



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Análisis de riesgo geotécnico para prevenir futuras fallas en una presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Bermudez Solis, Carlo Stephano
ORCID: 0000-0002-8006-5378

Giron Fasanando, Renzo
ORCID: 0000-0002-2710-2918

ASESOR

Torres Chung, César Roberto
ORCID: 0000-0002-3212-2817

Lima, Perú

2022

Metadatos Complementarios

Datos del autor(es)

Bermudez Solis, Carlo Stephano

DNI: 71422064

Giron Fasanando, Renzo

DNI: 70556531

Datos de asesor

Torres Chung, César Roberto

DNI: 41182279

Datos del jurado

JURADO 1

Donayre Córdova, Oscar Eduardo

DNI: 06162939

ORCID: 0000-0002-4778-3789

JURADO 2

Chavarry Vallejos, Carlos Magno

DNI: 07410234

ORCID: 0000-0001-5482-7562

JURADO 3

Chavarría Reyes, Liliana Janet

DNI: 25481792

ORCID: 0000-0002-1759-2132

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 2.01.01

Código del Programa: 732016

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres por su contante soporte e inspiración, a mi hermana por su incesante motivación, y a mis familiares por su apoyo incondicional, enseñanzas y consejos durante mi etapa universitaria.

Bermudez Solis Carlo Stephano

Esta tesis se la dedico a mis padres por siempre haber estado conmigo, por enseñarme la perseverancia, la constancia y a jamás bajar los brazos; a mi esposa por ser mi hombro y mi apoyo incondicional y a mi hija Liah por ser el motivo y la razón de mi día a día.

Giron Fasanando Renzo

AGRADECIMIENTO

Nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Ricardo Palma, por habernos brindado una educación de calidad durante nuestra formación académica.

Al Ing. César Torres Chung por su predisposición y asesoramiento durante el desarrollo de la presente tesis; y a todas personas que de alguna manera nos apoyaron en el desarrollo de la tesis, entre ellos docentes, colegas y familiares.

Bermudez Solis Carlo Stephano

Giron Fasanando Renzo

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT.....	ii
INTRODUCCIÓN	iii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Descripción y formulación del problema general y específicos	1
1.1.1 Árbol del problema	2
1.1.2 Problema general	3
1.1.3 Problemas específicos.....	3
1.2 Objetivo general y específico	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Delimitación de la investigación	4
1.3.1 Geográfica	4
1.3.2 Temporal.....	5
1.3.3 Temática	5
1.3.4 Muestral	5
1.4 Justificación del estudio.....	5
1.4.1 Conveniencia	5
1.4.2 Relevancia social	5
1.4.3 Aplicaciones prácticas	6
1.4.4 Utilidad metodológica	6
1.4.5 Valor teórico	6
1.5 Importancia del estudio.....	6
1.5.1 Nuevos conocimientos.....	6
1.5.2 Aporte	6
1.6 Limitaciones del estudio	7
1.6.1 Falta de estudios previos de investigación	7
1.6.2 Metodológicos o prácticos.....	7
1.6.3 Medidas para la recolección de los datos	7
1.6.4 Obstáculos en la investigación	7
1.7 Alcance	7

1.8 Viabilidad del estudio	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	9
2.1 Marco histórico	9
2.1.1 Historia de la actividad minera en el Perú	9
2.1.2 Actividad minera y de relavaría en el Perú.....	10
2.1.3 Antecedentes normativos en Perú	11
2.2 Investigaciones relacionadas con el tema	13
2.2.1 Investigaciones internacionales	13
2.2.2 Investigaciones nacionales	13
2.2.3 Artículos relacionados con el tema.....	14
2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio	15
2.3.1 Características y propiedades de relaves mineros	15
2.3.2 Impacto ambiental de la actividad minera.....	15
2.3.3 Fases de tiempo de vida de las presas de relaves	16
2.3.4 Métodos de construcción de presas de relave minero	18
2.3.5 Factor de seguridad.....	21
2.3.6 Evaluación de riesgos	21
2.3.7 Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)	24
2.3.8 CDA Dam Safety Guidelines	25
2.3.9 Guide to the Management of Tailings Facilities (MAC).....	27
2.3.10 Normas utilizadas en Chile.....	36
2.3.11 Normas utilizadas en Mexico	36
2.3.12 Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales (Cenepred)	37
2.3.13 Criterios de probabilidad	45
2.3.14 Análisis de estabilidad de taludes e infiltraciones	46
2.3.15 Análisis de desplazamientos simplificados inducidos por sismo	47
2.4 Definición de términos básicos.....	52
2.5 Fundamentos teóricos que sustentan las hipótesis.....	52
2.5.1 Esquema de desarrollo de las hipótesis	52
CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS	54
3.1 Hipótesis	54
3.1.1 Hipótesis general	54

3.1.2	Hipótesis específicas.....	54
3.2	Sistema de variables	54
3.2.1	Definición conceptual de las variables	54
3.2.2	Operacionalización de las variables	56
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....		58
4.1	Método de la investigación.....	58
4.2	Tipo de la investigación.....	58
4.3	Nivel de la investigación	58
4.4	Diseño de la investigación	59
4.5	Población y muestra.....	59
4.5.1	Población	59
4.5.2	Muestra	59
4.6	Recolección de datos	59
4.6.1	Instrumento de recolección de datos	59
4.6.2	Métodos y técnicas	59
4.7	Descripción de procesamiento de análisis	60
CAPÍTULO V: ANÁLISIS GEOTECNICO.....		61
5.1	Ubicación.....	61
5.2	Geomorfología.....	62
5.3	Geología del macizo rocoso.....	62
5.3.1	Volcánico Catalina – Grupo Mitu (Ps-mi)	63
5.3.2	Grupo Pucará (JTr-pu).....	63
5.3.3	Grupo Goyllarisquizga (Ki-g)	64
5.3.4	Formación Chulec (Ki-chu).....	64
5.3.5	Formación Pariatambo (Ki-pa).....	65
5.3.6	Formación Jumasha (Ks-j).....	65
5.3.7	Formación Casapalca (KTs-c).....	65
5.3.8	Eventos Intrusivos (T-mz/gd).....	66
5.4	Geología superficial.....	66
5.4.1	Depósitos glaciales	66
5.4.2	Depósitos coluviales	67
5.4.3	Depósitos antrópicos	67
5.4.4	Procesos kársticos en la fundación de la presa de relaves Toromocho	68

5.4.5	Falla inversa Toromocho	69
5.5	Geodinámica externa	69
5.6	Alcance del diseño	70
5.7	Criterios de diseño	70
5.8	Sección típica.....	72
5.9	Caracterización geotécnica de los materiales	72
5.9.1	Basamento rocoso.....	73
5.9.2	Material de filtro (Tipo 1).....	75
5.9.3	Material de transición (Tipo 2).....	78
5.9.4	Material de enrocado (Tipo 3).....	79
5.9.5	Material de enrocado (Tipo 3A)	82
5.9.6	Relaves depositados.....	82
5.10	Propiedades y parámetros geotécnicos.....	82
5.11	Coefficiente sísmico	83
5.12	Resultados del análisis de estabilidad física	84
5.12.1	Escenario 1	86
5.12.2	Escenario 2	88
5.13	Resultados del análisis de infiltraciones	90
5.13.1	Escenario 1	92
5.13.2	Escenario 2	95
5.14	Resultados del análisis de desplazamientos por sismo	98
CAPÍTULO VI: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS		99
6.1	Presentación de los resultados	99
6.1.1	Identificación de modos de falla.....	99
6.1.2	Evaluación de las causas potenciales de falla.....	99
6.1.3	Identificación de efectos o consecuencias de falla	101
6.1.4	Criterios de probabilidad de falla propuesta.....	101
6.1.5	Criterios de consecuencia propuesta.....	102
6.2	Análisis de los resultados.....	105
6.2.1	Matriz de riesgo propuesta	105
6.3	Contrastación de hipótesis	106
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		109

CONCLUSIONES	111
RECOMENDACIONES	114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
ANEXOS.....	118
Anexo 1: Matriz de consistencia.....	118
Anexo 2: Predicción de deformación de presas debido a sismo.....	122
Anexo 3: Análisis de desplazamiento simplificado (Sección A-A').....	123
Anexo 4: Análisis de desplazamiento simplificado (Sección B-B').....	126
Anexo 5: Matriz de riesgo propuesta.....	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1. Recomendaciones de monitoreo.....	12
Tabla N°2. Niveles de peligrosidad	41
Tabla N°3. Niveles de vulnerabilidad.....	44
Tabla N°4. Niveles de riesgo	44
Tabla N°5. Niveles de riesgo y consecuencias	44
Tabla N°6. Criterios de probabilidad.....	45
Tabla N°7. Matriz operacional de variables	56
Tabla N°8. Criterios de diseño.....	70
Tabla N°9. Propiedades y parámetros geotécnicos de los materiales.....	83
Tabla N°10. Coeficiente sísmico	83
Tabla N°11. Resultados de los análisis de estabilidad física	85
Tabla N°12. Resultados de los análisis de infiltraciones	90
Tabla N°13. Resultados del análisis de desplazamientos simplificado	98
Tabla N°14. Evaluación de los modos potenciales de falla.....	99
Tabla N°15. Ejemplo típico de criterios de probabilidad	102
Tabla N°16. Ejemplo típico de criterios de consecuencia	103
Tabla N°17. Matriz de riesgo analizada para los modos de falla estudiados	105
Tabla N°18. Resultados de la matriz de riesgo propuesta para los modos de falla estudiados.....	105
Tabla N°19. Resultados de la matriz de riesgo residual propuesta para los modos de falla estudiados	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N 1: Árbol del problema (Causas – Problema – Consecuencias).....	3
Figura N 2: Etapas de la actividad minera	10
Figura N 3: Secciones típicas de presas de relaves según su método de crecimiento	18
Figura N 4: Método aguas arriba	19
Figura N 5: Método aguas abajo (capas de arenas inclinadas)	20
Figura N 6: Relación entre la probabilidad de falla y el número de muertes debido a la falla de una presa	24
Figura N 7: Muestra de una matriz de evaluación de riesgos cualitativa típica	35
Figura N 8: Ilustración de un análisis de Bowtie.....	35
Figura N 9: Parámetros de evaluación	38
Figura N 10: Factores condicionantes	40
Figura N 11: Factores desencadenantes.....	40
Figura N 12: Gráfico de la proporción del movimiento de pulso.....	49
Figura N 13: Gráfica para determinación del porcentaje de asentamiento.....	51
Figura N 14: Esquema para determinación del asentamiento.....	51
Figura N 15: Esquema de desarrollo de hipótesis.....	53
Figura N 16: Ubicación de la unidad minera Toromocho	61
Figura N 17: Geología de la zona de estudio.....	68
Figura N 18: Configuración general de la presa de relaves	70
Figura N 19: Distribución de materiales de la presa de relaves.....	73
Figura N 20: Envolvente de resistencia al corte en función al esfuerzo normal	74
Figura N 21: Envolvente de resistencia al corte en función al esfuerzo normal	75
Figura N 22: Relación de ángulo de fricción con esfuerzo normal – Material Tipo 1 ...	77
Figura N 23: Envolvente de resistencia al corte del material Tipo 1.....	77
Figura N 24: Relación de ángulo de fricción con esfuerzo normal – Material Tipo 2 ...	79
Figura N 25: Envolvente de resistencia al corte del material Tipo 2.....	79
Figura N 26: Relación de ángulo de fricción con esfuerzo normal – Material Tipo 3 ...	81
Figura N 27: Envolvente de resistencia al corte del material Tipo 3.....	81
Figura N 28: Análisis de estabilidad estático - Sección A-A'.....	86
Figura N 29: Análisis de estabilidad pseudo-estático - Sección A-A'	86
Figura N 30: Análisis de estabilidad estático - Sección B-B'	87
Figura N 31: Análisis de estabilidad pseudo-estático - Sección B-B'.....	87

Figura N 32: Análisis de estabilidad estático - Sección A-A'.....	88
Figura N 33: Análisis de estabilidad pseudo-estático - Sección A-A'.....	88
Figura N 34: Análisis de estabilidad estático - Sección B-B'.....	89
Figura N 35: Análisis de estabilidad pseudo-estático - Sección B-B'.....	89
Figura N 36: Enmallado y condiciones de borde - Sección A-A'.....	91
Figura N 37: Enmallado y condiciones de borde - Sección B-B'.....	91
Figura N 38: Análisis de infiltración pressure head - Sección A-A'.....	92
Figura N 39: Análisis de infiltración total head - Sección A-A'.....	92
Figura N 40: Análisis de infiltración pore pressure - Sección A-A'.....	93
Figura N 41: Análisis de infiltración pressure head - Sección B-B'.....	93
Figura N 42: Análisis de infiltración total head - Sección B-B'.....	94
Figura N 43: Análisis de infiltración pore pressure - Sección B-B'.....	94
Figura N 44: Análisis de infiltración pressure head - Sección A-A'.....	95
Figura N 45: Análisis de infiltración total head - Sección A-A'.....	95
Figura N 46: Análisis de infiltración pore pressure - Sección A-A'.....	96
Figura N 47: Análisis de infiltración pressure head - Sección B-B'.....	96
Figura N 48: Análisis de infiltración total head - Sección B-B'.....	97
Figura N 49: Análisis de infiltración pore pressure - Sección B-B'.....	97

RESUMEN

En Perú, la minería es la principal actividad económica actualmente dado que representa el 60% de las exportaciones, lo cual contribuye a la generación de divisas permitiendo realizar importaciones necesarias para el crecimiento de la economía.

El tratamiento de los relaves mineros es generador de una imagen negativa por los impactos ambientales que conllevan a una contaminación general. A partir de esto existe la preocupación por no poder clasificar o distinguir las posibles fallas del diseño geotécnico de la presa.

La presente investigación tiene como objetivo principal determinar el riesgo geotécnico para prevenir futuras fallas en una presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín. El método de la investigación es deductivo, enfoque mixto, nivel descriptivo, diseño no experimental y prospectivo.

