \text{ m}^3 = 1\,597\,641\,300 \text{ N}$$

- **Ángulo de inclinación (ϑ):**

$$\vartheta = 35^\circ$$

- **Cálculo:**

$$F_{\text{paralela}} = 1\,597\,641\,300 \cdot \sin(35^\circ) = 916\,369\,403 \text{ N}$$

2. Fuerza Normal

La fuerza normal es la componente del peso que actúa perpendicular a la pendiente:

$$F_{\text{normal}} = F_g \cdot \cos(\vartheta)$$

- **Cálculo:**

$$F_{\text{normal}} = 1\,597\,641\,300 \text{ N} \cdot \cos(35^\circ) = 1\,308\,711\,137 \text{ N}$$

3. Fuerza de Fricción

La fuerza de fricción máxima es proporcional a la fuerza normal y depende del coeficiente de fricción (μ):

$$F_{\text{fricción}} = \mu \cdot F_{\text{normal}}$$

- **Coeficiente de fricción (μ):**

$$\mu = 0,7$$

- **Cálculo:**

$$F_{\text{fricción}} = 0,7 \cdot 1\,308\,711\,137\,N = 916\,097\,796\,N$$

4. Fuerza de Cohesión

La fuerza de cohesión depende de la cohesión del material y del área efectiva de contacto:

$$F_{\text{cohesión}} = \text{Cohesión promedio} \cdot \text{Área total}$$

- **Cohesión promedio:**

$$\text{Cohesión promedio} = 2,25 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

- **Área efectiva de contacto:**

$$\text{Área total} = \text{Área basal} + \text{Área inclinada}$$

$$\text{Área total} = 10\,000 \text{ m}^2 + 7\,325 \text{ m}^2 = 17\,325 \text{ m}^2$$

- **Cálculo:**

$$F_{\text{cohesión}} = 2,25 \times 10^5 \cdot 17\,325 = 2\,898\,125\,000 \text{ N}$$

5. Fuerza Sísmica

La fuerza sísmica se calcula como una fracción del peso del depósito, basada en la aceleración máxima del suelo:

$$F_{\text{sísmica}} = F_g \cdot \frac{a_{\text{máx}}}{g}$$

- **Aceleración máxima del suelo ($a_{\text{máx}}$):**

$$a_{\text{máx}} = 0,54 \cdot 9,8 = 5,292 \text{ m/s}^2$$

- **Cálculo:**

$$F_{\text{sísmica}} = 1\,597\,641\,300 \text{ N} \cdot \frac{5,292}{9,8} = 862\,726\,302 \text{ N}$$

6. Fuerza Paralela Total (con sismo)

La fuerza paralela total considera la fuerza paralela al plano más la fuerza sísmica:

$$F_{\text{paralela total}} = F_{\text{paralela}} + F_{\text{sísmica}}$$

- **Cálculo:**

$$F_{\text{paralela total}} = 916\,369\,403 + 862\,726\,302 = 1\,779\,095\,705 \text{ N}$$

7. Fuerza Resistiva Total

La fuerza resistiva total es la suma de la fuerza de fricción y la fuerza de cohesión:

$$F_{\text{resistiva total}} = F_{\text{fricción}} + F_{\text{cohesión}}$$

- **Cálculo:**

$$F_{\text{resistiva total}} = 916\,097\,796\text{ N} + 3\,898\,125\,000\text{ N} = 4\,814\,222\,796\text{ N}$$

8. Coeficiente de Seguridad

El coeficiente de seguridad (CS) se calcula como el cociente entre la fuerza resistiva total y la fuerza paralela total:

$$CS = \frac{F_{\text{resistiva total}}}{F_{\text{paralela total}}}$$

- **Cálculo:**

$$CS = \frac{4\,814\,222\,796}{1\,779\,095\,705} = 2,71$$

El coeficiente de seguridad durante el sismo es $CS = 2,71$. Esto indica que el depósito es estable bajo las condiciones sísmicas especificadas para el caso de sismos.

