



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO GEOTÉCNICO CONCEPTUAL DE REMOCIÓN APLICADO A UN TRANQUE DE RELAVES EN CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JORGE ANDRÉS ANTILEF MANZO

PROFESOR GUÍA:
LUIS ILABARCA MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CÉSAR PASTÉN PUCHI
ROBERTO GESCHE SCHÜLER

SANTIAGO DE CHILE
2024

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil
POR: Jorge Andrés Antilef Manzo
FECHA: 2024
PROFESOR GUÍA: Luis Ilabarca Muñoz

ESTUDIO GEOTÉCNICO CONCEPTUAL DE REMOCIÓN APLICADO A UN TRANQUE DE RELAVES EN CHILE

La disminución de las leyes de cobre prevé un aumento en los residuos mineros conocidos como relaves. Durante los últimos años se ha puesto especial atención en los depósitos antiguos y abandonados con el fin explotar sus materiales con potencial económico. La minería secundaria no solo pone énfasis en minerales principales como el cobre, sino también en aquellos que actualmente son estratégicos a nivel mundial. La remoción de relaves es la actividad asociada al retiro de los materiales depositados.

La legislación actual de Chile no considera el reprocesamiento o remoción de los relaves en la etapa de cierre o post cierre. Otros intereses son, por ejemplo, eliminar o mitigar su impacto ambiental, extracción de minerales remanentes, utilizar el suelo para otra actividad, reutilizar el relave como material de construcción o alcanzar niveles de seguridad acorde a la normativa vigente. Según el catastro del Sernageomin múltiples depósitos fueron construidos con una metodología constructiva aguas arriba, actualmente prohibida, y también muchos de estos se encuentran en estado de estabilidad física y química desconocidos. Esto reafirma el interés de estudiar el retiro parcial o total de los depósitos.

Este trabajo desarrolla un procedimiento general para determinar las técnicas adecuadas en la remoción total o parcial de un depósito de relaves inactivo. También, se realiza un estudio de sensibilidad geométrica a nivel conceptual con el fin de evaluar su estabilidad geotécnica, para luego ser aplicada en un depósito real. Se propone una remoción, principalmente, por pitoneo hidráulico del tranque, verificando su estabilidad geotécnica en todas sus etapas. Se utiliza el método de equilibrio límite para evaluar la estabilidad estática como pseudo estática.

La geometría y nivel freático condiciona la definición de la franja de seguridad y conformación de taludes al interior de la cubeta. El comportamiento no drenado de los relaves disminuye la estabilidad durante el proceso de remoción, por lo tanto, se determinó que los taludes más estables son aquellos de menor altura y sin presencia de nivel freático. Los resultados son útiles para el estudio de futuros proyectos de remoción en depósitos abandonados o inactivos, los cuales son de especial interés para una minería secundaria y polimetálica.

A mi mamá Jessica, mami Virginia, hermanos Antonio y Estrella, y sobrina Dominga.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 : Introducción	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
Capítulo 2 : Antecedentes de estudio	3
2.1. Depósitos de relaves	3
2.2. Variabilidad de los relaves en la cubeta	4
2.3. Marco legal	7
2.4. Técnicas de remoción.....	8
2.4.1. Remoción Hidráulica.....	9
2.4.2. Remoción Mecánica	13
2.4.3. Dragado	14
2.4.4. Casos de remoción.....	16
2.4.5. Secuencia de remoción de relaves.....	22
2.4.6. Transporte, reutilización y redeposición	24
2.5. Estabilidad física.....	25
2.5.1. Métodos de equilibrio límite	26
2.5.2. Métodos de estabilidad sísmica.....	28
2.5.3. Excavaciones.....	28
2.5.4. Licuación.....	29
2.6. Características de depósitos de relaves antiguos y abandonados en Chile	30
2.6.1. Geometría de los depósitos.....	30
2.6.2. Parámetros geotécnicos	31
2.6.3. Coeficientes sísmicos	33
2.6.4. Criterios de aceptabilidad	34
2.7. Estudio de caso: Tranque Barahona 2	34
2.7.1. Antecedentes.....	35
2.7.2. Marco geológico y clima	36
2.7.3. Geometría.....	37

2.7.4. Caracterización de los materiales.....	38
2.7.5. Nivel freático	38
Capítulo 3 : Metodología de trabajo	39
3.1. Parte I: Estudio de estabilidad geotécnica	39
3.1.1. Definición de geometría de taludes de relaves	39
3.1.2. Efecto del Nivel freático	41
3.1.3. Definición de una franja de seguridad	43
3.2. Parte II: Aplicación al tranque Barahona 2	45
Capítulo 4 : Resultados	47
4.1. Procedimiento de remoción	47
4.2. Estudio de taludes de relaves.....	50
4.3. Estudio de franja de seguridad	53
4.4. Caso de remoción: Tranque Barahona 2	55
4.4.1. Excavación en relaves.....	56
4.4.2. Franja de seguridad.....	59
4.4.3. Propuesta de remoción y recomendaciones constructivas	65
Capítulo 5 : Discusión y análisis	67
Capítulo 6 : Conclusión y recomendaciones.....	71
6.1. Conclusiones	71
6.2. Recomendaciones.....	72
Bibliografía	74
ANEXOS	77
Anexo A.....	77
Anexo B	84

Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación de monitores hidráulicos según su presión de impulsión (Engels et al., 2004).....	10
Tabla 2: Resumen de las ventajas y desventajas identificadas para el método de remoción hidráulica mediante monitores (complementado con Muir et al., 2005).....	12
Tabla 3: Resumen de las ventajas y desventajas identificadas para el método de remoción mecánica (complementado con Muir et al., 2005).....	14
Tabla 4: Resumen de las ventajas y desventajas identificados para el método de remoción hidráulica por dragado (Muir et al., 2005).....	15
Tabla 5: Proyectos de remoción de relaves (Gutiérrez et al., 2020).....	16
Tabla 6: Métodos de equilibrio límite (Bentley Systems, 2021).....	27
Tabla 7: Resumen de geometrías de depósitos de relaves antiguos, algunos en proceso de remoción, y abandonados (Consejo Minero, s.f.; Pulgar, 2020; SRK Consulting, 2019).....	31
Tabla 8: Resumen de parámetros geotécnicos para los muros de tranques de relaves antiguos, algunos en proceso de remoción, y abandonados.....	32
Tabla 9: Resumen de parámetros geotécnicos para los relaves de tranques antiguos, algunos en proceso de remoción, y abandonados.....	32
Tabla 10: Resumen de parámetros geotécnicos para los suelos de fundación de tranques de relaves antiguos, algunos en proceso de remoción, y abandonados.....	33
Tabla 11: Criterios de aceptabilidad utilizado en Barahona 0 (Resolución N°1160 de 2009).....	34
Tabla 12: Geometría de los muros 2 y 3 de tranque Barahona 2 (SRK Consulting, 2019).....	37
Tabla 13: Parámetros geotécnicos para el estudio de los taludes en la excavación en relaves sin considerar nivel freático, evaluando una condición drenada de los materiales.....	41
Tabla 14: Parámetros geotécnicos para la definición de los taludes en la excavación en relaves considerando nivel freático y comportamiento del relave drenado y no drenado.....	42
Tabla 15: Parámetros geotécnicos para la definición de una franja.....	45

Tabla 16: Verificación en la conformación de bancos y bermas al evaluar una etapa intermedia de remoción de los relaves, considerando caso estático.	56
Tabla 17: Verificación en la conformación de bancos y bermas al evaluar una etapa intermedia de remoción de los relaves, considerando caso pseudo estático.....	57
Tabla 18: Resultados de las franjas de seguridad para el tranque Barahona 2, considerando una falla local.	60
Tabla 19: Resultados de las franjas de seguridad para el tranque Barahona 2, considerando una falla global.	60
Tabla 20: Cantidad estimada de monitores hidráulicos para distintos horizontes temporales de remoción del tranque Barahona 2. Esto considerando un volumen de 35 millones de toneladas y una eficiencia de remoción de 8000 toneladas por día.	65
Tabla 21: Relación entre la altura del depósito y la berma de seguridad en los casos de estudio.	69

Índice de Ilustraciones

Figura 1: Método de construcción de un tranque usando eje central (a), aguas abajo (b) y aguas arriba (c) (Blight, 2010).	4
Figura 2: Segregación del tamaño de partícula a lo largo de la cubeta (Vick, 1990).	5
Figura 3: Remoción hidráulica del depósito de relaves Colihues, CODELCO (Henderson, 2013). Monitor operado remotamente a través de una caseta que la conecta a una estación de operación.	9
Figura 4: Proceso de reprocesamiento de relaves utilizando monitores hidráulicos (Engels et al., 2004).	10
Figura 5: Esquemas de secuencias de remoción existentes (Kovacs, 1985, como se citó en Engels et al., 2004).	11
Figura 6: Sumidero (Anglo American, 2021).	12
Figura 7: Remoción a través de método mecánico y estación de repulpeo (Wates & Götz, 2016).	13
Figura 8: Remoción en avanzada usando face shovel (izquierda), remoción en retirada usando dragline (derecha) (Griedl, 2016).	13
Figura 9: Remoción utilizando la metodología de dragado (Gutiérrez et al., 2020).	15
Figura 10: Ubicación de la planta MVC y los depósitos Colihues y Cauquenes (Henderson, 2013).	17
Figura 11: Secuencia de remoción del depósito de relaves Colihues (Henderson, 2013).	18
Figura 12: Secuencia de remoción del depósito de relaves Cauquenes (Henderson, 2013).	18
Figura 13: Antes y después en la remoción del depósito Barahona 0 (elaboración propia, modificado de Google Earth).	19
Figura 14: Ejemplo de secuencia de remoción desde zonas céntricas de la cubeta hacia los costados (Pignaton, 2010).	20
Figura 15: Antes y después del proceso de remoción de los depósitos de relaves PC2, PC1 y Copihue al año 2017 (Anglo American, 2019).	20
Figura 16: Remoción en zona no saturada en mina Los Bronces (Engels et al., 2004).	21

Figura 17: Secuencia propuesta (método de minería de bloques) para la remoción del tranque Hamburgo (BHP, 2023).	22
Figura 18: Ejemplo ilustrativo de método de remoción o minería por bloques (elaboración propia).	23
Figura 19: Ejemplo ilustrativo de remoción desde la cola en la figura izquierda y con zanjas desde el interior en la figura derecha (elaboración propia).	23
Figura 20: Diferentes opciones de redepósito (Gutiérrez et al., 2020).	25
Figura 21: Tipos de fallas comunes en taludes, estos son: (a) el movimiento de la masa de suelo en una capa débil, (b) falla de base, (c) al pie del talud, (d) de talud, (e) de flujo y (f) deslizamiento de bloque (Budhu, 2011).	26
Figura 22: Clasificación general de los métodos de estabilidad de taludes (Bentley Systems, 2021).	27
Figura 23: Variación en el tiempo de la presión de poros y factor de seguridad durante y después de un talud excavado en arcilla, $A=1$ y $A=0$ representan los altos y bajos valores del cambio en la presión de poros debido a la excavación (Duncan et al., 2014).	29
Figura 24: Ubicación del depósito Barahona 0 y Botadero Barahona del depósito Barahona 2 (SRK Consulting, 2019).	33
Figura 25: Ubicación instalaciones División El Teniente y Tranque Barahona (elaboración propia).	35
Figura 26: Mapa geológico de la mina El Teniente (extraído de Húmeres, 2007, modificado de Floody y Huete, 1998 en Muñoz, 2011, como se citó en Bascur, 2009).	36
Figura 27: Precipitación mensual en el tranque Barahona 2 (Bascur, 2019).	37
Figura 28: Nivel freático en la cubeta del Barahona 2 (Bascur, 2019).	38
Figura 29: Talud general del relave removido, se aprecia las entradas y salidas de las superficies de falla circulares, considerando una distancia de 5 m asociada a la búsqueda de fallas distintas a las que ocurren en la cara del talud (elaboración propia).	41
Figura 30: Talud con los cuatro escenarios de niveles freáticos a evaluar, se detallan las entradas y salidas en la superficies de falla circulares, considerando una distancia de 5 m asociada a la búsqueda de fallas distintas a las que ocurren en la cara del talud (elaboración propia).	43
Figura 31: Modelo simplificado para el estudio de la franja de seguridad considerando el método de construcción aguas abajo y comportamiento del material como drenado (elaboración propia).	44

Figura 32: Geometría simplificada del depósito de relaves Barahona 2 (elaboración propia).....	45
Figura 33: Etapas intermedias a evaluar en casos presentados en la Tabla 7...	46
Figura 34: Esquema de decisión para llevar a cabo la remoción de relaves para cualquier tipo de depósito en función de las humedades de sus relaves y necesidad de desmantelamiento parcial o total (elaboración propia).....	49
Figura 35: Resultados del estudio de sensibilidad geométrica de los taludes de relaves en la cubeta considerando el relave seco y tres alturas para, (a) en condición estática y (b) pseudo estática. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.....	50
Figura 36: Resultados del estudio de sensibilidad geométrica de los taludes de relaves en la cubeta en presencia de nivel freático, comportamiento drenado del relave y estático para dos alturas, (a) H=10 m y (b) H=5 m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.	51
Figura 37: Resultados del estudio de sensibilidad geométrica de los taludes de relaves en la cubeta en presencia de nivel freático, comportamiento no drenado del relave y estático para dos alturas, (a) H=10 m y (b) H=5 m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.	51
Figura 38: Resultados del estudio de sensibilidad geométrica de los taludes de relaves en la cubeta en presencia de nivel freático, comportamiento drenado del relave y pseudo estático para dos alturas, (a) H=10 m y (b) H=5 m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.	52
Figura 39: Resultados del estudio de sensibilidad geométrica de los taludes de relaves en la cubeta en presencia de nivel freático, comportamiento no drenado del relave y pseudo estático para dos alturas, (a) H=10 m y (b) H=5 m. En ningún caso se logra la condición de estabilidad mínima.	52
Figura 40: Resultados del estudio para la franja de seguridad considerando análisis de falla local y caso estático para, (a) H=30 m, (b) H=50 m y (c) H=100 m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.....	53
Figura 41: Resultados del estudio para la franja de seguridad considerando análisis de falla local y caso pseudo estático para, (a) H=30 m, (b) H=50 m y (c) H=100 m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.....	54
Figura 42: Resultados del estudio para la franja de seguridad considerando análisis de falla global y caso estático para, (a) H=30 m, (b) H=50 m y (c) H=100 m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.....	54

Figura 43: Estudio para la franja de seguridad considerando análisis de falla global y caso pseudo estático para, (a) H=30 m, (b) H=50 m y (c) H=100 m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.	55
Figura 44: Resultado para la configuración 1 en una etapa intermedia de remoción del tranque Barahona 2, considerando parámetros efectivos y condición estática.	57
Figura 45: Resultado para la configuración 1 en una etapa intermedia de remoción del tranque Barahona 2, considerando parámetros efectivos y condición pseudo estática.....	58
Figura 46: Resultado para la configuración 2 en una etapa intermedia de remoción del tranque Barahona 2, considerando parámetros efectivos y condición estática.	58
Figura 47: Resultado para la configuración 2 en una etapa intermedia de remoción del tranque Barahona 2, considerando parámetros efectivos y condición pseudo estática.....	59
Figura 48: Verificación de estabilidad local para las franjas propuestas para el muro 2 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso estático.	60
Figura 49: Verificación de estabilidad local para las franjas propuestas para el muro 2 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso pseudo estático.	61
Figura 50: Verificación de estabilidad local para las franjas propuestas para el muro 3 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso estático.	61
Figura 51: Verificación de estabilidad local para las franjas propuestas para el muro 3 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso pseudo estático.	62
Figura 52: Verificación de estabilidad global para las franjas propuestas para el muro 3 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso estático.	63
Figura 53: Verificación de estabilidad global para las franjas propuestas para el muro 3 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso pseudo estático.	63
Figura 54: Verificación de estabilidad global para las franjas propuestas para el muro 2 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso estático.	64

Figura 55: Verificación de estabilidad global para las franjas propuestas para el muro 2 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso pseudo estático.	64
Figura 56: Conducción de relaves al interior de cubeta, ubicación de sumideros y franjas de seguridad para la propuesta de remoción del tranque Barahona 2 (elaboración propia, modificado de Google Earth).	66
Figura 57: Histograma sobre la predicción de la falla a distintas alturas de nivel freático en el talud de relave de los distintos participantes, esto para dos sets (escenario A y B) de parámetros diferentes de estado crítico y NorSand.(Reid & Fourie, 2023).	68

Capítulo 1: Introducción

La minería es una de las principales actividades económicas en Chile. El año 2022 tuvo una participación del 14.2% del producto interno bruto (PIB) con una producción de 5.4 millones de toneladas métricas finas de cobre, 45.6 mil toneladas de molibdeno y 303.4 mil toneladas de compuesto de litio (carbonato, hidróxido y sulfato). Estos números sitúan a Chile como el principal productor mundial de cobre y el segundo en plata y molibdeno (Sernageomin, 2023).

La disminución de las leyes de cobre prevé un aumento de la producción y con ello un alza en la generación de residuos mineros conocidos como relaves. Simultáneamente, mejorar la eficiencia energética en el proceso, optimizar el uso del agua ante la escasez hídrica y reducir la huella de carbono, son acciones que provocan una reducción de los impactos ambientales. Estas medidas no solo buscan cumplir con las exigencias legales, sino que también atender las demandas de la sociedad (Gutiérrez et al., 2020), siendo estos pilares fundamentales de una minería sustentable.

En este contexto, a través del Programa Nacional de Minería Alta Ley, una iniciativa impulsada por la Corporación Nacional de Fomento (CORFO) y el Ministerio de Minería, se han desarrollado diversos programas y asociaciones tanto por el sector público como en el privado con el objetivo de fortalecer el área de la investigación, innovación, desarrollo y difusión. Según la memoria del año 2022 de la Corporación Alta Ley (CAL), publicada 2023, se destacan iniciativas como el Programa Tranque, Proyecto Relaves con Valor, Relaves Sustentables, Alianza CCM-Eleva, Expande, Interop y Chilepolimetálico.

Uno de los desafíos identificados a través de la línea de investigación y desarrollo (I+D), es la generación de valor a partir del relave, promoviendo su conversión de pasivo a activo económico. En otras palabras, se busca reprocesar o reutilizar los relaves existentes en los depósitos inactivos o abandonados, logrando integrar conceptos como economía circular y minería secundaria. Estudios han revelado la presencia de elementos químicos tradicionales en los relaves como el cobre, molibdeno, oro, hierro y plata, así como elementos definidos como estratégicos por la Unión Europea como el cobalto, cromo, vanadio o tierras raras (Gutiérrez et al., 2020).

De acuerdo con el catastro del Sernageomin, hasta el año 2022, de un total de 764 depósitos, 172 están abandonados y 474 están inactivos. Esto significa que, en conjunto, representan un 85%, de los cuales varios fueron construidos con el método aguas arriba, actualmente prohibido en Chile (Ministerio de Minería, 2007). Además, teniendo en cuenta las proyecciones del calentamiento global y la falta de medidas acordes a la actual normativa o de contingencia en estos depósitos, aumenta el riesgo de colapso y daño ambiental.

En consecuencia, además de la recuperación de los relaves con fines productivos, también existe el interés de remover un depósito de relaves para eliminar o mitigar su impacto ambiental, necesidad de utilizar el suelo para otra actividad o incluso se han realizado estudios para su uso como material de construcción (Blight, 2010). Independientemente de la motivación para la remoción del relave, este proceso requiere un análisis y estudio geotécnico adecuado, considerando las particularidades de cada depósito, desde un punto de vista económico y técnico. Actualmente existen métodos mecánicos e hidráulicos que permiten llevar a cabo esta práctica.

El principal interés de este trabajo es estudiar las diferentes técnicas existentes para la remoción de los relaves y del muro, identificando sus principales fortalezas, debilidades y alcances. Posteriormente, se busca determinar los potenciales riesgos geotécnicos durante todo el proceso de remoción, analizando y estudiando la estabilidad física en todas las etapas propuestas considerando las características específicas de los tranques de relaves abandonados e inactivos en Chile. Para finalizar con la aplicación a un caso real, proponiendo una remoción geotécnicamente estable y segura para el tranque de relaves inactivo Barahona 2, perteneciente a la mina El Teniente de la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO).

1.1. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la remoción parcial y completa de un depósito de relaves, evaluando su estabilidad geotécnica en las diferentes etapas, para luego aplicarlo al tranque Barahona 2 de la mina El Teniente, proponiendo una remoción segura.

1.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, el trabajo aborda los siguientes puntos:

1. Identificar las diferentes técnicas de remoción de relaves existentes.
2. Analizar los casos de remoción de relaves en Chile, identificando sus principales desafíos con el fin de establecer, a nivel general, las técnicas de remoción adecuadas a través del desarrollo de un diagrama de decisión.
3. Estudiar la estabilidad física mediante un análisis sensibilidad geométrica en la conformación de taludes y franja de seguridad, considerando las propiedades y parámetros geotécnicos de los tranques de relaves en Chile.
4. Aplicar los hallazgos al tranque Barahona 2, proponiendo una remoción segura, incluyendo recomendaciones de especificaciones técnicas para la conformación de taludes y franja de seguridad en la cubeta.

Capítulo 2: Antecedentes de estudio

Este capítulo introduce los conceptos fundamentales para comprender la evaluación de estabilidad física de depósitos al momento de remover sus relaves. Inicialmente se explica qué son estas estructuras y cómo se conforman. Posteriormente, se detallan las diferentes técnicas de remoción existentes junto con los casos de remoción en Chile, incluyendo información sobre geometrías y parámetros geotécnicos de los depósitos en el país. Finalmente, se aborda el concepto de estabilidad geotécnica enfocado en el estudio de remoción.

2.1. Depósitos de relaves

Los depósitos de relaves son estructuras destinadas a contener los desechos provenientes de una planta de concentración húmeda de especies de minerales (Ministerio de Minería, 2007). Su confiabilidad depende de múltiples factores desde su planificación, investigación del subsuelo, en el análisis de estabilidad, calidad de construcción, diligencia operativa, monitoreo, acción regulatoria y gestión de riesgos en todos los niveles (ICMM, 2021), esto para todo el ciclo de vida del depósito.

Actualmente se reconocen las siguientes etapas dentro del ciclo de vida de los depósitos de relaves: concepción del proyecto, diseño, construcción, operación, cierre y post cierre (ICMM, 2021). Estas no necesariamente son consecutivas, ya que comúnmente algunas se desarrollan en paralelo. En general, los depósitos son habilitados antes de su construcción final para comenzar su operación. Asimismo, existe la posibilidad de que sean rehabilitadas posterior a su cierre.

De acuerdo con el método de construcción, se identifican tres tipos de depósitos de relaves; aguas abajo, eje central y aguas arriba (ver Figura 1). El primero de estos requiere una mayor cantidad de material de muro en comparación con los demás, sin embargo, la experiencia ha demostrado que poseen mejor comportamiento físico relativo. Además, el muro no se construye sobre material depositado, permitiendo elevarlo respecto a su altura de diseño inicial e instalar sistemas de drenaje internos (MSHA, 2010).

El decreto supremo N°248 del año 2007 prohíbe la construcción mediante el método de aguas arriba. Este fue permitido hasta la década de los 70, momento en que el decreto supremo N°86 del año 1970 lo prohibió debido a la inestabilidad y fallas ocurridas en este tipo de depósitos bajo cargas sísmicas, así como a su eventual vulnerabilidad frente a licuación de las arenas del muro. Un ejemplo de esto es la falla ocurrida en el depósito El Cobre N°1 en 1965, que resultó con más de 200 víctimas (Figueroa et al., 2017).

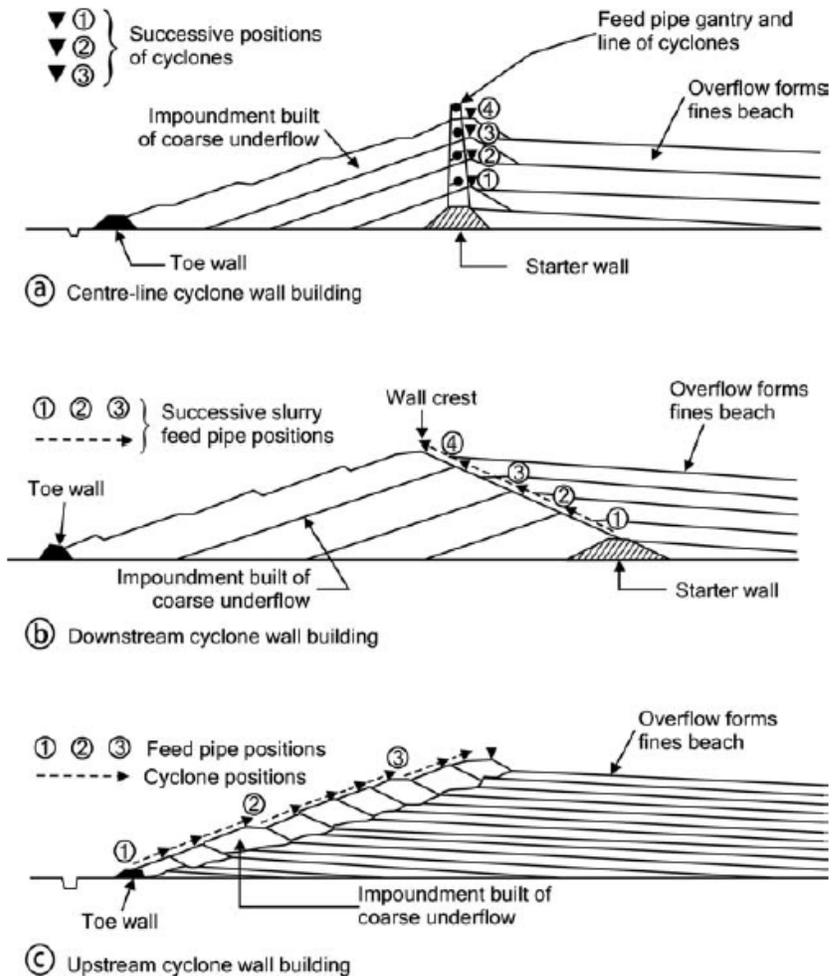


Figura 1: Método de construcción de un tranque usando eje central (a), aguas abajo (b) y aguas arriba (c) (Blight, 2010).

2.2. Variabilidad de los relaves en la cubeta

Los relaves se componen, generalmente, por una fracción gruesa (arenas) y finas (laminas). El proceso de depositación provoca su segregación y, en consecuencia, una distribución heterogénea en el tamaño de partículas en la cubeta, por ejemplo, si se deposita desde el muro, las laminas se encuentran alejadas de este, mientras que las arenas más cerca (ver Figura 2).

Adicionalmente, según Vick (1990), al igual que el fenómeno de segregación al interior de la cubeta se desarrollan otros fenómenos geotécnicos de manera heterogénea:

- Densidad: Tanto las arenas como las laminas aumentan con la profundidad.
- Densidad relativa: Varía según tipo de material tanto espacialmente en la cubeta como en profundidad.

- Permeabilidad: Disminuye a medida que se aleja del punto de descarga y en profundidad. Por otro lado, se considera anisotrópica, es decir, varía en la dirección de análisis, siendo mayor en la dirección la horizontal
- Compresibilidad: Varía según tipo de suelo, se asume que los relaves son más compresibles que suelos en estado natural debido a su estado suelto producto de la depositación sin compactación. Generalmente es mayor en lamas que en arenas.
- Consolidación: Parámetro en función de la compresibilidad y permeabilidad de los materiales, y su análisis es complejo. Este fenómeno es característico en relaves antiguos.
- Resistencia al corte drenado: En general, tanto en arenas como lamas las propiedades resultan ser mejores que en suelos naturales similares debido al grado de angularidad de las partículas. Con algunas excepciones, los relaves son no cohesivos.
- Resistencia al corte no drenado: Depende en gran medida de la densidad inicial y es útil para evaluar la generación de exceso de presiones de poro causado por una carga de corte rápida. A diferencia de los parámetros efectivos, en parámetros totales se presenta cohesión “real”.
- Resistencia cíclica: Útil para evaluar el comportamiento sísmico, depende de la densidad del material y, por lo mismo, al estar sin compactar los relaves resultan ser más susceptible a la licuación. Disminuye al aumentar el número de ciclos.

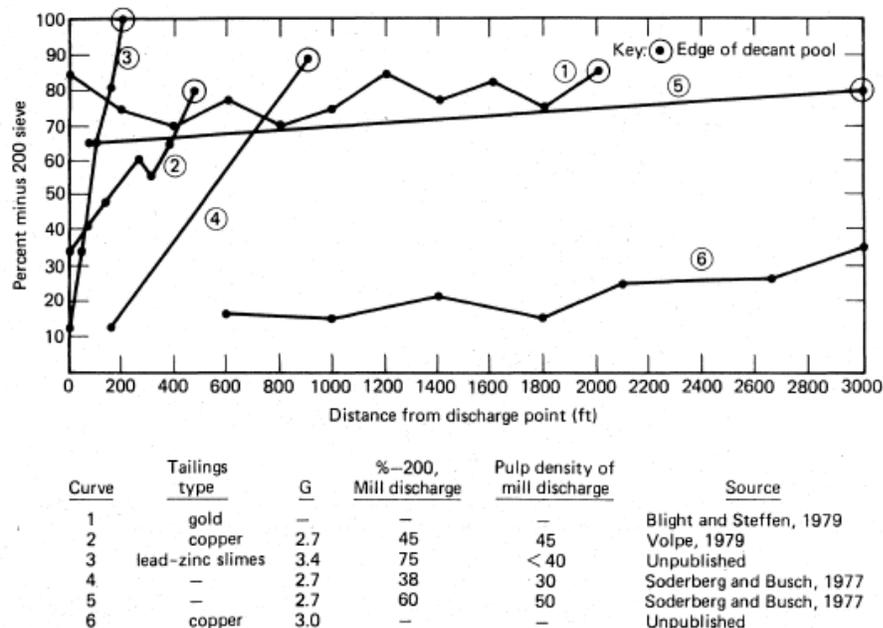


Figura 2: Segregación del tamaño de partícula a lo largo de la cubeta (Vick, 1990).

De acuerdo con el manual de uso público para el reprocesamiento de relaves y recuperación de elementos de valor (Gutiérrez et al., 2020), los depósitos se identifican como secos si los relaves poseen humedades remanentes entre 1 y 5% sin sectores intermedios saturados; húmedos, si presentan humedades remanentes entre 6 y 12% con algunos núcleos intermedios saturados, y saturados si presentan humedades totales o parciales entre 20 y 30%, y con zonas en presencia de nivel freático.