Para analizar el riesgo geotécnico se utilizó la metodología del FMEA, esta propone elaborar una matriz de riesgos donde se identifiquen los modos de falla, controles mínimos en función a las probabilidades y consecuencias, regularizando y agregando valores que mitiguen los potenciales desastres mediante los estándares internacionales del MAC Y CDA.

Se analizó el dique principal de la presa de relaves mediante análisis de estabilidad física, infiltraciones y desplazamientos simplificados, con los cuales se identifican los modos potenciales de falla y elabora la matriz de riesgos.

El análisis de riesgo nos dio como resultado cuatro modos potenciales de falla, lo que corroboró las hipótesis propuestas, concluyendo así un riesgo catastrófico/improbable, asumiendo pautas de seguridad de presas del CDA y MAC para lograr un nivel de riesgo catastrófico/raro.

Palabras Clave: Presa de relaves, análisis de riesgo, estabilidad, filtración, deformaciones.

ABSTRACT

Mining activity is currently the main economic activity in Peru, representing approximately 60% of the country's exports, which contributes to the generation of foreign exchange and allows imports necessary for the growth of the economy.

The treatment of mining tailings is the subject of great controversy and generates a negative image due to the environmental impacts that lead to general contamination. From this there is concern about not being able to classify or distinguish the possible failures of the geotechnical design or slopes of the dam.

The main objective of this research is to determine the geotechnical risk to prevent future failures in tailings dam downstream in the department of Junín. The research method is deductive, mixed approach, descriptive level, non-experimental and prospective design.

To analyze the geotechnical risk, the FMEA methodology was used, it proposes to develop a risk matrix where failure modes are identified, minimum controls based on probabilities and consequences, regularizing, and adding values that contribute to disaster reduction through standards. international MAC and CDA.

In the development of the investigation, the main dam of the tailings dam was analyzed through physical stability analysis, infiltration analysis and simplified displacement analysis, with which it was possible to identify the potential failure modes and develop the risk matrix.

The risk analysis gave us four possible failure modes, which corroborated the proposed hypotheses, thus concluding a catastrophic/unlikely risk, assuming CDA and MAC dam safety guidelines to achieve a catastrophic/rare risk level.

Keywords: Tailings dam, risk analysis, stability, filtration, deformations.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como objetivo principal determinar el riesgo geotécnico para prevenir futuras fallas en una presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín. Para determinar el riesgo geotécnico se trabajó con la metodología del FMEA, la cual propone elaborar una matriz de riesgos en cual se identifique los modos de falla y controles mínimos en función a las probabilidades y consecuencias, y los estándares internacionales del MAC Y CDA.

Por ello cuanto antes se tenga información de detección de fallas en la presa de relaves se puede lograr y realizar un correcto análisis donde contenga planes de mantenimiento, reparación el cual evite a toda costa la destrucción de las estructuras.

Por lo tanto, la propuesta de esta investigación es identificar y analizar los riesgos geotécnicos para prevenir futuras fallas en una presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín.

La presente investigación se ha estructurado en 6 capítulos, que se mencionan a continuación:

El capítulo I describe la realidad problemática, como la formulación de los problemas generales y específicos, los objetivos generales y específicos. A su vez se describe la delimitación de la investigación, la justificación del estudio, la importancia del estudio, las limitaciones del estudio, el alcance y viabilidad del estudio.

Problema general: ¿Cómo es un análisis del riesgo geotécnico en una presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín?

Objetivo general: Determinar el riesgo geotécnico para prevenir futuras fallas en una presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín.

El capítulo II describe el marco teórico de la investigación, así como las investigaciones relacionadas con el tema, bases teóricas y los fundamentos teóricos que sustentan la hipótesis de la investigación.

El capítulo III describe el sistema de hipótesis generales y específicas, y el sistema de variables.

Hipótesis principal: La presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín presenta un riesgo geotécnico bajo frente a futuras fallas.

El capítulo IV da a conocer la metodología de la investigación, el método, el tipo, el nivel, el diseño, la población y muestra, recolección de datos y la descripción de procesamiento de análisis.

El capítulo V expone la ubicación de la presa de relaves analizada, la geomorfología de la zona, la geología del macizo rocoso, la geología superficial, la geodinámica externa, el alcance del diseño, los criterios de diseño, la sección típica, la caracterización geotécnica de los materiales, las propiedades y parámetros geotécnicos, el coeficiente sísmico, y los resultados de los análisis de estabilidad física, infiltraciones y desplazamientos simplificado.

El capítulo VI muestra la identificación de los modos falla, la evaluación de causas potenciales de falla, la identificación de efectos o consecuencias de falla, los criterios de probabilidad de falla propuesta, los criterios de consecuencia propuesta y la matriz de riesgo propuesta.

Finalmente, se describen las conclusiones y recomendación derivadas de la investigación, en el cual se observa la matriz de riesgo donde se indica que se puede tener un nivel de riesgo catastrófico/raro, lo cual puede reducir los niveles de probabilidad y mitigar todo tipo de evento improbable.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción y formulación del problema general y específicos

Las exportaciones mineras peruanas representan aproximadamente el 60% de las exportaciones del país contribuyendo a la generación de divisas y permitiendo realizar importaciones que son necesarias para el crecimiento de la economía: vehículos, alimentos, artículos farmacéuticos, combustibles, y maquinaria y equipos, entre otros. (Dammert, 2020, p.2)

La problemática comienza con la importancia de mantener nuestro ecosistema y medio ambiente libre de cualquier daño y/o contaminación que pueda afectar la tranquilidad y la calma de la zona donde se labora, que puede ser provocado en gran medida por el vertido de residuos mineros. El tratamiento de los relaves mineros en el Perú es motivo de grandes controversias y es generadora de una imagen negativa por los impactos ambientales que conllevan a una contaminación sistemática del agua o del subsuelo (Villena, 2018).

“De acuerdo con la principal causa de falla de la presa de relaves, el porcentaje de accidentes de filtración, falla de cimentación, desbordamiento, terremoto y otros, son respectivamente, 21.6%, 17.3%, 20.6%, 17.0% y 23.5%” (Lyu, Chai, Xu, Qin y Cao, 2019, p.10). A partir de esto existe la preocupación por no poder clasificar o distinguir las posibles fallas del diseño geotécnico o de taludes de la presa, con el cual se trata de mantener a salvo la vida útil de la estructura, esto también involucra lo agreste que es ingresar al área de trabado dado los terrenos tan accidentados donde se encuentra establecida la presa.

Es por ello que se debe poner énfasis en la prevención de fallas en presas de relaves. “Es necesaria la promulgación de las normas que puedan regular e impedir que la contaminación de los relaves siga afectando a la población y al medio ambiente” (Menéndez y Muñoz, 2021, p.150). Para analizar el riesgo geotécnico de la presa de relaves y poder prevenir futuras fallas, en la presente investigación se utiliza la metodología del FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), y las guías “Dam Safety Guidelines” del CDA (Canadian Dam Association) y “Guide to the Management of Tailings Facilities” del MCA (Mining Association of Canada).

1.1.1 Árbol del problema

El campo de tensión y el campo de filtración en el depósito de relaves cambian, lo que lleva a la inestabilidad de la presa. Las siguientes razones explican la falla resultante: (1) el campo de filtración induce directamente la inestabilidad de la presa de relaves (filtración y erosión interna); (2) la inestabilidad de los cimientos de la presa de relaves (malas condiciones de los cimientos); (3) inundaciones que hacen que la pendiente de la presa de relaves se vuelva inestable (desbordamiento); (4) un efecto de terremoto (inestabilidad estática y sísmica); y (5) otras razones (hundimiento de la mina, erosión estructural, externa e inestabilidad de taludes). (Lyu et al.,2019, p.2)

“Las consecuencias de estas fallas son grandes pérdidas económicas, degradación y contaminación del medio ambiente y en muchos casos pérdidas de vidas humanas” (Oldecop y Rodríguez, 2007, p.181). La Figura N 1 muestra el árbol del problema que especifica las causas que lo generan y consecuencias provocadas.

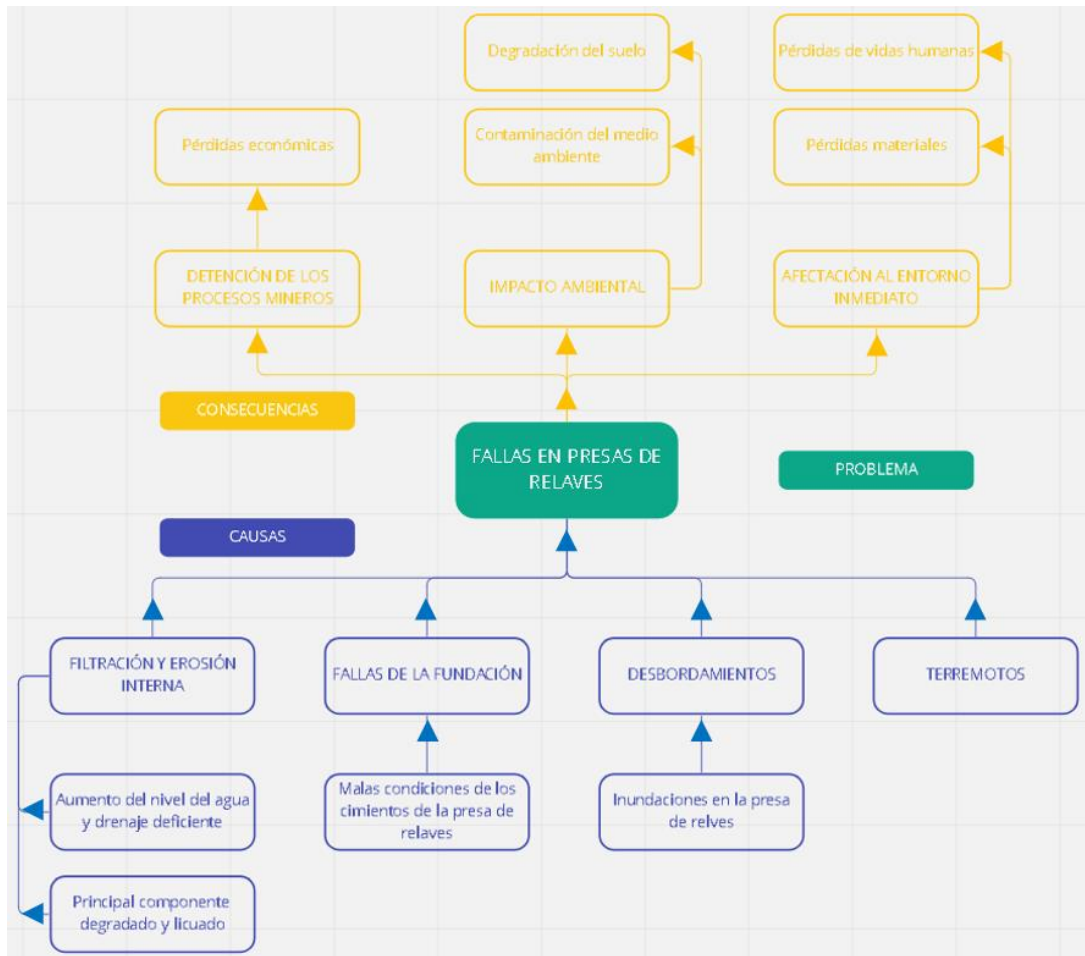


Figura N 1: Árbol del problema (Causas – Problema – Consecuencias)
Fuente: Elaboración propia

1.1.2 Problema general

¿Cómo es un análisis del riesgo geotécnico en una presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín?

1.1.3 Problemas específicos

- ¿Cómo evaluar el riesgo geotécnico de la presa de relaves utilizando la metodología del FMEA, y las guías del MAC y CDA?
- ¿De qué manera el modelamiento geotécnico de la presa de relaves cumple con el factor de seguridad establecido por la normativa vigente?
- ¿De qué modo el aumento del nivel de agua, un drenaje ineficiente, y que el principal componente se encuentre degradado y licuado, origina filtración y erosión interna en la presa de relaves?
- ¿De qué manera las malas condiciones de los cimientos generan fallas en la fundación de la presa de relaves?

- e) ¿De qué forma las inundaciones provocan desbordamientos en la presa de relaves?
- f) ¿Cómo los terremotos producen fallas en la presa de relaves?

1.2 Objetivo general y específico

1.2.1 Objetivo general

Analizar el riesgo geotécnico para prevenir futuras fallas en una presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Evaluar el riesgo geotécnico de la presa de relaves para establecer los modos potenciales de falla; utilizando la metodología del FMEA, y las guías del MAC y CDA.
- b) Modelar geotécnicamente la presa de relaves, para verificar si el factor de seguridad cumple con lo establecido por la normativa vigente.
- c) Analizar el modo que el aumento del nivel del agua, un drenaje ineficiente, y que el principal componente se encuentre degradado y licuado, origina filtración y erosión interna en la presa de relaves, para conocer cambios en la morfología y estructura de la presa de relaves.
- d) Examinar la manera que las malas condiciones de los cimientos generan fallas en la fundación de la presa de relaves, para prever la inestabilidad de la estructura.
- e) Distinguir la forma que las inundaciones provocan desbordamientos en la presa de relaves, para implantar mecanismos de control mínimos.
- f) Identificar como los terremotos producen fallas en la presa de relaves, para prevenir futuros deslizamientos de talud.

1.3 Delimitación de la investigación

1.3.1 Geográfica

La presente investigación analizará el depósito de relaves de la Unidad Minera Toromocho, ubicada en el distrito de Morococha, provincia de Yauli, departamento de Junín, Perú.

1.3.2 Temporal

La presente investigación se desarrollará durante los meses de mayo a noviembre del año 2022.

1.3.3 Temática

La presente investigación consistirá en analizar el riesgo geotécnico de una presa de relaves en el departamento de Junín; utilizando la metodología del FMEA, y las guías del MAC y CDA.

1.3.4 Muestral

La presente investigación tiene como unidades de análisis a la ingeniería de detalle del proyecto y los estudios previos en la zona de influencia de la presa de relaves.