Además, para ratificar los cálculos hechos anteriormente, se procede a realizar una simulación para poder mostrar el cómo se comportaría el depósito de relave cementado al verse enfrentado a un sismo, para el cual se utilizarán los mismos datos utilizados en el cálculo de estabilidad anterior.

Una vez hecha la simulación se obtienen los siguientes resultados.

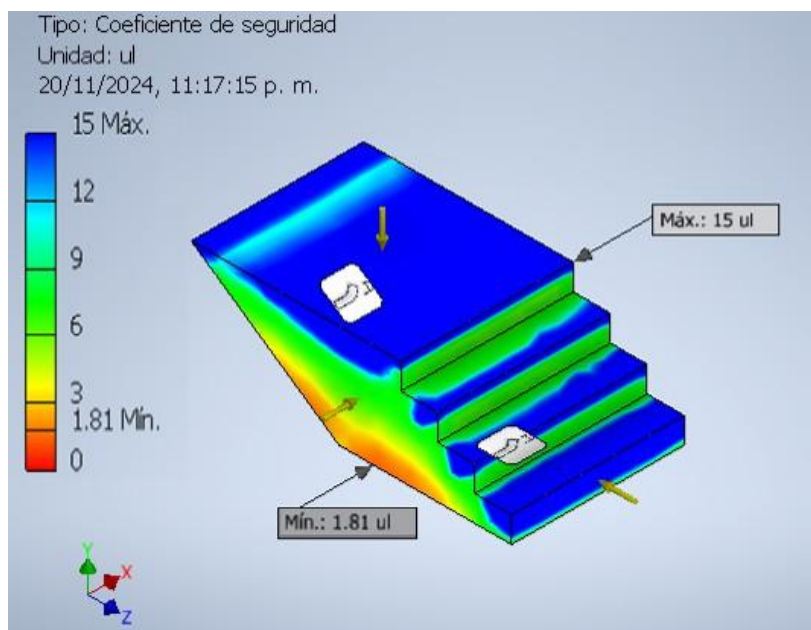


Figura 4.7. Coeficiente de seguridad depósito de relave cementado en presencia de un sismo.

Como se puede observar en la figura 4.7 los coeficientes de seguridad mínimos obtenidos son de 1,81 la cual es un valor mayor al mínimo requerido, además el valor es similar al valor obtenido por el método teórico lo cual demuestra que el depósito puede soportar las fuerzas ejercidas por sismos.

Capítulo 5

Resultados y Discusiones

1.1. Resultados

El estado del relave, seleccionado el cual será depositado en la cordillera de los Andes es en estado cementado.

La geometría escalonada genera una disposición ordenada, adaptándose al terreno montañoso y distribuyendo las cargas de forma uniforme.

El análisis técnico confirmó que el diseño propuesto cumple con los requisitos establecidos en el DS248. Los cálculos y simulaciones realizadas demostraron un coeficiente de seguridad de 1,95 bajo condiciones normales y de 1,81 frente a sismos, ambos valores por encima del mínimo normativo.

El depósito de relaves cementados alcanzó un coeficiente de permeabilidad de $2,0 \times 10^{-11}$ cm/s, considerablemente inferior al límite de 10^{-9} cm/s estipulado por SERNAGEOMIN.

Los resultados obtenidos para el deslizamiento del bloque fueron que la fuerza total resistiva es 5 844 383 N y la fuerza gravitacional paralela a la pendiente es de 5 621 049 N.

1.2. Discusión

Los CS obtenidos tanto en estado estático y en presencia de sismos asegura la estabilidad estructural necesaria en la cordillera ya que el mínimo requerido por el DS248 es de 1.3.

La geometría escalonada genera una disposición ordenada, adaptándose al terreno montañoso y distribuyendo las cargas de forma uniforme. Este diseño asegura un uso eficiente del espacio y reduce la posibilidad de erosión y escurrimientos descontrolados.

El análisis evidenció que los métodos de disposición en estado de pulpa y geo polímeros presentan limitaciones significativas para las condiciones de alta montaña. Los depósitos en estado de pulpa requieren muros de contención de gran altura, como el Embalse Los Leones, lo que implica un uso intensivo de materiales externos y riesgos de licuefacción. Los geo polímeros, por su parte, carecen de normativas específicas y presentan desafíos en su aplicación en condiciones extremas.