Por otro lado, la normativa vigente clasifica los depósitos de relaves según el contenido de humedad y la forma en que son dispuestos en la cubeta (Ministerio de Minería, 2007):

Relaves espesados: “depósitos de relaves donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de sedimentación, mediante espesadores, eliminándole una parte importante del agua que contienen. El depósito de relaves espesados deberá ser construido de tal forma que se impida que el relave fluya a otras áreas distintas a las del emplazamiento determinado y contar con un sistema de piscinas de recuperación del agua remanente.”

Relaves filtrados: “depósito de relaves donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de filtración, mediante equipos especiales de filtros, donde se asegure que la humedad sea menor a un 20%. Deberá asegurarse que el relave así depositado no fluya a otras áreas distintas a las del emplazamiento determinado”.

Relaves en pasta: “depósito de relaves que presenta una situación intermedia entre el relave espesado y el relave filtrado, corresponde a una mezcla de relaves sólidos y agua –entre 10 y 25% de agua– que contiene partículas finas, menores de 20 M, en una concentración en peso superior al 15%, muy similar a una pulpa de alta densidad. Su deposición se efectúa en forma similar al relave filtrado, sin necesidad de compactación, poseyendo consistencia coloidal”.

La humedad se relaciona con el contenido de sólidos del relave. Este se define como la relación entre el peso del sólido seco y su peso total, expresado en porcentaje, tal como se muestra en la Ecuación 1.

$$C_p = \frac{\text{Peso de los sólidos de la pulpa}}{\text{Peso total de la pulpa}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 1}$$

Mientras que su relación con la humedad, expresada en porcentaje se muestra en la Ecuación 2.

$$w = \left(\frac{1}{C_p} - 1 \right) \cdot 100 \quad \text{Ec. 2}$$

2.3. Marco legal

El marco regulatorio comprende una serie de leyes, decretos y reglamentos destinados a garantizar el cuidado al medio ambiente, a los trabajadores y comunidades. A continuación, se describen de manera general los diferentes aspectos que, directa o indirectamente, la remoción y el reprocesamiento de relaves debe considerar y evaluar.

El decreto supremo N°248 del 2007 señala los lineamientos básicos para la aprobación de los proyectos de depósitos de relaves en Chile, también fija los requisitos mínimos de diseño, construcción, operación y cierre. Mientras que el decreto N°50 de 2015 indica las condiciones técnicas del proyecto, construcción, operación de las obras hidráulicas, que en general se refiere a los depósitos con una concentración de sólidos menor al 65% (Gutiérrez et al., 2020).

Desde una perspectiva ambiental, la ley N°19300 proporciona las bases generales para su cuidado, en particular indicando el derecho de vivir en un ambiente libre de contaminación. El decreto supremo N°40 del 2012 establece el reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental, al cual deben ingresar los proyectos de remoción y reprocesamiento. También el D.F.L N°3557 de 1980 establece las disposiciones sobre la protección agrícola en establecimientos mineros.

Adicionalmente, el derrame de residuos mineros al mar se encuentra prohibido en el artículo N°142 de la ley N°2222 de 1978, cabe destacar que en el mismo documento se permite bajo ciertas consideraciones. En ese sentido el decreto N°136 de 2011 y decreto supremo N°1 de 1992 establecen lineamientos para la protección, prevención, vigilancia y combate frente a la contaminación de aguas de mar.

En seguridad minera se encuentra el decreto supremo N°132 de 2002 que tiene por objetivo “proteger la vida e integridad física de las personas que se desempeñan en dicha industria”. En relación con las condiciones laborales, el decreto supremo N°594 de 2000 establece las condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo.

En lo que concierne al cierre de los depósitos existe la ley N°20551 que las regula y establece lineamientos para asegurar la estabilidad física y química de las instalaciones y faenas. También está el decreto supremo N°41 del 2012 que complementa el marco regulatorio de la ley N°20551 para efectos de su implementación.

La utilización de agua en el proceso de remoción se encuentra regulada por el código de aguas D.F.L N°1122, que la considera como un bien social y económico, definiendo el acceso al agua potable y saneamiento como un derecho humano.

En la industria de reprocesamiento, existen metodologías de extracción de los elementos que son potenciales generadores de residuos peligrosos. Estos están regulados por el decreto supremo N°148 de 2003 estableciendo las condiciones sanitarias y de seguridad

mínimas. Así como también el código sanitario D.F.L N°725/1967 que refiere a la salud de los habitantes de todo el país.

Considerando lo mencionado anteriormente, es esencial revisar el marco regulatorio que engloba cada proyecto en particular. Esto dependerá de las diferentes metodologías y de las características de los residuos generados. Para la aprobación ambiental, el manual de uso público para el reprocesamiento de relaves y recuperación de elementos de valor, indica que todo proyecto de remoción a razón superior a 5000 toneladas por mes debe someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) (Gutiérrez et al., 2020). Este proceso otorga una evaluación integral de los posibles impactos ambientales y la implementación de medidas de mitigación.

Es importante destacar que, aunque el decreto supremo N°248 del 2007 indica que todo depósito debe poseer un plan de cierre, no especifica claramente aspectos como su reubicación, desmantelamiento, retiro parcial o total. Contrariamente, estándares internacionales, como el Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM), sí consideran la demolición y remoción como parte de las etapas de cierre y post cierre de los depósitos (ICMM et al., 2020). En ese sentido, el Plan Nacional de Depósitos de Relaves en el eje de economía circular e innovación, plantea la revisión y actualización del decreto supremo N°248 y N°132, junto con un proyecto de ley que regule el reprocesamiento de relaves en la ley N°20551 (Gutiérrez et al., 2020). Esto refleja la importancia de adaptar la regulación nacional a prácticas más actualizadas en la gestión de relaves.

La propiedad de los relaves es otro aspecto fundamental para considerar. Ya sean los dueños o arrendatarios de la faena que los generó pueden hacer uso de ellos como cualquier otro bien material. En el caso de los relaves contenidos en depósitos abandonados por sus dueños, estos son susceptibles de concesión minera por parte del estado, el cual podrá beneficiarse de estos asumiendo las obligaciones respectivas (Gutiérrez et al., 2020). Esto abre la posibilidad y facilita la obtención de valor de depósitos abandonados a través de la remoción y posterior reprocesamiento de sus relaves.

2.4. Técnicas de remoción

El término “remoción de relaves”, según la información recopilada, se entiende como el proceso mediante el cual los materiales contenidos en los depósitos son retirados parcial o totalmente, utilizando métodos mecánicos o hidráulicos. Este concepto ha sido utilizado ampliamente en diferentes actividades y es posible encontrarlo relacionado al desmantelamiento, retiro, reminería (del inglés *remining*), eliminación o reclamación de depósitos de relaves. En Brasil, se ha puesto especial atención debido a fallas recientes de depósitos, incluyendo la reintegración de los depósitos y su contenido al medio ambiente introduciendo el término de-caracterización (VALE, 2023). La remoción de relaves es un proceso crítico que tiene implicaciones importantes en términos de seguridad, medio ambiente y gestión de recursos minerales.

La motivación para llevar a cabo la remoción de relaves es diversa, tal como la reutilización parcial o completa, extracción de minerales remanentes, cumplimiento de la legislación ambiental, la eliminación o reducción de la polución, alcanzar factores de seguridad, la gestión del uso de suelo y el manejo de relave. Independiente del motivo y metodología utilizada para la remoción, es fundamental comprender y estudiar factores como la geología, el clima, y propiedades geotécnicas, incluyendo la humedad, porosidad, densidad, plasticidad y resistencia al corte (Engels et al., 2004). Estos aspectos son cruciales para la eficacia y seguridad del proceso de remoción.

2.4.1. Remoción Hidráulica

El monitoreo o pitoneo hidráulico consiste en el uso de máquinas conocidas como monitores o pitones, que expulsan agua a alta presión, operadas de forma manual o remota. Estos remueven el relave reconvirtiéndolo en pulpa y se utilizan principalmente en relaves secos o con baja humedad. Los métodos hidráulicos han sido ampliamente utilizados no solo para la remoción de relaves (ver Figura 3), sino que también para la explotación de minerales y excavaciones ordinarias.



Figura 3: Remoción hidráulica del depósito de relaves Colihues, CODELCO (Henderson, 2013). Monitor operado remotamente a través de una caseta que la conecta a una estación de operación.

Los monitores se clasifican según la presión de expulsión y diámetro del chorro del agua eyectada, los cuales se muestran en la Tabla 1. Dependiendo del tipo de material y consistencia del relave, se debe evaluar la presión y diámetro necesario para lograr una remoción controlada y acorde con los diseños.

Tabla 1: Clasificación de monitores hidráulicos según su presión de impulsión (Engels et al., 2004).

Tipo de monitor hidráulico	Presión (Pa)	Diámetro del chorro de agua (mm)
Baja presión	$<10^6$	50 - 150
Media presión	$10^6 - 6 \cdot 10^6$	15 - 30
Alta presión	$6 \cdot 10^6 - 25 \cdot 10^6$	1 - 5
Muy alta presión	$25 \cdot 10^7$	< 1

Cuando el chorro impacta con el relave se producen dos efectos, primero el relave es disgregado y fluye por gravedad a través de la pendiente del talud y, por otro lado, aumenta la capilaridad, alterando las propiedades mecánicas del relave. Este cambio, especialmente la disminución de su resistencia al corte, provoca fallas locales de baja profundidad en la cara del talud.

Este método es comúnmente utilizado para el reprocesamiento de relaves, tanto a nivel nacional como internacional. La remoción marca el inicio del reprocesamiento, que abarca el paso por el espesador de relaves, seguido por la planta de procesamiento y el transporte a otro depósito. Finalmente, se recupera y recircula el agua utilizada (ver Figura 4).

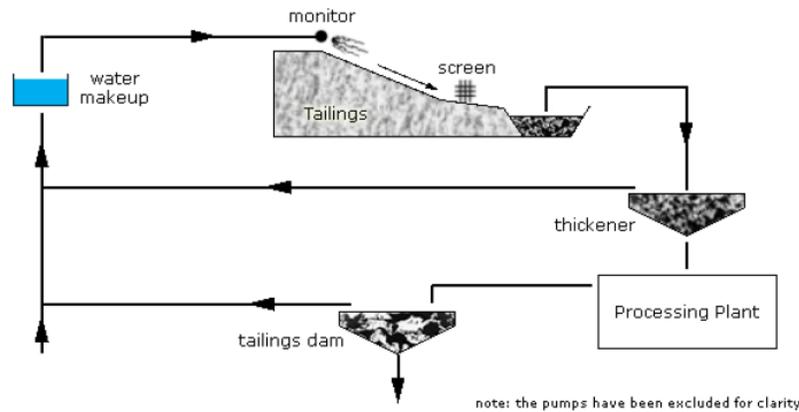


Figura 4: Proceso de reprocesamiento de relaves utilizando monitores hidráulicos (Engels et al., 2004).

Dependiendo de la secuencia de remoción, se identifican al menos cuatro formas de llevar a cabo esta actividad. Una de ellas es ubicar el monitor desde la parte superior del talud, donde el sentido del chorro de agua y el flujo de relave son iguales (Figura 5a), similar al caso de la Figura 3, mientras que existe una variante donde el sentido del chorro y flujo del relave van en sentido contrario (Figura 5b). Otra forma es ubicar el monitor desde la parte inferior del talud con igual sentido de chorro y flujo (Figura 5c). La última opción, es desde la parte baja del talud con sentidos contrarios entre chorro y flujo (Figura 5d). La experiencia ha demostrado que pendientes de zanjas del 1.5% son efectivas para generar flujo en el que no sedimenten las partículas gruesas (Muir et al., 2005).

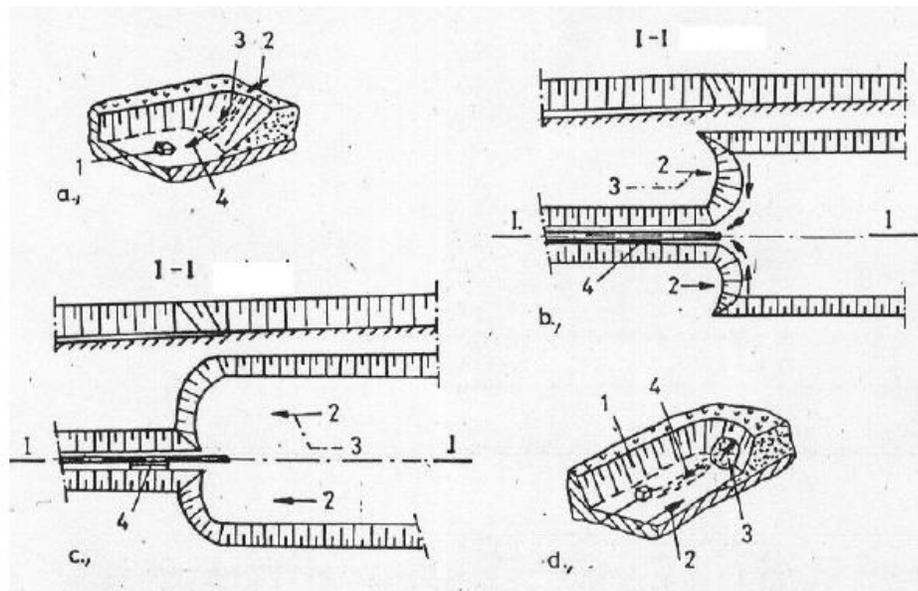


Figura 5: Esquemas de secuencias de remoción existentes (Kovacs, 1985, como se citó en Engels et al., 2004).

La primera forma (Figura 5a) presenta la ventaja de ubicar el monitor en una superficie que permite que el chorro y el flujo de relave vayan en el mismo sentido, lo que proporciona mayor estabilidad facilitando su transporte. Sin embargo, el ángulo del chorro es agudo, lo que provoca una disminución en la eficiencia de remoción. La segunda forma (Figura 5b) es poco utilizada debido a la necesidad de excavar una zanja en dirección contraria previo a la remoción. La tercera forma (Figura 5c) es igual a la anterior, pero más eficiente debido al ángulo de contacto del chorro con la cara del talud. Por último, la cuarta forma (Figura 5d) es más eficiente ya que el chorro de agua está más cercano al ángulo óptimo (90°), sin embargo, se dificultan las condiciones de trabajo teniendo que monitorear los caminos del relave segregado (Engels et al., 2004).

Es común encontrar sistemas conocidos como sumideros para la remoción por monitoreo hidráulico. Estos son depresiones ubicadas en zonas estratégicas, generalmente en lugares con pendientes bajas con el fin de conducir los relaves segregados que posteriormente serán impulsados mediante bombas verticales (ver Figura 6). Estos son fijos o móviles y para su construcción se suelen utilizar monitores hidráulicos o excavación mecánica.

En múltiples proyectos, se han utilizado elementos segregadores de material no comercial, como mallas, ya que existe la posibilidad que dentro de la cubeta se encuentren otros materiales, como sobretamaños, tuberías, elementos de construcción, etc. La cantidad de sumideros depende de la velocidad de remoción requerida por diseño. En algunos casos estos se van desplazando mediante balsas a medida que se avanza en el proceso, evitando así la necesidad de disponer distintos sumideros fijos.

Las ventajas y desventajas de esta técnica se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Resumen de las ventajas y desventajas identificadas para el método de remoción hidráulica mediante monitores (complementado con Muir et al., 2005).

Ventajas	Desventajas
Comparativamente menos costosa.	Se requiere de maquinaria mecánica para limpieza final.
Control de la densidad de la pulpa y flujo variando el número de monitores y tamaño de la boquilla.	Se requieren grandes excavaciones para generar las zanjas y lavaderos.
Se usa la gravedad para transportar la pulpa.	Se requieren de estaciones de monitoreo satelital para zonas bajas.
Sistema simple de implementar (cribas, monitores, bombas y tuberías).	Alto impacto por precipitaciones que generan inestabilidades en la zona de operación debido al aumento de los niveles freáticos.
El monitoreo remoto disminuye el riesgo en la operación.	Dificultad de separar material no rentable como escombros.
Versatilidad en la secuencia de remoción.	Se requiere de disponibilidad de agua lo que afectará el balance hídrico de la empresa.



Figura 6: Sumidero (Anglo American, 2021).

2.4.2. Remoción Mecánica

La remoción mecánica se emplea principalmente en depósitos secos, es decir, con una baja humedad remanente en sus relaves privilegiando el uso de maquinaria especializada, similar a una excavación ordinaria (ver Figura 7). Al involucrar el movimiento de tierra, se requieren equipos como bulldozers, cargadores frontales y camiones. También se han utilizado excavadores de rueda de cangilones (Wates & Götz, 2016). Además, se permite la combinación con otros métodos hidráulicos (ver sección 2.4.3).



Figura 7: Remoción a través de método mecánico y estación de repulpeo (Wates & Götz, 2016).

Adicionalmente, los métodos mecánicos para la minería pueden ser clasificados de acuerdo con la posición y forma en que se excava. Algunos de estos son de cara al talud en avanzada o sobre el talud en retirada (Griedl, 2016), tal como se observa en la Figura 8.

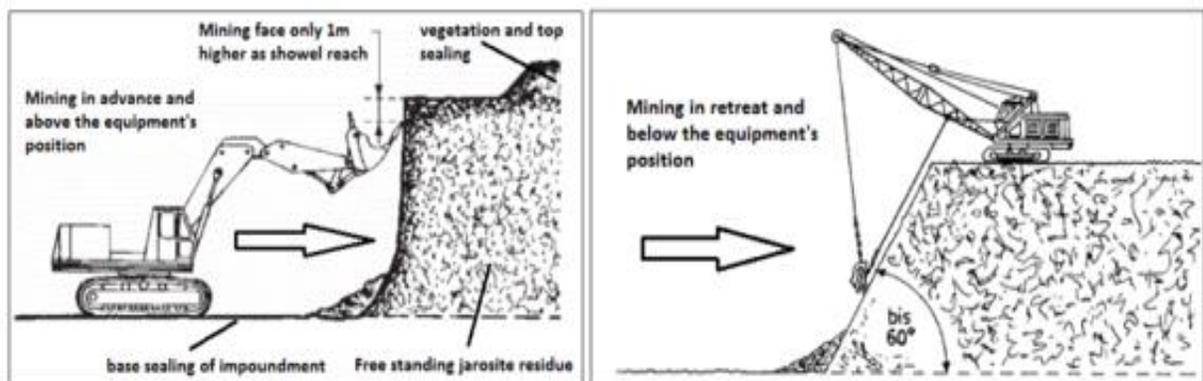


Figura 8: Remoción en avanzada usando face shovel (izquierda), remoción en retirada usando dragline (derecha) (Griedl, 2016).

Desde un punto de vista económico, esta metodología es considerada eficiente solo para depósitos pequeños debido a los costos asociados. La remoción mecánica se realiza en arenas y resulta más costosa y poco factible en relaves debido a que se obstruyen los puntos de transferencia en los sistemas mecánicos (Muir et al., 2005). En consecuencia, no se recomienda esta metodología para depósitos con humedades considerables ni de gran tamaño, pero sí para la limpieza final del depósito, donde los monitores hidráulicos no son factibles.

El desmantelamiento de los muros de los depósitos, generalmente construidos con material granular, ya sea de empréstito o arena de relave cicloneada, cumplen con los requisitos para ser removidos mediante esta técnica. En resumen, las ventajas y desventajas de este método se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Resumen de las ventajas y desventajas identificadas para el método de remoción mecánica (complementado con Muir et al., 2005).

Ventaja	Desventaja
Limpiar hasta el fondo del depósito.	Comparativamente más costosa.
Segregar material no comerciable.	Se requiere de una superficie firme para la operación.
No se requiere de agua durante el proceso.	Se requieren grados de recuperación altos para que sea rentable.
Retiro de material granular como el muro.	Se debe controlar la polución y ruido.

2.4.3. Dragado

Al igual que el monitoreo hidráulico, el dragado se considera como un método hidráulico, sin embargo, tiene una componente mecánica en la operación. Este consiste en el retiro de los relaves con múltiples equipos conocidos como dragas que, mediante el proceso de fluidización, logran remover el material sólido disgregable para luego impulsarlo mediante bombas (ver Figura 9). Para lograr este efecto, primero se escarea el relave mediante capachos, ruedas dentadas, cabezales cortadores, entre otros, y después la pulpa pasa por bombas de dragado (Gutiérrez et al., 2020).

Las dragas se ubican en las lagunas formadas en la cubeta de los depósitos mediante patas de anclaje y se movilizan mediante huinches anclados a tierra firme, se diferencian entre sí de acuerdo con el elemento escariador. El sistema completo considera la laguna de operación donde se encuentra el relave, las dragas con su sistema de suministro de agua e impulsión, un sistema opcional de pitones de apoyo y la eliminación de ultragruesos (Gutiérrez et al., 2020).

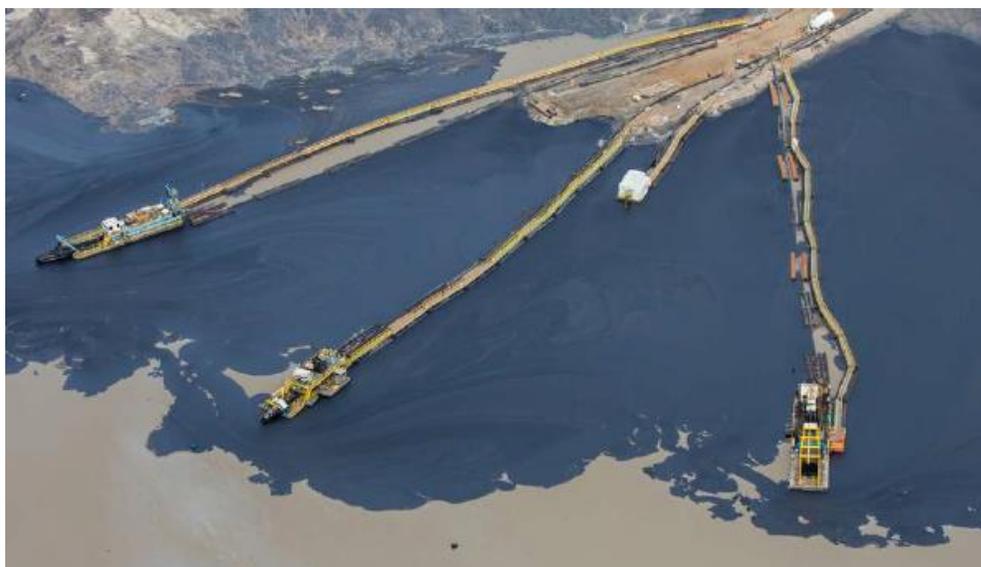


Figura 9: Remoción utilizando la metodología de dragado (Gutiérrez et al., 2020).
 Basándose en lo anterior, este método se utiliza en una condición particular en la cual el nivel freático se encuentra sobre los relaves y no es factible en depósitos secos o parcialmente saturados. Las ventajas y desventajas del dragado en relaves se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4: Resumen de las ventajas y desventajas identificados para el método de remoción hidráulica por dragado (Muir et al., 2005).

Ventajas	Desventajas
No se necesitan mayores cambios en la red de agua o eliminación de entradas de agua en el proceso.	Altos costos de equipamiento.
Operar en cualquier estación del año.	No todo el material es removido debido a la acción de la draga.
Minimiza el consumo adicional de agua y su perturbación.	Problemas si hay vegetación.
Ideal para zonas inundadas.	Baja densidad recuperada en comparación a los otros métodos.
Efectivas en áreas con capacidad de soporte baja donde la maquinaria del método mecánico podría asentarse.	Alto costo total de recuperación.

2.4.4. Casos de remoción

Actualmente, se han realizado proyectos de remoción a nivel nacional e internacional con diferentes finalidades. En la Tabla 5 se muestran casos ya finalizados o en proceso, indicando el método, la eficiencia alcanzada y los desafíos encontrados. En los casos chilenos, el colapso o falla de talud por sismos resulta fundamental de analizar para lograr una operación segura. La experiencia ha demostrado que el monitoreo hidráulico es el más económico en comparación a los métodos mecánicos o por dragado (Gutiérrez et al., 2020).

Tabla 5: Proyectos de remoción de relaves (Gutiérrez et al., 2020).

Depósito	Compañía minera	País	Método	Remoción (t/d)	Desafío
B2	Mina San Rafael	Perú	Drenaje forzado y mecánico	1500	Hundimiento de las ruedas del camión
Varios	Ergo Minas	Sudáfrica	Pitoneo hidráulico	80000	Arrastre de basura industrial
Tranque Cauquenes	Minera Valle Central	Chile	Pitoneo hidráulico	55000 60000	a Alto consumo de agua y energía eléctrica, colapso en caso de sismo
Tranque Pérez Caldera 1	Anglo American	Chile	Pitoneo hidráulico	10000 15000	a Alto consumo de agua y energía eléctrica, colapso en caso de sismo
Tranque Atlas	-	Filipinas	Dragado	10000 15000	a Adquirir equipo adecuado
Tranque Pérez Caldera 2	Anglo American	Chile	Dragado	10000 15000	a Discontinuidad del proceso y baja concentración de la pulpa
Embalse Colihues	Minera Valle Central	Chile	Pitoneo hidráulico	35000	-
Tranque Barahona 0	Codelco	Chile	Pitoneo hidráulico	-	Condición no drenada de estratos saturados

Mina El Teniente

El Teniente es una mina de cobre perteneciente a CODELCO. Según Henderson (2013) esta ha depositado sus relaves en cuatro diferentes depósitos: Barahona 1 y 2 (entre los años 1919 y 1936), Cauquenes (entre los años 1936 y 1977), Colihues (entre los años 1977 y 1986) y Carén (desde 1986 hasta la actualidad).

Actualmente Minera Valle Central (MCV) reprocesa relaves de cobre del depósito Colihues y Cauquenes, además de los relaves frescos de la producción actual de la planta de procesamiento El Teniente. En la Figura 10 se visualiza la planta procesadora MVC y los depósitos mencionados anteriormente (Henderson, 2013).



Figura 10: Ubicación de la planta MVC y los depósitos Colihues y Cauquenes (Henderson, 2013).

El reprocesamiento de los relaves contenidos en Colihues se realizó a razón de 35000 toneladas por día utilizando principalmente el monitoreo hidráulico, con el uso de 4 monitores y dos sumideros (Henderson, 2013). Además, se señala que estos dispositivos tienen una eficiencia de 8000 a 10000 toneladas por día.

De acuerdo con la información recopilada en el estudio de Henderson (2013), la empresa SRK determinó mediante estudios geotécnicos la recomendación de taludes de 10 m con ángulos de cara de 45° en la primera etapa de extracción, incluso en contacto con el chorro de agua. Por otro lado, se limitó el área de excavación al interior de la cubeta a 20 m del muro, por razones de seguridad, con pendientes de 24° para la segunda etapa de extracción, tal como se muestra en la Figura 11.

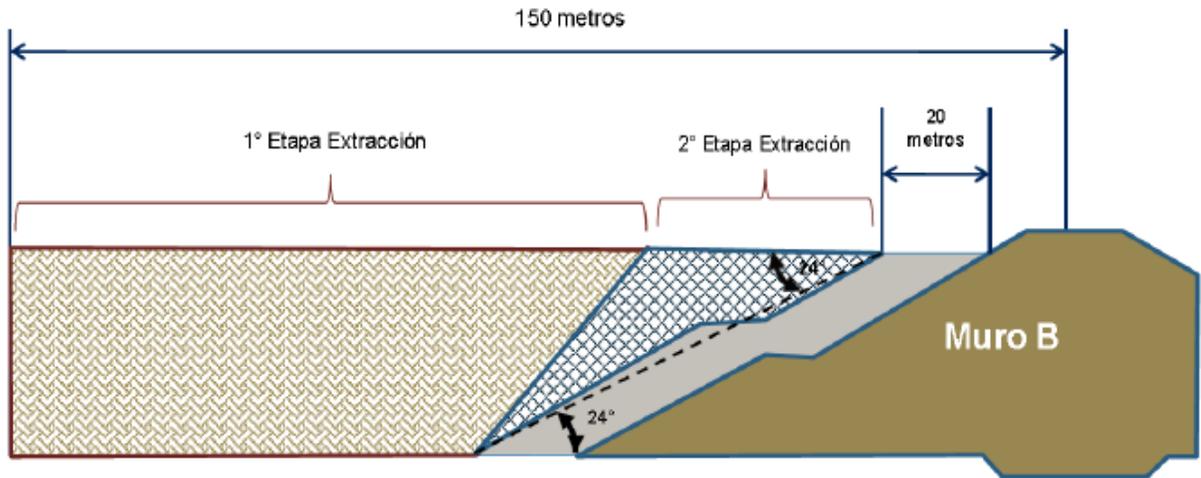


Figura 11: Secuencia de remoción del depósito de relaves Colihues (Henderson, 2013). Por otro lado, el reprocesamiento de los relaves contenidos en Cauquenes se realiza mediante el desmantelamiento hidráulico y sumideros, con taludes de ángulos de 16° y una altura de 10 m. Además, se recomendó una distancia de 250 m del muro principal como medida de seguridad (ver Figura 12). Se espera una producción de 60000 toneladas por día (conforme a lo presentado en la Tabla 5) y la utilización de una estación de bombeo para suministrar agua para la operación a un caudal de $3060 \text{ m}^3/\text{día}$ (Henderson, 2013).

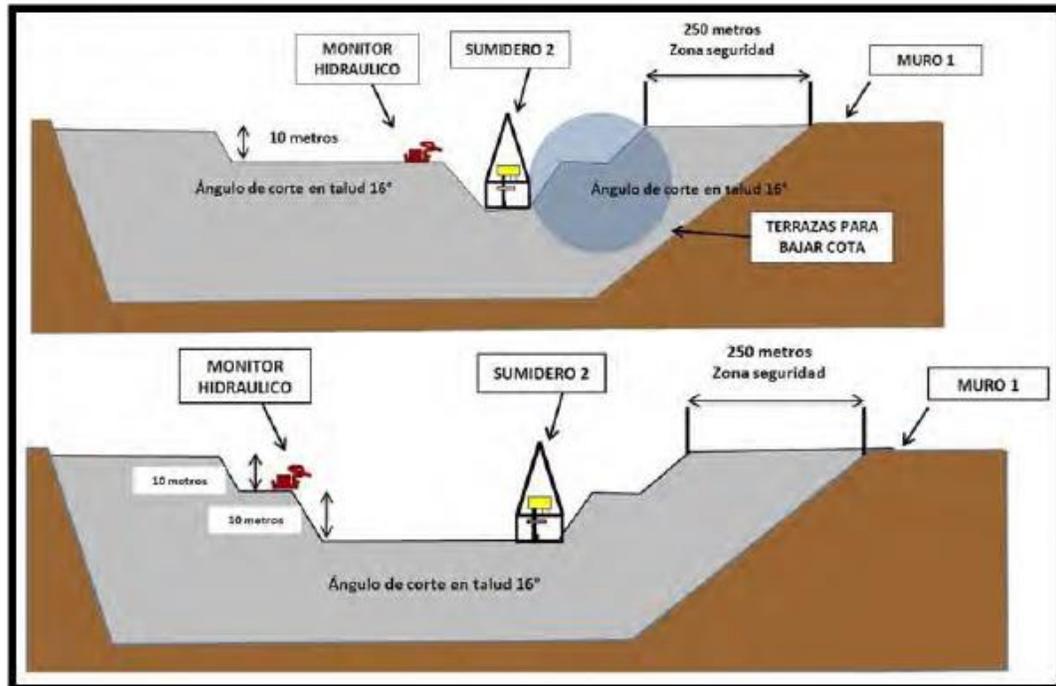


Figura 12: Secuencia de remoción del depósito de relaves Cauquenes (Henderson, 2013).