1.4 Justificación del estudio

1.4.1 Conveniencia

El propósito de la investigación es llenar el vacío que existe en el flujo en cuanto a los distintos métodos de análisis de riesgo geotécnico en cuanto a presas de relaves se refiere.

La importancia de esta tesis transfiere en que a partir de un modelamiento geotécnico y posterior análisis de riesgo de la presa de relaves, se presenten controles mínimos que eviten las fallas o cualquier evento que dañe en si la estructura establecida o afecte significativamente la vida útil de esta. En ese sentido, se tendrá un mejor acceso al conocimiento de este análisis y con ello vendrían las mejoras de diseño, para así beneficiar la distribución de la misma.

1.4.2 Relevancia social

Esta investigación pretende agilizar el proceso en la definición de expedientes de los análisis nombrados para una adecuada ejecución de los procedimientos geotécnicos a emplear en obra.

En ese sentido se mejoraría la calidad de trabajos y apoyaría con la menor posible contaminación de desechos que podría afectar a los pueblos rurales adyacentes, reduciendo a su vez cualquier tipo de enfermedades que podrían ocasionar dichos desechos.

1.4.3 Aplicaciones prácticas

El desarrollo de la presente investigación se enfocará en el empleo de los distintos métodos de análisis de riesgos para así evitar el mal funcionamiento de la estructura o que sea afectado por fallas que puedan aparecer.

Por lo tanto, se desarrollarán los procesos garantizando los resultados que a la vez optimicen costos y reduciendo riesgos.

1.4.4 Utilidad metodológica

La aplicación de las metodologías del FMEA, y las guías del MAC y CDA podrá ser tomada como referencia y ser utilizada en diferentes análisis de riesgos geotécnicos en presas de relaves.

1.4.5 Valor teórico

Debido a la necesidad de mantener las estructuras en óptimas condiciones, hoy en día es más que necesario la implementación de un moderno sistema de análisis de gestión de riesgos.

1.5 Importancia del estudio

1.5.1 Nuevos conocimientos

La presente investigación pretende demostrar la importancia de tener una estrategia de análisis de riesgo geotécnico en presas de relaves; para establecer modos potenciales de fallas y mecanismos de control mínimos con el fin de prevenir futuras fallas.

1.5.2 Aporte

La presente investigación tiene como aporte ser una referencia para futuros análisis de riesgo geotécnico en presas de relaves.

1.6 Limitaciones del estudio

1.6.1 Falta de estudios previos de investigación

Debido a lo infrecuente de este tipo de estructuras, se ha tomado como antecedentes a la investigación la ingeniería de detalle del proyecto y los estudios previos en la zona de influencia de la presa de relaves.

1.6.2 Metodológicos o prácticos

Debido a que las normas consultadas no están estandarizadas, pueden existir sesgos en los resultados del análisis.

1.6.3 Medidas para la recolección de los datos

Difícil acceso a la información debido a que es reservada para las organizaciones involucradas.

1.6.4 Obstáculos en la investigación

Debido a la complejidad y difícil acceso de la estructura, existe una gran dificultad para entrevistar a determinados sujetos de estudio y realizar investigaciones en campo.

1.7 Alcance

La presente investigación tendrá como resultado realizar un modelamiento geotécnico de la presa de relaves, para posteriormente analizar el riesgo geotécnico, elaborar la matriz de riesgos y establecer modos potenciales de falla y controles mínimos, utilizando la metodología del FMEA, y las guías del MAC y CDA.

1.8 Viabilidad del estudio

A pesar de la poca información disponible, con la ingeniería de detalle del proyecto y los estudios previos en la zona de influencia de la presa de relaves es posible analizar el riesgo geotécnico; lo cual es muy importante debido a que Perú es uno de los principales exportadores de minerales en el mundo, por lo cual urge tener más investigaciones que puedan utilizarse como referencia a futuros análisis y

tener una estrategia de análisis para evitar futuras fallas en este tipo de estructuras, las cuales podrían tener consecuencias catastróficas.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco histórico

A través de la historia del Perú, el país nos ha enseñado que, así como tenemos riquezas, recursos y bellos paisajes; también somos una zona vulnerable a distintos tipos de desastres naturales tales como: terremotos, aludes, aluviones, huaycos, maremotos, etc. Estos accidentes propios de nuestro ecosistema varían en cuanto tiempo y magnitud, afectando mucho a los distintos tipos de estructura que hay en la localidad de donde se situó tal evento.

En el caso de la actividad minera, se dan muchos procesos ya sea de producción y selección de materiales dentro de la propia corteza terrestre en menor y en mayor escala, los cuales se encuentran expuestos frente a estos desastres naturales.

2.1.1 Historia de la actividad minera en el Perú

La industria minera en el Perú ha sido históricamente importante. Desde épocas precolombinas, los metales y la actividad asociada a ella han jugado un rol clave en el desarrollo de las economías del mundo antiguo. Durante la época colonial, la explotación de los metales preciosos impuso el desarrollo de los sistemas económicos mercantilistas que llevaron a la creación de los imperios coloniales entre los siglos XVI y XVIII. En tiempos más modernos, los impactos de la minería han sido ampliamente estudiados y difundidos, ya sea en términos de los tributos o contraprestaciones que generan, como en el empleo directo e indirecto. La minería también ha impactado en los encadenamientos con otras industrias como la construcción, el comercio, servicios de transporte, energía, telecomunicaciones, entre muchos otros. (Osinermin, 2017, p.14)

Estas actividades mineras a lo largo de la historia han ocasionado problemas en el terreno debido a que en el pasado no había mucho control de los residuos sólidos y líquidos, estos eran vertidos a los lagos y ríos cercanos al lugar de las presas, o hasta eran enterrados ocasionando una gran contaminación al medio ambiente.

2.1.2 Actividad minera y de relavaría en el Perú

La actividad minera engloba muchas definiciones en cuestión de etapas, es decir que consta de procesos como la exploración, concentración, extracción, refinación y fundación para la obtención final de los minerales requeridos. Ahí es donde se separa y se logra que los relaves mineros sean un conglomerado de desperdicios (residuos minerales), tierra e incluso piedras (fragmentos de rocas) que al juntarse o mezclarse generan este tipo de elemento. Los desechos tóxicos provienen directamente de esta mezcla concentrada que al momento de brotar con el medio ambiente genera contaminación a tal grado que depende bastante a que está sometido el mineral con características propias de lugar de la mina.



Figura N 2: Etapas de la actividad minera
Fuente: Estudios Mineros del Perú S.A.C. (2006)

Estos grandes depósitos de desechos tóxicos que contienen varios elementos nocivos para la comunidad aledaña están siempre en constante observación, además que en nuestro país no existe una regulación estricta en relación al acopio de desechos de la industria minera. Es por esto mismo que a pesar de

haber ya afrontado el tema con la población, la mayoría de la industria es incapaz de conjugar su desarrollo con el de las comunidades cercanas a la explotación de tal manera que se preserve su estilo de vida como el ecosistema (Cristobal, 2018).

2.1.3 Antecedentes normativos en Perú

En el Perú aún está pendiente la regularización de presas de relaves en ámbitos generales, lo que se tiene es más que nada una legislación donde se le exige al concesionario (contratistas) unas medidas especiales a tomar. Paullo y Segovia (2020) describieron las medidas de la siguiente manera:

- La construcción de los depósitos de relaves debe basarse en estudios geotécnicos previos a la etapa de operación,
- Priorizar el uso de sólidos contenidos en los relaves para optimizar el área de disposición final,
- Priorizar la circulación del agua contenida en los relaves al proceso de beneficio,
- Establece la necesidad de utilizar materiales impermeables y sistemas de control. (p. 6, 7)

Para terminar el usuario está en la condición de garantizar todas las medidas necesarias para el buen funcionamiento de la presa, es decir que se asegura la estabilidad física y química de los elementos de los residuos dentro de la presa.

El Ministerio de Energía y Minas (MINEM) publica en el año 1997 la “Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Desechos Sólidos de Mina”, donde se da la finalidad de proporcionar una perspectiva general de los asuntos de estabilidad de taludes en cuestión de diseño, planeamiento, funcionabilidad, operación, mantenimiento y cierre de depósitos de relaves (Paullo y Segovia, 2020).

A continuación, se presenta la Tabla N°1, la cual indica los métodos y hace énfasis en los factores que se recomienda medir según la entidad.

Tabla N°1

Recomendaciones de monitoreo

Medición e inspección visual diaria de todos los factores que influyen directamente en la seguridad de la presa	<p>Ancho de playa</p> <p>Revancha</p> <p>Posición a nivel freático</p> <p>Movimiento horizontal y vertical de la cresta de la presa de arranque y talud aguas abajo</p> <p>Todos los procedimientos de disposición de relaves</p>
Medición y pruebas de que todos los factores relacionados con la evaluación de estabilidad en cada etapa de construcción y especialmente cuando se aproxima a la altura máxima final	<p>Distribución y zonificación de los relaves depositados</p> <p>Presión de poros</p> <p>Sedimentación diferencial</p> <p>Sismicidad y presión dinámica de poros y características dinámicas de los relaves depositados</p> <p>Revisión de consolidación, sedimentación y estabilidad en la altura final durante los años de elevación de la presa</p>
Mediciones que sirven para mejorar las técnicas de relleno hidráulico	<p>Ancho de playa</p> <p>Tamaño de partícula inicial de los relaves</p> <p>Densidad de pulpa</p> <p>Densidad de pulpa desde cada salida de la descarga de gruesos</p> <p>Distribución de los relaves depositados a lo largo de la playa según el tamaño de partícula, densidad y propiedades mecánicas del suelo</p>

Fuente: MINEM (1998)

El MINEM, vuelve a publicar para el año 2006 la “Guía de Elaboración de Planes de Cierre de Minas”, esta guía nos indica los procedimientos a tratar y argumentos a ejecutar para la incrementación de la estabilidad de las represas. Estas pasarían por un mejor control de calidad en cuanto a los procedimientos constructivos donde se resaltaría la estabilidad de las superficies expuestas, negar la construcción con el método de aguas arriba.

Nos indica también un nuevo control de monitoreo donde se describirá todas las acciones a tomar en cuando a las inspecciones en caso de las posibles fallas causadas por terremotos, lluvias, aluviones, etc.

- a) DS N° 40-2014-EM: “Este decreto indica directamente que está prohibido la construcción de presa de relaves con el método de aguas arriba, así como la disposición submarina o subacuática de desmontes, relaves y/o solidos de la actividad minera” (MINEM, 2014).

2.2 Investigaciones relacionadas con el tema

2.2.1 Investigaciones internacionales

De La Cruz (2017) en su investigación definió una metodología con el Árbol de Fallos (Fault Tree Analysis-FTA) que permite determinar las causas que condicionan la rotura de las presas de relaves y su liberación catastrófica al medio ambiente, teniendo como conclusión que la metodología permite determinar las causas o los factores naturales o antropogénicos que condicionan el fallo de una presa de relaves y su liberación de material al medio ambiente.

Kheirkhah y Amiri (2020) en su investigación evaluaron los riesgos ambientales de la represa de la mina de cobre Sungun utilizando el método EFMEA para evitar fugas o fallas accidentales de la presa, concluyendo que el método de análisis de los modos y efectos de la falla ambiental (con respecto al parámetro de no detección) es un método adecuado y eficiente para evaluar los riesgos ambientales en relaves.

2.2.2 Investigaciones nacionales

Paullo y Segovia (2020) en su investigación determinaron los parámetros geotécnicos de Presa de Relaves N°3 de la unidad Minera Pallancata, para luego cuantificar los riesgos de distintos escenarios asociados a eventos que pudiesen ocurrir y las consecuencias que estos conllevarían con la pérdida de vidas, el daño al medio ambiente y a las estructuras que se encuentran aguas debajo de la presa; el resultado obtenido de estas evaluaciones les dio un riesgo medio y aceptable, lo que corroboró las hipótesis dadas.

De La Cruz y Valderrama (2021) en su investigación evaluaron los riesgos de un depósito de relave inoperativo en la cabecera de la cuenca del río Rímac, Chicla – Huarochirí – Lima; considerando la incorporación de variables geotécnicas y aplicando el manual del CENEPRED, llegaron a la conclusión de que el valor de riesgo se ubica dentro del nivel de riesgo muy alto para ambos casos.

Arias (2021) en su investigación trató cuestiones que son específicas a emplazamientos de una manera práctica, con intención de mejorar continuamente el desempeño de la industria minera, ayudando a los titulares de la actividad minera a utilizar las mejores prácticas de ingeniería y conforme a la legislación aplicable que incluyan criterios medioambientales y de seguridad; desde la selección y el diseño del emplazamiento, a través de la construcción y operación, hasta el cierre definitivo. El modelo de gestión implementado en una presa en operación demostró cumplir sus objetivos, reflejando una tendencia a reducir la cantidad de incidentes de seguridad y de medio ambiente; el modelo de gestión para la gestión de presas de relaves puede ser mejorado continuamente porque está adecuado al ciclo de Edwards Deming (planificar, hacer, verificar y actuar).

Calvo (2021) en su investigación realizó la caracterización de los riesgos presentes durante el crecimiento horizontal y vertical, de presas de relaves de mediana minería del Departamento de Ayacucho; con la finalidad de establecer controles que permitan reducir la probabilidad de accidentes e incrementar la tasa de retorno de trabajadores a sus hogares sanos y seguros todos los días.

Romero (2018) en su investigación determinó el método para identificar los peligros, evaluación de riesgos y determinación de controles (IPERC) en base al apartado 4.3.1 de la norma OHSAS 18001:2007 en el recrecimiento de la presa de relaves etapa 2 – Toromocho, Minera Chinalco - Unidad Yauli – Junín.

2.2.3 Artículos relacionados con el tema

Lyu, Chai, Xu, Qin y Cao (2019) en su artículo proporcionan una referencia para el diseño y la construcción de las presas de relaves y reducir las ocurrencias de fallas, teniendo como conclusión que las fallas de cada presa

de relaves involucran factores de ingeniería y humanos y que estos factores pueden evitarse.

Menéndez y Muñoz (2021) en su artículo discuten y analizan los efectos de la contaminación del agua y suelo producto de los residuos de relaves mineros, teniendo como conclusión que existe una urgencia imperiosa del estudio sobre el impacto de contaminación de los relaves mineros sobre la salud humana y el ecosistema.