Los resultados obtenidos sobre el valor de permeabilidad del depósito garantizan que no ocurrirán infiltraciones hacia los acuíferos subyacentes, minimizando riesgos ambientales, ya que según SERNAGEOMIN este valor ($2,0 \times 10^{-11}$) es considerado impermeable .

Para llevar a cabo una evaluación integral del modelo propuestos bajo fuerzas sísmicas, se realizaron dos enfoques de análisis, uno consistió en un análisis manual basado en los principios de la mecánica de suelos y la teoría de estabilidad de taludes y la segunda fue ejecutado mediante el software Autodesk Inventor utilizando el método de elementos finitos (FEM).

El análisis manual se fundamentó en la aplicación del criterio de Mohr Coulomb para evaluar la resistencia del depósito ante las fuerzas provocadas de el mismo más las fuerzas del sismo que se estaba evaluando. A partir de estos cálculos, se determinó que el coeficiente de seguridad es de 2,71, lo que indica una estabilidad adecuada del depósito bajo condiciones sísmicas. Este valor refleja una aproximación global del equilibrio entre las fuerzas resistivas y las fuerzas que tienden a producir deslizamiento.

Por otro lado, el análisis realizado con el software Autodesk Inventor se basó en el método FEM. Este método discretiza el depósito en una malla de elementos y resuelve las ecuaciones de equilibrio en cada uno de ellos, lo que permite evaluar con una mayor precisión la distribución de esfuerzos y deformaciones en el material. Se aplicaron las mismas cargas consideradas en el análisis manual, incluyendo el peso del depósito y aceleraciones sísmicas.

El análisis en Inventor proporcionó un coeficiente de seguridad de 1,81, lo cual representa una evaluación más localizada de las zonas críticas del depósito. Este valor más bajo puede atribuirse a varios factores los cuales pueden ser, una distribución no uniforme de los esfuerzos, una geometría más detallada y efectos de deformación y flexibilidad del material.

A pesar de que los coeficientes de seguridad obtenidos son diferentes, ambos resultados son considerados válidos y representativos debido a que el análisis de coeficiente de seguridad manual proporciona un coeficiente de seguridad global, evaluando el equilibrio promedio de todas las fuerzas actuantes. El análisis de Inventor, ofrece un coeficiente de seguridad local, identificando zonas específicas donde los esfuerzos pueden ser mayores. Además, si se utiliza como valor final el resultado, más bajo encontrado el cual fue de 1,81, este valor cumple con las normativas solicitadas de un coeficiente de seguridad mínimo de 1,3 para condiciones sísmicas en depósitos de relaves lo que indica una estabilidad aceptable.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

El presente estudio tuvo como objetivo general proponer una alternativa técnica para la disposición de relaves cementados en la alta cordillera de los Andes, abordando los desafíos estructurales, sísmicos y ambientales que presentan los métodos tradicionales utilizados en el valle central de Chile. A través del desarrollo de esta investigación, se obtuvieron resultados que permiten validar los objetivos específicos planteados y demostrar la viabilidad técnica de la propuesta.

En primer lugar, se analizó en profundidad las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los relaves cementados para su uso en depósitos superficiales. La proporción seleccionada de 95 % relave y 5 % cemento se determinó como adecuada para garantizar la estabilidad estructural y la impermeabilidad del depósito. Los ensayos realizados arrojaron una permeabilidad de $2,0 \times 10^{-11}$ cm/s, cumpliendo con los estándares estipulados por SERNAGEOMIN. La cementación del relave mejora significativamente su cohesión interna y reduce la posibilidad de infiltraciones, asegurando una mayor protección de los acuíferos subyacentes.