De acuerdo con la resolución N°1660 el año 2009, se aprobó el proyecto de trasvasije del tranque Barahona 0 (ver Figura 13), el cual contempló la remoción completa mediante pitoneo hidráulico, utilizando 2 dispositivos móviles.

Lo dispuesto en dicha resolución muestra que la secuencia de remoción se llevó a cabo desde el extremo norte, abriendo una galería central hacia el muro principal, para luego ir ampliando dicha zanja hacia los costados. Después de retirada cada capa se procedió a bajar el punto de colección ubicada en el extremo norte para repetir el corte, manteniendo siempre una revancha con el coronamiento del muro. El material excedente posterior a la remoción se retiró mecánicamente. Esta forma de remoción también se ha visto en depositos más grandes (ver Figura 14).

Para la remoción, se consideraron análisis estático y pseudo estático para una situación previa, como también una situación intermedia de la remoción, evaluando en ambos casos un comportamiento drenado y no drenado de los materiales. Los resultados indicaron que el depósito no era estable en su condición inicial, por lo tanto, se recomendó su remoción.

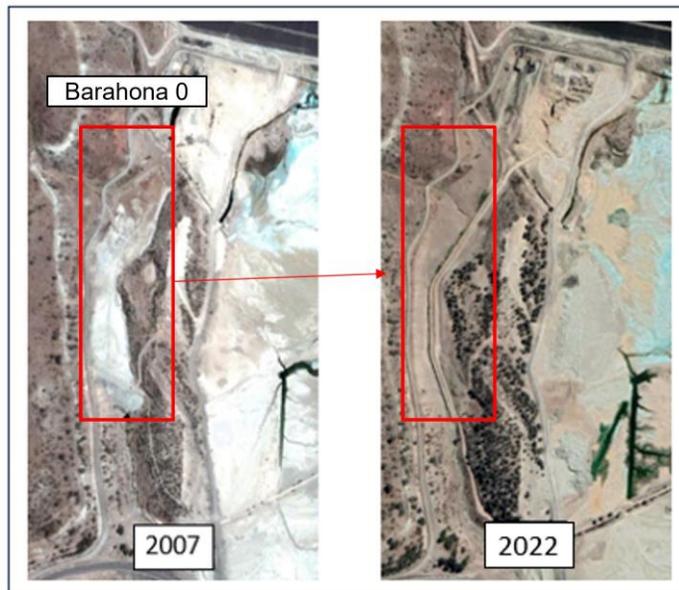


Figura 13: Antes y después en la remoción del depósito Barahona 0 (elaboración propia, modificado de Google Earth).

Al igual que en el caso del muro principal, la verificación de estabilidad de los taludes durante la excavación mostró que los estratos saturados, en análisis no drenado, no cumplieron los criterios de aceptabilidad. Concluyendo que esta zona representaba un alto riesgo para operar desde los terraplenes de prueba, optándose por una metodología diferente de remoción.

Entonces, para los relaves saturados, se recomendó utilizar maquinaria tipo clamshell, dragline o excavadora, siempre apoyados en terreno natural, y por tanto en zonas estables. Por otro lado, la máxima altura recomendada de corte de los taludes sin sobrecarga con estos equipos fue de 5 m. El límite entre zonas saturadas y no saturadas se definió por el nivel freático.



Figura 14: Ejemplo de secuencia de remoción desde zonas céntricas de la cubeta hacia los costados (Pignaton, 2010).

Mina Los Bronces

La mina Los Bronces, propiedad de Anglo American, depositaba sus relaves en tres depósitos: Copihues, Pérez Caldera 1 y 2 (PC1 y PC2), los cuales tuvieron que ser removidos por razones ambientales (ver Figura 15).

En estos casos, se utilizaron métodos combinados, es decir, mecánicos, monitoreo hidráulico y dragado. Esto debido a que en algunos casos los relaves se mezclaron con roca depositada durante la construcción del embalse, lo cual dificultó la utilización de métodos hidráulicos y su posterior impulsión.



Figura 15: Antes y después del proceso de remoción de los depósitos de relaves PC2, PC1 y Copihue al año 2017 (Anglo American, 2019).

El clima fue un factor de riesgo importante a considerar, ya que durante los meses de invierno aumentaban los riesgos de avalanchas, ventiscas y congelamiento de los equipos mecánicos. Otro desafío significativo fue la remoción de zonas saturadas potencialmente licuables (Engels et al., 2004). Aunque no se encontraron datos específicos sobre los ángulos de corte ni altura de taludes, la Figura 16 muestra taludes con inclinaciones cercanas a los 45° con alturas de 5 a 10 m.



Figura 16: Remoción en zona no saturada en mina Los Bronces (Engels et al., 2004).

Mina Escondida

En 2023, Minera Escondida presentó una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), actualmente desistida, asociada un proyecto de remoción y reprocesamiento del tranque de relaves Hamburgo. El proyecto contemplaba el retiro de relaves mediante pitones hidráulicos a alta presión con agua recirculada. Los pitones se ubicarían en la superficie del relave convirtiéndolo en pulpa de alta densidad (BHP, 2023).

Por otro lado, la remoción mecánica de los diques internos se llevaría a cabo mediante excavadoras y camiones para el transporte a botaderos. Los sumideros se pretendían ubicar en zonas bajas mediante canales conformados por los mismos relaves, mientras que la impulsión de la pulpa se realizaría mediante bombas verticales (BHP, 2023).

Como recomendación para mantener la estabilidad de los diques, los coronamientos en ningún caso deberían estar a más de 17 m sobre el relave adyacente (BHP, 2023). La secuencia de remoción se realizaría mediante un método de minería de bloques (ver Figura 17), el cual consiste en dividir el área del relave en cuadrantes, removiéndolos separadamente.

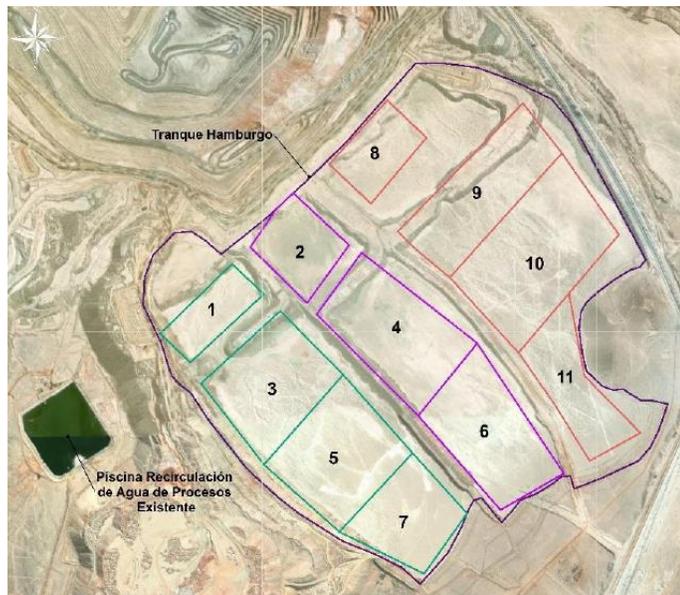


Figura 17: Secuencia propuesta (método de minería de bloques) para la remoción del tranque Hamburgo (BHP, 2023).

2.4.5. Secuencia de remoción de relaves

La secuencia de remoción de relaves al interior de la cubeta se aborda de diferentes maneras acorde a las condiciones de cada depósito. Según los proyectos en proceso o ya ejecutados estudiados, se identifican al menos dos enfoques, primero una basada en la sectorización de los relaves y otra que inicia por el retiro desde zonas estables en el interior de la cubeta, abriéndose con zanjas.

El método de minería de bloques consiste en dividir la cubeta en cuadrantes de igual o diferente área, como se ilustra en Figura 18. En este proceso, los relaves son removidos mediante pitones hidráulicos, formando una pulpa que es drenada a un sumidero ubicado en el punto más bajo de cada uno de estos bloques. Posteriormente, esta pulpa se bombea desde el sumidero para ser reprocesada o reutilizada.

Se resalta que este método recomienda la construcción de diques internos estables en el diseño inicial del depósito de relaves para facilitar la remoción. En ausencia de estos diques, los taludes que se formarían entre bloques serían potencialmente inestables aumentando el riesgo en la operación. Se ha observado el uso de diques superficiales que emplean métodos de estabilización para permitir el acceso de dispositivos de remoción en relaves.

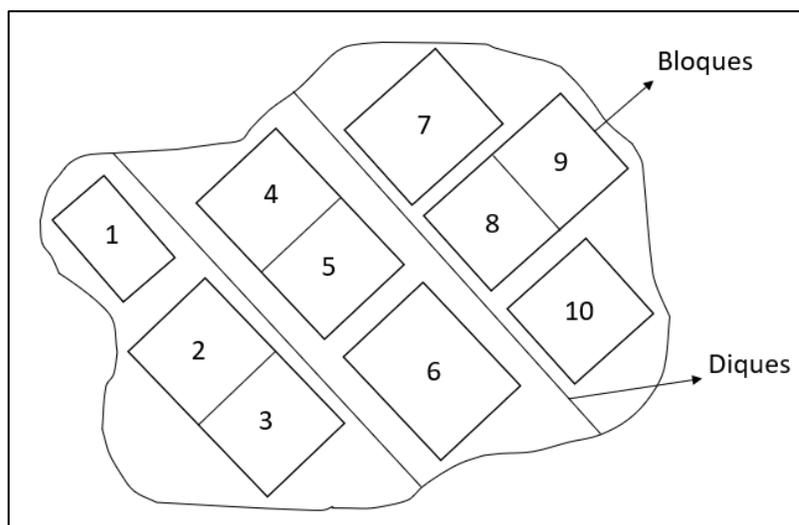


Figura 18: Ejemplo ilustrativo de método de remoción o minería por bloques (elaboración propia).

El GISTM menciona un método o enfoque conocido como observacional. Este corresponde a un proceso continuo y flexible que permite incorporar modificaciones previamente definidas durante o después de la construcción (ICMM et al., 2020). Si bien corresponde a una filosofía general de monitoreo y construcción, resulta aplicable a la remoción de relaves. Este incorpora todas las situaciones desfavorables que la instrumentación o evaluación proactiva pudiese advertir, con el fin de desarrollar un plan de mitigación para reducir el riesgo.

En la remoción de relaves, la estructura crítica corresponde al muro del depósito, por lo que este método responde a una secuencia de remoción desde sectores alejados del muro avanzando hacia este, con el fin de, por ejemplo, monitorear los desplazamientos y el nivel freático, tal como se ilustra en la Figura 19. En consecuencia, en ningún caso se recomienda comenzar en sectores que pongan en riesgo la estabilidad del muro, y con ello el potencial vaciamiento de los relaves.

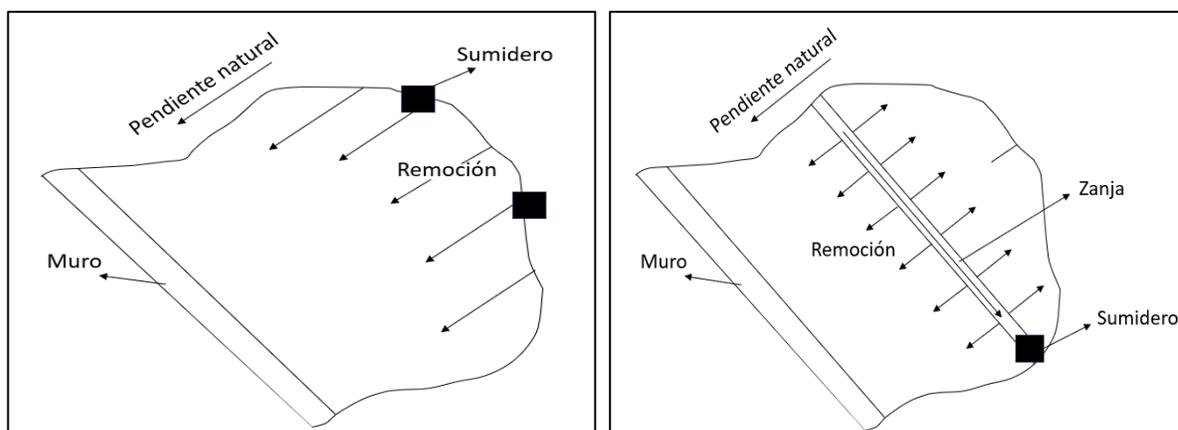


Figura 19: Ejemplo ilustrativo de remoción desde la cola en la figura izquierda y con zanjas desde el interior en la figura derecha (elaboración propia).

2.4.6. Transporte, reutilización y redepositación

Aunque el transporte de los relaves removidos y su redepositación no están dentro del alcance de este trabajo, se destaca que estas actividades condicionan de alguna manera el diseño o metodología de remoción. Por un lado, se tienden a orientar los sumideros y sistemas de impulsión hacia la red de transporte, como canales preexistentes. Por otro lado, con el pitoneo hidráulico y dragado es posible, con cierta dificultad, inducir la concentración de sólidos de la pulpa, de tal manera de facilitar el reprocesamiento en la planta. El dragado tiene la ventaja de que el relave se impulsa directamente desde las tuberías en las dragas, mientras que para el método mecánico se privilegia el uso de camiones para el transporte de relave seco.

Cabe destacar que actualmente se desarrollan proyectos innovadores que exploran la reutilización de relaves con fines distintos a la obtención de valor por reprocesamiento de mineral remanente. Dada su granulometría y composición, los relaves pueden utilizarse como materia prima de productos comerciales, como materiales cerámicos o vidrios, insumos para la preparación de materiales de construcción, cemento o elaboración de geopolímeros (Gutiérrez et al., 2020). Esta diversificación de aplicaciones vuelve interesante la remoción de relaves, incorporando opciones diferentes a las de obtener valor económico de los minerales residuales. Por último, esta perspectiva se relaciona de cierta manera con el contenido humedad de los relaves removidos, dada las distintas finalidades que actualmente se investigan y desarrollan.

Posterior a la remoción, estos pueden ser dispuestos en un nuevo depósito de relaves o reintegrados en el mismo del cual fueron extraídos (ver Figura 20). También es posible que varios depósitos sean reprocesados al mismo tiempo, lo que sería atractivo en un futuro en el cual se reprocesen simultáneamente varios depósitos antiguos, práctica actualmente habitual en Sudáfrica (Gutiérrez et al., 2020). En consecuencia, considerar estas configuraciones resulta fundamental en el desarrollo de la minería secundaria en Chile.

Otra alternativa para la redepositación de los relaves reprocesados es reducir humedad, logrando depósitos de relaves en pasta, y si se requiere bajar aún más su humedad se obtienen relaves filtrados, con un contenido de agua del 15% al 17% en peso (Gutiérrez et al., 2020). Si bien económicamente lograr estos niveles de humedad en los relaves es muy costoso, estos poseen ventajas comparativas desde un punto de vista de estabilidad física y química.

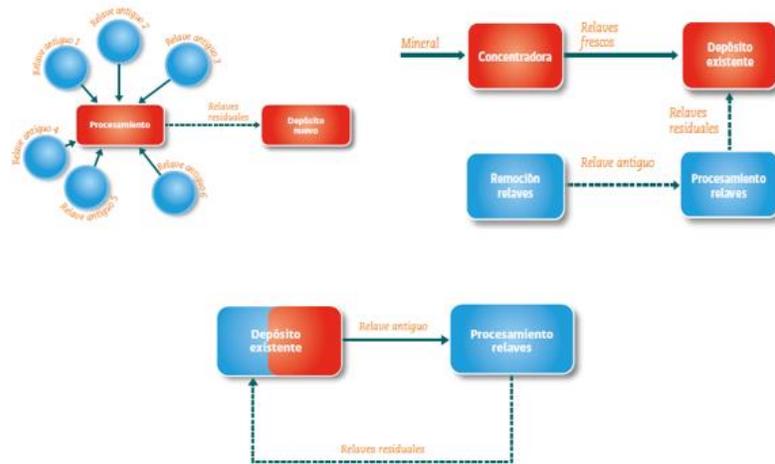


Figura 20: Diferentes opciones de redepositación (Gutiérrez et al., 2020).

2.5. Estabilidad física

La estabilidad de taludes en suelos ha sido ampliamente estudiada y cuenta con diferentes enfoques para su evaluación. En los diseños geotécnicos, se incorporan factores de seguridad (FS) que deben cumplirse para garantizar un buen desempeño de la estructura. Este factor considera los riesgos e incertidumbres asociados a la falla de estas estructuras y varían caso a caso.

Una forma de definir este factor de seguridad al deslizamiento es mediante la comparación de las fuerzas resistentes y solicitantes, tal como se muestra en la Ecuación 3 para una superficie de falla. La superficie con el menor FS se le conoce como superficie de falla crítica.

$$FS = \frac{\sum \text{fuerzas resistentes}}{\sum \text{fuerzas solicitantes}} \quad \text{Ec. 3}$$

Esto indica que, si el factor de seguridad es igual a uno, las fuerzas resistentes son iguales a las solicitantes, por lo que factores de seguridad mayores a uno corresponden a situaciones favorables donde las fuerzas resistentes son mayores a las solicitantes y, por lo tanto, la condición es estable.

En Chile, las principales causas de falla o colapso de depósitos de relaves corresponden a sismos, rebalse, filtración e inestabilidad de talud. En particular, las fallas han ocurrido por licuación sísmica por falla de flujo, seguido por inestabilidad de talud con deformaciones inducidas por sismo y, en menor medida, por rebalse (Villavicencio et al., 2014). Sin embargo, al evaluar el proceso de remoción, se consideran y evalúan los mecanismos por los cuales una excavación de suelo puede fallar, es decir, inestabilidad de talud o licuación sísmica.

Según Budhu (2011) se identifican al menos 6 tipos de fallas en taludes; el movimiento de la masa de suelo en una capa débil, falla de base, al pie del talud, de talud, de flujo y deslizamiento de bloque (ver Figura 21). En el caso de relaves, por la forma en que se depositan, se esperaría que se desarrollen tipos fallas de movimiento de la masa de suelo en una capa débil, falla de base, al pie del talud y de talud.

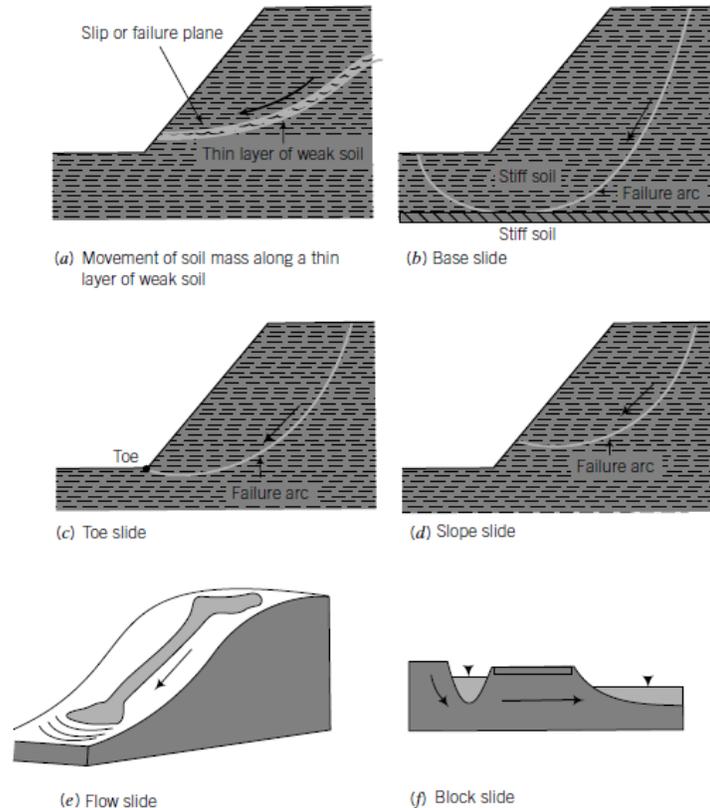


Figura 21: Tipos de fallas comunes en taludes, estos son: (a) el movimiento de la masa de suelo en una capa débil, (b) falla de base, (c) al pie del talud, (d) de talud, (e) de flujo y (f) deslizamiento de bloque (Budhu, 2011).

2.5.1. Métodos de equilibrio límite

Estos métodos son ampliamente utilizados en la práctica para la verificación de la estabilidad de taludes. Estos se clasifican y entienden de acuerdo con los principios y supuestos involucrados en el análisis (Bentley Systems, 2021). La Figura 22 muestra la clasificación general de estos métodos, incluyendo diferentes procedimientos para su evaluación.

De acuerdo con el manual del software PLAXIS LE, estos principios son:

- La plasticidad se desarrolla sólo a lo largo de la superficie de falla y el bloque en movimiento se comporta como un sólido.

- El tipo de superficie de falla debe ser seleccionada por el usuario, la cual puede ser circular, compuesta o no-circular.
- La ubicación de la superficie de falla crítica se encuentra mediante prueba y error.

Mientras que los supuestos son:

- Los materiales se comportan y fallan de acuerdo con el modelo constitutivo seleccionado.
- El factor de seguridad (FS) es el mismo a lo largo de toda la superficie de falla.
- El factor de seguridad para la componente cohesiva es igual que para la componente friccional.

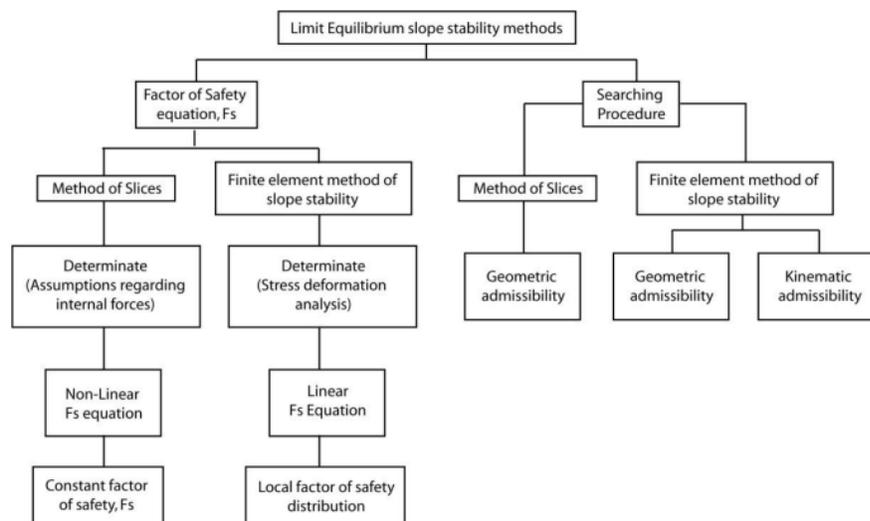


Figura 22: Clasificación general de los métodos de estabilidad de taludes (Bentley Systems, 2021).

Algunos de estos métodos se muestran en la Tabla 6, donde se muestra que tipo de equilibrio satisface. De acuerdo con lo anterior, estos pueden ser más o menos precisos.

Tabla 6: Métodos de equilibrio límite (Bentley Systems, 2021).

Método	Equilibrio de fuerzas	Equilibrio de momentos
Equilibrio límite general	Si	Si
Ordinario o de Fellenius	No	Si
Bishop simplificado	No	Si
Janbu simplificado	Si	No
Spencer	Si	Si
Morgenstern-Price	Si	Si
Corps of engineers	Si	No
Lowe-Karafiath	Si	No
Sarma (1973)	No	Si
Sarma dovelas no verticales (1979)	No	Si

2.5.2. Métodos de estabilidad sísmica

Según Jibson (2011), los métodos existentes para evaluar el comportamiento de taludes sometidos a cargas sísmicas se dividen en tres categorías: análisis pseudo estático, métodos simplificados de deformación (por ejemplo, Newmark) y métodos numéricos tensión-deformación (por ejemplo, elementos o diferencias finitas).

El método utilizado en este estudio corresponde al pseudo estático, en el cual se incorpora dentro del análisis de equilibrio límite como una pseudo fuerza vertical u horizontal según las ecuaciones 4 y 5, respectivamente.

$$F_h = k_h \cdot W \quad \text{Ec. 4}$$

$$F_v = k_v \cdot W \quad \text{Ec. 5}$$

Donde W corresponde al peso de la masa deslizante y, k_v y k_h corresponden a los coeficientes sísmicos vertical y horizontal, respectivamente. En la práctica la pseudo fuerza horizontal siempre se evalúa, mientras que la vertical eventualmente. Existen diversas formas para determinarlos, por ejemplo, entre los más utilizados se encuentra el método de Saragoni (1993) o el decreto 86 de 1970, actualmente derogado. También, estos últimos dependen también de las condiciones particulares de la estructura, potenciales daños, entre otras.

2.5.3. Excavaciones

La remoción se considera como una excavación de suelo. Al crear un talud de arcilla en presencia de nivel freático superficial provoca que la presión de poros disminuya en respuesta del material excavado. Después de un tiempo, la presión de poros aumenta y se estabiliza de acuerdo con el nivel freático (ver Figura 23). Sin embargo, esto provoca una disminución de las tensiones efectivas disminuyendo la resistencia de los materiales (Duncan et al., 2014). La magnitud de la reducción y recuperación de las presiones de poros dependerá de la permeabilidad de las lamas y su efecto en la estabilidad de los taludes.

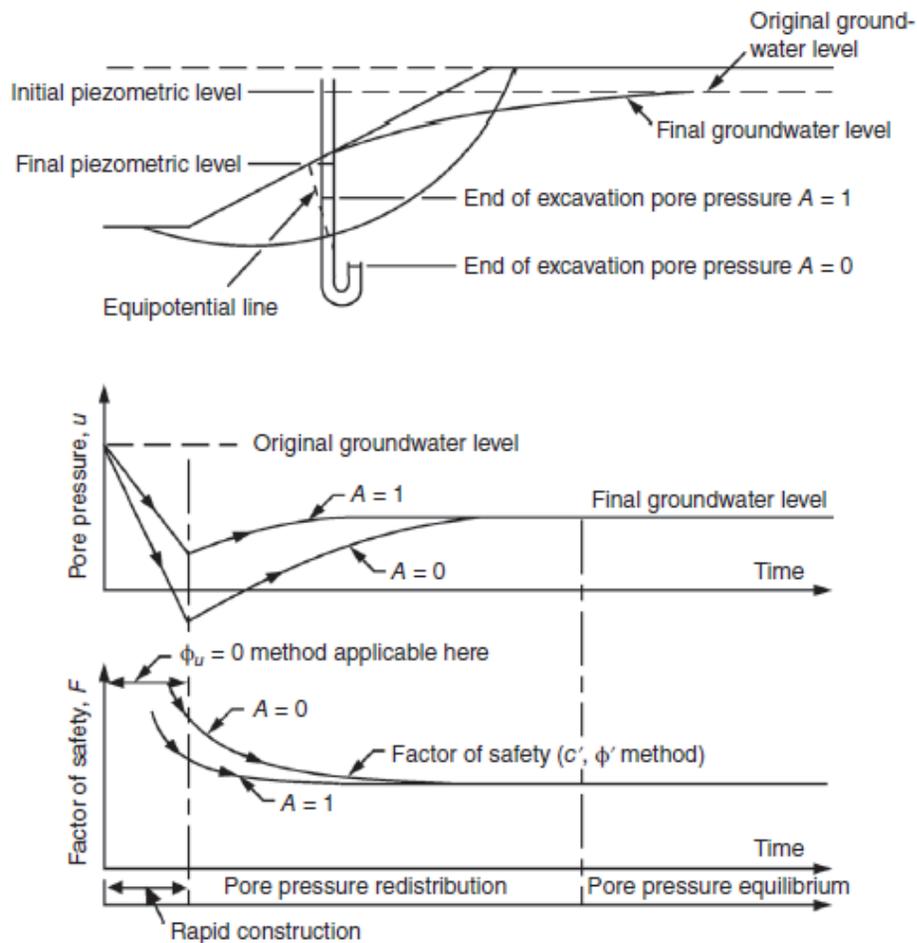


Figura 23: Variación en el tiempo de la presión de poros y factor de seguridad durante y después de un talud excavado en arcilla, $A=1$ y $A=0$ representan los altos y bajos valores del cambio en la presión de poros debido a la excavación (Duncan et al., 2014).

2.5.4. Licuación

Casagrande (1975) identificó dos tipos de licuación, primero la movilidad cíclica asociada a una pérdida de rigidez del material, y segundo la licuación verdadera o falla de flujo asociada a la pérdida de resistencia del material. La susceptibilidad a la licuación de ambos tipos es provocada por factores históricos, geológicos, de composición y de estado (Kramer, 1996). Son suelos susceptibles aquellos con presencia considerable de material granular con baja o nula cohesión, con una baja capacidad de drenaje y sin compactar.

Además, el suelo debe estar total o parcialmente saturado, permitiendo un comportamiento no drenado en el que se desarrollen los excesos de presiones de poros provocando la licuación.

En Chile, se han reportado fallas en depósitos de relaves debido a la licuación de las lamas. Un ejemplo de ello es el depósito Barahona 1, que colapsó el año 1928 tras el terremoto de Talca de $M_w=8.3$. En este evento, los relaves recientemente depositados

licuaron provocando un asentamiento del dique que generaron grietas por las cuales fluieron los relaves licuados. Este flujo erosionó el talud aguas abajo, culminando en la falla y posterior liberación de 2.7 millones cúbicos de relaves (Troncoso et al., 2017). Esta experiencia demuestra la susceptibilidad de los relaves a la licuación.

Para evaluar el potencial de licuefacción en suelos, se han desarrollado diversas metodologías. Algunas de ellas incluyen pruebas de laboratorio y de campo con el fin de definir una resistencia residual para condiciones estáticas de carga, sin embargo, se pierde representatividad de las condiciones reales del suelo. Por otro lado, existen métodos que utilizan datos históricos de falla de flujo por licuación (Youd et al., 2001), empleando mediciones de SPT o CPT.