Concha y Lall (2017) en su artículo revisan fallas históricas de las presas de relaves los mecanismos de falla y las prácticas actuales de diseño y evaluación de riesgos, recopilan datos sobre fallas de represas de relaves reportadas en el pasado, sus causas y aspectos de diseño de fuentes bibliográficas, y presentan una metodología para realizar una evaluación cualitativa de la exposición a las presas de relaves considerando los atributos de la presa y las características del área aguas abajo para obtener un índice de calificación de riesgo (HR).

2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

2.3.1 Características y propiedades de relaves mineros

Las características por los que se solicitan las presas son que los relaves siempre tienden a tener su estructura granular más amplia que cualquier otro, es decir que estas varían entre los 50 – 200 un, mayormente dado que están siempre en estado sólido. (Hernández y Guardado, 2010)

2.3.2 Impacto ambiental de la actividad minera

Son los hechos y/o actividades que tratan en su mayoría sobre los resultados y efectos que transmiten todos los relaves mineros en lo que respecta a su depósito y confinamiento respectivamente.

También se le asocia a los posibles daños causados en ríos, lagos, lagunas, suelo y atmósfera. En lo que respecta al aire, este puede contaminarse con impurezas sólidas, estos residuos que se encuentran en el aire en algunos casos pueden llegar a penetrar los pulmones con enfermedades que pueden complicarse según el sistema inmune de cada persona.

En la afectación de aguas superficiales, siempre es afectada por residuos sólidos finos que siempre se encuentran de su llegada de las áreas de exploración. Por eso es común pensar que los sistemas de estabilidad de taludes son fijos, es decir típicos al momento de diseñar la estructura. Pero por la variedad de tipos de terrenos que existe en el Perú y la variedad de suelos agrestes es difícil encontrar el mismo diseño de un talud para la represa.

La estabilidad de los taludes va a variar para cada represa a ejecutar, ya que con el pasar de los años hemos tenido la experiencia de las distintas clases de fenómenos naturales que podemos afrontar en la variedad de climas que hay en el país, especialmente en las zonas altoandinas en las que afecta bastante las lluvias, granizadas, huaycos, etc.

Todo tipo de estructura que se adecua a la forma geotécnica que requiere el trabajo tiene siempre una alta probabilidad razonable de presentar problemas durante el periodo de vida útil de la estructura, y que dicha estructura tenga un buen funcionamiento, pero con un alto costo que pueda generar dudas al momento del diseño. La evaluación de riesgo que da la estabilidad de la estructura es llamada el “factor de seguridad global” o simplemente “factor de seguridad”.

2.3.3 Fases de tiempo de vida de las presas de relaves

a) Construcción

El desarrollo de un depósito de relave implica por lo general, una importante etapa de construcción. Aunque estas actividades pueden continuar durante la vida de la instalación, la fase de «construcción» se refiere aquí a las actividades iniciales anteriores al arranque de la concentradora. Los impactos ambientales durante este tiempo pueden incluir calidad del aire (polvo) y calidad del agua (derrames de sedimentos), pero éstos son de una naturaleza común a todos los demás aspectos del desarrollo inicial de una mina. (MINEM, 2015, p. 6)

b) Operación

El período de operación comienza y termina con la descarga de los relaves en las instalaciones. Esta duración es usualmente determinada por la vida de la mina, que a su vez es gobernada por factores económicos,

precios de los metales, y reservas geológicas. Los períodos típicos de operación de un depósito van de 10 a 20 años, aunque algunos están aún operando después de 90 años. El planeamiento operacional para relaves debe considerar como volumen mínimo, la cantidad total de relaves obtenibles con las reservas económicamente minables al momento de la iniciación del proyecto. Es deseable, en lo posible, incorporar una provisión para contingencias causadas por extensión de las reservas de mineral. (MINEM, 2015, p. 6,7)

c) Cierre

El período de cierre comienza al término de las operaciones de la concentradora y de la descarga de relaves. Durante este tiempo se construyen las instalaciones adicionales que puedan ser requeridas para alcanzar la estabilidad física o química a largo plazo (por ejemplo, zanjas y conductos permanentes de derivación del agua); y se inicia la rehabilitación (por ejemplo, colocando tierra de cultivo y sembrando). El período de cierre requiere el monitoreo de estos parámetros adicionales por el período de tiempo necesario para asegurar su adecuado funcionamiento y para realizar cualquier modificación necesaria. En el caso que se proporcionen fianzas, garantías, bonos u otros documentos financieros para garantizar el cumplimiento exitoso de las medidas de cierre; entonces el fin del periodo de cierre coincidirá con la devolución de los bonos fianzas, etc. de la compañía minera. En general, el tiempo de cierre puede tomar de 2 a 30 años, aunque es típico el lapso de 5 a 10 años y depende de la complejidad y requerimientos técnicos de las medidas de cierre y el monitoreo pertinente. Las medidas de cierre deberán ser tales que su implementación sea también factible en la eventualidad del cese prematuro de las operaciones, debiendo incluirse también, en el planeamiento de cierre, las condiciones de contingencia para la suspensión temporal de las operaciones. (MINEM, 2015, p. 7)

d) Post-cierre

El post-cierre o abandono comienza a continuación de la exitosa terminación de las medidas de cierre y se extiende tanto como se requiera para que la estabilidad física y química del depósito de relaves quede asegurada. Para propósitos prácticos, esto generalmente significa

indefinidamente y para circunstancias que involucran ARD ello puede alcanzar períodos de hasta 1000 años. Una implicancia importante es que las consideraciones de diseño para casos extremos tales como inundaciones y terremotos, deben ser capaces de acomodar los eventos más grandes que puedan ocurrir, potencialmente mucho más grandes que aquellos requeridos para el diseño durante el período de operación. (MINEM, 2015, p. 7)

2.3.4 Métodos de construcción de presas de relave minero

En la actualidad, existen tres métodos comunes de construcción de presas de relaves. Estos métodos son:

- Método aguas arriba
- Método aguas abajo
- Método línea central o mixto

En los tres métodos o procedimientos constructivos es frecuente que se combinen los desechos con otros materiales compatibles, con la finalidad de que la estructura tenga una mayor estabilidad y no tener problemas de asentamientos, compactación y permeabilidad. En la Figura N 3 se aprecian las secciones típicas de las presas de relaves según su método de crecimiento.

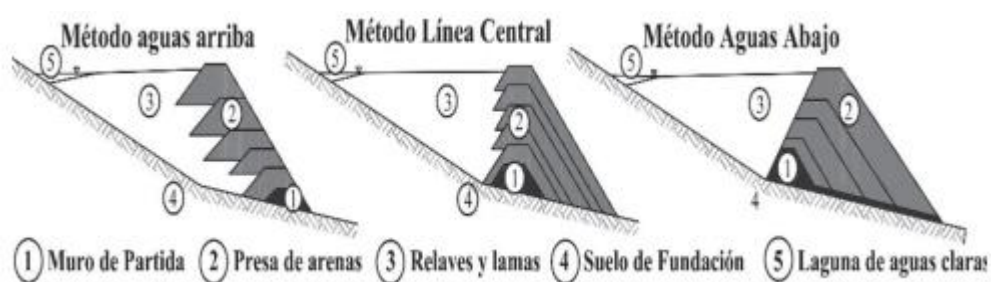


Figura N 3: Secciones típicas de presas de relaves según su método de crecimiento
Fuente: Figueroa, Solans, Gonzalez y Campaña (2017)

a) Método aguas arriba

Por información de Ramírez (2007) el método de aguas arriba se aplica al primer muro (starter dam) que está elaborado mediante materiales de terreno en campo compactado para la cual se inicia la deposición de los relaves, empleando la clasificación que se le denomina “hidrociclones”;

la parte más gruesa o arena, se descarga por el flujo inferior del hidrociclón (underflow) y se coloca junto al muro inicial, mientras la parte más fina o delgada, que sale por el flujo superior del hidrociclón (overflow) se coloca hacia el centro del tranque en un punto más distanciado del muro, para que así se va formando una especie de solidificación. Que al momento de sedimentar las partículas con más pesos de lamas y gran parte del agua escurre, formando el pozo de sedimentación. la que una vez fue libre de partículas en general en suspensión es liberada mediante un flujo de descarga, que se les denomina torres o muros de evacuación, que se utilizan bombas sumergidas y/o montadas sobre la plancha flotante. Una vez que se llena el depósito o que se encuentra próximo a llenarse, se inicia el movimiento del muro, de tal forma que al levantar a una mayor elevación con la dirección hacia aguas arriba e iniciando una nueva etapa de descarga de arenas, y peralte del muro; se prosigue así sucesivamente la construcción en la forma indicada.

Las presas de relaves del tipo aguas arriba tal como se observa en la Figura N 4 no son definitivamente apropiadas para las condiciones sísmicas en virtualmente todos los lugares del Perú, excepto posiblemente en condiciones excepcionales donde cualquier falla de flujo puede ser confinada por una barrera artificial o natural, tal como una depresión topográficamente cerrada.

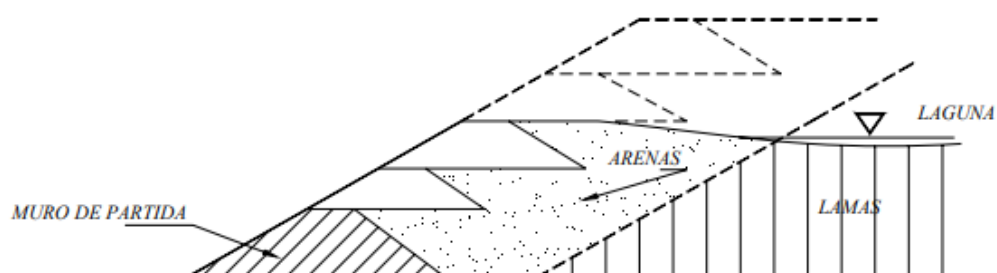


Figura N 4: Método aguas arriba
Fuente: Ramírez (2007)

b) Método aguas abajo

La construcción se inicia también con un muro de partida de material de empréstito compactado desde el cual se vacía la arena cicloneada hacia el lado del talud aguas abajo de este muro y las lamas se depositan hacia el talud aguas arriba. Cuando el muro se ha peraltado lo suficiente, usualmente 2 a 4 m., se efectúa el levante del muro, desplazando los hidrociclones a una mayor elevación en la dirección hacia aguas abajo y comenzando una nueva etapa de descarga de arenas y peralte del muro. A veces se dispone también de un segundo muro pre-existente aguas abajo (ver Figura N 5). Las arenas se pueden disponer en capas inclinadas, según el manto del talud del muro de partida, o bien, disponerlas en capas horizontales hacia aguas abajo del muro de partida. (Ramírez, 2007, p.9) “Este método de aguas abajo requiere disponer de un gran volumen de arenas y permite lograr muros resistentes más estables del punto de vista de la resistencia sísmica” (Ramírez, 2007, p.9).

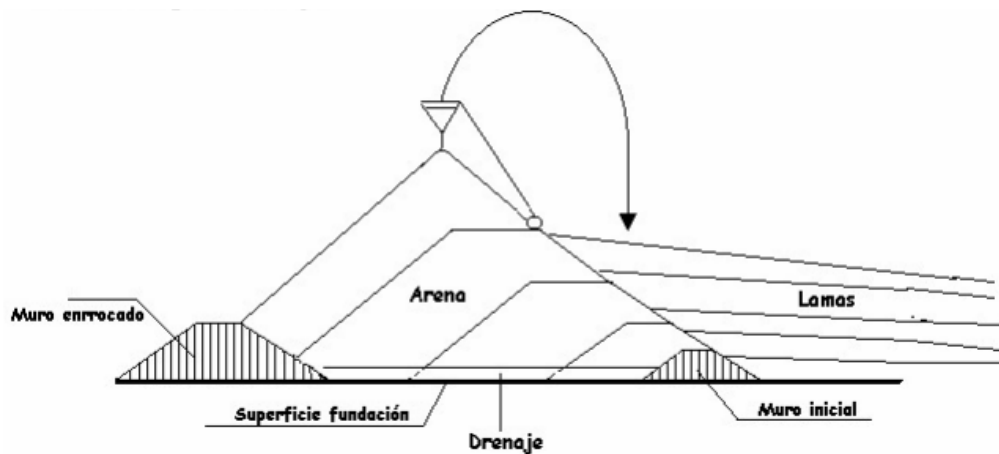


Figura N 5: Método aguas abajo (capas de arenas inclinadas)
Fuente: Ramírez (2007)

c) Método línea central o mixto

Se inicia al igual que los métodos anteriores con un muro de partida de material de empréstito compactado, sobre el cual se depositan las arenas cicloneadas hacia el lado de aguas abajo y las lamas hacia el lado de aguas arriba. Una vez completado el vaciado de arenas y lamas correspondiente al muro inicial, se eleva la línea de alimentación de arenas y lamas, siguiendo el mismo plano vertical inicial de la berma de

coronamiento del muro de partida. Lo que permite lograr un muro de arenas cuyo eje se mantiene en el mismo plano vertical, cuyo talud de aguas arriba es más o menos vertical, y cuyo talud de aguas abajo puede tener la inclinación que el diseño considera adecuada. (Ramírez, 2007, p.10) “Este método requiere disponer de un volumen de arenas intermedio entre los 2 métodos anteriores, y permite lograr muros suficientemente estables” (Ramírez, 2007, p.10).

2.3.5 Factor de seguridad

El factor de seguridad “FS”, para un talud se define generalmente como la relación entre la resistencia al corte disponible con respecto del esfuerzo cortante sobre la superficie de falla crítica. Las características de esfuerzos y deformaciones de la mayoría siempre se caracterizan por que puede presentar deformaciones plásticas relativamente grandes en cuanto se aproximan los esfuerzos cortantes aplicados a la resistencia al corte del material.

En el diseño de un talud o depósito, el factor de seguridad debe ser mayor a la unidad de volteo. Todo esto se da siempre y cuando los relaves que puedan abastecerse en la presa no afecten su capacidad de carga y/o resistencia de la misma.