Por otra parte, se diseñó un prototipo de depósito escalonado, considerando las complejas condiciones geotécnicas de la alta cordillera. Este diseño permitió una disposición ordenada y progresiva del relave, adaptándose a pendientes de hasta 35° . La geometría escalonada optimizó la distribución de las cargas, mejoró la estabilidad estructural y redujo el riesgo de erosión superficial. Asimismo, la implementación de muros provisionales durante el proceso de solidificación facilitó la construcción por etapas y contribuyó a minimizar el uso de materiales externos, alineándose con criterios de sostenibilidad.

La validación técnica del diseño se llevó a cabo mediante simulaciones computacionales y cálculos manuales, enfocándose en el comportamiento estructural del depósito bajo condiciones sísmicas extremas. Los resultados indicaron un coeficiente de seguridad de 1,95 en condiciones estáticas y de 1,81 frente a aceleraciones sísmicas de hasta 0,54 g, superando el requisito normativo mínimo de 1,3 exigido por el DS248. Estos valores demuestran que el depósito es capaz de soportar fuerzas sísmicas considerables sin comprometer su integridad estructural, garantizando así su viabilidad técnica en una de las zonas más sísmicas del planeta.

Además, se descartaron otras alternativas como los relaves en pulpa y el uso de geo polímeros. Los depósitos en pulpa fueron rechazados debido a la necesidad de construir muros de contención de gran altura y al riesgo de licuefacción en zonas sísmicas. Por otro lado, los geo polímeros presentaron incertidumbres respecto a su comportamiento en condiciones extremas de alta montaña y carecen de normativas específicas para su aplicación a gran escala. La selección de relaves cementados como método preferente se fundamentó en su mayor estabilidad, impermeabilidad y adaptabilidad al terreno montañoso.

En conclusión, los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación confirman que la disposición de relaves cementados en alta cordillera representa una alternativa técnica viable y sostenible. El diseño propuesto no solo garantiza la estabilidad estructural y la impermeabilidad del depósito, sino que también contribuye a liberar tierras en el valle central, reduciendo los conflictos socioambientales y mejorando la gestión territorial. De esta forma, se cumple con el objetivo general y se valida cada uno de los objetivos específicos planteados, aportando una solución alineada con los desafíos actuales y futuros de la industria minera chilena.

6.2. Recomendaciones

En primer lugar, se recomienda adoptar el diseño de depósitos escalonados con relaves cementados como una solución estándar para proyectos mineros en regiones de alta montaña con elevada actividad sísmica. Este enfoque ha demostrado ser eficiente para garantizar la estabilidad estructural, reducir los riesgos de deslizamiento y adaptarse a la topografía montañoso. Además, la construcción progresiva mediante muros provisionales permite optimizar el uso de materiales y minimizar el impacto ambiental asociado al transporte y disposición de insumos externos.

Para asegurar una implementación exitosa, se sugiere llevar a cabo pruebas piloto en condiciones reales de alta montaña antes de una aplicación a gran escala. Estas pruebas permitirán validar los parámetros técnicos establecidos en el presente estudio, como el coeficiente de permeabilidad, la resistencia estructural y el comportamiento sísmico del depósito. Asimismo, facilitarán la identificación de posibles ajustes en el proceso de construcción y en la proporción de la mezcla cementada para mejorar su desempeño.

Es fundamental establecer un programa de monitoreo continuo una vez que el depósito entre en operación. Este programa debe incluir inspecciones regulares de los niveles de solidificación, pruebas de resistencia mecánica y mediciones del coeficiente de permeabilidad. Además, se recomienda implementar sistemas de alerta temprana que permitan detectar cualquier anomalía en la estabilidad del depósito y asegurar una respuesta oportuna para prevenir fallas estructurales.

En cuanto a la optimización de materiales, se sugiere investigar el uso de aditivos o materiales alternativos que puedan sustituir parcial o totalmente al cemento tradicional. La incorporación de aditivos podría mejorar las propiedades mecánicas del relave cementado, reducir costos de implementación y disminuir el impacto ambiental asociado a la producción de cemento. Esta línea de investigación debe enfocarse en garantizar que los materiales alternativos cumplan con las normativas técnicas y ambientales establecidas en el DS248 y el DS132.