2.6. Características de depósitos de relaves antiguos y abandonados en Chile

Como se ha expuesto en los capítulos anteriores, es común que los depósitos antiguos y abandonados presenten cierto nivel de incertidumbre en sus características, ya sea en su geometría o en la caracterización y comportamiento de sus materiales. En consecuencia, en este capítulo se recopilan datos para el estudio geotécnico de remoción que posteriormente será aplicado al depósito que se presenta en la sección 2.7 correspondiente al tranque Barahona 2.

2.6.1. Geometría de los depósitos

En la actualidad, en Chile existen múltiples configuraciones y geometrías en los depósitos de relaves. Aunque la cantidad de estos depósitos es considerable, solo algunos concentran la mayoría de los relaves existentes, dando lugar a estructuras de grandes alturas que ocupan extensas áreas. Por otro lado, los depósitos antiguos y abandonados se caracterizan por almacenar cantidades menores de relave y, por lo tanto, sus alturas también son menores.

La recopilación para el estudio considera depósitos de relaves antiguos, entre los cuales algunos están en proceso de remoción y otros poseen características similares al depósito Barahona 2. Estos son: Barahona 1, Cauquenes, Colihues, que tienen las características que se muestran en la Tabla 7. También se incluye la caracterización realizada por Pulgar (2020) de depósitos abandonados en la zona centro norte del país.

Tabla 7: Resumen de geometrías de depósitos de relaves antiguos, algunos en proceso de remoción, y abandonados (Consejo Minero, s.f.; Pulgar, 2020; SRK Consulting, 2019).

Depósito	Altura (m)	Pendiente aguas abajo (H:V)
Barahona 1	54	2.1:1
Cauquenes muro 0	23	2.5:1
Cauquenes muro 1	51	3.7:1
Cauquenes muro 2	35	3.5:1
Cauquenes muro 3	18	2.0:1
Cauquenes muro 4	14	2.0:1
Colihues Muro A	83	2.2:1
Colihues Muro B	42	2.2:1
Colihues Muro C	16	1.8:1
Delirio (Depósito A)	21	1.4:1
Delirio (Depósito B)	27	1.5:1

2.6.2. Parámetros geotécnicos

Dada la limitada disponibilidad de información sobre los parámetros geotécnicos de los relaves, que suelen ser datos privados y reservados, la caracterización de los materiales que componen los depósitos abandonados y antiguos en Chile se basa en la información recopilada por De Laire (2021) desde varias fuentes, y Pulgar (2020). Adicionalmente, se incluye información del depósito Barahona 0, el cual comparte similitudes en cuanto a sus materiales al depósito Barahona 2 estudiado posteriormente. Es relevante señalar que, en el caso de De Laire (2021), se consideran los límites de los parámetros presentados. Un resumen de estos parámetros se presenta en la Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10 para los muros, relaves y suelos de fundación, respectivamente.

El suelo de fundación presentado por De Laire (2021) son excesivamente altos, lo cual puede corresponder a roca. Además, los valores para el relave presentados para el Barahona 0 no están correctos debido a que no puede presentar un ángulo de fricción nula, sin embargo, se entiende que usa para representar una resistencia no drenada constante.

Tabla 8: Resumen de parámetros geotécnicos para los muros de tranques de relaves antiguos, algunos en proceso de remoción, y abandonados.

Depósito	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Su/σ_v (-)	Peso unitario (kN/m ³)	Peso unitario saturado (kN/m ³)	Fuente
Barahona 0	33	0	–	18	19	Resolución N° 1160 de 2009
–	32 – 40	0 – 60	0.2	12 – 21 ¹	–	De Laire (2021)

Nota 1: No se distingue si es natural o saturado.

Tabla 9: Resumen de parámetros geotécnicos para los relaves de tranques antiguos, algunos en proceso de remoción, y abandonados.

Depósito	Angulo de fricción	Cohesión (kPa)	Su/σ_v (-)	Peso unitario (kN/m ³)	Peso unitario saturado (kN/m ³)	Fuente
Barahona 0	0 ¹	20 ¹	–	16	17	Resolución N° 1160 de 2009
Delirio, depósito A	25	17	–	17	–	Pulgar (2020)
Delirio, depósito B	33	0	–	14	–	Pulgar (2020)

Nota 1: No se detalla a qué tipo de parámetros corresponde, sin embargo, se presupone que corresponde a una resistencia no drenada constante.

Tabla 10: Resumen de parámetros geotécnicos para los suelos de fundación de tranques de relaves antiguos, algunos en proceso de remoción, y abandonados.

Depósito	Angulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso unitario (kN/m ³)	Peso unitario saturado (kN/m ³)	Fuente
Barahona 0	36	0	22	22	Resolución N° 1160 de 2009
–	45 – 50	30000 a 50000 ¹	26 – 29	–	De Laire (2021)

Nota 1: Estos valores corresponderían a un suelo de fundación de tipo roca.

2.6.3. Coeficientes sísmicos

Se consideran como estructuras similares el Tranque Barahona 0, el cual fue removido totalmente y se emplazó aguas abajo del muro principal del Barahona 2, y el Botadero Barahona ubicado cercano al depósito de relaves Barahona (ver Figura 24).



Figura 24: Ubicación del depósito Barahona 0 y Botadero Barahona del depósito Barahona 2 (SRK Consulting, 2019).

Conforme con la resolución para el trasvasije del depósito de relaves Barahona 0 (Resolución N°1660 de 2009), se realizó un análisis de equilibrio límite utilizando el software SLOPE/W con el método de Bishop simplificado, utilizando para el análisis pseudo estático un coeficiente sísmico horizontal de 0.14.

En el marco de plan de cierre de la mina El Teniente (SRK Consulting, 2019), para el botadero Barahona ubicado cercano al depósito de relaves Barahona 2 (ver Figura 24), se consideró para un sismo operacional un coeficiente sísmico horizontal de 0.10 mientras que para el sismo máximo probable un coeficiente sísmico horizontal de 0.16.

2.6.4. Criterios de aceptabilidad

De manera similar, en el trasvasije del depósito de relaves Barahona 0, se aplicaron los criterios de aceptabilidad de la Tabla 11 para las excavaciones en la cubeta, considerando tanto los casos estáticos y pseudo estáticos.

Tabla 11: Criterios de aceptabilidad utilizado en Barahona 0 (Resolución N°1160 de 2009).

Condición	Factor de seguridad
Estática	≥ 1.5
Pseudo estática	≥ 1.2

Cabe destacar que existe escasa información sobre remoción de relaves y la conformación de taludes en la cubeta, por lo que no se presentan estudios que respalden dichos criterios. Los valores presentados en la Tabla 11 son utilizados comúnmente para botaderos e incluso para muros de depósitos de relaves (Ministerio de Minería, 2007). Se reconoce que los riesgos asociados en las estructuras anteriormente mencionadas son diferentes y, por lo tanto, se espera que los factores de seguridad sean estudiados de acuerdo con las particularidades del proyecto en cuestión.

2.7. Estudio de caso: Tranque Barahona 2

El propósito de este subcapítulo es proporcionar una descripción del área de emplazamiento del depósito en estudio. Se presentan las características más importantes con el fin de identificar y cuantificar posibles eventos naturales que potencialmente pongan en riesgo la remoción de los relaves, conforme a las recomendaciones de Engels et al. (2004). Asimismo, se caracteriza, con la información disponible, el tranque Barahona 2.

2.7.1. Antecedentes

La mina El Teniente es una instalación de extracción de cobre que pertenece a CODELCO. Actualmente produce concentrado de cobre a partir de la explotación subterránea del mineral. Ubicada en la comuna de Machalí a 50 km de la ciudad de Rancagua comenzó su operación en el año 1905 y actualmente cuenta con 4500 km de galerías de extensión.

Dentro de las instalaciones se encuentran los depósitos de relaves: Embalse Carén donde actualmente se depositan los relaves producidos por la mina a través de un canal de 87 km de extensión y, los Barahona 1 y 2 que actualmente se encuentran inactivos. El tranque de relaves Barahona 1 se ubica aguas arriba del muro 1 y aguas abajo del Barahona 2, este último contenido por los muros 2 y 3, tal como se muestra en la Figura 25.

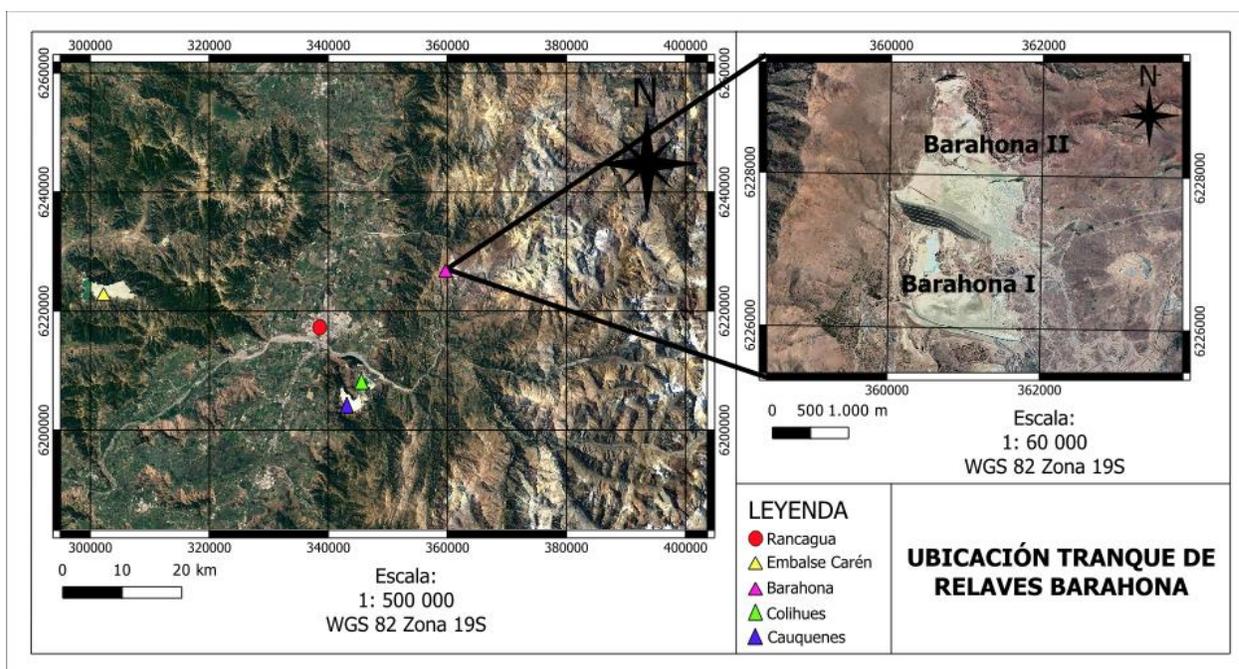


Figura 25: Ubicación instalaciones División El Teniente y Tranque Barahona (elaboración propia).

El tranque Barahona 2 operó durante los años 1928 hasta 1936, sin embargo, se utilizó de forma parcial hasta la década de 1970. Abarca una superficie de 180 Ha y se estima que almacena un volumen de 35 millones de metros cúbicos de relaves, según su capacidad autorizada (Sernageomin, 2022). De acuerdo con Henderson (2013), se estima que estos relaves poseen una ley de cobre del 0.32%. Comparativamente los relaves frescos entre los años 2003 y 2013 en promedio tuvieron una ley del 0.119% con una recuperación, en toneladas, del 25% y para el reprocesamiento del depósito Colihues se tuvo una recuperación del 31% para una ley de sus relaves del 0.283%. Esto último da cuenta del valor de los relaves antiguos.

El terremoto de magnitud $M_w=7.6$ ocurrido el 1 de diciembre de 1928 en las cercanías de la localidad de Curepto provocó la falla del muro del tranque Barahona 1, liberando 3.5 millones de relaves ocasionando la muerte de 54 personas (Bascur, 2019). Posterior al desastre, fue construido el tranque de relaves Barahona 2 aguas arriba.

2.7.2. Marco geológico y clima

La mina El Teniente se clasifica como un depósito pórfido cuprífero (ver Figura 26), en la cual se ubican las formaciones Coya-Machalí, Farellones y Colon-Coya, todas de naturaleza volcánica (SRK Consulting, 2019). Los relaves depositados provienen de las minas Bornita, Teniente y Fortuna (Bascur, 2019).

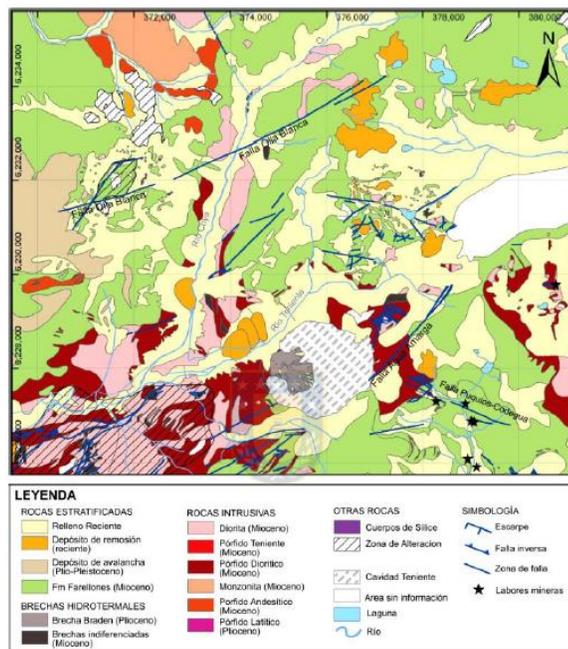


Figura 26: Mapa geológico de la mina El Teniente (extraído de Húmeres, 2007, modificado de Floody y Huete, 1998 en Muñoz, 2011, como se citó en Bascur, 2009).

De acuerdo con su plan de cierre, esta región no destaca fracturas o fallas que generen un riesgo geológico. Los plegamientos existentes se atribuyen a las formaciones sin ser identificados a lo largo del valle del río Coya (SRK Consulting, 2019). En consecuencia, no se identifican potenciales riesgos geológicos que puedan afectar la remoción de los relaves.

La zona de emplazamiento del depósito presenta un clima templado frío con lluvias invernales. La Figura 27 muestra que la mayor concentración de precipitaciones ocurre entre los meses de mayo y octubre, alcanzando valores máximos en junio y julio, lo que es concordante con las estaciones de invierno. Los escurrimientos superficiales provienen principalmente del deshielo, mientras que, en primavera y verano, de la nieve acumulada en otoño e invierno (SRK Consulting, 2019).

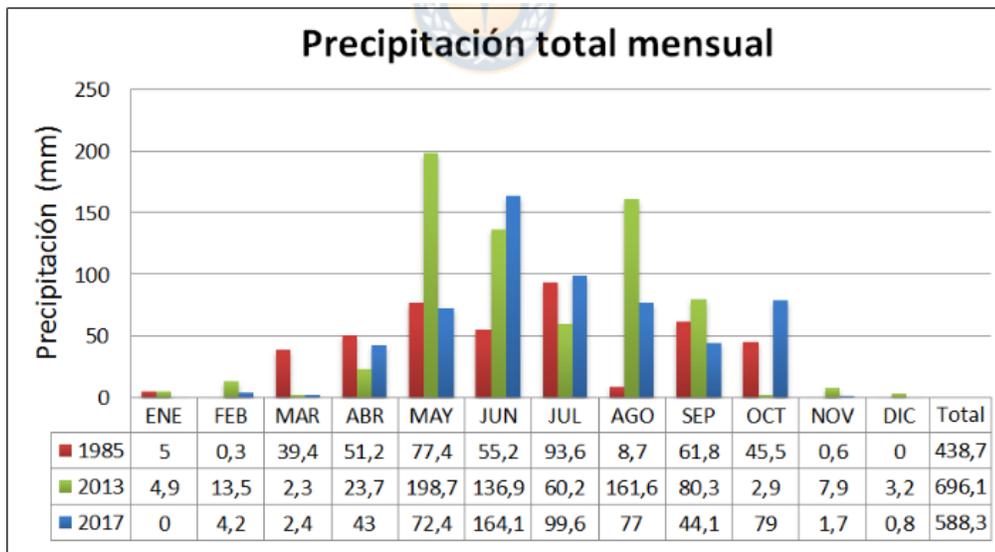


Figura 27: Precipitación mensual en el tranque Barahona 2 (Bascur, 2019).

Con base en lo anterior, se destaca que, durante los periodos de mayor precipitación, es decir, entre mayo y octubre, aumenta el riesgo de remoción debido al ingreso de agua en los relaves, aumentando los niveles freáticos al interior de la cubeta. Además, esta misma condición tiene un potencial de generar inestabilidad en los taludes de relaves, así como daño en los equipos y afectar la operación.

2.7.3. Geometría

La Tabla 12 muestra la geometría del tranque de relaves Barahona 2. En cuanto a las inclinaciones de los taludes aguas arriba de los muros no existe información disponible que den cuenta de su estado actual. Por lo cual se asume el mismo que en aguas abajo en los modelos realizados. Es común que los taludes aguas arriba sean menores que los de aguas arriba, lo que da lugar a la evaluación de una condición más estable para el muro.

Tabla 12: Geometría de los muros 2 y 3 de tranque Barahona 2 (SRK Consulting, 2019).

Característica	Muro 2	Muro 3
Altura máxima (m)	75	22
Revancha media (m)	3	3
Talud aguas abajo (m)	4:1	2.5:1
Ancho coronamiento (m)	10	7
Cota coronamiento (m.s.n.m)	1654.5	1654.5

2.7.4. Caracterización de los materiales

Aunque no se cuenta con información específica sobre los parámetros geotécnicos de los materiales que componen los muros del tranque, se utilizan los resultados obtenidos del estudio con parámetros de estructuras similares para evaluar la estabilidad del depósito. En particular, se toman en consideración los parámetros del tranque Barahona 0 ubicado aguas abajo del depósito, cuyos relaves provienen del mismo lugar. Esto provoca incertidumbres en los resultados, tanto en el estudio como en la aplicación que deben ser discutidos.

2.7.5. Nivel freático

Varios de los estudios revisados sugieren que el clima es un factor que afecta las condiciones del tranque y, en consecuencia, de su remoción. Si bien algunos estudios mencionan una sequía en la zona de emplazamiento, se ha demostrado que el cambio climático aun no es suficiente para alterar los procesos hídricos del tranque (Bascur, 2019). Las marcadas diferencias de precipitaciones otorgan periodos de evaporación y de aporte hídrico significativos.

El comportamiento hidrológico al interior del tranque resulta difícil de caracterizar, ciertos estudios muestran irregularidades (ver Figura 28), mientras que otros señalan niveles freáticos máximos de 10.5 m y 5 m (Bascur, 2019). Húmeres 2017 (como se citó en Bascur 2019), sugiere una profundidad de 25 m del nivel freático considerando la sequía, la existencia de fases solubles a profundidades de 21.2 m y un cambio granulométrico a dicha profundidad. En conclusión, se reconoce que la caracterización del nivel freático al interior de la cubeta es poco precisa.

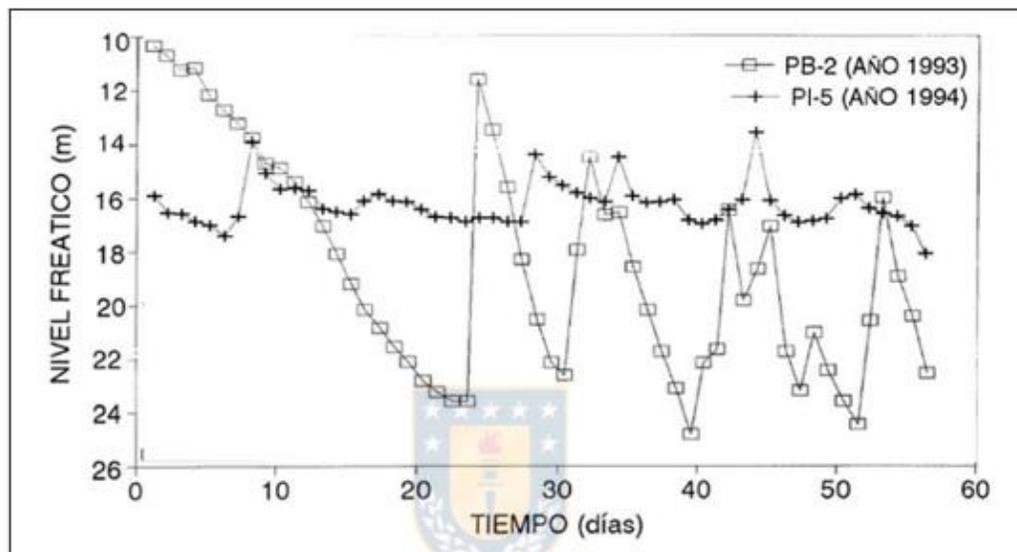


Figura 28: Nivel freático en la cubeta del Barahona 2 (Bascur, 2019).

Capítulo 3: Metodología de trabajo

Este capítulo presenta la metodología de trabajo de la memoria, cuya finalidad es la elaboración de una propuesta de remoción parcial o total aplicada a un caso real, aplicando el estudio de sensibilidad geométrica incorporando recomendaciones de especificaciones técnicas en la conformación de taludes. Partiendo de la revisión bibliográfica se busca establecer un esquema general para decidir conceptualmente la remoción de cualquier depósito desde el punto técnico. Luego, ya que se reconoce cierta incertidumbre en el tipo de construcción y comportamiento de los relaves en depósitos abandonados e inactivos, se realiza un estudio de sensibilidad geométrico, tanto para la berma de seguridad como también a los taludes excavados de relaves.

3.1. Parte I: Estudio de estabilidad geotécnica

Habiendo definido la técnica y secuencia de remoción asociadas a los métodos mecánicos o hidráulicos, el estudio de estabilidad física se realiza mediante el análisis por equilibrio límite con el programa PLAXIS LE utilizando el método de Morgenstern-Price, considerando superficies de falla de tipo circular y material isotrópico.

Se estudian etapas críticas durante el proceso de remoción. La primera de ellas corresponde a configuraciones intermedias, que implican la conformación taludes de relaves en el interior de la cubeta, y otra etapa al final en caso de remoción parcial. Las etapas intermedias dependen de la secuencia de remoción y se busca evaluar inestabilidades locales del talud, así como globales en la conformación de bancos y bermas. En caso de no remover completamente el depósito, es decir en una remoción parcial, se debe disponer y evaluar una franja o berma de seguridad estable, que permita la remoción segura de los relaves al interior de la cubeta y su permanencia en el tiempo.

En consecuencia, se propone un estudio tanto para la definición de una franja de seguridad como la conformación de taludes en relaves. Este análisis incluye la evaluación de la estabilidad, teniendo en cuenta las diversas geometrías de depósitos de relaves y el comportamiento de materiales involucrados. La resistencia de estos los materiales se establece mediante la información recopilada sobre tranques de relaves antiguos y abandonados mostrados en la sección 2.6.2. Por simplicidad se estudian tipos de falla al pie del talud y de talud.

3.1.1. Definición de geometría de taludes de relaves

Después de revisar los proyectos mencionados en las secciones 2.4.4 y 2.6.1, se determinó que la definición geométrica de los taludes responde principalmente a su estabilidad

geotécnica, así como a la velocidad de remoción requerida. Por lo tanto, la optimización debe considerar ambos criterios, lo cual se encuentra fuera del alcance de este trabajo, que se centra exclusivamente en la estabilidad geotécnica de los taludes conformados.

La Figura 29 presenta la geometría general del corte en el relave, el cual tiene como propósito evaluar la estabilidad local del talud durante el proceso de remoción. El estudio incorpora las siguientes variables:

- Altura del talud (H)
- Ángulo del talud (α)

Para ambos casos, estático y sísmico, se evalúan tres alturas de talud (H) y cinco inclinaciones (α). En una primera instancia, no se contempla la existencia de nivel freático, asumiendo comportamiento de los relaves como drenados, es decir, con parámetros de resistencia efectivos. Se utiliza un solo coeficiente sísmico, definido a través del estudio de antecedentes en tranques de relaves en Chile, sin hacer una distinción entre un sismo operacional o uno máximo creíble, y sin considerar la componente vertical.

Las superficies de falla se definen de manera que afecten a la operación de, por ejemplo, un monitor hidráulico ubicado en la parte superior del talud. Es importante mencionar que el análisis no considera la sobrecarga generada por la monitor. Para esto se utiliza la herramienta de búsqueda de superficies por entrada y salida, dejando 5 metros en la parte superior hasta el pie del talud, tal como se muestra en la Figura 29. De esta manera, se evitan considerar fallas locales propias del proceso de remoción, es decir, fallas en la cara del talud.

En cuanto a la búsqueda de superficies de falla por entrada y salida, se consideran, en ambos casos, espaciamientos de 0.5 m y 15 incrementos de radio. Lo anterior permite una mayor precisión en la búsqueda de fallas críticas.

Para evaluar la sensibilidad geométrica descrita anteriormente, a través de la variación de H y α , se desarrolla un script en Python modificando la API (del inglés application programming interface) ya integrada en PLAXIS LE. Para obtener detalles adicionales, se presenta el script completo en el Anexo A.

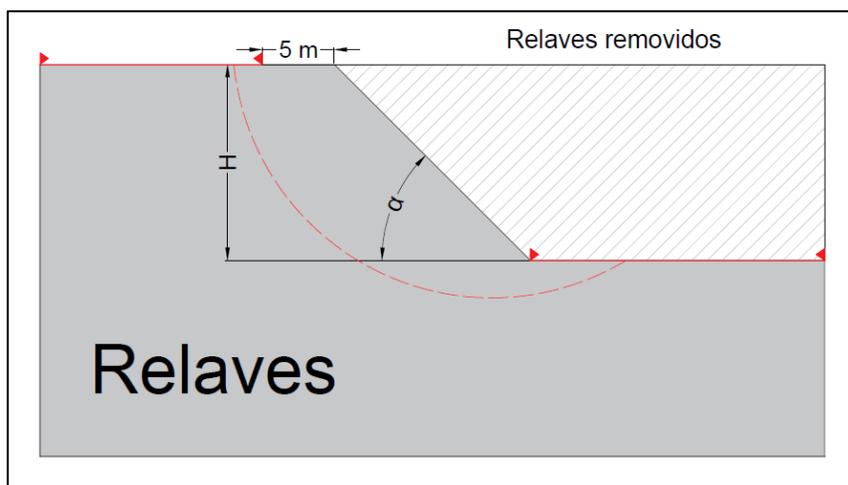


Figura 29: Talud general del relave removido, se aprecia las entradas y salidas de las superficies de falla circulares, considerando una distancia de 5 m asociada a la búsqueda de fallas distintas a las que ocurren en la cara del talud (elaboración propia).

Las alturas de los taludes y sus respectivos ángulos para el estudio se establecen a través del estudio de los casos de remoción revisados, los cuales varían desde los 16° hasta los 45°. Por consiguiente, se evalúan cinco inclinaciones equiespaciadas de taludes entre 10° a 50°. Además, se estudian alturas de taludes de 5 m, como lo observado en Barahona 0, 10 m utilizados en Colihues y Cauquenes, y se agrega en el estudio una altura de 2.5 m, considerando que depósitos abandonados presentan alturas menores.

Dado que el estudio de la variabilidad de los parámetros geotécnicos de los materiales se encuentra fuera del alcance de este trabajo, estos se consideran constantes y con valores presentados en la Tabla 13. Asimismo, se mantiene constante el coeficiente sísmico horizontal con valor 0.14.

Tabla 13: Parámetros geotécnicos para el estudio de los taludes en la excavación en relaves sin considerar nivel freático, evaluando una condición drenada de los materiales.

Material	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso unitario (kN/m ³)
Relaves	25	0	16

3.1.2. Efecto del Nivel freático

Con el propósito de evaluar el efecto del nivel freático en la estabilidad de los taludes, se exploran cuatro escenarios posibles, estos se muestran en la Figura 30. Estos niveles condicionan el comportamiento de los materiales, y su análisis resulta fundamental. Estos se sitúan a distancias de un tercio de la altura del talud (H) introduciendo la altura del nivel freático desde la base (h), es decir, desde la base del talud ($h = 0/3 H$) hasta su superficie ($h = 3/3 H$).

La condición de los relaves saturados se evalúa tanto en condición drenada como no drenada. Para ello, se utiliza el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb y relación de resistencia no drenada, respectivamente. Se establece una resistencia no drenada mínima de 20 kPa, reconociendo que estos taludes son superficiales y existe una resistencia mínima que se debe considerar al utilizar el modelo de relación de resistencia no drenada, la cual depende de la profundidad. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 14.

Al igual que para el caso sin nivel freático, las superficies de falla son circulares y se buscan por entrada y salida, con espaciamentos de 0.5 m y 15 incrementos de radio. También se consideran 5 metros antes de comenzar el talud, en la parte superior, hasta el pie de este, ya que fallas más cercanas se podrían considerar parte de la misma remoción. Esta falla propuesta comprometería la operación debido a la posición de, por ejemplo, un monitor hidráulico.

Para evaluar la sensibilidad geométrica descrita anteriormente, a través de la variación de h , H y α , se desarrolla un script en Python modificando la API ya integrada en PLAXIS LE. Es importante mencionar que los resultados se presentan en términos de la relación entre h y H . Para obtener detalles adicionales, se presenta el script completo en el Anexo A.

Tabla 14: Parámetros geotécnicos para la definición de los taludes en la excavación en relaves considerando nivel freático y comportamiento del relave drenado y no drenado.

Material	Angulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	S_u/σ_z (-)	Resistencia no drenada mínima (kPa)	Peso unitario natural (kN/m³)	Peso unitario saturado (kN/m³)
Relaves	25	0	0.1	20	16	18

Al igual que en el estudio de taludes con y sin nivel freático, para evaluar los distintos casos se desarrolla un script en Python modificando una API ya integrada en PLAXIS LE. Para obtener detalles adicionales, se presenta el script completo en el Anexo B.

Con el objetivo de simplificar el estudio, se mantienen constantes ciertos parámetros, como lo son la revancha de $R=3$ m, el coronamiento de $C=15$ m y la pendiente aguas debajo de relación 2:1 (H:V). Asimismo, se considera una pendiente idéntica tanto para el talud aguas abajo como aguas arriba.

Las superficies de falla son de tipo circular mediante el método de búsqueda de entrada y salida, con espaciamentos de 0.5 m y 15 incrementos de radio. Se definen de manera que afecte la estabilidad global y local de la franja de seguridad, es decir, fallas que comiencen en el pie del talud y terminen, en un primer caso, en el comienzo de la franja de seguridad y, por otro lado, en el muro aguas arriba o comienzo de la revancha. Estas dos fallas, local y global se ilustran en rojo en la Figura 31.

Como se mencionó anteriormente el relave se evalúa en condición drenada, para lo cual se utiliza el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb para los relaves, muro y suelo de fundación. Mientras que el coeficiente sísmico horizontal para el análisis pseudo estático es de 0.14, despreciando la componente vertical.