Una vez que el relave es capturado de una operación unitaria anterior por un sistema Venturi, es transportado desde una cañería de alimentación a un estanque acondicionador, donde el objetivo es diluirlo y homogenizarlo hasta obtener la concentración de sólidos óptima para que ingrese al feedwell del espesador, que es un cajón interno de alimentación donde su principal objetivo es realizar la mezcla de relave con agua y floculante alimentado por otra línea, actuando como desaireador eliminando las burbujas de aire que perjudican el contacto floculante-sólido, a su vez disminuyendo la turbulencia a la entrada del espesador.

2.3.6 Evaluación de riesgos

La mitigación del riesgo es un paso lógico que sigue a la estimación del riesgo, la estructura de análisis de riesgos se utiliza para identificar y priorizar aquellos componentes del sistema que probablemente se

beneficiarían de las mejoras. Si el riesgo calculado del sistema existente se considera demasiado alto, se proponen alternativas para reducir el riesgo de falla, estas alternativas se incorporan al modelo de riesgo y se realiza una reevaluación para estimar sus impactos. Después de un estudio repetido utilizando diferentes alternativas, los tomadores de decisiones pueden recibir alternativas adecuadas y costos estimados para su consideración en la mejora de la seguridad general de la presa. En última instancia, este paso en el proceso de evaluación de riesgos es el más importante. Es el objetivo principal al que conducen todos los demás procedimientos. (Paullo y Segovia, 2020, p. 37)

Después de mitigar los riesgos se precede a la aceptación del riesgo que es una decisión informada para aceptar la probabilidad y las consecuencias de un riesgo particular. La aceptación del riesgo está acoplada a la evaluación de reducción del riesgo y es la base para decidir qué riesgo residual se aceptará para la comunidad y las estructuras afectadas. En algunos países, existe un cierto nivel de riesgo que se define como el límite de riesgo inaceptable. Los factores de seguridad recomendados por las guías generales de diseño para trabajos de ingeniería y la información de apoyo y las recomendaciones de los analistas de riesgos e ingenieros proporcionan información importante, pero son los tomadores de decisiones los que finalmente toman la decisión. A veces existen diferencias entre lo que se considera tolerable para las estructuras existentes y lo que se requiere para las nuevas estructuras. El riesgo individual es el total incremento del riesgo impuesto por una presa. Por lo tanto, los riesgos aportados por todos los modos y escenarios de falla deben combinarse para obtener el riesgo general. (Paullo y Segovia, 2020, p. 37,38)

Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) propuso en la guía “Guidelines on Risk Assessment” del año 1994, que el riesgo individual se calcularía como el riesgo individual promedio sobre la población en riesgo o como riesgo individual para la persona en mayor riesgo. La probabilidad condicional promedio de muerte, dada la falla de la presa, es la pérdida de vidas esperada dividida por la población en riesgo. Sin embargo, se afirma que el riesgo individual para la persona en mayor riesgo es el valor que realmente importa. (Paullo y Segovia, 2020, p. 38)

Los criterios de riesgo individual según ANCOLD (1994) son:

- Valor límite del riesgo individual promedio: $1E-05$ por año,
- Valor límite de riesgo individual para la persona con mayor riesgo: $1E-04$ por año,
- Valor objetivo del riesgo individual medio: $1E-06$ por año,
- Valor objetivo del riesgo individual para la persona con mayor riesgo: $1E-05$ por año.

El riesgo social (el riesgo anual de un evento que resulte en un número de muertes igual o superior a un número determinado) tienen como objetivo tener en cuenta la aversión de la sociedad a los desastres que implican múltiples muertes. (Paullo y Segovia, 2020, p. 38)

De acuerdo con ANCOLD (1994) las características de los criterios de riesgo social son:

- Se preocupan solo por el número de vidas perdidas, y no por las identidades de las personas involucradas;
- Son basado en eventos. Por lo tanto, cada escenario individual de falla de presa se considera por separado al juzgar si una presa cumple.

La Figura N 6 muestra la relación entre la probabilidad de falla y el número de muertes debido a la falla de una presa.

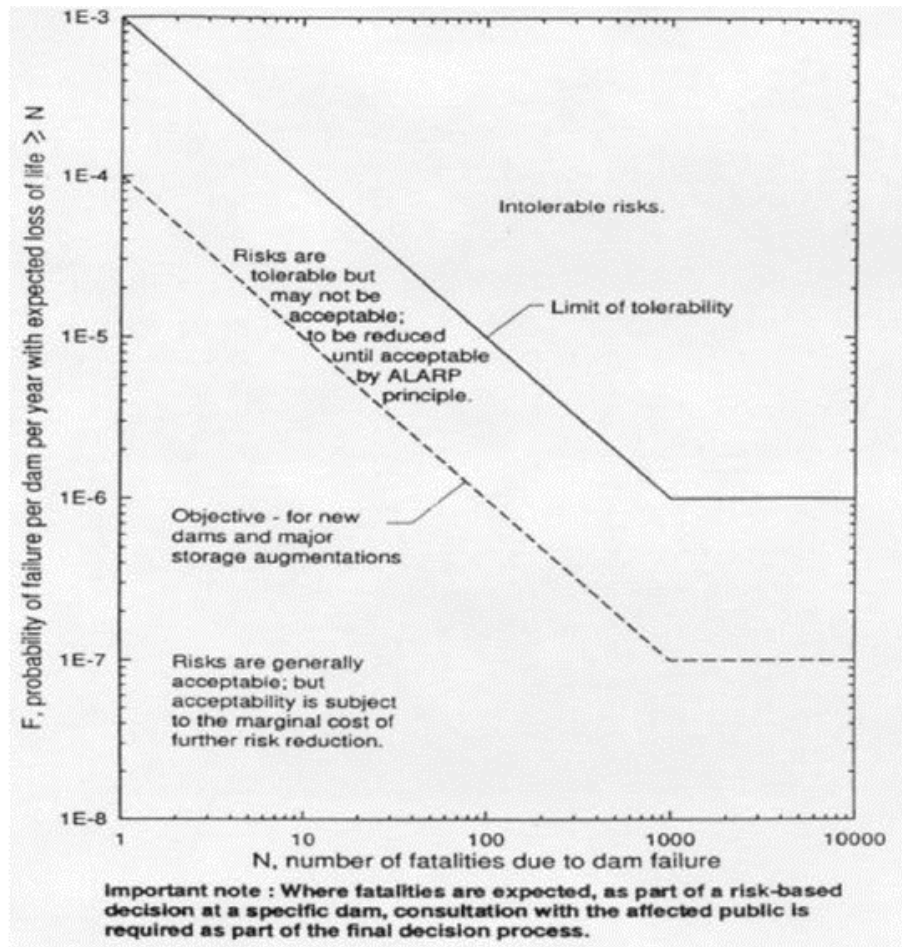


Figura N 6: Relación entre la probabilidad de falla y el número de muertes debido a la falla de una presa
Fuente: ANCOLD (1998)

2.3.7 Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)

El modo de fallos y análisis de efectos es el proceso de revisar tantos componentes, ensamblajes y subsistemas como sea posible para identificar posibles modos de falla en un sistema y sus causas y efectos. Para cada componente, los modos de falla y sus efectos resultantes en el resto del sistema se registran en una hoja de trabajo FMEA específica. Existen numerosas variaciones de tales hojas de trabajo. (Rausand y Hoylan, 2004, p. 88)

La metodología FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), para el análisis de los modos y efectos o consecuencias de falla considera la siguiente secuencia:

- Identificar los modos potenciales de falla
- Evaluación de causas potenciales de falla

- Identificación del área de riesgo y del dueño de riesgo
- Efectos o consecuencias de la falla
- Mecanismos de control existentes
- Probabilidad de falla y la consecuencia asociada
- Calificación de riesgo actual
- Mecanismos de control adicionales
- Calificación de riesgo residual

2.3.8 CDA Dam Safety Guidelines

Las directrices de seguridad de presas se han convertido en un importante documento de referencia para la seguridad de las presas en Canadá e internacionalmente. Las directrices consisten en principios que son aplicables a todas las presas y un resumen de procesos y criterios para la gestión de la seguridad de las presas de acuerdo con los principios.

El ingeniero de represas responsable o quien toma las decisiones debe evaluar e interpretar la información proporcionada en las Directrices de seguridad de represas, identificar cualquier consideración que no se aborde en esos documentos, tener en cuenta los avances en la comprensión y determinar los requisitos de seguridad de represas apropiados para una situación específica. (Canadian Dam Association, 2013)

a) Análisis y evaluación

La seguridad de las presas exige un diseño, una construcción, una operación y un mantenimiento seguros que se ajusten a las normas y prácticas reconocidas. Sin embargo, el nivel de seguridad no se puede medir fácilmente con métodos tradicionales. Se han adoptado métodos, normas y procedimientos específicos con la expectativa de que, al seguir el enfoque prescrito, se logrará el objetivo de seguridad deseado, aunque el nivel de protección todavía no se conoce realmente.

La gestión de la seguridad se ocupa en última instancia de la gestión del riesgo y debe proporcionar respuestas a las siguientes preguntas:

- ¿Qué puede salir mal?
- ¿Cuál es la posibilidad (probabilidad) de que suceda?
- Si ocurre, ¿cuáles son las posibles consecuencias?

Para comprender cómo se espera que funcionen las estructuras y qué nivel de desviación de la condición normal es tolerable, los análisis de seguridad de la presa deben considerar la gama completa de condiciones aplicables. El diseño, la construcción y la operación deben considerarse en el análisis para garantizar que se haya logrado la intención del diseño. Una evaluación de riesgos formal es un método estructurado y sistemático para comprender los posibles resultados, los impactos de las interacciones y las áreas de importancia e incertidumbre. En el enfoque tradicional de la gestión de la seguridad de las presas, los reglamentos y normas se basan en gran medida en conceptos deterministas de confiabilidad. La probabilidad de ocurrencia de peligros se aborda explícitamente solo para inundaciones y terremotos, mientras que otros eventos adversos o elementos de influencia externa se introducen a través de la selección de eventos iniciadores y escenarios de consecuencias.

El enfoque tradicional y el enfoque basado en el riesgo se complementan hasta cierto punto, en el sentido de que el objetivo general en ambos casos es garantizar que la "represa sea segura" en la medida de lo razonable y factiblemente posible, dadas las limitaciones de cada enfoque. En general, todas las evaluaciones de seguridad de presas se llevan a cabo en el contexto del riesgo, con prácticas deterministas probadas que se utilizan en diversos grados para reducir la carga analítica asociada con los métodos probabilísticos y para respaldar las decisiones cuando los valores de riesgo cuantificables son inalcanzables. La información requerida para una evaluación determinista también se utiliza en una evaluación probabilística. En este último, se introduce información adicional y análisis más complejos para dar cuenta simultáneamente de las incertidumbres en los modelos y los procesos físicos que afectan a la presa. El enfoque probabilístico se puede utilizar para validar resultados deterministas y calcular resultados más precisos cuando los datos estén disponibles. Por lo tanto, dentro de las limitaciones de la practicidad, una evaluación probabilística puede proporcionar una base mejorada para la toma de decisiones que equilibre los beneficios sociales y de otro tipo y los riesgos residuales de un esfuerzo.

Los dos enfoques para la toma de decisiones sobre la seguridad de las presas se describen a continuación. Cabe señalar que la fijación de niveles mínimos de seguridad debe ser un asunto de política y regulación pública. Los análisis y evaluaciones de ingeniería se utilizan para confirmar y demostrar el cumplimiento o desarrollar medidas alternativas para cumplir con los requisitos identificados.

2.3.9 Guide to the Management of Tailings Facilities (MAC)

“Esta guía de relaves brinda orientación sobre las mejores prácticas para la gestión segura y ambiental y socialmente responsable de las instalaciones de relaves” (The Mining Association of Canada, 2017, p.1).

The Mining Association of Canada (2017) definió la finalidad de la guía en tres aspectos:

- Proporcionar un marco para la gestión de las instalaciones de relaves,
- Ayudar a los propietarios de instalaciones de relaves a desarrollar sistemas de gestión de relaves que incluyan criterios ambientales y de seguridad,
- Mejorar la consistencia de la aplicación de principios de ingeniería y gestión razonables y prudentes a las instalaciones de relaves. (p.1)

Los relaves y cualquier agua asociada deben manejarse de manera responsable. La gestión responsable incluye la prevención de impactos a la salud y seguridad humana, el medio ambiente y la infraestructura. Los relaves se gestionan en instalaciones de ingeniería que se planifican, diseñan, construyen, operan, cierran y mantienen en el período posterior al cierre a largo plazo (es decir, durante todo el ciclo de vida de la instalación) de manera coherente con la necesidad de una gestión responsable. La gestión responsable se define mediante evaluaciones integrales de los riesgos asociados con una instalación de relaves, tanto físicos como químicos, que evalúan los posibles impactos en la salud, la seguridad, el medioambiente, la sociedad, el negocio, la economía y las reglamentaciones, y la implementación de los controles apropiados para gestionar aquellos riesgos de manera eficaz. (The Mining Association of Canada, 2017, p.1)

Según las recomendaciones del Guide to the Management of Tailings Facilities, los modos de falla para la elaboración del análisis de riesgo incluyen lo siguiente:

- Falla por rebalse (Overtopping);
- Evento sísmico que produce licuación en la fundación del dique;
- Evento sísmico que produce falla en el dique;
- Falla por Tubificación (Piping);
- Inestabilidad del talud;
- Alto nivel de infiltración;
- Falla en el revestimiento del dique que impacta sobre la integridad de la estructura del dique; y
- Falla ambiental en el control de generación de polvo (con consecuencias medioambientales).