Por último, se recomienda trabajar en conjunto con entidades reguladoras, como SERNAGEOMIN, para actualizar las normativas relacionadas con la disposición de relaves en alta cordillera. Las especificaciones técnicas deben considerar los desafíos particulares de los terrenos montañosos y las ventajas de los métodos avanzados, como la cementación de relaves. Esta actualización normativa facilitará la aprobación de proyectos innovadores y fomentará prácticas más seguras y sostenibles en la industria minera.

Bibliografía

- [1] P. V, “Ecuador: peligrosas piscinas de desechos mineros que rodean mirador no tienen...” <https://planv.com.ec/historias/ecuador-peligrosas-piscinas-desechos-mineros-que-rodean-mirador-no-tienen/>, 2024, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [2] F. Chile, “Avances y retos para la gestión de los depósitos de relaves en Chile,” <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/05/TRANQUE-2018-1.pdf>, 2018, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [3] Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), “Guía trámite pas del artículo 135 del reglamento del seia,” <https://www.sea.gob.cl/documentacion/guias-y-criterios/guia-tramite-pas-del-articulo-135-del-reglamento-del-seia-permiso>, 2020, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [4] U. de Chile. (2023) Impactos y desafíos del manejo de relaves. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/137234>
- [5] ResearchGate. (2023) Aplicación de relaves cementados en minas subterráneas chilenas. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/311789682_Aplicacion_de_relaves_cementados_en_minas_subterraneas_chilenas
- [6] SERNAGEOMIN, “Preguntas frecuentes sobre relaves,” <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>, 2024, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [7] Antofagasta Minerals, “Estándar de relaves,” https://www.aminerals.cl/sustentabilidad/estandar-de-relaves?utm_source=chatgpt.com, 2024, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [8] R. S. Minera, “Todo lo que debes saber sobre los relaves mineros según sernageomin,” https://revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/todo-lo-que-debes-saber-sobre-los-relaves-mineros-segun-sernageomin/?utm_source=chatgpt.com, 2024, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [9] SONAMI, “Depósitos de relaves mineros,” https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2019/05/Depositos-de-Relaves-Mineros_sonami.pdf?utm_source=chatgpt.com, 2019, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [10] SERNAGEOMIN, “Ds248 reglamento de depósitos de relave,” https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2023/07/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf, 2023, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [11] H. al Día, “Disposición de relaves cementados en minas subterráneas,” <https://hormigonaldia.ich.cl/sostenibilidad/>

- disposicion-de-relaves-cementados-en-minas-subterraneas/, 2024, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [12] InduAmbiente, “Cómo rellenos cementados,” https://www.induambiente.com/especial/construccion/como-rellenos-cementados?utm_source=chatgpt.com, 2024, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [13] Codelco, “Gestión de relaves: Los leones,” <https://www.codelco.com/gestion-de-relaves/los-leones>, 2024, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [14] L. Bambas, “Sitio oficial de las bambas,” <https://www.lasbambas.com>, 2024, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [15] C. C. Engineer, “Award of merit: Antamina tailings facility,” https://www.canadianconsultingengineer.com/features/award-of-merit-antamina-tailings-facility/?utm_source=chatgpt.com, 2024, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [16] SERNAGEOMIN, “Guía técnica para la operación de depósitos de relaves,” <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/12/GuiaTecOperacionDepRelaves.pdf>, 2018, consultado el 6 de noviembre de 2024.
- [17] L. Bai, H. Wang, X. Zhang, H. Li, S. Yang, and Z. Tian, “Effect of cement content on the static and dynamic liquefaction resistance of fine tailing,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, p. e02825, 2024.
- [18] M. Helinski, *Mechanics of mine backfill*. University of Western Australia Perth, 2007.
- [19] U. de Salamanca, “Ley de darcy,” https://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf, 2024, consultado el 6 de noviembre de 2024.

Capítulo 7

Anexos

Tabla 7.1

PARÁMETROS GEOMECÁNICOS INGRESADOS AL SOFTWARE INVENTOR.

Propiedad	Unidad	Relave cementado
UCS	MPa	0,6
E	MPa	500
Poisson (ν)	-	0,25
Y	kN/m ³	2,7