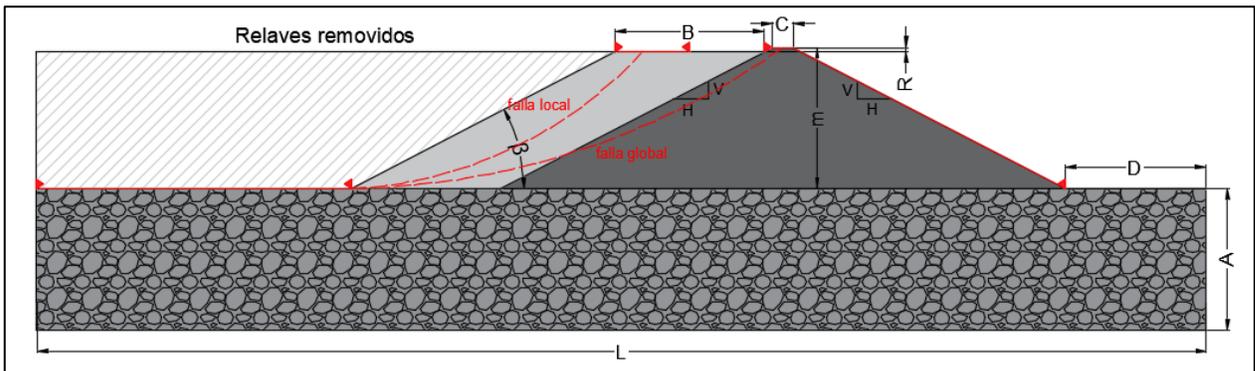


Figura 31: Modelo simplificado para el estudio de la franja de seguridad considerando el método de construcción aguas abajo y comportamiento del material como drenado (elaboración propia).

Con base en las alturas recopiladas en la Tabla 7, se estudian tres alturas de muro, de 30 m, 50 m y 100 m. Además, dada la variabilidad en la distancia de bermas observadas en Colihues y Cauquenes (20 y 250 metros respectivamente), se consideran tres distancias de la franja (B), éstas son de 30 m, 50 m y 200 m. Mientras que, para el análisis local, las inclinaciones estudiadas son de 10° , 15° y 20° . Es importante destacar que para la estabilidad de la franja se deben satisfacer ambos análisis simultáneamente.

Los parámetros geotécnicos de los materiales se consideran constantes y de valores presentados en la Tabla 15.

Tabla 15: Parámetros geotécnicos para la definición de una franja.

Material	Angulo de fricción (°)	Cohesión (kPa)	Peso unitario natural (kN/m ³)
Muros	34	0	18
Relaves	25	0	16
Suelo de fundación	36	0	22

3.2. Parte II: Aplicación al tranque Barahona 2

La aplicación del estudio al caso del depósito de relaves Barahona 2 plantea el uso de los resultados y hallazgos obtenidos, tanto de la revisión bibliográfica como de la primera parte relacionada al estudio de estabilidad geotécnica. De acuerdo con las particularidades del depósito, se evalúan las diferentes técnicas de remoción incluyendo las especificaciones sobre los taludes y franjas durante el proceso de remoción.

Por lo tanto, uno de los objetivos es evaluar la estabilidad física en los taludes excavados durante el proceso de remoción utilizando como base el estudio realizado previamente. El modelo simplificado, que considera la geometría que se muestra en la Tabla 12 se observa en la Figura 32.

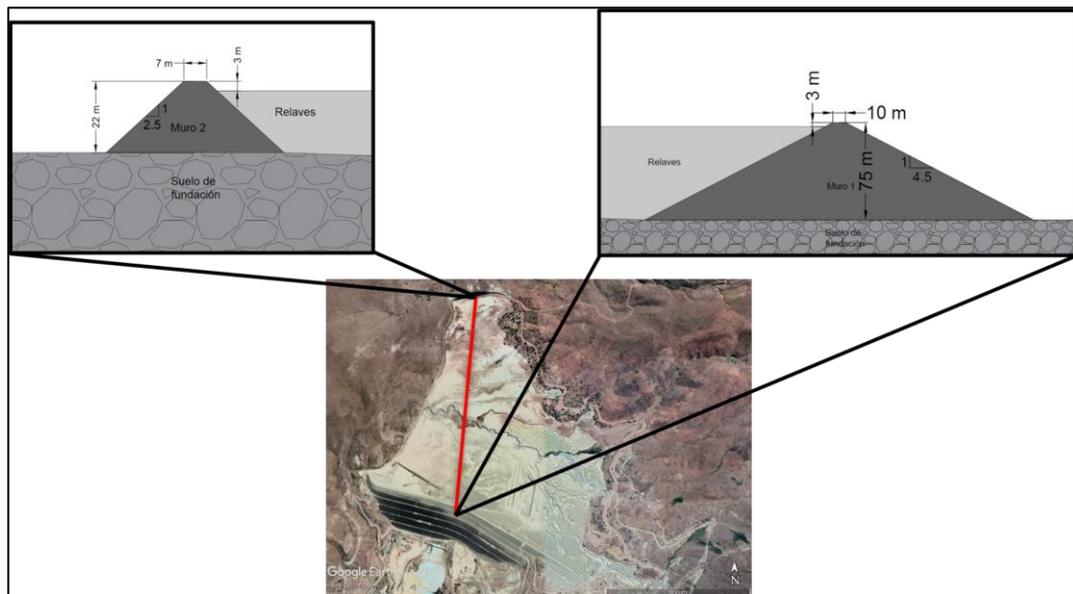


Figura 32: Geometría simplificada del depósito de relaves Barahona 2 (elaboración propia).

Con el fin de evaluar la estabilidad durante el proceso de remoción se analizan 2 configuraciones intermedias en un perfil a lo largo de la cubeta, como se muestra en rojo en la Figura 32, estas se presentan en la Figura 33.

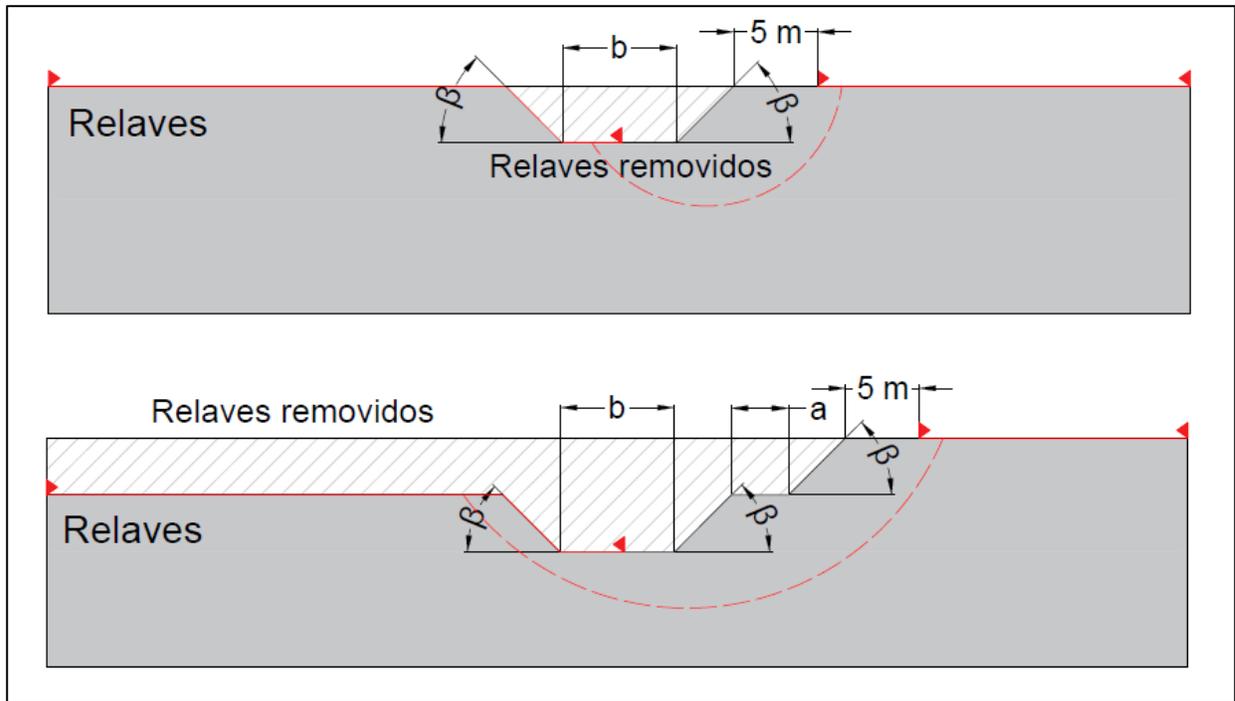


Figura 33: Etapas intermedias a evaluar en casos presentados en la Tabla 7.

Para la conformación de bancos se consideran los parámetros geotécnicos efectivos utilizados en el estudio que se muestran en la Tabla 13. Además, el análisis considera los siguientes parámetros geométricos que se determinan como resultado del análisis de la bibliografía revisada complementado con los resultados obtenidos de la sección 5.4. En este caso la altura de los bancos corresponde a la altura de los taludes evaluados de manera local, es decir, altura H en la Figura 29.

- ✓ Altura del bancos (H)
- ✓ Bermas (a)
- ✓ Zanja (b)
- ✓ Ángulos de taludes (β)

Capítulo 4: Resultados

El presente capítulo expone los principales resultados del estudio realizado y de su aplicación al tranque Barahona 2, incluye la investigación asociada a las técnicas de remoción, la definición de taludes de relaves en la cubeta, la determinación de la franja de seguridad y verificación en la aplicación en el estudio de caso.

4.1. Procedimiento de remoción

La revisión y análisis de antecedentes permite determinar las técnicas y secuencia de remoción adecuadas para los depósitos. Esta revisión permite la descripción de las variables que se consideran importantes y su implicancia en el estudio geotécnico asociado a la remoción de relaves y muros.

Acorde con los objetivos de este trabajo, se elabora un diagrama de decisión para, de manera general, definir las diferentes técnicas y etapas de remoción durante el proceso de desmantelamiento parcial o completo del depósito. Esto se logra mediante el análisis de los diferentes casos de estudio presentados en sección 2.4.4.

Como resultado de la revisión bibliográfica se identifican una serie de variables que permiten determinar las técnicas de remoción del depósito y recomendar especificaciones técnicas, en particular se destacan las siguientes:

- Tipo de estructura: De acuerdo con el material de construcción, se identifican dos tipos. Un tranque que se construye con arena de relave o un embalse con material de empréstito. Esto influye en las propiedades geotécnicas de los materiales, principalmente del muro y, en consecuencia, de su estabilidad.
- Método de construcción: Los depósitos se construyen mediante el método de aguas arriba, eje central o aguas abajo. Es importante señalar que en algunos casos se combinan dichos métodos en las diferentes etapas. Se ha demostrado que el método de construcción impacta en la estabilidad del muro aguas abajo del depósito.
- Secuencia de depositación: Esto nos permite entender la distribución de lamas y arenas en el interior de la cubeta del depósito.
- Geometría del depósito: Influye en la estabilidad física de la misma, se relacionan con; el método de construcción, altura del muro, coronamiento, revancha, entre otras. Por otro lado, la geometría en planta (vista superior) nos permite definir espacialmente la secuencia de remoción.

- Propiedades geotécnicas de los materiales: Estos sirven como entrada en los modelos geotécnicos y en la posterior evaluación de los taludes de relaves. También es fundamental entender el comportamiento de estos, es decir, drenado o no drenado, y utilizar parámetros efectivos o totales. Es fundamental de considerar por su elevada incertidumbre en los depósitos de relaves abandonados o antiguos.
- Determinación del nivel freático: Este afecta considerablemente en el comportamiento de los materiales y, en consecuencia, en la estabilidad. Las precipitaciones como captación de aguas en el interior de la cubeta, así como la existencia de estructuras de drenaje o impermeabilización, condicionan su ubicación.
- Geología y sismicidad: La componente sísmica se incorpora en los análisis a través de los coeficientes sísmicos para los análisis pseudo estáticos. Por otro lado, la geología es fundamental para detectar, por ejemplo, fallas que pongan en riesgo la remoción.
- Criterios de aceptabilidad: De acuerdo con la institución o país, son criterios de diseño para la verificación de la estabilidad que varían caso a caso y se comparan con los resultados obtenidos.

El diagrama de decisión simplificado para la evaluación de remoción desde un punto de vista conceptual que se muestra en la Figura 34. Tanto la realización de taludes de prueba como la definición de la franja de seguridad tienen una componente de mitigación de riesgos dentro de las recomendaciones constructivas, que resultan fundamentales para una operación segura en el proceso de remoción.

Este diagrama muestra cómo se decide qué técnicas de remoción utilizar para cada depósito desde un punto de vista geotécnico, el cual es complementado posteriormente con especificaciones técnicas asociados a alturas y ángulos de taludes, zanjas y geometría de la berma de seguridad. Por otro lado, se evita utilizar el concepto de metodología constructiva de remoción, el cual se refiere a la descripción, lo más detallada posible, del proceso de desmantelamiento utilizando como base las técnicas previamente definidas, indicando las secuencias, etapas, cantidad de dispositivos, eficiencias, distribución espacial, entre otras, lo cual se encuentra fuera del alcance del trabajo.

Sin embargo, se recomienda de forma general la forma en que los relaves son retirados dentro de la cubeta. Esto responde a principalmente a cómo y dónde se inicia, y luego cómo avanza el proceso de remoción. De acuerdo con las particularidades de cada depósito se identificaron al menos dos tipos que se detallan en subcapítulo 4.1.2.

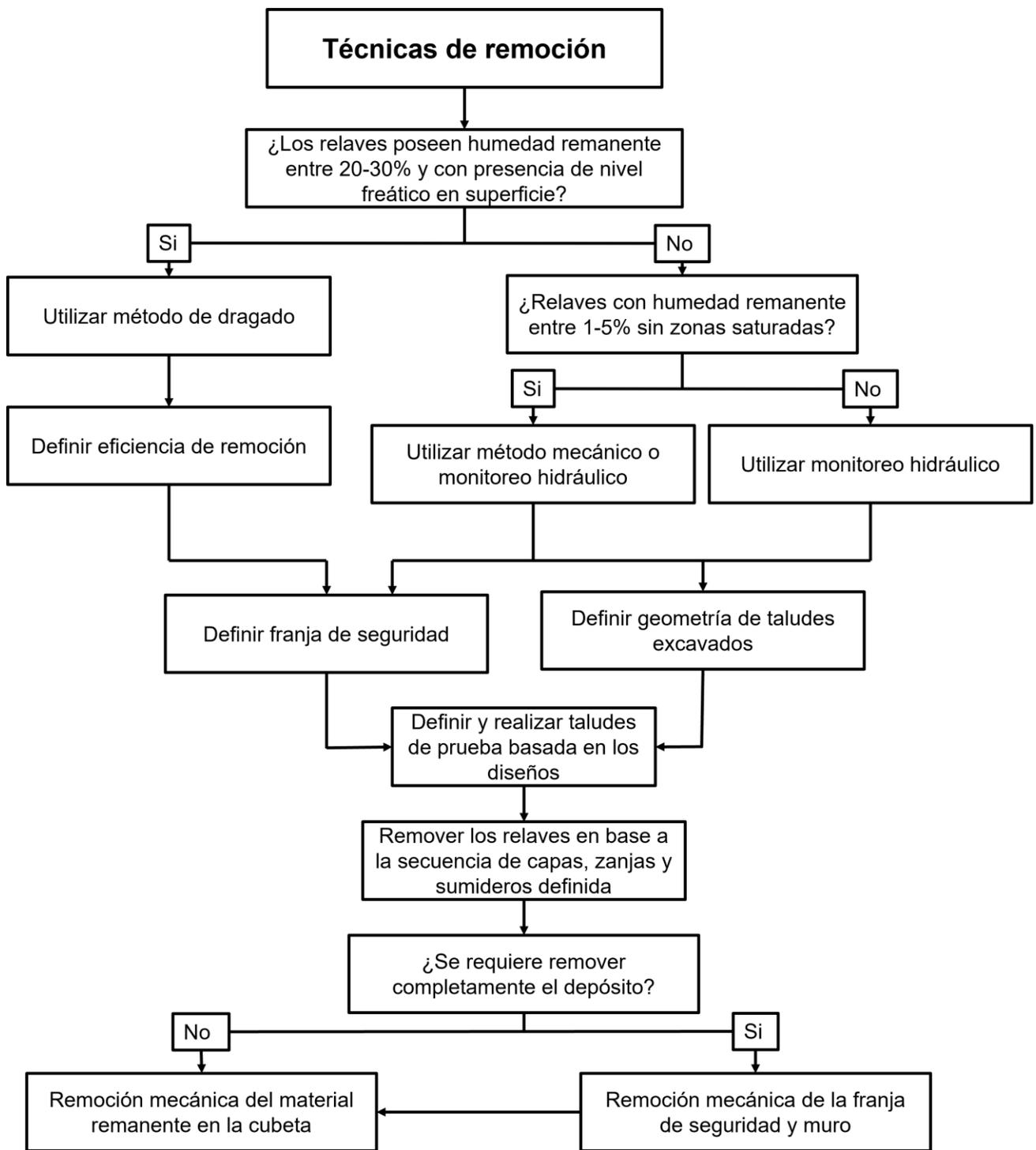


Figura 34: Esquema de decisión para llevar a cabo la remoción de relaves para cualquier tipo de depósito en función de las humedades de sus relaves y necesidad de desmantelamiento parcial o total (elaboración propia).

4.2. Estudio de taludes de relaves

Los resultados del estudio sobre los taludes de relaves excavados en la cubeta, sin considerar nivel freático, se muestran en la Figura 35. De acuerdo con la definición de estabilidad se presenta el límite o mínimo que se debe cumplir (FS=1).

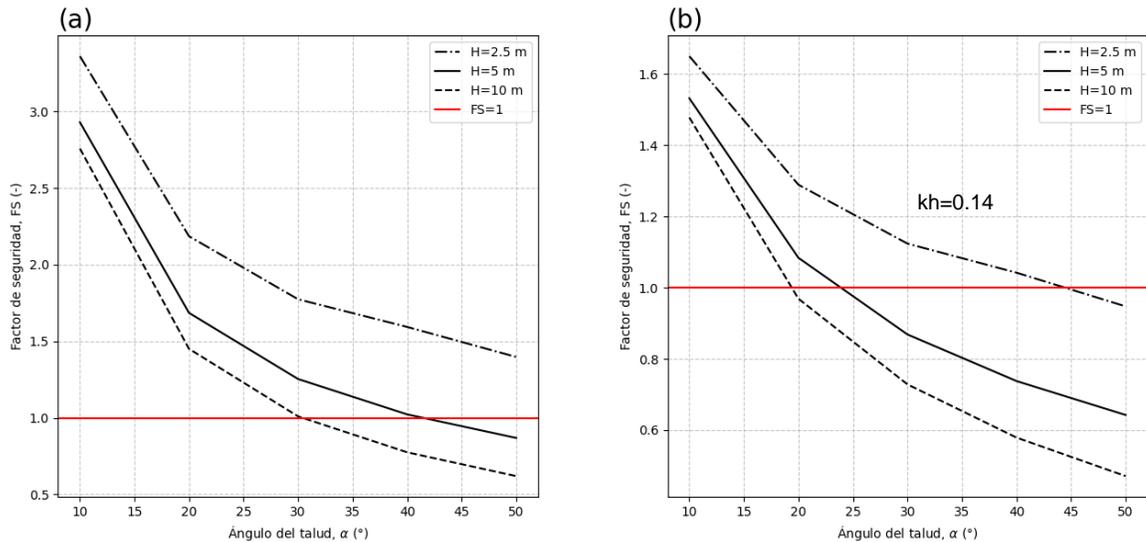


Figura 35: Resultados del estudio de sensibilidad geométrica de los taludes de relaves en la cubeta considerando el relave seco y tres alturas para, (a) en condición estática y (b) pseudo estática. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.

La Figura 35 muestra que, en ambos casos, el factor de seguridad disminuye en taludes más inclinados y de mayor altura. También, en ambas configuraciones, la estabilidad disminuye al incorporar la componente sísmica, siendo esta la que controla la estabilidad. Así, son estables taludes de 5 metros con ángulos menores a 25° , para 10 m menores a 20° y para 2.5 m menores a 45° .

Los resultados del estudio para la definición de los taludes excavados considerando la existencia de nivel freático y el relave saturado en condición estática se muestran en la Figura 36 y Figura 37, mientras que para una condición pseudo estática se muestran en la Figura 38 y Figura 39.

Al igual que en los casos sin considerar nivel freático, el factor de seguridad disminuye en taludes más inclinados, de mayor altura e incorporando la componente sísmica. Se destaca que, en la condición crítica, en donde se considera nivel freático, comportamiento no drenado de los materiales y condición pseudo estática, en ningún caso se alcanza la estabilidad mínima.

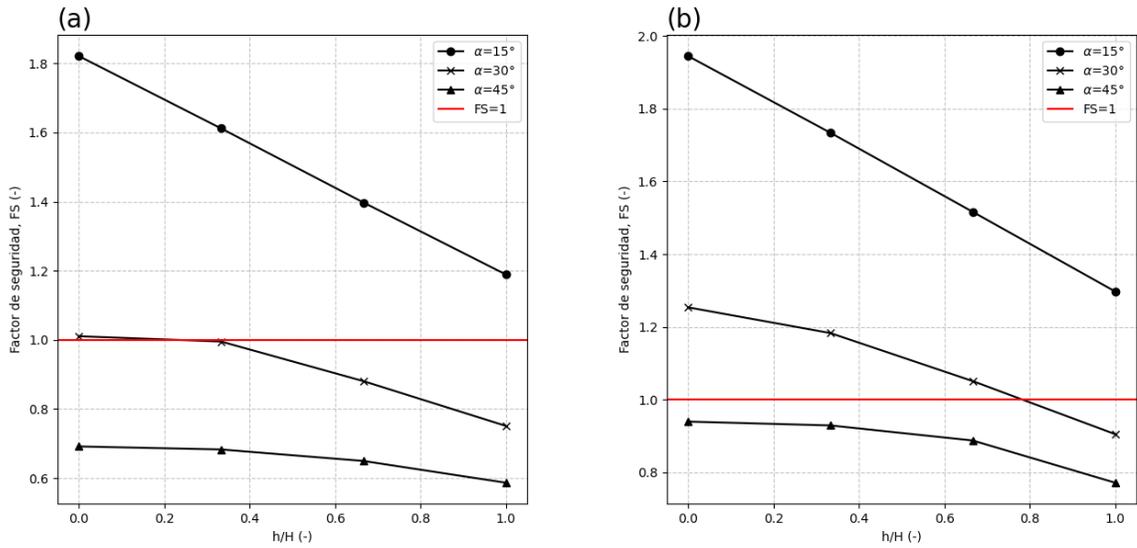


Figura 36: Resultados del estudio de sensibilidad geométrica de los taludes de relaves en la cubeta en presencia de nivel freático, comportamiento drenado del relave y estático para dos alturas, (a) $H=10$ m y (b) $H=5$ m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.

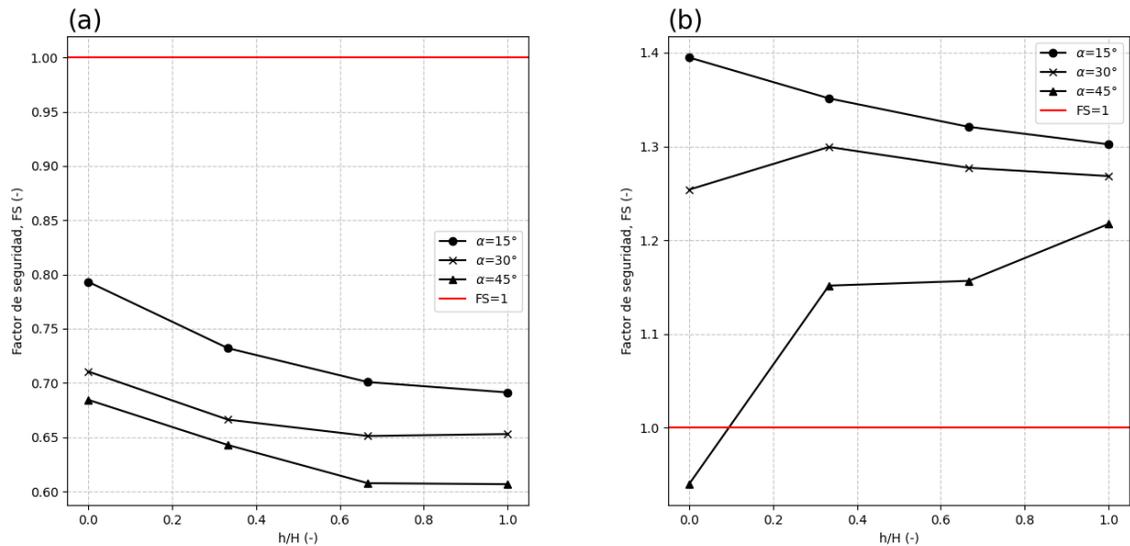


Figura 37: Resultados del estudio de sensibilidad geométrica de los taludes de relaves en la cubeta en presencia de nivel freático, comportamiento no drenado del relave y estático para dos alturas, (a) $H=10$ m y (b) $H=5$ m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.

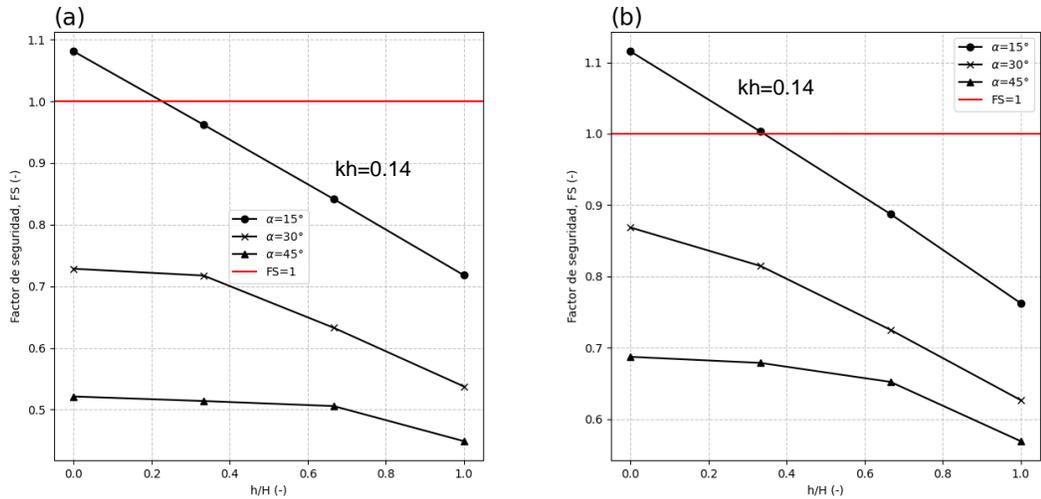


Figura 38: Resultados del estudio de sensibilidad geométrica de los taludes de relaves en la cubeta en presencia de nivel freático, comportamiento drenado del relave y pseudo estático para dos alturas, (a) $H=10$ m y (b) $H=5$ m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.

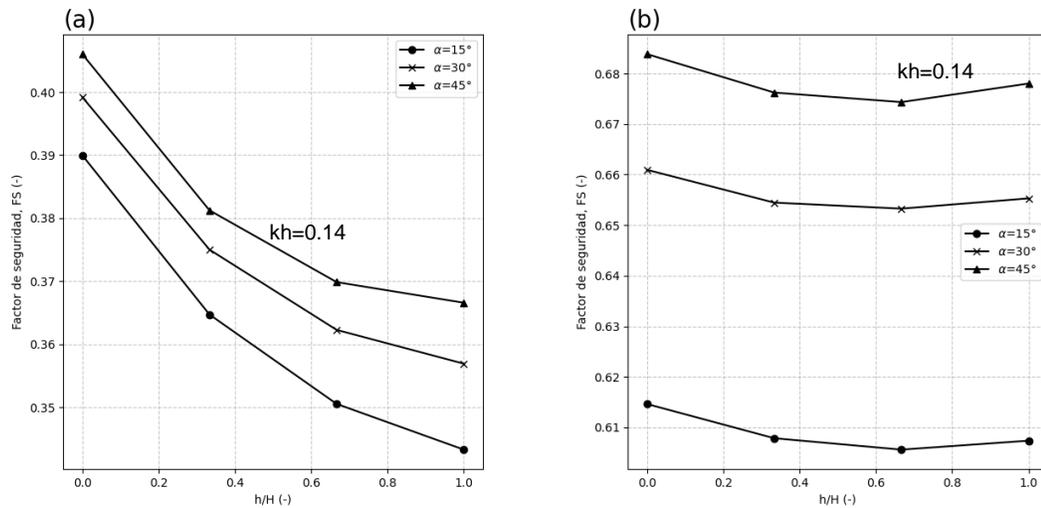


Figura 39: Resultados del estudio de sensibilidad geométrica de los taludes de relaves en la cubeta en presencia de nivel freático, comportamiento no drenado del relave y pseudo estático para dos alturas, (a) $H=10$ m y (b) $H=5$ m. En ningún caso se logra la condición de estabilidad mínima.

La presentación de los resultados es en función de la relación entre la altura del nivel freático (h) y la altura del talud (H), es decir, que para encontrar el factor de seguridad asociado a dicha condición hidráulica se debe escalar por la altura del talud. Por ejemplo, una relación de $h/H = 1$, quiere decir que el nivel freático se ubica en la superficie superior del talud, mientras que para una relación de $h/H = 0$, este se encuentra a nivel de la base del talud. Este enfoque permite una comprensión de cómo varía la estabilidad en diferentes ubicaciones del nivel freático en relación con la altura del talud.

4.3. Estudio de franja de seguridad

El estudio de la franja de seguridad considera el relave en condición drenada, entendiéndose que para una condición no drenada no se alcanzan factores de seguridad mínimos de manera local, tal como se muestra en la Figura 39, siendo omitidos en la presentación de resultados. Para una falla local de la franja se obtiene la Figura 40 y Figura 41, mientras que para una falla global se muestran en la Figura 42 y Figura 43.

La presentación de los resultados es en función de la relación entre la altura del depósito (H) y la distancia de la berma (B) del muro del depósito, es decir, que para encontrar el factor de seguridad asociado a dicha berma se debe escalar por la altura asociada. De esta manera se obtiene una comprensión y visualización de una posible relación entre la geometría de la estructura y la conformación de la franja de seguridad.