La Guide to the Management of Tailings Facilities considera los controles mínimos necesarios para mitigar los riesgos, los cuales enumeran a continuación:

- Caracterización e investigación del sitio;
- Diseño - estabilidad estática y sísmica, controles de tubificación, drenaje y controles de desborde;
- QA/QC de construcción y operación;
- Monitoreo de presión de poros y deformaciones;
- Revisión técnica independiente;
- Mantenimiento e inspecciones del dique;
- Monitoreo de flujos y volúmenes de agua;
- Mitigación de la lixiviación / drenaje ácido y control de las descargas de aguas subterráneas y superficiales.

a) Evaluación y gestión del riesgo

“La evaluación y gestión del riesgo es esencial para la gestión eficaz de las instalaciones de relaves, y es parte integral de todos los elementos del marco de gestión de relaves y de todo el ciclo de vida” (The Mining Association of Canada, 2017, p.10).

Los riesgos potenciales asociados con las instalaciones de relaves, incluidos los riesgos físicos y químicos, así como los riesgos operativos,

organizativos, financieros y de gestión, deben ser identificados. Las instalaciones deben concebirse, diseñarse, construirse, operarse y cerrarse de manera que gestione los riesgos de manera efectiva para lograr los objetivos de minimizar el daño. Los riesgos deben reevaluarse a lo largo del ciclo de vida, y como parte de cualquier cambio material en la instalación de relaves, como una extensión de la vida útil de la mina o una suspensión temporal de operaciones. A medida que cambia el perfil de riesgo de la instalación, las medidas de gestión de riesgos deben actualizarse respectivamente. (The Mining Association of Canada, 2017, p.10)

Para instalaciones nuevas y existentes, la evaluación de riesgos debe considerar los impactos potenciales del cambio climático, incluidos los fenómenos meteorológicos extremos (sequía prolongada o precipitaciones intensas) y los impactos potenciales en permafrost en áreas de alta latitud o altitud. La gestión de riesgos debe incluir medidas para garantizar que las instalaciones de relaves son lo suficientemente resilientes como para que los riesgos sigan gestionándose adecuadamente en condiciones climáticas cambiantes, particularmente a largo plazo, durante el cierre y post-cierre. (The Mining Association of Canada, 2017, p.11)

Un aspecto de la gestión de riesgos es la identificación, el desarrollo y la implementación de controles, que son controles relacionados con la gestión de las instalaciones de relaves que deben implementarse efectivamente para evitar que ocurra un incidente grave o para limitar las consecuencias si ocurre un incidente grave. Los pasos clave en la identificación, desarrollo e implementación de los controles críticos, son implementar un sistema de gestión de relaves, identificar y evaluar:

- Eventos potenciales con consecuencias no deseadas;
- Modos de falla plausibles y otros riesgos asociados;
- Controles críticos asociados con cada modo de falla plausible;
- Indicadores de desempeño asociados con estos controles;
- Acciones definidas y sistemáticas para implementar los controles;

- Actividades para mantener, verificar e informar sobre la eficacia de los controles; y
- Acciones predefinidas para el manejo adaptativo.

La implementación de un gobierno corporativo apropiado, incluida la implementación de un sistema de gestión, es una forma de control crítico. Sin embargo, la mayoría de los otros controles críticos son más específicos a los riesgos asociados con una determinada instalación de relaves. Por lo tanto, algunos controles críticos pueden ser implementados y monitoreados a nivel corporativo, mientras que otros son implementados y monitoreados a nivel de sitio específico. (The Mining Association of Canada, 2017, p.11)

b) Gestión de riesgos

La identificación y mitigación de riesgos son principios fundamentales de una buena gestión, y esto se aplica a la gestión de relaves. Las evaluaciones de riesgos deben completarse con la frecuencia necesaria para cumplir con los objetivos de gestión de relaves establecidos para cualquier instalación determinada. El nivel de riesgo aceptable debe definirse en el contexto de la instalación y para su fase de vida específica, teniendo en cuenta la probabilidad y las consecuencias de fallas catastróficas y las perspectivas del propietario, los reguladores y COI (Comunidades de interés). (The Mining Association of Canada, 2017, p.18)

La evaluación y gestión de riesgos debe tener en cuenta:

- Riesgos físicos y químicos de la instalación de relaves.
- Riesgos ambientales tales como terremotos, derrumbes o avalanchas, que puedan impactar en la instalación.
- Otros riesgos externos al propietario y la instalación, incluidos los riesgos normativos y de permisos (por ejemplo, no obtener los permisos de manera oportuna o permisos que no están alineados con la intención de diseño de la instalación de relaves).

c) Marco y enfoque de la gestión de riesgos

La industria minera opera dentro de una cultura de gestión de riesgos orientada a la gestión responsable de riesgos. Un marco de gestión de

riesgos debe estar integrado dentro de la estrategia general de cada organización, y políticas y prácticas operativas. En general, la gestión de riesgos implica la identificación, evaluación, y tratamiento de riesgos. En el contexto de la gestión de relaves, un enfoque de gestión de riesgos facilita la revisión y mejora continua de las estrategias de gestión de riesgos a lo largo del ciclo de vida de una instalación de relaves. Por lo tanto, debe ser flexible, iterativo y receptivo al cambio. Además, una eficaz y transparente gestión de riesgos requiere un nivel apropiado de competencia en la toma de decisiones para evaluar, recomendar y aprobar los riesgos técnicos, de gestión, ambientales, sociales y económicos relacionados con manejo de relaves. (The Mining Association of Canada, 2017, p.39)

La implementación de un enfoque basado en el riesgo requiere que el propietario de una instalación de relaves primero defina el perfil de riesgo de la instalación, teniendo en cuenta el entorno operativo interno y externo, y factores cuantitativos y cualitativos. Una vez que se ha establecido este contexto, se puede realizar una evaluación de riesgos para la instalación de relaves. (The Mining Association of Canada, 2017, p.39)

Como parte de esto, los propietarios deben considerar el "riesgo comercial" en el contexto de una brecha en una instalación de relaves u otro evento significativo no deseado. La mayoría de las principales empresas mineras emplean riesgos integrales sistemas de gestión que podrían usarse para caracterizar los impactos comerciales potenciales, como los de salud y seguridad de la fuerza laboral, pérdida de producción, reputación corporativa y capitalización de mercado. En realidad, el riesgo comercial de un propietario puede tener potencialmente más consecuencias y justificar un diseño más estricto, requisitos de construcción y operación que de otro modo se determinarían sobre la base de otros estándares y/o regulaciones de la industria. (The Mining Association of Canada, 2017, p.39)

Existen dos enfoques básicos para la evaluación de riesgos:

- Identificar los riesgos potenciales y determinar la probabilidad de una gama de posibles consecuencias de esos riesgos; y

- Determinar modos de falla creíbles y evaluar qué condiciones potenciales (peligros) y sus probabilidades, podría resultar en esos modos de falla. La aplicación de ambos enfoques proporciona una sólida evaluación de los riesgos.

En general, una evaluación de riesgos intenta responder a las siguientes preguntas fundamentales:

- ¿Qué puede pasar (evento no deseado) y cómo (modo de falla)?
- Si sucede, ¿cuáles son las consecuencias?
- ¿Cuál es la probabilidad (probabilidad) de que suceda tal evento no deseado?
- ¿Se puede eliminar prácticamente el riesgo?
- ¿Qué se puede hacer para reducir la probabilidad?
- ¿Qué se puede hacer para reducir las consecuencias?
- ¿Es tolerable el nivel de riesgo o aceptable y lo hace requiere tratamiento adicional?

Las estrategias de gestión de riesgos suelen implicar el desarrollo y la implementación de controles de riesgo destinados a controlar o mitigar los riesgos identificados durante la evaluación de riesgos. Mediante la aplicación de estrategias de gestión de riesgos, las organizaciones toman las medidas necesarias para reducir los riesgos identificados dentro de niveles aceptables que son As Low As Reasonably Practicable (ALARP). (The Mining Association of Canada, 2017, p.40)

Estas estrategias mitigan y controlan los riesgos por uno o una combinación de lo siguiente:

- Eliminar o evitar riesgos específicos para minimizar el riesgo general en la medida de lo posible;
- Minimizar la probabilidad de que ocurra el riesgo mediante la identificación temprana y la implementación de controles apropiados;
y
- Desarrollar planes de contingencia y mitigación para las posibles consecuencias de los riesgos identificados.

Puede haber algunos riesgos que, incluso cuando se reducen a ALARP, siguen siendo inaceptables y por lo tanto requieren una reevaluación de alternativas. (The Mining Association of Canada, 2017, p.40)

d) Aplicación de herramientas de evaluación de riesgos

De acuerdo con el Boletín 139 de ICOLD, la calificación de peligro se define como el daño consecuente de un relave la falla de una presa, generalmente se evalúa en términos de su efecto potencial en las cuatro categorías de:

- Pérdida de la vida
- Daño ambiental
- Costo del daño físico
- Impacto social incluyendo la percepción pública

Estas cuatro categorías podrían utilizarse como base para realizar una evaluación de riesgos en cualquier fase de la vida (ciclo de una instalación de relaves). Al tratar de mantener estas categorías lo más genéricas posible, las cuatro enumeradas anteriormente. Las categorías podrían ampliarse de la siguiente manera:

- Salud y seguridad (incluidas posibles lesiones, degradación de la salud de las personas y pérdida de vidas);
- Medioambiental (incluido el daño medioambiental potencial y/o la degradación medioambiental);
- Financiero (incluido el aumento de costos para la operación/corporación y/o el costo de posibles daños físicos);
- Social (incluida la degradación cultural potencial y/o la percepción pública);
- Legal (incluido el incumplimiento y permisos insuficientes);
- Gestión y control operativo (incluidas herramientas de gestión inadecuadas, recursos calificados y/o financiamiento); y
- Reputación del Propietario, incluido el mercado capitalización y pérdida de acciones.

Los riesgos que se encuentran durante las diferentes fases de la mina, o durante eventos extremos que afectan la instalación de relaves, se pueden evaluar frente a las categorías enumeradas anteriormente utilizando un

modelo de análisis de modos y efectos de falla (FMEA) y una matriz típica de probabilidad-consecuencias similar a la uno que se muestra siguiente Figura N 7. Los riesgos pueden identificarse como extremos, altos, moderados o bajos. Como punto de partida, todos los conceptos de gestión presentados deben evaluarse siguiendo un enfoque basado en el riesgo y considerando todas las fases del ciclo de vida de la instalación de relaves. (The Mining Association of Canada, 2017, p.41)

Además de FMEA, existen varias otras técnicas de evaluación de riesgos que pueden ayudar en la evaluación de la probabilidad de ocurrencia de un evento no deseado y sus consecuencias para la operación, la sociedad y el medio ambiente. Algunas otras técnicas de uso común incluyen el análisis preliminar de riesgos, la simulación de Monte Carlo, el análisis de causa y consecuencia y el análisis de árboles de decisiones/eventos. Algunas de estas otras técnicas se pueden utilizar junto con una matriz de probabilidad-consecuencias. (The Mining Association of Canada, 2017, p.41)

Por ejemplo, el método de Bowtie (ver Figura N 8) podría usarse para obtener una mejor comprensión del alcance y la eficacia de los controles de riesgo, incluidos los controles críticos, que existen o podrían implementarse para la gestión de eventos con consecuencias altas o extremas. eventos de consecuencias extremas, identificados en un modelo de matriz de probabilidad-consecuencias.

Los revisores independientes deben recibir evaluaciones de riesgos y planes de gestión para la instalación de relaves en cuestión, e incluir los resultados de esas evaluaciones y planes en el alcance del RI. Los resultados resumidos de las evaluaciones de riesgos deben informarse al Funcionario Ejecutivo Responsable. (The Mining Association of Canada, 2017, p.41)

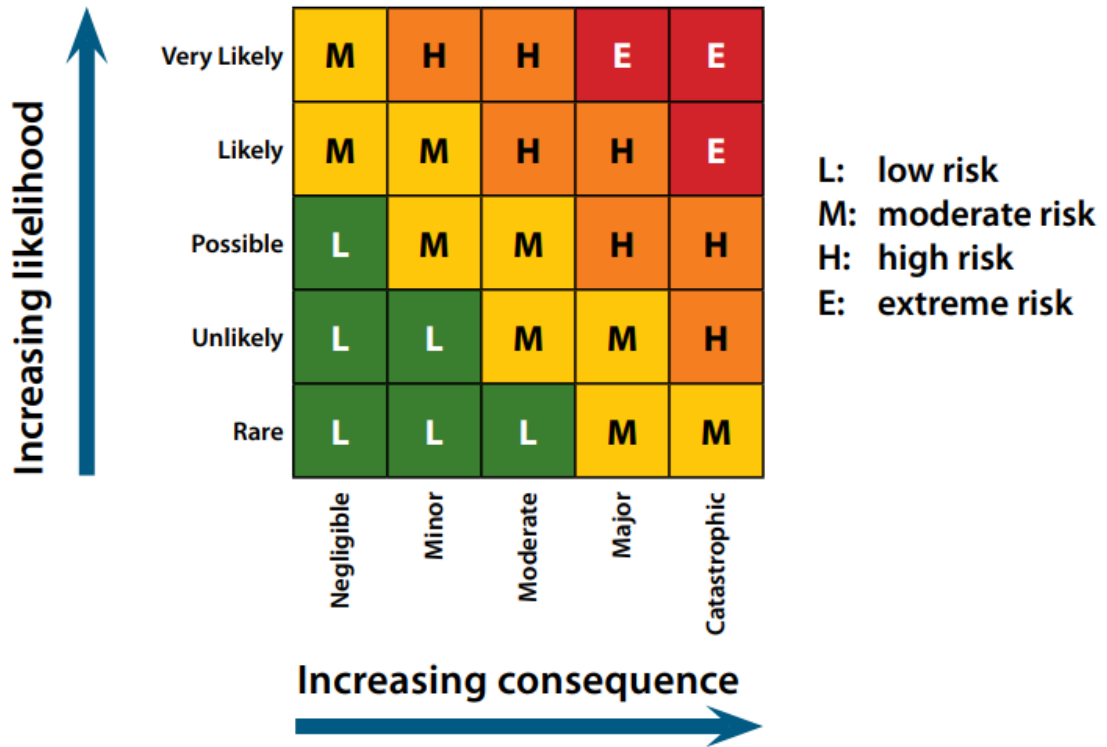


Figura N 7: Muestra de una matriz de evaluación de riesgos cualitativa típica
Fuente: MAC (2017)

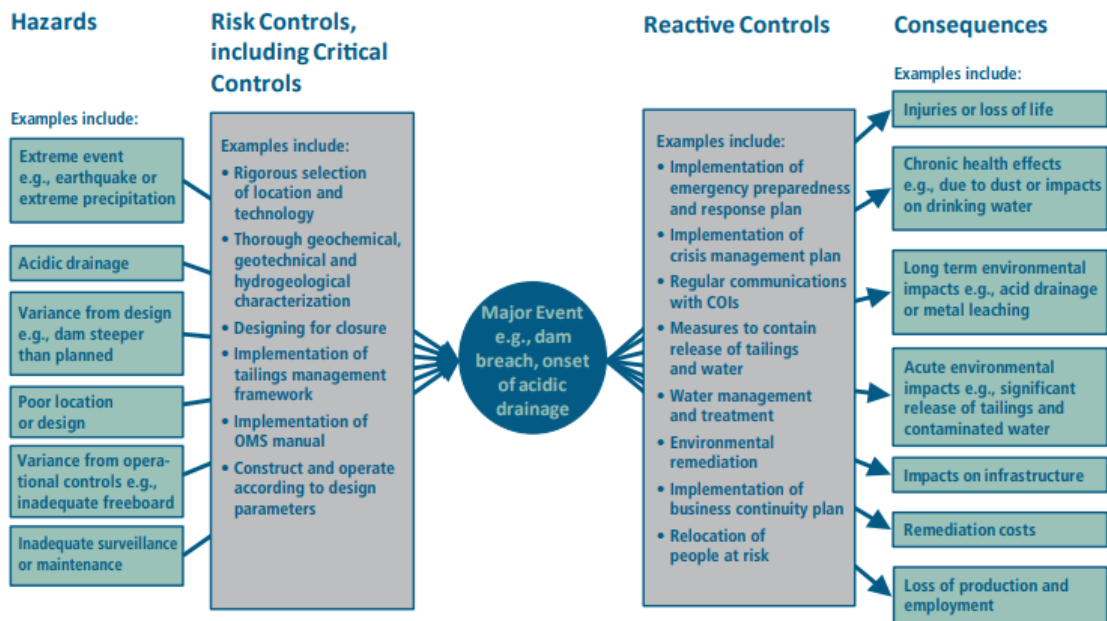


Figura N 8: Ilustración de un análisis de Bowtie
Fuente: MAC (2017)

2.3.10 Normas utilizadas en Chile

- a) Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Depósitos de Relave” (DS-248)

Es la normativa específica que aborda los relaves mineros, producto de la concentración y flotación mineral, otorgando al SERNAGEOMIN atribuciones y facultades de control y fiscalización en esta materia, facultándolo asimismo para la aplicación de sanciones en caso de contravención al mismo y a las resoluciones que para su cumplimiento se dispongan, en conformidad al Reglamento de Seguridad Minera. Este Decreto señala que se necesita una aprobación del SERNAGEOMIN para construir y operar cualquier depósito de desechos o relaves mineros. Cualquier modificación al proyecto aprobado durante la construcción u operación debe ser autorizada por el SERNAGEOMIN antes de su implementación.

- b) Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves (DSM/07/31)

Esta Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves, tiene por objetivos:

Recordar algunos conceptos básicos y generalidades sobre relaves, indicar las distintas opciones de descarga de los relaves y tipos de depósitos de relaves aceptable por la legislación Chilena; entregar algunas sencillas recomendaciones a considerarse sobre la operación y control de depósitos de relaves, destinadas principalmente dichas recomendaciones como ayuda a los pequeños productores mineros que dentro del proceso de sus faenas incluyen a los tranques de relaves; se indican también los distintos componentes y su significado de los depósitos de relaves y principalmente en extenso los de los tranques de relaves.

2.3.11 Normas utilizadas en Mexico

- a) Norma Oficial Mexicana (NOM-SEMARNAT-2003)

Establece las especificaciones para la caracterización de relaves (jal o jale) y la caracterización del sitio, los criterios para la mitigación de los impactos ambientales. Se refiere a las etapas de proyecto, construcción,

operación y post-operación de los tranques de relaves (presas de jales), y para el monitoreo.

b) Operación segura de presas (NMX-AA-175)

Se divide en 3 partes:

- Análisis de riesgo y clasificación de presas (2015)
- Inspecciones de seguridad (2016)
- Plan de acción ante emergencias (PAE-2017)

2.3.12 Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales (Cenepred)

a) Peligro

El peligro es la posibilidad de que ocurran peligros naturales potenciales en un lugar específico con una intensidad específica y dentro de un rango de tiempo y frecuencia específico.

En otros países, los documentos técnicos relacionados con la investigación de fenómenos naturales utilizan el término amenaza para referirse al peligro.

b) Identificación de probable área de influencia del fenómeno en estudio

Primero, con base en el conocimiento histórico del impacto de los fenómenos naturales en áreas geográficas expuestas, se determina las posibles áreas afectadas por fenómenos naturales. Básicamente, esto se hace recopilando sistemáticamente toda la información detallada (geografía, infraestructura, y servicios básicos).

c) Peligros generados por fenómenos de origen natural

Una vez que se determina el área de impacto de la amenaza producida por el fenómeno natural, es necesario evaluar los parámetros del fenómeno de intervención (mecanismo de generación), lo que ayuda a evaluarlo. En la definición de los parámetros de evaluación se sigue la estructura de la clasificación de peligros. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.33)

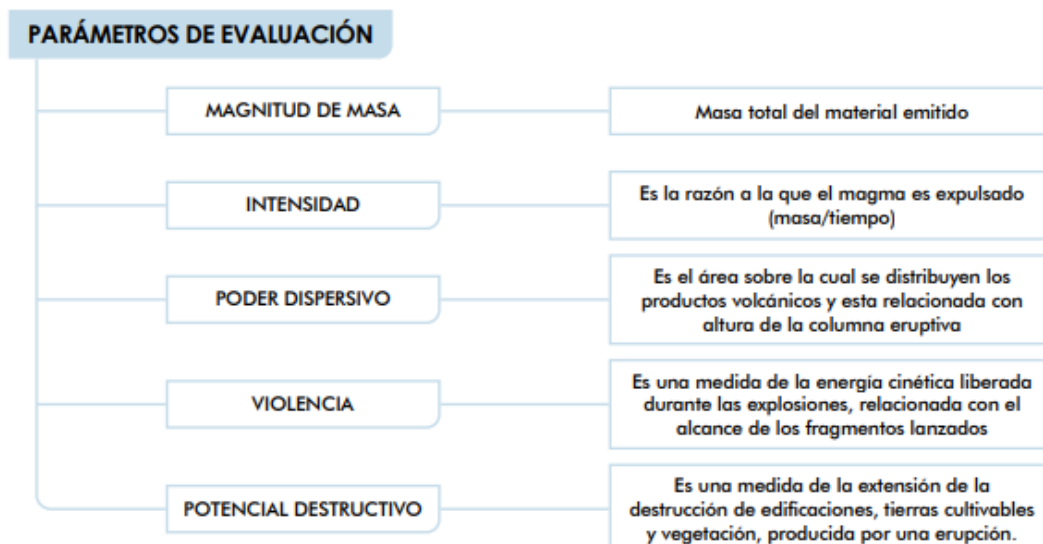


Figura N 9: Parámetros de evaluación
Fuente: Cenepred (2015)

d) Parámetros de evaluación

- Información histórica de episodios

La caracterización de los fenómenos naturales nos muestra un panorama general de las formas específicas en que se manifiestan a nivel nacional, regional o nacional. local. Sin embargo, es fundamental conocer su recurrencia para poder desarrollar estrategias para prevenir y / o reducir sus posibles efectos negativos. Si bien las entidades técnicas y científicas son las encargadas de monitorear y registrar la información histórica sobre los hechos ocurridos dentro del territorio nacional, es necesario recabar información a nivel local y regional en los organismos ambientales, subdirecciones y departamentos administrativos. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.103)

- Estudios previos de peligrosidad y riesgo

De acuerdo con el artículo 4 de la Ley N ° 29664, los integrantes del SINAGERD deberán tomar el principio de acción permanente y permanecer en guardia ante los peligros naturales. Es por esto que los miembros del SINAGERD realizan investigaciones de peligros y 59 riesgos y son verificados por la entidad técnica y científica competente. Estos estudios pueden servir como punto de partida para

determinar el grado de peligro porque contienen información a priori sobre el lugar o zona donde se realiza la investigación, un análisis del daño o impacto causado y la periodicidad del retorno de los fenómenos naturales. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.103)

- Identificación de parámetros y descriptores que son susceptibles al fenómeno de estudio

Factores condicionantes: Relieve, tipo de suelo, cobertura vegetal, uso actual del suelo, etc.

Factores desencadenantes: Hidrometeorológicos, inducido por la acción humana, geológico, etc.

e) Susceptibilidad

La susceptibilidad se refiere a la mayor o menor predisposición a que suceda u ocurra un evento en una determinada área geográfica (depende de los condicionantes y desencadenantes del fenómeno y su respectiva área geográfica). De acuerdo con este esquema, aquellas franjas de tierra que rápidamente caen bajo las inundaciones corresponderían a áreas de mayor susceptibilidad hídrica, mientras que aquellas que no son invadidas representarían áreas de menor susceptibilidad hídrica. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.106)

- Factores condicionantes

“Son parámetros propios del ámbito geográfico de estudio, el cual contribuye de manera favorable o no al desarrollo del fenómeno de origen natural (magnitud e intensidad), así como su distribución espacial” (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.103).

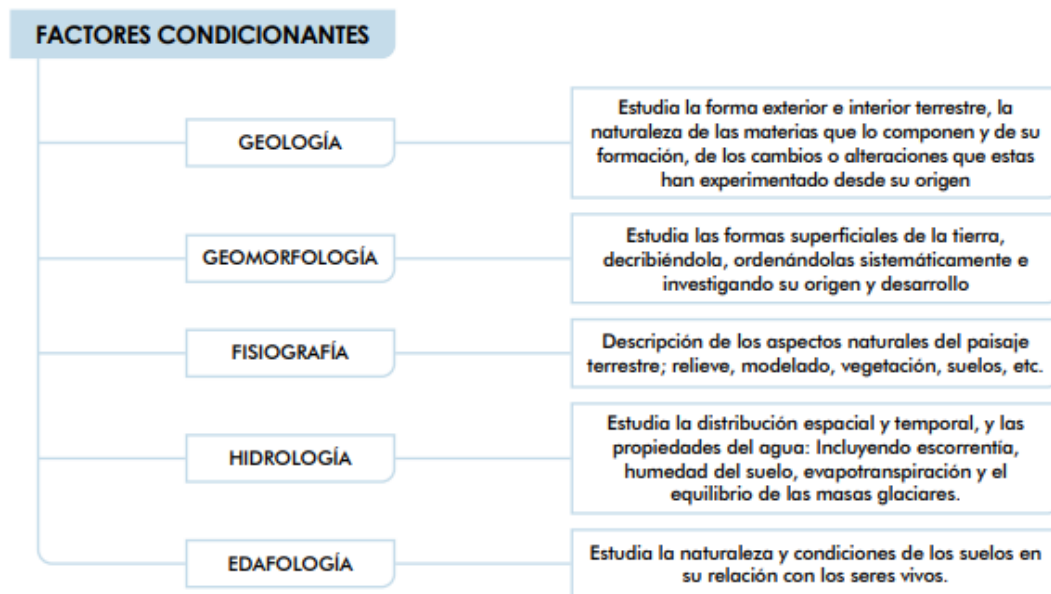


Figura N 10: Factores condicionantes
Fuente: Cenepred (2015)

- Factores desencadenantes

Son parámetros que desencadenan eventos y/o sucesos asociados que pueden generar peligros en un ámbito geográfico específico. Por ejemplo: las lluvias generan deslizamiento de material suelto o meteorizado, los sismos de gran magnitud ocurridos en el mar (locales) ocasionan tsunamis, etc. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.104)



Figura N 11: Factores desencadenantes
Fuente: Cenepred (2015)

f) Análisis de elementos expuestos en zonas susceptibles

Es importante indicar que se cuantifica el impacto probable de los elementos expuestos (área geográfica en riesgo) que se encuentran dentro del área de influencia del fenómeno de origen natural, calculando las pérdidas o daños probables (vidas humanas, infraestructura, bienes y medio ambiente), que podrían generarse como resultado de la manifestación de fenómenos naturales. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.108)

Es importante analizar la posible pérdida en lo correspondiente a la:

- Dimensión social: población, salud, educación.
- Dimensión económica: agricultura, industria, comercio y turismo, transporte y comunicaciones, energía, agua y saneamiento.
- Dimensión ambiental: recursos naturales renovables y no renovables.

g) Niveles de peligrosidad

“Para fines de la evaluación de riesgos, las zonas de peligro pueden estratificarse en cuatro niveles: bajo, medio, alto y muy alto, cuyas características y su valor correspondiente se detallan a continuación” (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.103).