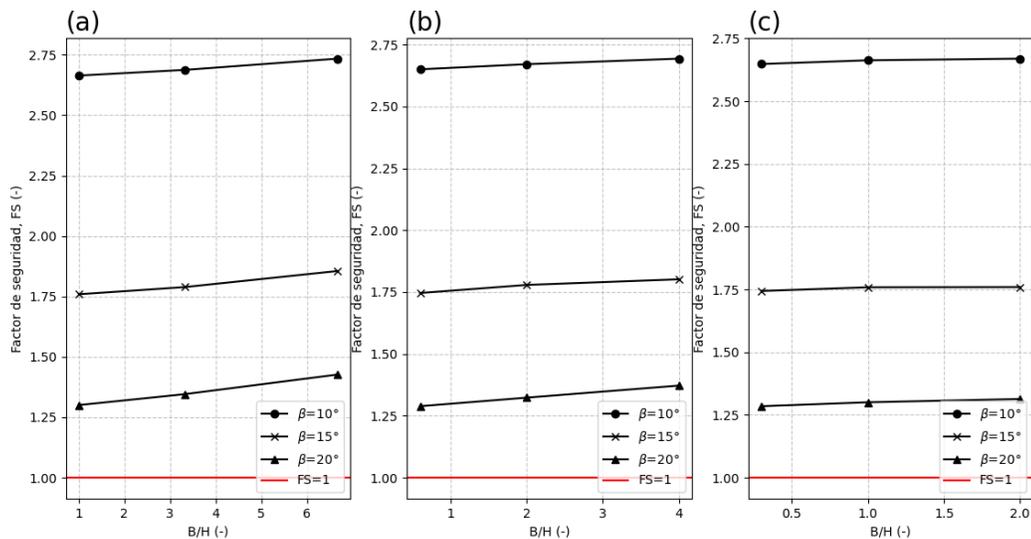


Figura 40: Resultados del estudio para la franja de seguridad considerando análisis de falla local y caso estático para, (a) H=30 m, (b) H=50 m y (c) H=100 m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.

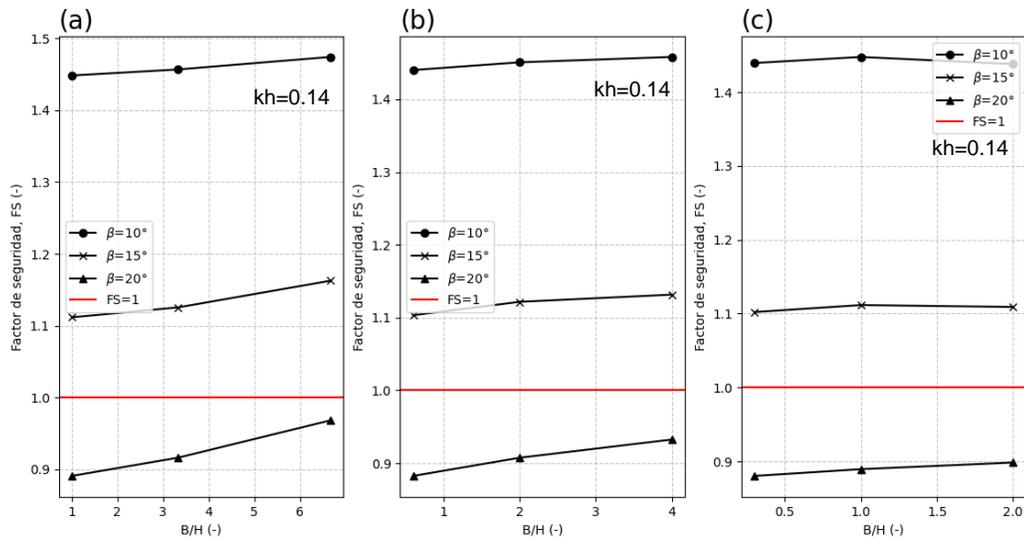


Figura 41: Resultados del estudio para la franja de seguridad considerando análisis de falla local y caso pseudo estático para, (a) $H=30$ m, (b) $H=50$ m y (c) $H=100$ m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.

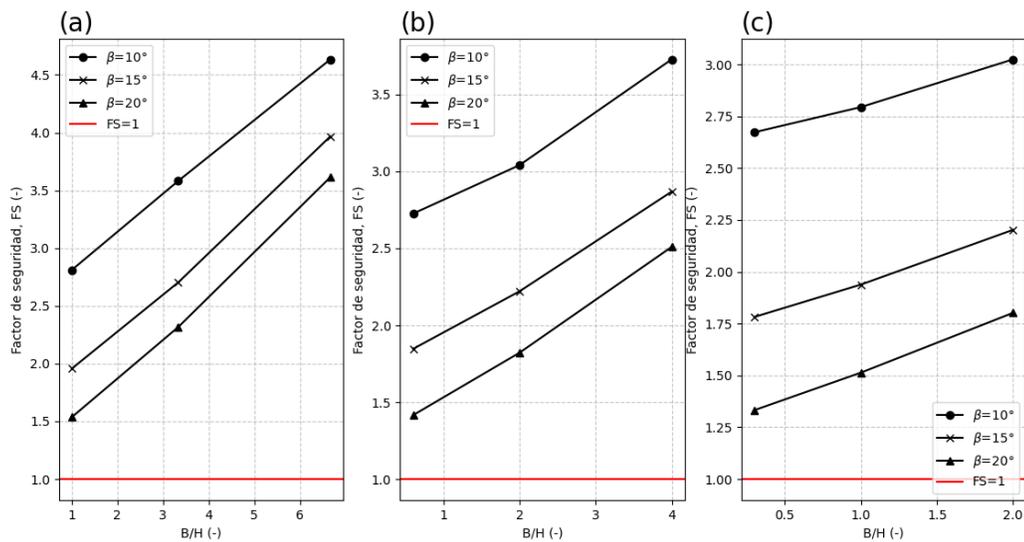


Figura 42: Resultados del estudio para la franja de seguridad considerando análisis de falla global y caso estático para, (a) $H=30$ m, (b) $H=50$ m y (c) $H=100$ m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.

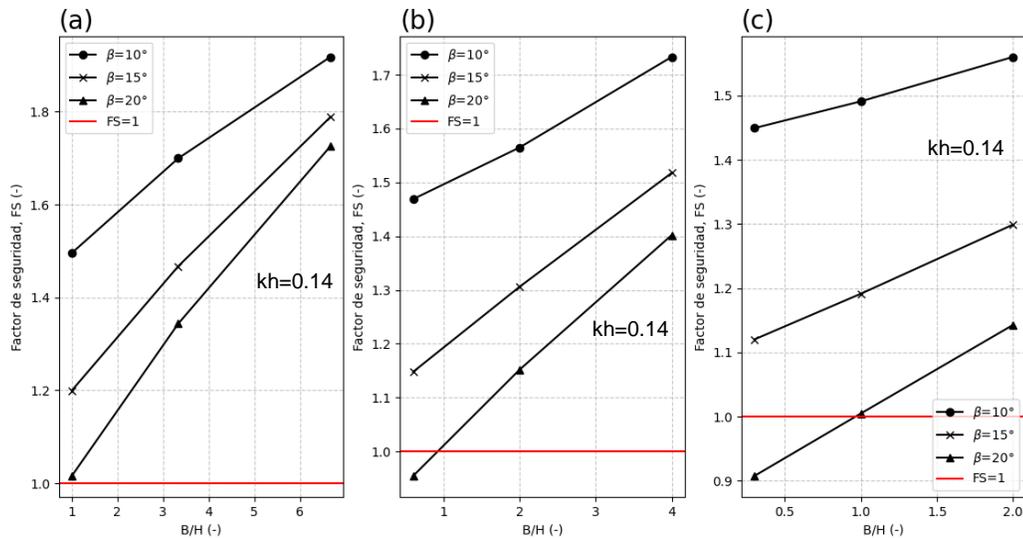


Figura 43: Estudio para la franja de seguridad considerando análisis de falla global y caso pseudo estático para, (a) $H=30$ m, (b) $H=50$ m y (c) $H=100$ m. La línea roja muestra el límite admisible para una condición estable.

En las Figuras 40 y 41, se observa que, al considerar una falla local del talud de la franja, el factor de seguridad no varía sustancialmente al considerar muros de menor altura y aumenta levemente al considerar bermas de mayor distancia. También, controla la condición pseudo estática al presentar factores de seguridad menores para los mismos casos de estudio. En ese sentido, localmente, son estables franjas con inclinación de talud de 10° y 15° .

En fallas globales, es decir, que consideren gran parte de la franja, son estables aquellas con distancia al muro hasta 6 veces la altura del muro, para cualquier inclinación en muros de 30 m. Hasta 4 veces la altura del muro, para casi cualquier inclinación en muros de 50 m y 100 m. Desde otro punto de vista, son inestables franjas con distancias menores a la altura del muro para inclinaciones mayores a 20° .

4.4. Caso de remoción: Tranque Barahona 2

Las características de humedad de los relaves dispuestos en el tranque Barahona 2 permiten reconocer que no se encuentran saturados en superficie, mientras que su nivel freático posee una incertidumbre importante. De acuerdo con distintos estudios, este nivel se estima entre 15 a 40 metros de profundidad. Por lo tanto, según los antecedentes disponibles y utilizando el diagrama de la Figura 34, se propone una remoción, principalmente, por monitoreo hidráulico.

4.4.1. Excavación en relaves

Para la determinación de alturas y ángulos de taludes excavados se consideran como criterios de admisibilidad de diseño aquellos utilizados en el trasvasije del depósito Barahona 0. Estos valores son utilizados en estructuras permanentes y de riesgo alto, como el mismo depósito de relaves. Los valores para los factores de seguridad son de 1.5 para el caso estático y 1.2 para el caso pseudo estático.

En relación con los materiales, se utilizan los mismo que en el Barahona 0, ya que de cierta manera tienen similitud dada su procedencia productiva. Sin embargo, no se tienen parámetros de resistencia drenada de los materiales, por lo que se consideran los mismos que se utilizaron en el estudio para los taludes de relaves y de la franja de seguridad, es decir, aquellos que se muestran en la Tabla 14.

Incorporando los criterios de admisibilidad anteriormente mencionados y los resultados obtenidos de la Figura 35 se proponen taludes de 10 metros con ángulos de 15° con un factor de 1.2 pseudo estático y 2.0 estático, aproximadamente. Mientras que, en una condición crítica para una etapa intermedia de remoción, se propone evaluar para una zanja de 15 m y una berma de 10 m. De esta manera las dos configuraciones presentadas en la Figura 33 se obtienen los resultados de la Tabla 16 y Tabla 17, tanto para el caso estático como pseudo estático.

No se considera el aumento del nivel de agua dentro de las zonas de excavación (dentro de la cubeta) debido a que existen obras en ejecución para sus desvíos a través de canales de contorno y se carece de información precisa que dé cuenta del nivel freático al interior de la cubeta. Además, como resultado del análisis pseudo estático para un comportamiento no drenado del relave (ver Figura 39), se descartan dichas casos de estudio. Esto indica que no se recomienda llevar a cabo la remoción de los relaves mediante monitoreo hidráulico en presencia del nivel freático en los taludes, ya que resultan factores de seguridad menores a 1.

Tabla 16: Verificación en la conformación de bancos y bermas al evaluar una etapa intermedia de remoción de los relaves, considerando caso estático.

Escenario	Configuración 1	Configuración 2
	FS	
Análisis global considerando parámetros efectivos	2.01	2.15

Tabla 17: Verificación en la conformación de bancos y bermas al evaluar una etapa intermedia de remoción de los relaves, considerando caso pseudo estático.

Escenario	Configuración 1	Configuración 2
	FS	
Análisis global considerando parámetros efectivos	1.23	1.27

Los resultados muestran que, al igual que para un análisis local del talud, el caso pseudo estático representa una situación crítica y que controla la estabilidad. Por otro lado, la configuración 2 resulta ser favorable en ambos casos. Para más detalle, ver Figuras 44, 45, 46 y 47.

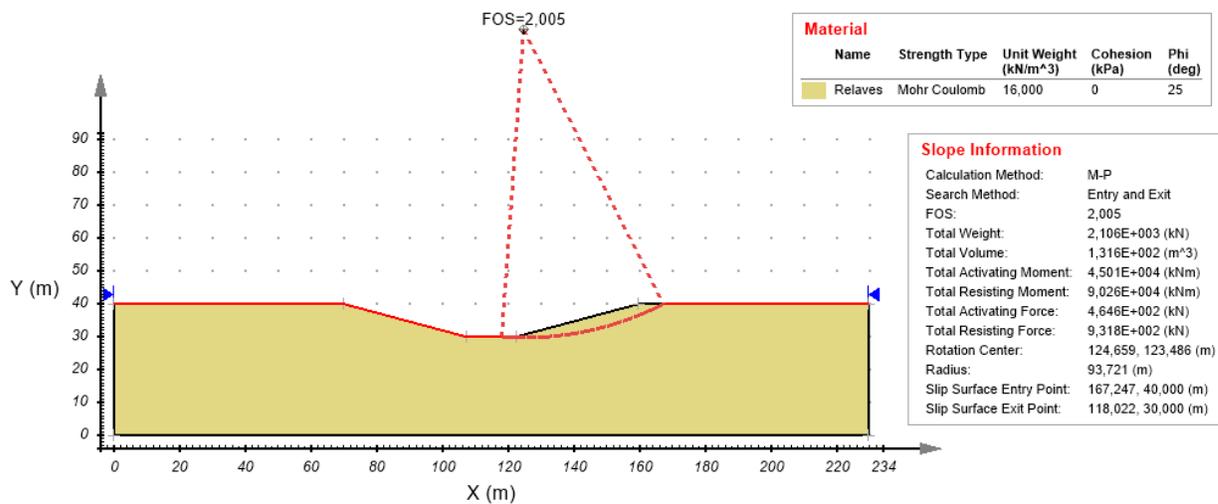


Figura 44: Resultado para la configuración 1 en una etapa intermedia de remoción del tranque Barahona 2, considerando parámetros efectivos y condición estática.

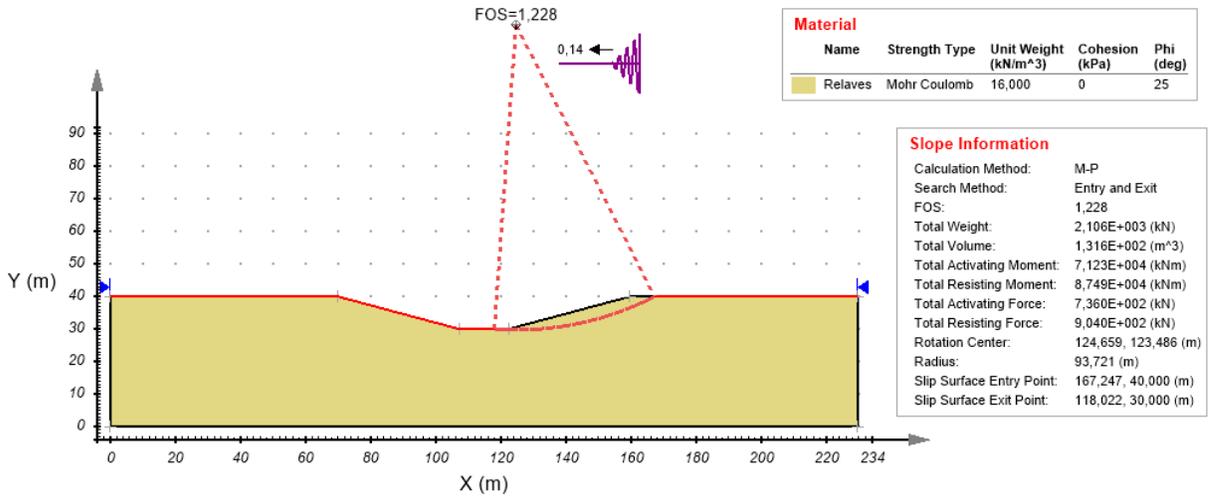


Figura 45: Resultado para la configuración 1 en una etapa intermedia de remoción del tranque Barahona 2, considerando parámetros efectivos y condición pseudo estática.

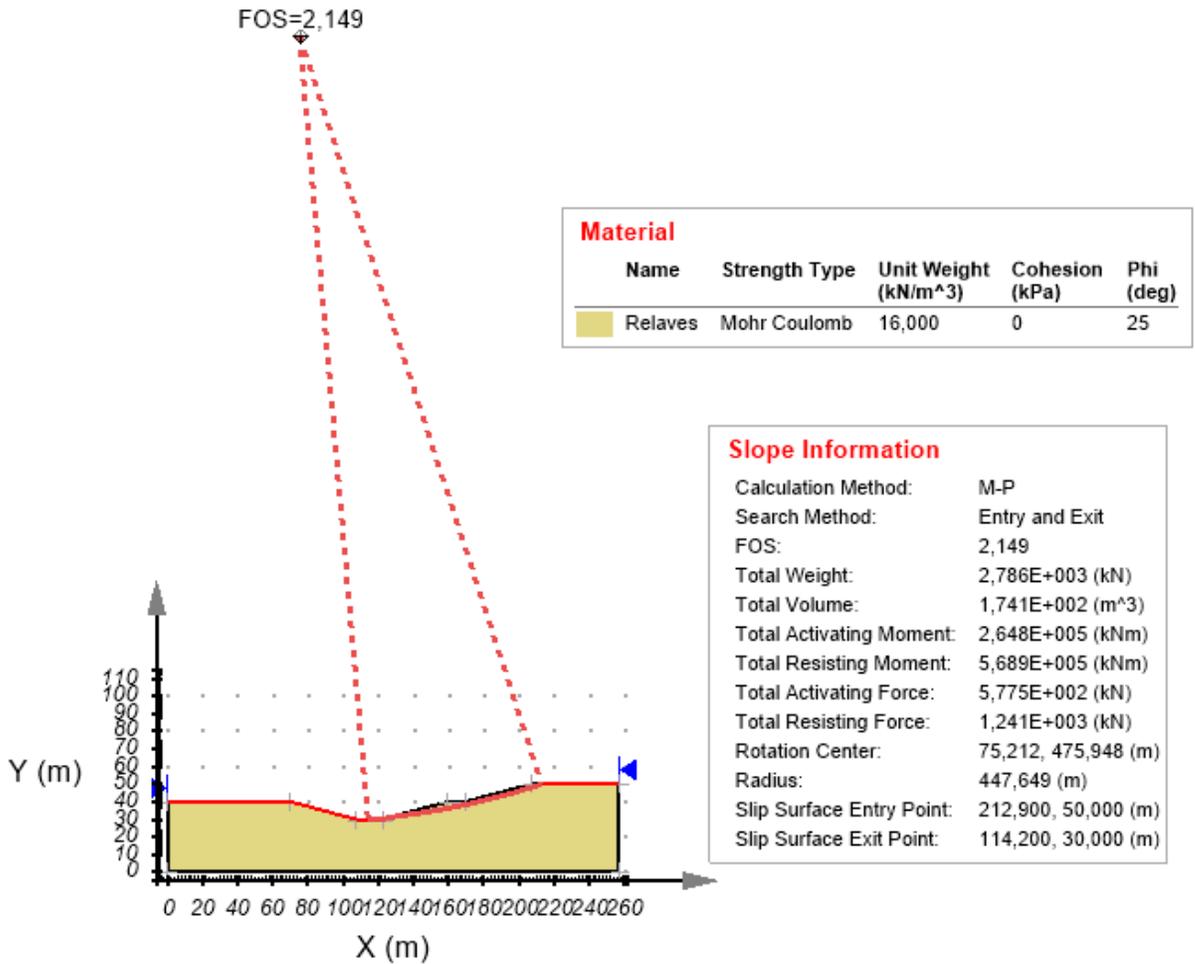


Figura 46: Resultado para la configuración 2 en una etapa intermedia de remoción del tranque Barahona 2, considerando parámetros efectivos y condición estática.

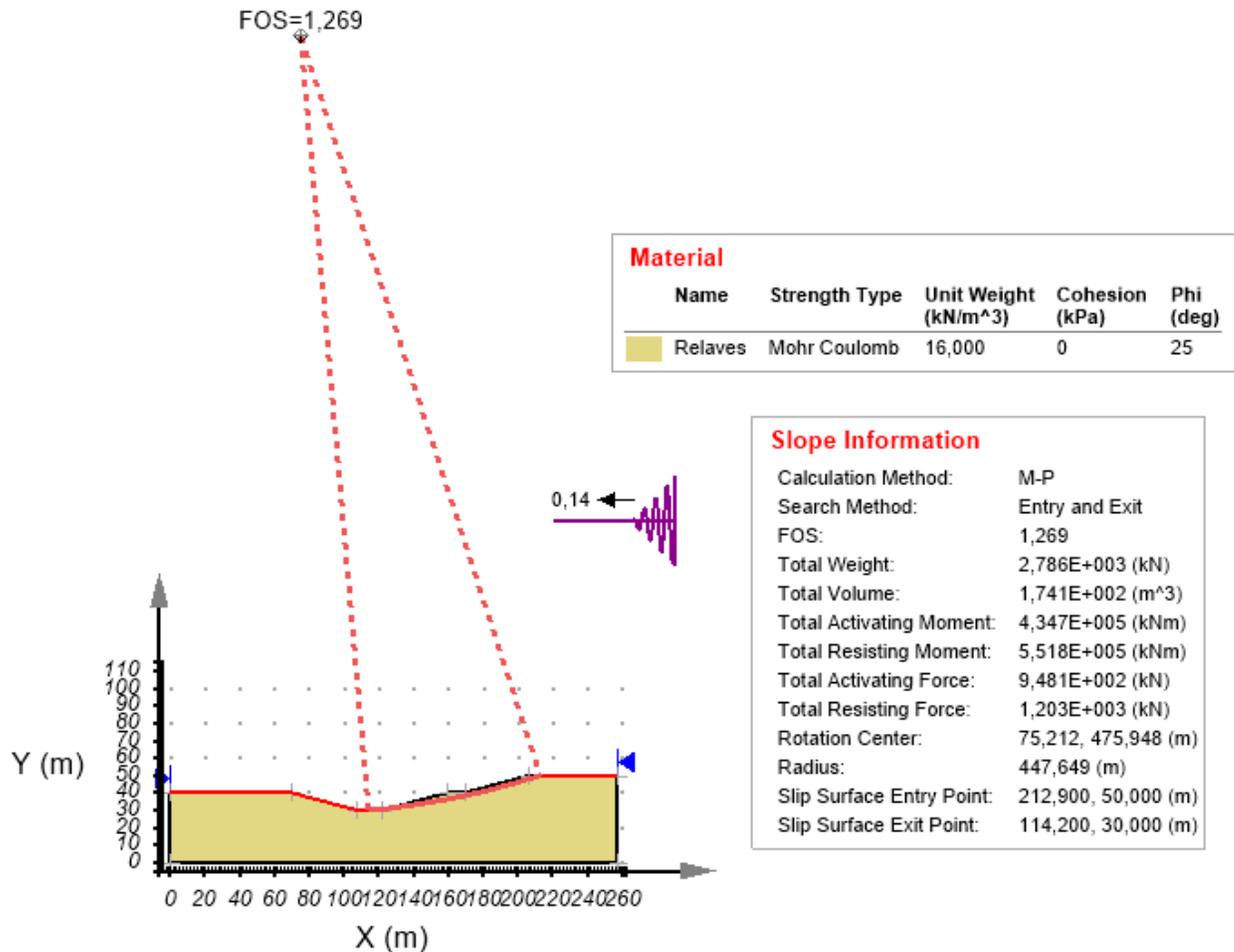


Figura 47: Resultado para la configuración 2 en una etapa intermedia de remoción del tranque Barahona 2, considerando parámetros efectivos y condición pseudo estática.

4.4.2. Franja de seguridad

Los resultados obtenidos en la sección 4.3 permiten recomendar bermas (B) con distancia igual o mayor a la altura del muro (H), esto como resultado del análisis global (ver Figura 43). Mientras que, del análisis local, se recomiendan inclinaciones de 13° (ver Figura 41). Lo anterior considerando los criterios de admisibilidad de diseño de 1.5 estático y 1.2 pseudo estático, cumpliendo la estabilidad local como global conjuntamente. De esta manera, para el muro de 75 m se propone una franja de 80 m y para el muro de 22 m una franja de 30 m. Los resultados que verifican estas configuraciones se muestran en la Tabla 18 y Tabla 19. Para más detalles ver las Figuras 48 a 55 presentadas a continuación.

Tabla 18: Resultados de las franjas de seguridad para el tranque Barahona 2, considerando una falla local.

Caso Barahona 2	FS estático	FS pseudo estático
Muro 2 (H=75m, B=80m)	2.03	1.22
Muro 3 (H=22m, B=30m)	2.04	1.23

Tabla 19: Resultados de las franjas de seguridad para el tranque Barahona 2, considerando una falla global.

Caso Barahona 2	FS estático	FS pseudo estático
Muro 2 (H=75m, B=80m)	2.22	1.30
Muro 3 (H=22m, B=30m)	2.33	1.35

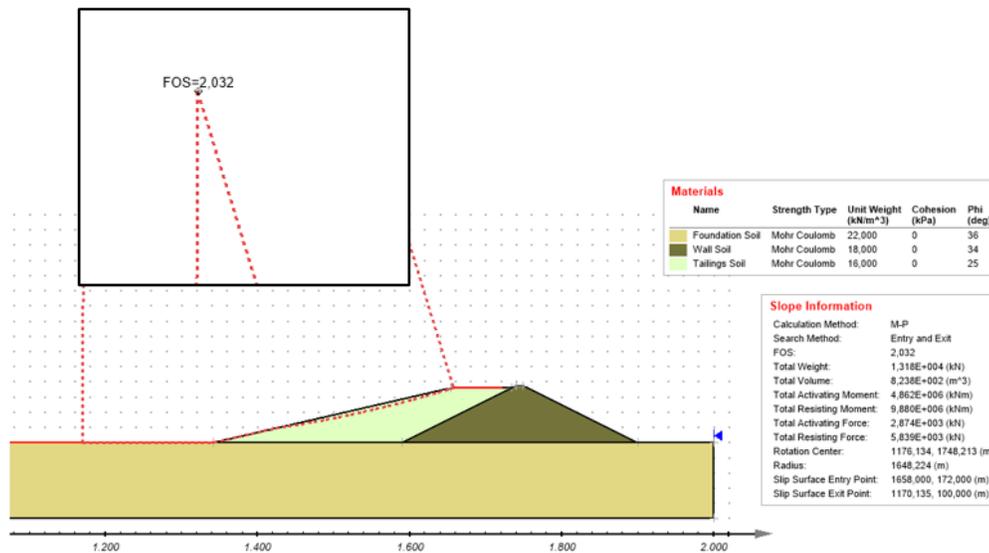


Figura 48: Verificación de estabilidad local para las franjas propuestas para el muro 2 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso estático.

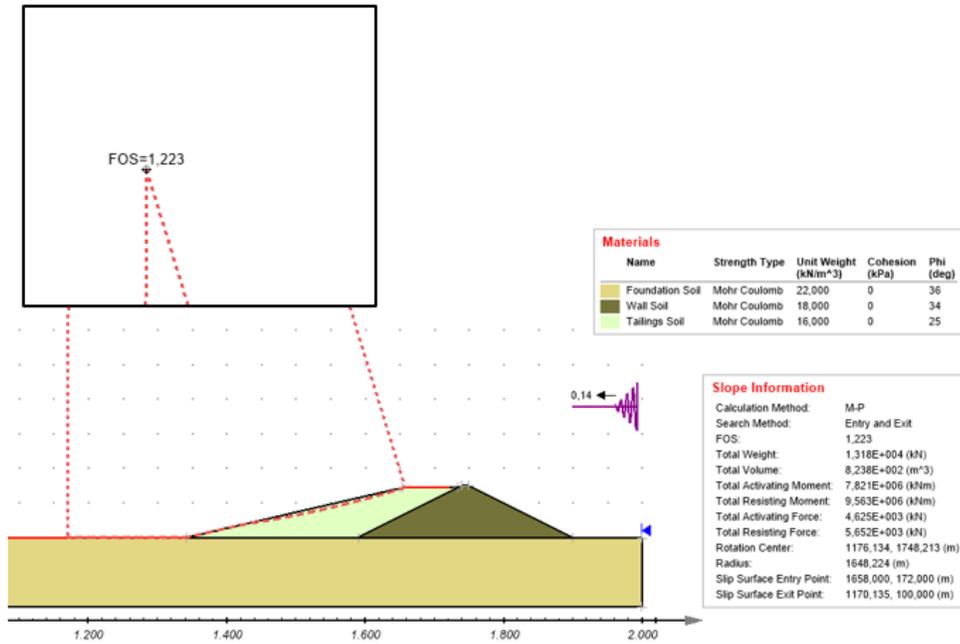


Figura 49: Verificación de estabilidad local para las franjas propuestas para el muro 2 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso pseudo estático.

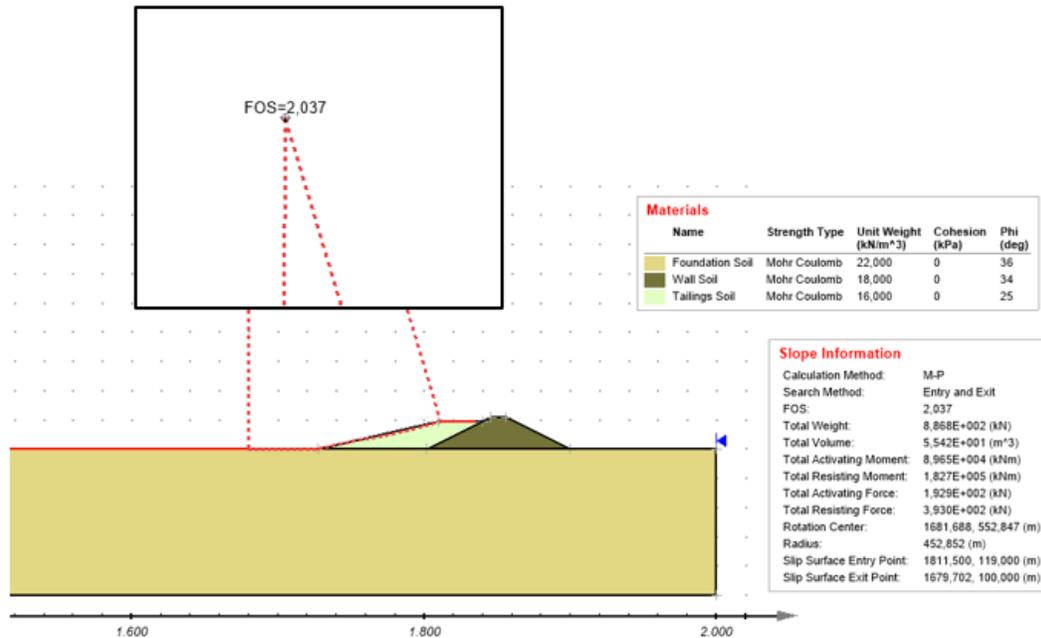


Figura 50: Verificación de estabilidad local para las franjas propuestas para el muro 3 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso estático.

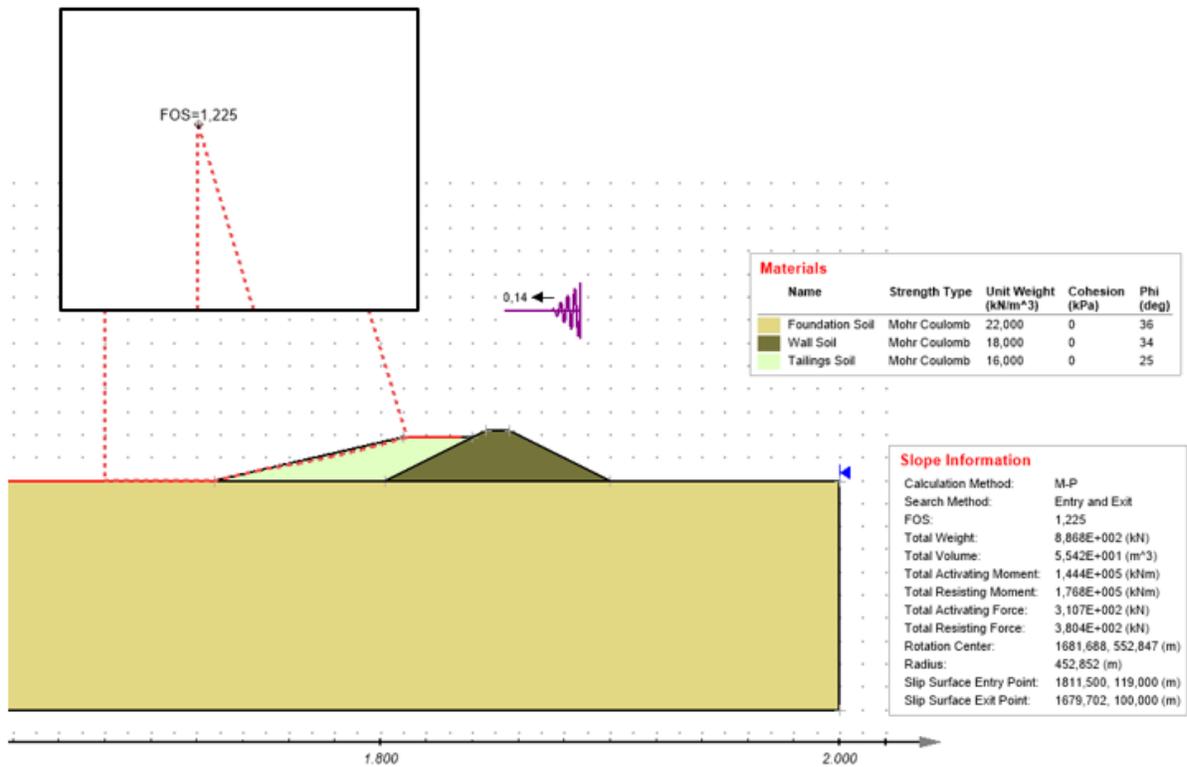


Figura 51: Verificación de estabilidad local para las franjas propuestas para el muro 3 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso pseudo estático.

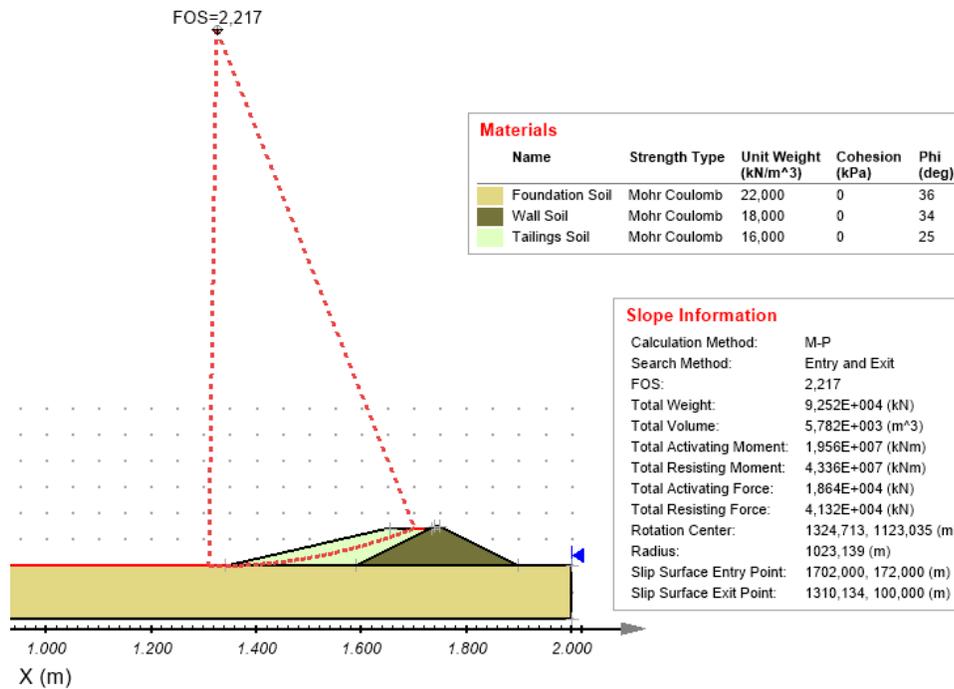


Figura 52: Verificación de estabilidad global para las franjas propuestas para el muro 3 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso estático.

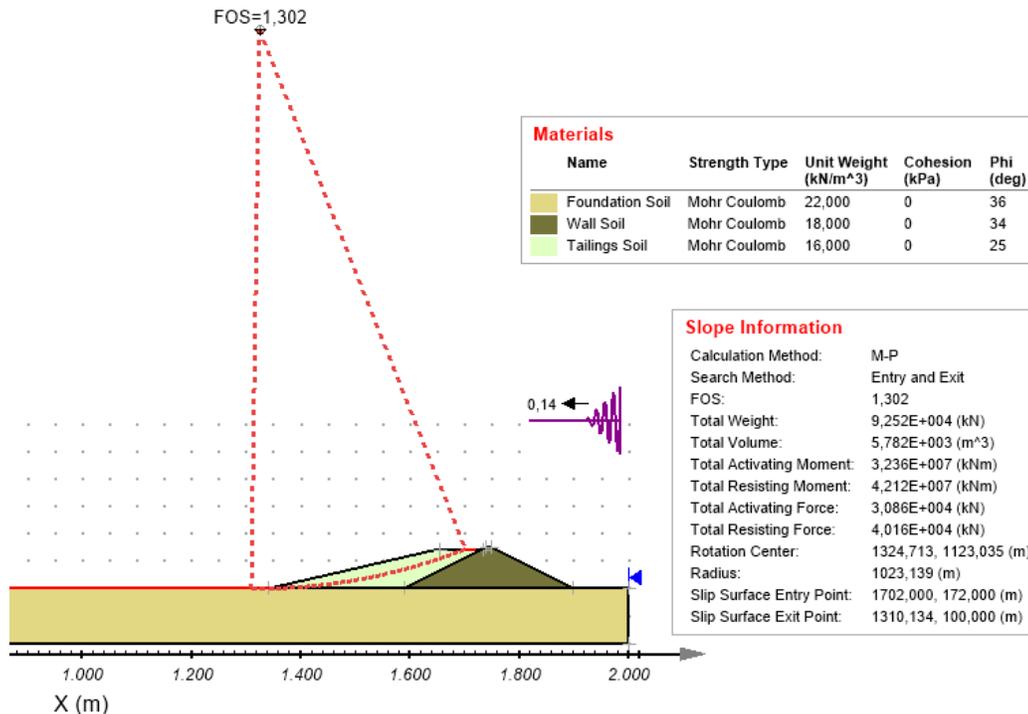


Figura 53: Verificación de estabilidad global para las franjas propuestas para el muro 3 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso pseudo estático.

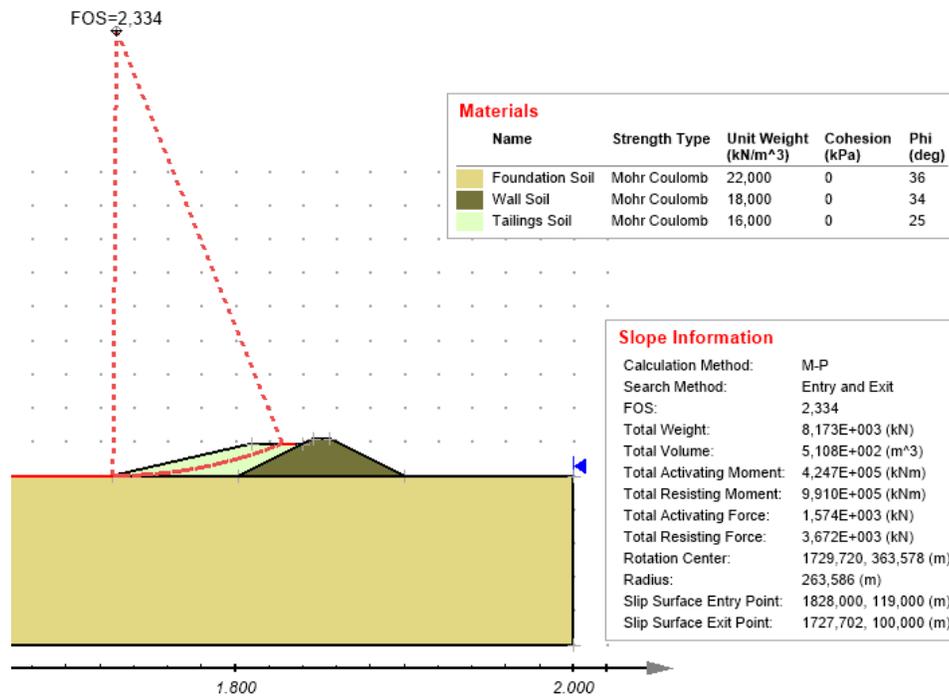


Figura 54: Verificación de estabilidad global para las franjas propuestas para el muro 2 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso estático.

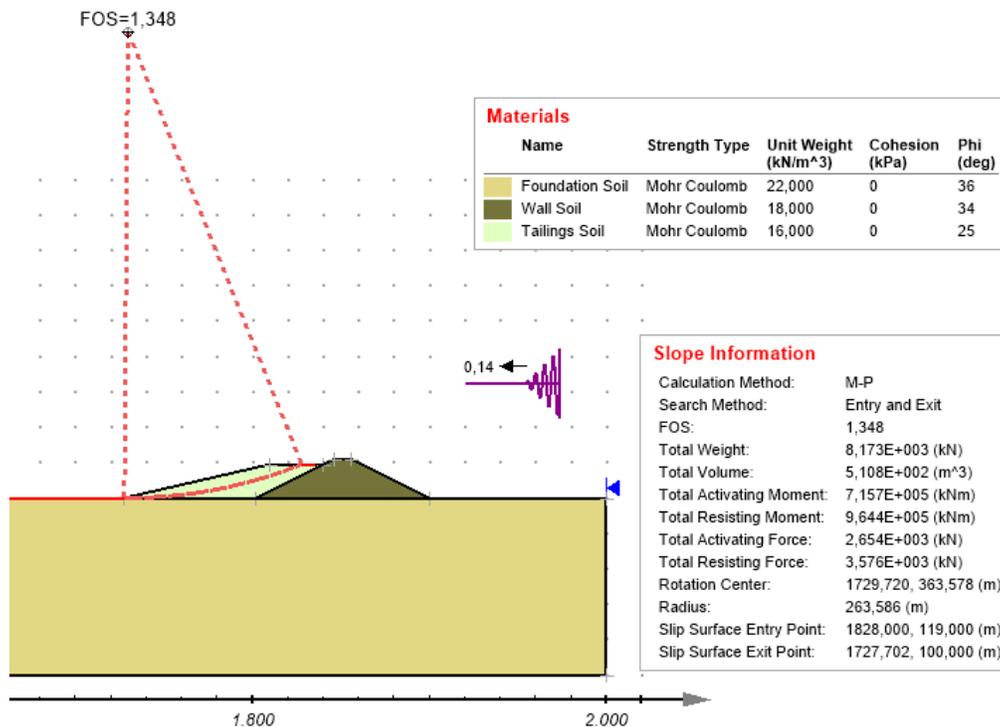


Figura 55: Verificación de estabilidad global para las franjas propuestas para el muro 2 del tranque Barahona 2, considerando el relave en condición drenada y caso pseudo estático.

4.4.3. Propuesta de remoción y recomendaciones constructivas

Como se mencionó anteriormente, se propone una remoción de los relaves contenidos en el depósito Barahona 2 mediante monitoreo hidráulico y sumideros. Su cantidad y distribución depende de la velocidad requerida de remoción. Según la eficiencia vista en proyectos similares (8000 a 10000 toneladas por día), en la Tabla 20 se presenta una estimación de los recursos necesarios para diferentes horizontes temporales, para un volumen estimado de 35 millones de toneladas de relaves.

Adicionalmente, según la ley del cobre estimada para los relaves depositados en Barahona 2 del 0.32% y una recuperación estimada del 30% en peso, se obtendrían 32550 toneladas de cobre. Esto último, es fundamental para evaluar el proyecto desde un punto de vista económico. Asimismo, se recomienda evaluar la recuperación de molibdeno de estos relaves.

Tabla 20: Cantidad estimada de monitores hidráulicos para distintos horizontes temporales de remoción del tranque Barahona 2. Esto considerando un volumen de 35 millones de toneladas y una eficiencia de remoción de 8000 toneladas por día.

Tiempo de remoción (años)	Cantidad de monitores hidráulicos
3	4
5	3
7	2
10	1

En un comienzo y previo a la remoción de relaves, se deben realizar taludes de prueba con el objetivo de analizar el comportamiento de los materiales y reducir los riesgos del proyecto durante la operación. Los resultados, bajo los criterios de admisibilidad señalados y parámetros de los relaves considerados, muestran que taludes de 15° son estables. En caso de remoción parcial del depósito, se propone una la franja de seguridad para el muro 2 y 3, con distancias de 80 m y 30 m respectivamente, verificando que son factibles y estables.

Dada la profundidad de la cubeta, se espera remover el relave en 8 etapas, retirándolo en taludes de 10 m de alto, con ángulos de 15°. La forma de retirar los relaves se ilustra en la Figura 5a, donde los monitores se sitúan sobre el talud y se retira la pulpa en la

misma dirección del chorro o de manera perpendicular a través de las zanjas. Naturalmente, al realizar la remoción mediante zanjas, podrían quedar taludes entre ellas que deben ser removidos con monitores ubicados bajo el talud, cuidando la distancia para una operación segura.

Las especificaciones mencionadas anteriormente son aplicables en casos donde no existe un nivel freático en el talud. De lo contrario, podrían ocurrir comportamientos no drenados que harían inviable la estabilidad del talud. Por ende, para lograr esta condición en las distintas etapas, es necesario deprimir los niveles freáticos a medida que se vayan retirando los relaves. Para esto se recomienda su monitoreo y control constante durante el proceso.

Tanto las zanjas y sumideros dependen de la velocidad de remoción requerida, sin embargo, en un principio se propone el uso de 3 monitores hidráulicos con 2 sumideros móviles construidos y profundizados con los mismos dispositivos. También, se propone comenzar con dos zanjas desde centro abriéndose hacia los muros, esto para cada etapa. Las zanjas deben tener pendientes entre 1.5% a 2.0% para el transporte por gravedad del relave fluidizado hacia los sumideros (ver Figura 56).

Al finalizar la remoción, si se requiere remover la franja de seguridad y ambos muros del tranque, se propone retirar con maquinaria tipo excavadoras y camiones para su transporte, acorde a la velocidad de desmantelamiento requerida. De la misma forma, dado que existe material remanente (contacto con el suelo de fundación) que no es posible retirar por monitoreo hidráulico también se propone retirar con maquinaria convencional.

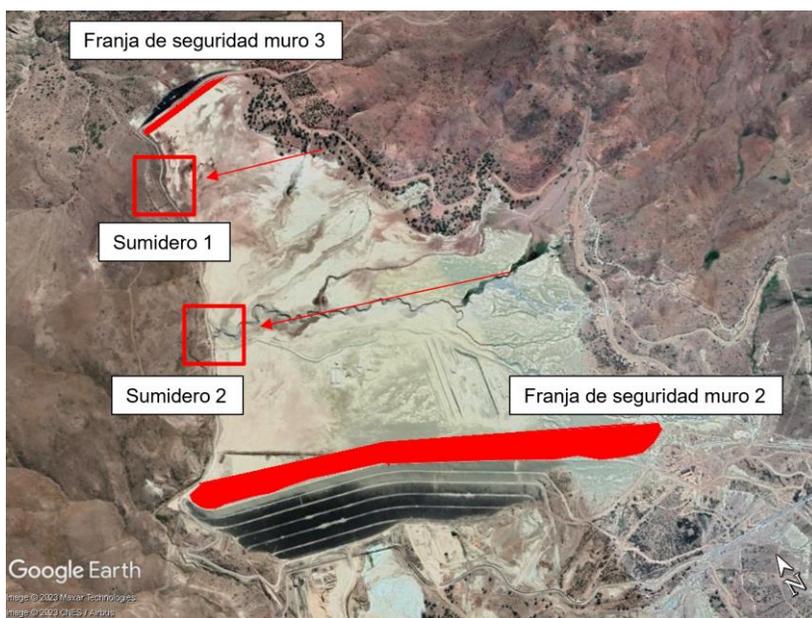


Figura 56: Conducción de relaves al interior de cubeta, ubicación de sumideros y franjas de seguridad para la propuesta de remoción del tranque Barahona 2 (elaboración propia, modificado de Google Earth).

Capítulo 5: Discusión y análisis

En este capítulo se realiza un análisis crítico sobre los resultados obtenidos, contrastándolos con los casos estudiados de remoción y con el estado de arte en relación con la problemática estudiada.

Procedimiento de remoción

El procedimiento de remoción general que se muestra en la Figura 34 se elaboró basada en la información recopilada. Esta presenta ciertas limitaciones debido a la escasa cantidad de proyectos que han desarrollado en el país y el carácter privado de los mismos. A pesar de las limitaciones, definir los depósitos como secos, húmedos y saturados, es una buena forma de caracterizarlos para decidir las técnicas de remoción adecuadas. Sin embargo, los criterios y rangos de humedad se basaron únicamente según el Manual de Uso público para el reprocesamiento de relaves (Gutiérrez et al., 2020). Esto abre la posibilidad de estudiar factibilidades técnicas de remoción en condiciones particulares de relaves, donde fenómenos no considerados como la succión pudiesen generar condiciones de estabilidad diferentes.

La franja de seguridad fue un hallazgo clave del estudio. Luego de analizarla y entender su finalidad, resulta una parte esencial del proceso de remoción, logrando una operación segura y mitigando los riesgos asociados, tanto para la estructura principal (muro) como para la excavación y retiro de los relaves al interior de la cubeta. Se destaca su implementación independiente del tipo de técnica de remoción utilizada.

En relación con la remoción parcial o completa del depósito, se desprenden consideraciones económicas y ambientales para su implementación. Por un lado, la remoción de material no reprocesable, como un muro de empréstito, resulta costosa por su ejecución, por lo que desde ese punto de vista no existe un incentivo para llevarla a cabo. Sin embargo, desde el lado ambiental, si existe un incentivo por retirarlo completamente, por ejemplo, si se requiere restablecer completamente el área intervenida.

Taludes en relaves

El estudio realizado sobre taludes de relaves posee una incertidumbre asociada a las propiedades geotécnicas del relave, las cuales no fueron evaluadas. Por lo tanto, los resultados obtenidos no son reproducibles ni aplicables para relaves con características distintas. No obstante, se espera que los resultados generales, especialmente el efecto en los factores de seguridad debido a la variabilidad geométrica de los taludes y franja de seguridad se mantengan al cambiar las propiedades. Esto sugiere encontrar condiciones de estabilidad diferentes a las presentadas en este estudio.

Los puntos fuera de tendencia de la Figura 37b corresponden a casos límite, donde el tipo de superficie de falla cambia y deja de ser profunda, ya que no logra contacto con el

estrato saturado como en los demás casos. Como resultado presentan un factor de seguridad menor, sin embargo, son particularidades basadas en la geometría del modelo.

Se determinó que los casos de sísmicos representados por los análisis pseudo estáticos, son los que controlan la estabilidad de los taludes estudiados. Aquello se evidencia en el desafío encontrado en la remoción del tranque Pérez Caldera 2 (ver Tabla 5), donde el colapso en caso de sismo fue de especial atención en los diseño de taludes.

Al evaluar el efecto del agua, se evidenció que el comportamiento no drenado de los relaves resulta altamente desfavorable en la estabilidad de los taludes. También, independiente del comportamiento del suelo, los factores de seguridad disminuyen al considerar una mayor carga hidráulica sobre el talud.

Un estudio comparativo, en el que 28 equipos participaron en el ejercicio para predecir el nivel freático necesario que produjese la falla en un talud de relaves, mostró que los participantes emplearon distintas metodologías para el mismo problema, obteniendo diferentes niveles freáticos, incluso algunos predecían la falla sin este (ver Figura 57), por ejemplo, para el escenario A 6 equipos mostraron que no fallaría y 3 equipos dijeron que fallaría a un nivel entre 25 y 30 m. Cabe destacar que ambos escenarios representan sets de parámetros de estado crítico y NorSand diferentes. Los diferentes grupos utilizaron resistencias drenadas, movilización de resistencia licuable, enfoque de trayectoria de tensiones y diferentes modelos constitutivos, obteniendo resultados contrapuestos, donde en algunos casos el talud fallaba y en otros no (Reid & Fourie, 2023). Por lo tanto, se destaca que el estado del arte en relación con el estudio de estabilidad geotécnica de taludes de relaves es reciente existiendo diferentes maneras y enfoques para su evaluación.

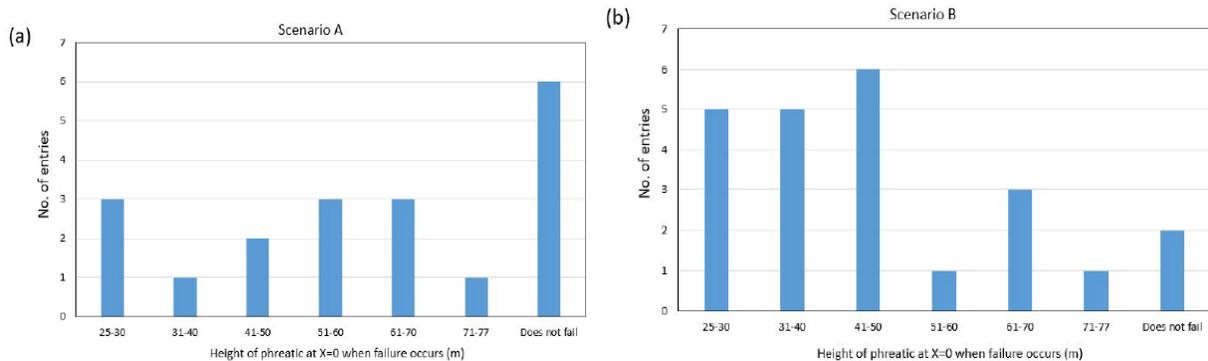


Figura 57: Histograma sobre la predicción de la falla a distintas alturas de nivel freático en el talud de relave de los distintos participantes, esto para dos sets (escenario A y B) de parámetros diferentes de estado crítico y NorSand.(Reid & Fourie, 2023).

Franja de seguridad

Al evaluar los resultados del estudio para la determinación de la franja de seguridad, se destaca lo siguiente: en primer lugar, si se consideran otros métodos de construcción como lo son el aguas arriba o eje central, la falla local y global considerada sería la misma en todos los casos. Sin embargo, se reconoce que los relaves y arenas son susceptibles a la licuación, por lo que es necesario evaluar caso por caso este modo de falla. En conclusión, al considerar otros métodos de construcción, distintos al de aguas abajo, la estabilidad de la franja de seguridad y muro podrían verse comprometidas.

Según los parámetros geotécnicos y criterios de admisibilidad de diseño considerados, se determinó una relación de estabilidad, igual o mayor de uno a uno, entre la franja de seguridad y altura del depósito. Por otro lado, los casos de estudio analizados (ver Tabla 21) no muestran una relación lineal, ya que en algunos casos supera el doble, y en otros es cercano a la mitad. Aun así, de acuerdo con los resultados todas las configuraciones presentadas serían estable considerando una inclinación de talud de 13° y los parámetros utilizados.

Tabla 21: Relación entre la altura del depósito y la berma de seguridad en los casos de estudio.

Depósito	Altura del muro	Franja de seguridad
Colihues	42	20
Cauquenes	51	250
Pérez Caldera 2	80 ¹	200

[1]: Altura estimada con Google Earth.

Lo anterior sugiere dos posibilidades. En primer lugar, las características y comportamiento de los relaves sean influyente tal que resulten en estas diferencias de caso a caso. En segundo lugar, la definición de la franja de seguridad podría no basarse únicamente en razones geotécnicas o de estabilidad. Por ejemplo, es plausible que cierta parte del relave en contacto con el muro no sea económicamente reprocesable por una baja ley del mineral.

Aplicación de remoción Barahona II

La metodología propuesta en este trabajo se basa en el monitoreo hidráulico para sus relaves y en técnicas mecánicas para la franja de seguridad, muro y material remanente. Esta elección está en línea con lo presentado en estudios previos, donde se determinó que la opción de remoción completa con el reprocesamiento de los relaves es favorable frente al cierre del depósito (DET, 2019). Además, en este estudio se analizaron 6 alternativas de remoción considerando los diferentes métodos, como también el tratamiento y posterior impulsión hacia la planta reprocesadora, desde un punto de vista principalmente económico.

La alta incertidumbre en los parámetros del depósito se debe a la escasa información disponible y al hecho de ser una estructura antigua. Esto contribuye a que los resultados

presentados para el tranque Barahona 2 también posean un grado de incertidumbre considerable. A pesar de ello, la metodología propuesta es coherente con lo observado tanto en depósitos chilenos como extranjeros.

Al considerar el nivel freático en los análisis de estabilidad de taludes de relaves, se observa que al disminuir su profundidad el factor de seguridad aumenta. Esto se explica teóricamente, ya que un nivel más alto genera presiones de poros en condición hidrostática que antes no existían afectando la estabilidad del talud. Por ello, junto con un posible comportamiento no drenado, en la propuesta de remoción se especifica deprimir el nivel freático del depósito durante el proceso.

Con base en lo expuesto anteriormente y con el objetivo de reducir la incertidumbre del proyecto y mitigar los riesgos asociados, se recomienda una campaña de exploración geotécnica que determine los niveles freáticos al interior del tranque como también caracterizar geotécnicamente los relaves, tanto en su condición drenada como no drenada. También, estudiar la estructura de los relaves debido a una depositación heterogénea de los relaves en la cubeta.

Factores de seguridad

Los criterios de admisibilidad se basaron en estudios similares de remoción, los cuales son comúnmente utilizados en depósitos de relaves para evaluar su estabilidad física. Sin embargo, esta elección es cuestionable desde varios puntos de vista. En primer lugar, el concepto de factor de seguridad tiene que ver en parte con los riesgos asociados a una potencialmente la falla de la estructura, como también, a la incertidumbre del problema en cuestión.

Lo anterior sugiere analizar los riesgos potenciales en la remoción de relaves que, en una primera instancia, se asocian a la operación misma. Esto porque cualquier falla de talud ocurrirá al interior de la cubeta y los relaves seguirán contenidos. Por lo tanto, el riesgo es diferente al compararlo con la función original del depósito en su estado inicial. Además, estos procesos tienen horizontes temporales muy diferentes, ya que un depósito puede ser planificado para permanecer de por vida en el lugar de emplazamiento, mientras que la remoción abarca solo años o décadas. En consecuencia, se vuelve indispensable revisar los factores utilizados en el estudio de caso y evaluar la posibilidad de ajustar dicho factor en concordancia con los riesgos potenciales de la operación de remoción de relaves y la certeza de los parámetros geotécnicos.

Capítulo 6: Conclusión y recomendaciones

Este capítulo resume las principales conclusiones de la memoria, tanto del estudio de estabilidad geotécnica en la remoción de relaves, como de su aplicación a un depósito real. Además, se incluyen recomendaciones en respuesta al análisis y discusión de los resultados obtenidos.

6.1. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo permite concluir que la problemática de la remoción de relaves para el reprocesamiento, reutilización o fines ambientales es compleja e involucra varias disciplinas en su evaluación, desde estudios mineralógicos previos, análisis geotécnicos y geológicos, condiciones hidrológicas, hasta evaluaciones económicas y de producción. La escasa información disponible en depósitos abandonados o antiguos es una limitante y contribuye al aumento de la incertidumbre en los estudios realizados.

En la búsqueda de una operación segura, los análisis de estabilidad resultan fundamentales necesitando una caracterización geotécnica de alta precisión, captando la variabilidad de los relaves en la cubeta, con el fin de reducir la incertidumbre en los modelos. Así, la experiencia en estos proyectos es importante y necesaria debido a la limitada información disponible, considerando también el reciente estado del arte en el estudio de estabilidad en taludes de relaves.

La remoción propuesta se centró en la definición de las técnicas adecuadas que considera los riesgos geotécnicos identificados, estableciendo recomendaciones técnicas relacionadas a la geometría de los taludes y franja de seguridad destacando lo siguiente:

- Existen tres formas de remover relaves: monitoreo hidráulico, técnicas mecánicas o por dragado, siendo la primera la más favorable en términos de costo y seguridad. Considerando la condición actual de los depósitos, especialmente por la humedad de sus relaves, las técnicas mencionadas resultan factibles o más eficientes comparativamente. Se privilegia el uso de monitoreo en depósitos húmedos, remoción mecánica en secos y dragado en relaves con presencia de nivel freático.
- El estudio demuestra que la condición sísmica controla la estabilidad, tanto para la definición de taludes como para la franja de seguridad. No se recomienda realizar excavaciones o remoción de la franja de seguridad ni del muro con niveles freáticos presentes. Esto porque los materiales pueden comportarse de forma no drenada, reduciendo considerablemente su resistencia.

- Del estudio de la franja de seguridad se determinó que, considerando los parámetros geotécnicos utilizados, una relación mayor o igual que uno a uno entre la berma de seguridad y la altura del depósito resultan estables. No obstante, la revisión y comparación con los proyectos de remoción existentes sugieren consideraciones adicionales a las geotécnicas en su definición. Asimismo, la geometría de los taludes no responde solo a una cuestión de estabilidad, sino que también a una tasa de producción de relaves requerida.
- Dentro de la metodología se propone, como especificación técnica, franjas de seguridad de 80 metros para el muro de 75 metros (muro 2) y 30 metros para el muro de 22 m (muro 3), con un ángulo de talud de 13°. Adicionalmente, en la cubeta son estables taludes de 10 metros de alto con ángulos de 15°. Estas configuraciones se verificaron según la información disponible, en particular, con criterios de aceptabilidad y parámetros geotécnicos de depósitos similares. Por lo tanto, se necesitan estudios adicionales para validar dichos resultados.

6.2. Recomendaciones

- Al verificar distintas configuraciones con parámetros y variables que no corresponden al depósito en estudio, en ningún caso se recomienda utilizar directamente estos resultados sin estudios específicos que respalden dicha información. Si bien el estudio se basa en depósitos de relaves de cobre en Chile, tampoco se recomienda utilizar los resultados en otros casos, aun cuando las características de las estructuras y materiales sean similares. Lo anterior recalca la importancia de estudiar los depósitos de acuerdo con sus particularidades, evaluando caso a caso con los debidos estudios.
- Dado que se reconoce que los relaves tienen una variabilidad espacial importante, se recomienda realizar una campaña geotécnica que logre caracterizar geotécnicamente los relaves contenidos en la cubeta. También, aplicado en el estudio de caso, se recomienda llevar a cabo estudios geológicos y sísmicos específicos de la zona de emplazamiento.
- Se recomienda diseñar un plan de monitoreo durante la remoción de los relaves, con el fin de estudiar el comportamiento de los muros, franjas y taludes al momento de retirar los materiales. Tomando especial atención en el comportamiento del nivel freático al interior de la cubeta y las deformaciones del muro principal.
- También, estudiar el comportamiento de los relaves con diferentes enfoques, por ejemplo, con diferentes modelos constitutivos. Así como evaluar la susceptibilidad y modo de falla de licuación y ver cómo influye en la conformación de taludes, bancos, bermas y la franja de seguridad.

- Revisar y estudiar los factores de seguridad asociados a remoción de relaves, para evaluar los taludes y franja de seguridad. Esto por ser estructuras con fines y plazos diferentes a, por ejemplo, el mismo depósito de relaves. Esto abre la posibilidad de producir diseños y configuraciones con mayor flexibilidad.

Bibliografía

- Anglo American. (2019). *Depósito de relaves Pérez Caldera - situación actual y proyecto de aceleración de repulpeo*. <https://gestionhidricamapochoalto.cl/archivos/2020/01/Dep%C3%B3sito-de-Relaves-P%C3%A9rez-Caldera-Situaci%C3%B3n-actual-y-proyecto-de-aceleraci%C3%B3n-de-repulpeo.pdf>
- Anglo American. (2021). *Declaración de impacto ambiental del proyecto: "Remoción de relaves de tranque Pérez Caldera - Capítulo 1 : "Descripción de proyecto."*
- Bascur, J. (2019). *Caracterización de la fracción densa del tranque de relaves Barahona N°II, División El Teniente, Codelco, Región del Libertador Bernardo O'higgins, Chile*.
- Bentley Systems. (2021). *PLAXIS LE - Slope Stability - 2D/3D Limit equilibrium slope stability analysis - Theory Manual*. www.bentley.com
- BHP. (2023). *Declaración de impacto ambiental del proyecto: "Remoción y reprocesamiento de relaves desde el Tranque Hamburgo" - Capítulo N°2: "Descripción de proyecto."*
- Blight, G. (2010). *Geotechnical engineering for mine waste storage facilities*. CRC Press/Balkema.
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations*.
- Consejo Minero. (n.d.). *Plataforma de relaves*. <https://Consejominero.Cl/Plataformas-Digitales/Plataforma-de-Relaves/Fichas-Relaves-Cm/Codelco/>.
- Corporación Alta Ley (CAL). (2023). *Memoria Alta Ley 2022*. 115p.
- De Laire, R. (2021). *Análisis de sensibilidad de la estabilidad de taludes para tranques y embalses de relave utilizando el método de equilibrio límite*.
- División el Teniente (DET). (2019). *Resumen Ejecutivo: Análisis Estratégico de Soluciones a Los Tranques Barahona Alternativa - Seleccionada*.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*.
- Engels, J., Schönhardt, M., Witt, K. J., & Benkovics, I. (2004). *Tailings Management Facilities – Intervention Actions for Risk Reduction. Report of the European RTD project TAILS SAFE*.
- Figuroa, A., Solans, D., Gonzalez, C., & Campaña, J. (2017). *Comportamiento sísmico de presas de relaves construidas aguas abajo y línea central*. 30–37.
- Griedl, P. E. (2016). *Evaluation of Excavation Methods for Jarosite Disposal Areas within Europe - Reworking of Metallurgical Tailings*.
- Gutiérrez, I., Vallejos, A., Aracena, I., Prieto, J., Cornejo, J., Vera, F., María, J., Luque, J., Soledad, G., Montalva, U., Correa, R. M., Reghezza Inzunza, A., Abarca, J. I.,

- Arancibia, C. C., Vergara Belmar, R., Pérez Valderrama, B., Luis, J., Letelier, V., Olivares, G., ... Godoy, N. (2020). *Relaves con Valor, 'Manual de Uso Público - Reprocesamiento de relaves y recuperación de elementos de valor D288-MAN-GN-P2-001'*.
- Gutiérrez, I., Vallejos, A., Aracena, I., Rayo, J., Cornejo, J., & Vera, F. (2020). *Relaves con valor, "Manual de uso público" - Reprocesamiento de relaves y recuperación de elementos de valor D288-MAN-GN-P2-001"*. 52p.
- Henderson, R. (2013). *43-101 Technical Report - Minera Valle Central Operation Rancagua, Región VI, Chile*. https://www.amerigoresources.com/_resources/reports/tech_report_april_8_2014.pdf
- ICMM, UN, & PRI. (2020). *Global Industry Standard on Tailings Management*.
- International Council on Mining & Metals (ICMM). (2021). *Tailings management: Good practice guide*.
- Jibson, R. W. (2011). Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes-A retrospective. *Engineering Geology*, 122(1–2), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.09.017>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*.
- Mine Safety and Health Administration (MSHA). (2010). *Engineering and Design Manual - Coal Refuse Disposal Facilities*. <http://get.adobe.com/reader/>
- Ministerio de Minería. (2007). *Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves*. 24p. https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/01/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf
- Muir, A., Mitchell, J., Flatman, S. R., & Sabbagha, C. (2005). A practical guide to re-treatment of gold processing residues. In *Minerals Engineering* (Vol. 18, Issue 8). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.01.027>
- Pignaton, T. V. (2010). *Produção de ferro-gusa e escória vanadífera a partir de rejeitos da Mineração Caraíba*.
- Pulgar, M. (2020). *Metodología de evaluación de estabilidad física de depósitos de relaves abandonados en la zona centro norte de Chile*.
- Reid, D., & Fourie, A. (2023). Development and outcomes of a tailings slope stability comparative design exercise. *Geotech. J. Downloaded from Cdnsciencepub*.
- Sernageomin. (2022). *Catastro de Depósitos de Relaves en Chile*. <https://www.Sernageomin.Cl/Datos-Publicos-Deposito-de-Relaves/>.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2023). *Anuario de la Minería de Chile 2022*. 235 p.

- SRK Consulting. (2019). *Actualización Plan de Cierre - División El Teniente - Informe Preparado para Corporación Nacional del Cobre CODELCO*. www.latam.srk.com
- Troncoso, J. H., Verdugo, R., & Valenzuela, L. (2017). *Seismic performance of tailings sand dams in Chile*.
- VALE. (2023). *Upstream Dam De-characterization Program in Brazil*. <https://www.vale.com/web/esg/de-characterization-program#:~:text=The%20term%20de%2Dcharacterization,acting%20as%20a%20tailings%20containment>.
- Vick, S. G. (1990). *Planning, design, and analysis of tailings dams*. BiTech.
- Villavicencio, G., Espinace, R., Palma, J., Fourie, A., & Valenzuela, P. (2014). Failures of sand tailings dams in a highly seismic country. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(4), 449–464. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0142>
- Wates, J., & Götz, A. (2016). Practical Considerations in the Hydro Re-Mining of Gold Tailings. In *Gold Ore Processing: Project Development and Operations* (pp. 729–738). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00040-2>
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F., Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., ... Stokoe, K. H. (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 817–833. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2001\)127:10\(817\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:10(817))

ANEXOS

Anexo A

A continuación, se presenta el código utilizado para el estudio de taludes sin considerar el nivel freático.

```
1 # Copyright: (c) 2021 Bentley Systems, Incorporated. All rights reserved.
2 # Código utilizado para la memoria: "Estudio Geotécnico Conceptual de Remoción Aplicado a un
  Tranque de Relaves en Chile"
3 # Análisis de suelo sin nivel freático
4 # Autor: Jorge Antilef, Correo: jorge.antilef@ug.uchile.cl
5
6 import plxle
7 import numpy as np
8 import matplotlib.pyplot as plt
9 from plxle.analysis_settings import *
10 from plxle.material import *
11 from plxle.model import *
12 from plxle.water import *
13
14 V = np.array([10.0, 5.0, 2.5]) # Altura del talud (m)
15 alfa = np.array([10, 20, 30, 40, 50]) # Ángulo del talud (°)
16
17 #Propiedades relave
18 densidad_relave = 16 # Natural (kN/m3)
19 phi_relave = 25 # Ángulo de fricción interna (°)
20 cohesion_relave = 5 # Cohesión (kPa)
21
22 #Coeficiente sísmico
23 kh= np.array([0.0, 0.14]) # Coeficiente sísmico horizontal (-)
24
25 # Geometría del Modelo
26 l = 0.5 #Incrementos del entry o exit cada 0.5 metros
27 R = 15 #Incrementos de radio de las superficies de falla
28 Hf = 2 #Veces de la altura del talud en profundidad del estrato inferior
29 Li = 2 #Veces de la altura del talud hacia la izquierda del talud
30 Ld = 2 #Veces de la altura del talud hacia la derecha del talud
31 Lm = 5 #Espacio sobre el talud (m)
32
33 #Factor de seguridad
34 FOS=np.zeros((len(V), len(alfa), len(kh)))
35
36 for k in range(len(V)):
37     for i in range(len(alfa)):
38         for j in range(len(kh)):
39             def create_model():
40                 model_settings = ModelSettings2D(
41                     "Talud"+"H"+str(V[k])+"alfa"+str(alfa[i])+"kh"+str(kh[j])*10),
42                     Units.Metric,
43                     SlipDirection.LeftToRight
```

```

44 )
45 analysis_settings = AnalysisSettings(
46     [CalculationMethod.MP]
47 )
48
49 search = EntryExitSearch(EntryExitLine( 0, Hf*V[k]+V[k]), (Li*V[k], Hf*V[k]+V[k]),
50     int((Li*V[k])/l) ),
51     EntryExitLine( ( Li*V[k] + Lm + (V[k] / (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))), Hf*V[k]),
52     ( Li*V[k] + Lm + Ld*V[k] + (V[k] / (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))),
53     Hf*V[k]), int((Li*V[k])/l), R)
54 analysis = SingleAnalysis2D(search)
55
56 tailings_soil = MohrCoulombMaterial("Tailings Soil", densidad_relave,
57     cohesion_relave, phi_relave)
58
59 tailings_region = Region2D(
60     "Tailings Soil",
61     [
62         (0, 0),
63         (0, Hf*V[k]+V[k]),
64         (Li*V[k] + Lm, Hf*V[k]+V[k]),
65         (Li*V[k] + Lm + (V[k]/ (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))), Hf*V[k]),
66         (Li*V[k] + Lm + Ld*V[k] + (V[k]/ (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))), Hf*V[k]),
67         (Li*V[k] + Lm + Ld*V[k] + (V[k]/ (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))), 0)
68     ]
69 )
70
71 pwp = WaterTablePWP2D(
72     WaterTablePiezoLine(
73         [
74             (0,0),
75             (Li*V[k] + Lm + Ld*V[k] + (V[k]/ (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))),0)
76         ],
77         [
78             tailings_region
79         ]
80     ),
81     []
82 )
83 seismic = ConstantPseudoStaticLoad(kh[j])
84
85 )
86
87 regions = [tailings_region]
88 materials = [tailings_soil]
89 material_assignment = {
90     tailings_region: tailings_soil
91 }
92
93 model = Model2D(
94     model_settings,
95     analysis_settings,
96     analysis,
97     materials,
98     regions,

```

```

99         material_assignment,
100         pwp,
101         seismic=seismic
102     )
103     return model
104
105     if __name__ == "__main__":
106         model = create_model()
107         version = plxle.get_version()
108         result = plxle.solve(model)
109         print(f"Solver version: {version}")
110         print(f"Model solved with FOS = {result.fos}")
111         print(f"Output to {result.output_path}")
112
113         FOS[k,i,j]=result.fos
114
115     # Resultado Gráfico
116     plt.figure(1)
117     plt.clf()
118
119     plt.subplot(1, 2, 1)
120     plt.plot(alfa, FOS[2,:,0], linestyle='dashdot', color='black', label="H=2.5 m")
121     plt.plot(alfa, FOS[1,:,0], color='black', label="H=5 m")
122     plt.plot(alfa, FOS[0,:,0], linestyle='dashed', color='black', label="H=10 m")
123     plt.axhline(y=1, color='red', label='FS=1')
124     plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
125     plt.xlabel('Ángulo del talud,  $\alpha$  (°)')
126     plt.ylabel('Factor de seguridad, FS (-)')
127     plt.title('(a)', loc='left', fontsize=20)
128     plt.legend()
129
130     plt.subplot(1, 2, 2)
131     plt.plot(alfa, FOS[2,:,1], linestyle='dashdot', color='black', label="H=2.5 m")
132     plt.plot(alfa, FOS[1,:,1], color='black', label="H=5 m")
133     plt.plot(alfa, FOS[0,:,1], linestyle='dashed', color='black', label="H=10 m")
134     plt.axhline(y=1, color='red', label='FS=1')
135     plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
136     plt.xlabel('Ángulo del talud,  $\alpha$  (°)')
137     plt.ylabel('Factor de seguridad, FS (-)')
138     plt.title('(b)', loc='left', fontsize=20)
139     plt.legend()
140
141     plt.tight_layout()
142
143     plt.show()

```

El código utilizado para el estudio de taludes considerando el nivel freático, se presenta a continuación.

```

1 # Copyright: (c) 2021 Bentley Systems, Incorporated. All rights reserved.
2 # Código utilizado para la memoria: "Estudio Geotécnico Conceptual de Remoción Aplicado a un
  Tranque de Relaves en Chile"
3 # Análisis de suelo con nivel freático
4 # Autor: Jorge Antilef, Correo: jorge.antilef@ug.uchile.cl
5
6 import plxle
7 import numpy as np
8 import matplotlib.pyplot as plt
9 from plxle.analysis_settings import *
10 from plxle.material import *
11 from plxle.model import *
12 from plxle.water import *
13
14 V=np.array([10, 5]) # Altura del talud (m)
15 alfa=np.array([15, 30, 45]) # Ángulo del talud (°)
16 h=np.array([0, 1/3, 2/3, 3/3]) # Ángulo del nivel freático (*H m)
17 FOS=np.zeros((len(V), len(alfa), len(h)))
18
19 #Propiedades relave
20 densidad_relave_natural= 16 # Natural (kN/m3)
21 densidad_relave_saturada = 18 # Saturado (kN/m3)
22 phi_relave= 25 # Ángulo de fricción interna (°)
23 cohesion_relave= 0 # Cohesion (kPa)
24 Ratio = 0.1 # Su/Sigma_v'
25 Min_Shear_Strength = 20 # Resistencia mínima (kPa)
26
27 #Coeficiente sísmico
28 #kh = 0 # Coeficiente sísmico horizontal (-)
29 kh = 0.14 # Coeficiente sísmico horizontal (-)
30
31 # Geometría del Modelo
32 l = 0.5 #Incrementos del entry o exit cada 0.5 metros
33 R = 15 #Incrementos de radio de las superficies de falla
34 Hf = 3 #Veces de la altura del talud en profundidad del estrato inferior
35 Li = 3 #Veces de la altura del talud hacia la izquierda del talud
36 Ld = 4 #Veces de la altura del talud hacia la derecha del talud
37 Lm = 5 #Espacio sobre el talud (m)
38 d_nf = 0.3 #Pocentaje de la altura del talud en el que se deprime el nivel freático (%)
39
40 for k in range(len(V)):
41     for i in range(len(alfa)):
42         for j in range(len(h)):
43             def create_model():
44                 model_settings = ModelSettings2D(
45                     "Talud"+"V"+np.str_(V[k])+"alfa"+np.str_(alfa[i])+"h"+np.str_(h[j])*V[k],
46                     Units.Metric,
47                     SlipDirection.LeftToRight
48                 )

```

```

49     analysis_settings = AnalysisSettings(
50         [CalculationMethod.MP]
51     )
52
53     search = EntryExitSearch(EntryExitLine( 0, Hf*V[k]+V[k]), (Li*V[k], Hf*V[k]+V[k]),
54 int((Li*V[k])/l)),
55     EntryExitLine( ( Li*V[k] + Lm + (V[k] / (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))), Hf*V[k]),
56     (Li*V[k] + Lm + Ld*V[k] + (V[k] / (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))), Hf*V[k]),
57 int((Ld*V[k])/l)), R)
58     analysis = SingleAnalysis2D(search)
59
60     unsaturated_tailings_soil = MohrCoulombMaterial("Unsaturated Tailings Soil", den-
61 sidad_relave_natural, cohesion_relave, phi_relave)
62     #saturated_tailings_soil = MohrCoulombMaterial("Saturated Tailings Soil", den-
63 sidad_relave_saturada, cohesion_relave, phi_relave)
64     saturated_tailings_soil = UndrainedStrengthRatioMaterial("Saturated Tailings Soil", den-
65 sidad_relave_saturada, Ratio, Min_Shear_Strength)
66
67     saturated_tailings_region = Region2D(
68         "Saturated Tailings Soil",
69         [
70             (0, 0),
71             (0, (Hf*V[k] + h[j]*V[k])),
72             ((Li*V[k] + Lm)/2, (Hf*V[k]+ h[j]*V[k])),
73             ((Li*V[k] + Lm + (V[k] / (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))) -
74 ((d_nf*(h[j])*V[k])/((np.tan(np.deg2rad(alfa[i]))))), Hf*V[k] + (d_nf*(h[j])*V[k])),
75             ((Li*V[k] + Lm + (V[k] / (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))), Hf*V[k]),
76             ((Li*V[k] + Lm + (V[k] / (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))) + Ld*V[k], Hf*V[k]),
77             ((Li*V[k] + Lm + (V[k] / (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))) + Ld*V[k], 0)
78         ]
79     )
80
81     unsaturated_tailings_region = Region2D(
82         "Unsaturated Tailings Soil",
83         [
84             (0, (Hf*V[k] + h[j]*V[k])),
85             (0, Hf*V[k] + V[k]),
86             (Li*V[k] + Lm, Hf*V[k]+V[k]),
87             ((Li*V[k] + Lm + (V[k] / (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))) -
88 ((d_nf*(h[j])*V[k])/((np.tan(np.deg2rad(alfa[i]))))), Hf*V[k] + (d_nf*(h[j])*V[k])),
89             ((Li*V[k] + Lm)/2, (Hf*V[k]+ h[j]*V[k])),
90         ]
91     )
92
93     pwp = WaterTablePWP2D(
94         WaterTablePiezoLine(
95         [
96             (0, (Hf*V[k]+ h[j]*V[k])),
97             ((Li*V[k] + Lm)/2, (Hf*V[k]+ h[j]*V[k])),
98             ((Li*V[k] + Lm + (V[k] / (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))) -
99 ((d_nf*(h[j])*V[k])/((np.tan(np.deg2rad(alfa[i]))))), Hf*V[k] + (d_nf*(h[j])*V[k])),
100             ((Li*V[k]+ Lm + (V[k] / (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))), Hf*V[k]),
101             ((Li*V[k] + Lm + (V[k] / (np.tan(np.deg2rad(alfa[i])))) + Ld*V[k], Hf*V[k])
102         ],
103         [

```

```

96         saturated_tailings_region
97     ]
98     ),
99     []
100 )
101 seismic = ConstantPseudoStaticLoad(kh
102
103 )
104
105 regions = [saturated_tailings_region, unsaturated_tailings_region]
106 materials = [saturated_tailings_soil, unsaturated_tailings_soil]
107 material_assignment = {
108     saturated_tailings_region: saturated_tailings_soil,
109     unsaturated_tailings_region: unsaturated_tailings_soil
110 }
111
112 model = Model2D(
113     model_settings,
114     analysis_settings,
115     analysis,
116     materials,
117     regions,
118     material_assignment,
119     pwp,
120     seismic=seismic
121 )
122 return model
123
124 if __name__ == "__main__":
125     model = create_model()
126     version = plxle.get_version()
127     result = plxle.solve(model)
128     print(f"Solver version: {version}")
129     print(f"Model solved with FOS = {result.fos}")
130     print(f"Output to {result.output_path}")
131
132     FOS[k,i,j]=result.fos
133     print(FOS)
134
135 # Resultado Gráfico
136 plt.figure(1)
137 plt.clf()
138
139 # H=10m
140 plt.subplot(1, 2, 1)
141 plt.plot(h, FOS[0,0,:],marker='o',color='black', label='$\alpha=15^\circ$')
142 plt.plot(h, FOS[0,1,:],marker='x',color='black', label='$\alpha=30^\circ$')
143 plt.plot(h, FOS[0,2,:],marker='^',color='black', label='$\alpha=45^\circ$')
144 #plt.axhline(y=1, color='red', label='FS=1')
145 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
146 plt.xlabel('h/H (-)')
147 plt.ylabel('Factor de seguridad, FS (-)')
148 plt.title('(a)', loc='left', fontsize=20)
149 plt.legend()
150

```

```
151 # H=5m
152 plt.subplot(1, 2, 2)
153 plt.plot(h, FOS[1,0,:],marker='o',color='black', label='$\alpha=15^\circ$')
154 plt.plot(h, FOS[1,1,:],marker='x',color='black', label='$\alpha=30^\circ$')
155 plt.plot(h, FOS[1,2,:],marker='^',color='black', label='$\alpha=45^\circ$')
156 #plt.axhline(y=1, color='red', label='FS=1')
157 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
158 plt.xlabel('h/H (-)')
159 plt.ylabel('Factor de seguridad, FS (-)')
160 plt.title('(b)', loc='left', fontsize=20)
161 plt.legend()
162
163 plt.tight_layout()
164
165 plt.show()
```

Anexo B

A continuación, se presenta el código utilizado para el estudio de la franja de seguridad para un depósito construido con el método aguas abajo.

```
1 # Copyright: (c) 2021 Bentley Systems, Incorporated. All rights reserved.
2 # Código utilizado para la memoria: "Estudio Geotécnico Conceptual de Remoción Aplicado a un
  Tranque de Relaves en Chile"
3 # Análisis de franja de seguridad
4 # Autor: Jorge Antilef, Correo: jorge.antilef@ug.uchile.cl
5
6 import plxle
7 import numpy as np
8 import matplotlib.pyplot as plt
9 from plxle.analysis_settings import *
10 from plxle.material import *
11 from plxle.model import *
12 from plxle.water import *
13
14 #MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN AGUAS ABAJO
15
16 #Geometría muro
17 C = 10 # Coronamiento, C (m)
18 R= 3 # Revancha, R (m)
19 H = np.array([30, 50, 100]) # Altura del muro, h (m)
20 B = np.array([30, 100, 200]) # Franja o berma de seguridad, B (m)
21 beta = np.array([10, 15, 20]) # Inclinación de la franja de seguridad, beta (°)
22
23
24 # Factor de seguridad
25 FOS = np.zeros((len(H), len(B), len(beta)))
26
27 # Geometría del suelo de fundación
28 L = 2000 # Largo, L (m)
29 A = 100 # Ancho, A (m)
30 D = 100 # Distancia del pie, D (m)
31
32 #Propiedades suelo de fundación
33 densidad_fundacion = 22 # Densidad (kN/m3)
34 phi_fundacion = 36 # Ángulo de fricción interna (°)
35 cohesion_fundacion = 0 # Cohesion (kPa)
36
37 #Propiedades muro del depósito
38 densidad_muro = 18 # Densidad (kN/m3)
39 phi_muro = 34 # Ángulo de fricción interna (°)
40 cohesion_muro = 0 # Cohesion (kPa)
41
42 #Propiedades de los relaves
43 densidad_relave= 16 # Densidad (kN/m3)
44 phi_relave= 25 # Ángulo de fricción interna (°)
45 cohesion_relave= 0 # Cohesion (kPa)
46 Ratio = 0.1 # Su/Sigma_v (-)
47 Min_Shear_Strength = 20 # Resistencia no drenada mínima (kPa)
```

```

48
49 #Sismo
50 #kh= 0 #Coeficiente sismico horizontal (-)
51 kh= 0.14 #Coeficiente sismico horizontal (-)
52
53 #Tipo de falla
54 T_f= 0.95 # Falla local del talud de la franja
55 #T_f= 0.40 # Falla global del talud de la franja #Se usó una distancia 0.15*B del muro
56
57 for i in range(len(H)):
58     for k in range(len(B)):
59         for j in range(len(beta)):
60             def create_model():
61                 model_settings = ModelSettings2D(
62                     "Talud AA-UP-"+H+" np.str_(H[i])+"B"+ np.str_(B[k])+"beta"+ np.str_(beta[j]),
63                     Units.Metric,
64                     SlipDirection.RightToLeft
65                 )
66                 analysis_settings = AnalysisSettings(
67                     [CalculationMethod.MP]
68                 )
69
70                 search = EntryExitSearch(EntryExitLine( (L-D-(2*H[i])-C-(2*R)-((B[k]*T_f)),
71                                                         A+H[i]-R), (L-D-(2*H[i])-C-(2*R)-((B[k]*0.15)), A+H[i]-R), 40),
72                                                         EntryExitLine( ((L-D-(2*H[i])-C-(2*R)-(B[k])-((H[i] - R) /
73 (np.tan(np.deg2rad(beta[j])))))-(8*B[k]), A),
74                                                         (L-D-(2*H[i])-C-(2*R)-(B[k])-((H[i] - R) /
75 (np.tan(np.deg2rad(beta[j])))))-8*B[k]), A), 20), 30)
76                 analysis = SingleAnalysis2D(search)
77
78                 foundation_soil = MohrCoulombMaterial("Foundation Soil", densidad_fundacion, cohe-
79 sion_fundacion, phi_fundacion)
80                 wall_soil = MohrCoulombMaterial("Wall Soil", densidad_muro, cohesion_muro, phi_muro)
81                 #tailings_soil = UndrainedStrengthRatioMaterial("Tailings Soil", densidad_relave, Ratio,
82                 Min_Shear_Strength)
83                 tailings_soil = MohrCoulombMaterial("Tailings Soil", densidad_relave, cohesion_relave,
84                 phi_relave)
85
86                 foundation_region = Region2D(
87                 "Foundation Soil",
88                 [
89                 (0, 0),
90                 (L, 0),
91                 (L, A),
92                 (0, A)
93                 ]
94                 )
95
96                 wall_region = Region2D(
97                 "Wall Soil",
98                 [
99                 (L-D-(4*H[i])-C, A),
100                (L-D, A),
101                (L-D-(2*H[i]), A+H[i]),
102                (L-D-(2*H[i])-C, A+H[i])

```

```

98     ]
99     )
100
101     tailings_region = Region2D(
102         "Tailings Soil",
103         [
104             (L-D-(2*H[i])-C-(2*R)-(B[k])-((H[i] - R) / (np.tan(np.deg2rad(beta[j]))))), A),
105             (L-D-(4*H[i])-C, A),
106             (L-D-(2*H[i])-C-(2*R), A+H[i]-R),
107             (L-D-(2*H[i])-C-(2*R)-B[k], A+H[i]-R)
108         ]
109     )
110
111     seismic = ConstantPseudoStaticLoad(kh
112
113     )
114
115     regions = [foundation_region, wall_region, tailings_region]
116     materials = [foundation_soil, wall_soil, tailings_soil]
117     material_assignment = {
118         tailings_region: tailings_soil,
119         foundation_region: foundation_soil,
120         wall_region: wall_soil
121     }
122
123     model = Model2D(
124         model_settings,
125         analysis_settings,
126         analysis,
127         materials,
128         regions,
129         material_assignment,
130         seismic=seismic
131     )
132     return model
133
134
135
136     if __name__ == "__main__":
137         model = create_model()
138         version = p1xle.get_version()
139         result = p1xle.solve(model)
140         print(f"Solver version: {version}")
141         print(f"Model solved with FOS = {result.fos}")
142         print(f"Output to {result.output_path}")
143
144         FOS[i,k,j]=result.fos
145         print(FOS)
146
147     plt.figure(1)
148     plt.clf()
149
150     plt.subplot(1, 3, 1)
151     Curva1=1 / (H[0]/B)
152     plt.plot(Curva1, FOS[0,:,0],marker='o', color='black', label=r'$\beta=10^\circ$')

```

```

153 plt.plot(Curva1, FOS[0, :, 1], marker='x', color='black', label=r'\beta$=15°')
154 plt.plot(Curva1, FOS[0, :, 2], marker='^', color='black', label=r'\beta$=20°')
155 plt.axhline(y=1.0, color='red', label='FS=1')
156 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
157 plt.xlabel('B/H (-)')
158 plt.ylabel('Factor de seguridad, FS (-)')
159 plt.title('(a)', loc='left', fontsize=20) # H=30
160 plt.legend()
161
162 plt.subplot(1, 3, 2)
163 Curva2=1 / (H[1]/B)
164 plt.plot(Curva2, FOS[1, :, 0], marker='o', color='black', label=r'\beta$=10°')
165 plt.plot(Curva2, FOS[1, :, 1], marker='x', color='black', label=r'\beta$=15°')
166 plt.plot(Curva2, FOS[1, :, 2], marker='^', color='black', label=r'\beta$=20°')
167 plt.axhline(y=1.0, color='red', label='FS=1')
168 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
169 plt.xlabel('B/H (-)')
170 plt.ylabel('Factor de seguridad, FS (-)')
171 plt.title('(b)', loc='left', fontsize=20) # H=50
172 plt.legend()
173
174 plt.subplot(1, 3, 3)
175 Curva3=1 / (H[2]/B)
176 plt.plot(Curva3, FOS[2, :, 0], marker='o', color='black', label=r'\beta$=10°')
177 plt.plot(Curva3, FOS[2, :, 1], marker='x', color='black', label=r'\beta$=15°')
178 plt.plot(Curva3, FOS[2, :, 2], marker='^', color='black', label=r'\beta$=20°')
179 plt.axhline(y=1.0, color='red', label='FS=1')
180 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)
181 plt.xlabel('B/H (-)')
182 plt.ylabel('Factor de seguridad, FS (-)')
183 plt.title('(c)', loc='left', fontsize=20) # H=100
184 plt.legend()
185
186 plt.show()

```