Tabla N°2

Niveles de peligrosidad

Nivel	Rango
Peligro muy alto	$0.260 \leq R < 0.503$
Peligro alto	$0.134 \leq R < 0.260$
Peligro medio	$0.068 \leq R < 0.134$
Peligro bajo	$0.035 \leq R < 0.068$

Fuente: Cenepred (2015)

h) Vulnerabilidad

De acuerdo con la Ley N ° 29664 del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y su reglamento (Decreto Supremo N ° 048-2011-PCM), la vulnerabilidad se define como la vulnerabilidad de la 62

población, estructura física o actividades socioeconómicas, ser perjudicado por el acto de un peligro o amenaza. La exposición se refiere a las elecciones y prácticas que ponen a las personas y sus medios de vida en la zona de peligro de peligro. La exposición es producida por una relación inadecuada con el medio ambiente, que puede deberse a procesos no planificados de crecimiento demográfico, un proceso de migración desordenada, el proceso de Urbanización sin una adecuada ordenación territorial y / o políticas de desarrollo económico insostenibles. Cuanto mayor sea la exposición, mayor será la vulnerabilidad. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.121)

- **Exposición**

La exposición se refiere a las elecciones y prácticas que ponen a las personas y sus medios de vida en la zona de peligro de peligro. La exposición es producida por una relación inadecuada con el medio ambiente, que puede deberse a procesos no planificados de crecimiento demográfico, un proceso de migración desordenada, el proceso de Urbanización sin una adecuada ordenación territorial y / o políticas de desarrollo económico insostenibles. Cuanto mayor sea la exposición, mayor será la vulnerabilidad. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.122)

- **Fragilidad**

La fragilidad se refiere a las condiciones de desventaja o debilidad relativa de una persona y un medio de vida frente al peligro. En general, se centra en las condiciones físicas de una comunidad o sociedad y es de origen interno, por ejemplo: Formas de construcción que, entre otras cosas, no cumplan con las regulaciones de construcción y / o materiales aplicables. Cuanto mayor es la fragilidad, mayor es la vulnerabilidad. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.122)

- **Resiliencia**

La resiliencia se refiere al grado de asimilación o capacidad de las personas para recuperarse y ganarse la vida en caso de peligro. Está asociado sobre las condiciones sociales y organizativas de la

población. Cuanto mayor sea la fiabilidad, menor será la susceptibilidad. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.123)

i) Análisis de los elementos expuestos sociales, económicos y ambientales

- Análisis de la dimensión social

Se determina la población expuesta dentro del área de influencia del fenómeno de origen natural, identificando la población vulnerable y no vulnerable, para posteriormente incorporar el análisis de la fragilidad y resiliencia sociales en la población vulnerable. Esto ayuda a identificar los niveles de vulnerabilidad social. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.124)

- Análisis de la dimensión económica

Se determina las actividades económicas e infraestructura expuesta dentro del área de influencia del fenómeno de origen natural, identificando los elementos expuestos vulnerables y no vulnerables, para posteriormente incorporar el análisis de la fragilidad y resiliencia económicas. Esto ayuda a identificar los niveles de vulnerabilidad económica. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.129)

- Análisis de la dimensión ambiental

Se determina los recursos naturales renovables y no renovables expuestos dentro del área de influencia del fenómeno de origen natural, identificando los recursos naturales vulnerables y no vulnerables, para posteriormente incorporar el análisis de la fragilidad y resiliencia ambientales. Esto ayuda a identificar los niveles de vulnerabilidad ambiental. (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.135)

j) Determinación de los niveles de vulnerabilidad

“Para fines de la Evaluación de Riesgos, las zonas de vulnerabilidad pueden estratificarse en cuatro niveles: bajo, media, alta y muy alta, cuyas características y su valor correspondiente se detallan a continuación” (Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2015, p.140).

Tabla N°3

Niveles de vulnerabilidad

Nivel	Rango
Vulnerabilidad muy alta	$0.260 \leq R < 0.503$
Vulnerabilidad alta	$0.134 \leq R < 0.260$
Vulnerabilidad media	$0.068 \leq R < 0.134$
Vulnerabilidad baja	$0.035 \leq R < 0.068$

Fuente: Cenepred (2015)

k) Estimación del riesgo

Tabla N°4

Niveles de riesgo

Nivel	Rango
Riesgo muy alto	$0.068 \leq R < 0.253$
Riesgo alto	$0.018 \leq R < 0.068$
Riesgo medio	$0.005 \leq R < 0.18$
Riesgo bajo	$0.001 \leq R < 0.005$

Fuente: Cenepred (2015)

A continuación, se muestra los niveles de riesgos y sus consecuencias en presas de relaves, este cuadro es de elaboración propia en la cual se da a conocer las consecuencias que puede ocasionar la falla de una presa.

Tabla N°5

Niveles de riesgo y consecuencias

Nivel	Rango
Riesgo muy alto	La población y personal de obra se encuentra en peligro constante, contaminación crítica de suelos y aguas subterráneas, pérdidas económicas que conlleven al cierre definitivo de la mina.
Riesgo alto	La población y personal de obra se

Nivel	Rango
	encuentra en peligro constante, daños materiales importantes y contaminación aguas abajo. Millones de dólares en costos de reparación por lo cual las operaciones mineras deben detenerse por meses.
Riesgo medio	La población y personal de obra se encuentra en peligro regular, contaminación aguas abajo reparables en corto tiempo.
Riesgo bajo	El peligro para la población y personal de obra y sus intereses económicos son de baja magnitud, con probabilidades de ocurrencia mínimas.

Fuente: Cenepred (2015)

2.3.13 Criterios de probabilidad

La Tabla N°6 presenta los criterios de probabilidad convencionales en la industria de los análisis de riesgo.

Tabla N°6
Criterios de probabilidad

Puntuación	Descripción	Probabilidad
1	Raro	Ocurrencia rara o en circunstancias excepcionales <10% de probabilidad de ocurrencia
2	Improbable	Improbable de ocurrir en condiciones normales de operación 10% hasta 35% de probabilidad de ocurrencia
3	Posible	El evento puede ocurrir, pero no es esperado 35% hasta 65% de probabilidad de ocurrencia
4	Probable	El evento puede ocurrir en cualquier 65% hasta 90% de probabilidad de

Puntuación	Descripción	Probabilidad	
		momento	ocurrencia
5	Muy probable	Es muy probable que ocurra el evento en cualquier momento	> 90% de probabilidad de ocurrencia

Fuente: Elaboración propia

2.3.14 Análisis de estabilidad de taludes e infiltraciones

a) Metodología para el análisis de infiltración

El software SLIDE, versión 9.0 (Rocscience, 2021), tiene la capacidad de llevar a cabo un análisis de infiltración por medio de elementos finitos para condiciones de agua estacionarias o transitorias.

Para poder usar esta herramienta es necesario activar la opción “Steady State FEA” en el SLIDE, permitiendo realizar la discretización del modelo en elementos finitos y considerar las opciones de contorno en nuestro modelo, esto permitirá ingresar el nivel del agua presente en la presa, con estos datos el programa realizará una serie de iteraciones para determinar el flujo del agua de acuerdo con las propiedades asignadas al material, cabe resaltar que el programa computacional nos permite medir la infiltración en secciones que previamente debemos definir.

Una ventaja de realizar el análisis en este software es que posterior a realizar un análisis de infiltración los resultados (presiones de poros) pueden ser utilizados automáticamente en el análisis de estabilidad de taludes en SLIDE.

Para los análisis de infiltración es recomendable utilizar 2 casos de análisis por etapa, uno considerando el NOWL (Normal Operating Water Level) y otro en la situación más extrema siendo este el caso del IDF más un 50 %, esto para poder tener las infiltraciones que existirían en condiciones normales y las que ocurrirían en un evento extremo.

b) Metodología para los análisis de estabilidad por equilibrio límite

Los análisis de estabilidad se llevan a cabo bajo condiciones estáticas y pseudo-estáticas, teniendo en cuenta la configuración de la geometría final y las secciones analizadas.

El software SLIDE, versión 9.0 (Rocscience, 2021), tiene la capacidad de llevar a cabo análisis de estabilidad de taludes mediante el método de equilibrio límite. El análisis se puede llevar a cabo por varios métodos.

Como, por ejemplo, el método propuesto por Spencer (1967), el cual, a diferencia de otros métodos, satisface todas las condiciones de equilibrio, tanto de fuerzas como de momentos, y además es apropiado para cualquier forma de superficie de deslizamiento, teniendo en cuenta que para el caso de algunos análisis se espera obtener superficies de deslizamiento no circulares. El software SLIDE realiza la iteración a través de varias superficies de falla para determinar la superficie con el mínimo factor de seguridad, definida como la superficie crítica.

Cabe resaltar que en el caso de que los factores de seguridad en condiciones pseudo-estáticas sean menores a 1,0, dicha condición no indica que el talud se encuentre inestable o pueda colapsar bajo condiciones sísmicas, de acuerdo con la metodología propuesta por Hynes-Griffin y Franklin (1984) se interpreta que las deformaciones permanentes inducidas por sismo podrán ser mayores a 1 metro, por lo que se necesitará calcular dichas deformaciones inducidas por sismo, las cuales no deberán superar las deformaciones permisibles establecidas en los criterios de diseño.

2.3.15 Análisis de desplazamientos simplificados inducidos por sismo

a) Metodología para los análisis de desplazamientos permanentes

Se considera estimar los desplazamientos permanentes que se podrían generar debido a la sismicidad de la zona y características de la estructura en evaluación.

La metodología de Bray & Macedo (2019) es una actualización del método de Bray & Travorou (2007) donde se ha estimado el desplazamiento permanente inducido debido a los terremotos corticales poco profundos a lo largo de los márgenes activos de las placas. En la

actualización de la metodología se ha usado un total de 6711 registros a comparación de los 688 usados originalmente.

El modelo propuesto por Bray & Macedo (2019) describe 3 casos de análisis, los cuales son los siguientes:

- Procedimiento de estimación de desplazamiento para movimientos de suelo ordinarios.
- Procedimiento de estimación del desplazamiento para movimientos de tierra de pulsos cercanos a la falla.
- Estimación de desplazamiento para enfoques deterministas y pseudo-probabilísticos.

Adicionalmente para determinar si es que los sismos de pulso gobiernan los sismos se puede usar el modelo de Hayden et al. (2014), cuya ecuación se muestra a continuación:

Proporción del movimiento de pulso

$$= \frac{1}{1 + \exp(-3.87 + 1.04xR^{0.5} + 15.99x(\varepsilon + 3)^{-2})}$$

Donde: R es la distancia en km al pulso y ε es el valor de épsilon del parámetro de movimiento del terreno. En la figura se muestra la representación gráfica de la ecuación mostrada anteriormente.

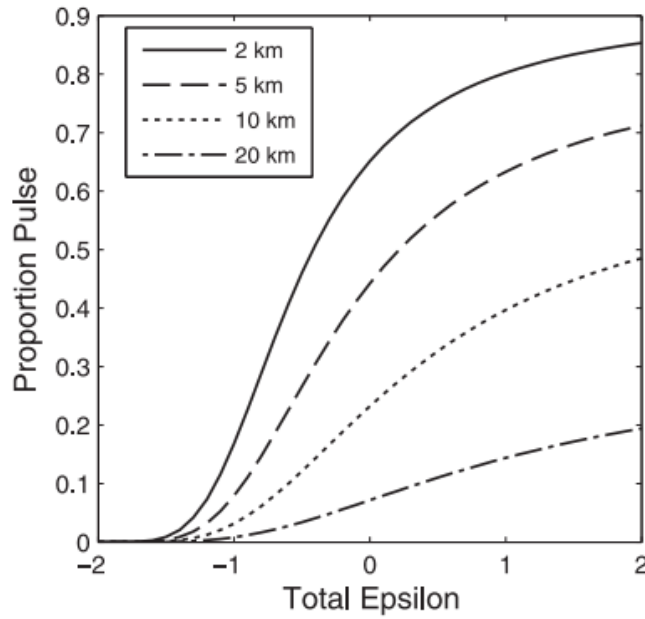


Figura N 12: Gráfico de la proporción del movimiento de pulso
Fuente: Wood (2022)

En general, para poder estimar los desplazamientos según esta metodología es necesario contar con lo siguiente:

- La magnitud del sismo de análisis (M_w)
- La aceleración de fluencia (k_y)
- El periodo fundamental inicial (T_s)
- La aceleración espectral del suelo para un periodo degradado igual a $1,3T_s$. ($S_a(1,3T_s)$)
- El valor del PGV (Peak Ground Velocity), el cual toma relevancia en el cálculo cuando es mayor a 115 cm/s.

Para determinar el valor de los desplazamientos Bray & Macedo proponen la siguiente ecuación para el tercer caso, la cual contiene todos los parámetros anteriormente mencionados:

$$\begin{aligned}
 \ln(D) = & a1 - 2.491\ln(k_y) - 0.245 \left(\ln(k_y) \right)^2 + 0.344\ln(k_y)\ln(S_a(1.3T_s)) \\
 & + 2.703\ln(S_a(1.3T_s)) - 0.089 \left(\ln(S_a(1.3T_s)) \right)^2 + a2T_s \\
 & + a3(T_s)^2 + 0.607M_w + a4 * \ln(PGV) + a5 \pm \varepsilon
 \end{aligned}$$

Los términos k_y , T_s , $Sa(1.3T_s)$, M_w y PGV ya fueron descritos anteriormente, mientras que ε es una variable normalmente distribuida para una media de 0 y distribución estándar de 0.74, mientras que los parámetros a_1 , a_2 , a_3 , a_4 y a_5 son constantes los cuales dependen del valor de PGV y T_s .

b) Metodología para el análisis de asentamientos debido a sismo

De forma adicional, se considera estimar las deformaciones posibles en la cresta de la presa debido a la sismicidad de la zona, esto para poder verificar el borde libre considerado en la presa.

Para poder calcular este valor se va a usar la metodología propuesta por Swaisgood et al. 2003 (actualizado en el 2013), el cual relaciona el asentamiento de la cresta con el valor de magnitud del sismo en M_w , la aceleración PGA en g, y la altura total de la presa, considerando el espesor de suelo bajo ella.

Swaisgood et al. (2013) ha revisado, comparado y realizado un análisis estadístico a un aproximado de 82 presas cuyas alturas varían entre 10 y 235 metros sometidos a terremotos de varios países como Estados Unidos, México, Japón, Chile, Filipinas, Taiwan, Nueva Zelanda y Perú, en base a este trabajo se pudo determinar que los principales parámetros que influyen son el PGA (Peak Ground Acceleration) y la magnitud del sismo. Adicionalmente determinaron que otros parámetros tienen una influencia mínima o casi nula, tales como el tipo de presa, la distancia del epicentro del sismo, altura de la presa, longitud de la cresta, pendiente, entre otros.

La ecuación propuesta por Swaisgood (2013) es la siguiente:

$$\%Asentamiento = e^{5.7PGA+0.47M_w-7.22}$$

Donde:

PGA : Peak Ground Acceleration

M_w : Magnitud momento del sismo

Esta ecuación puede ser representada gráficamente tal como se muestra en la Figura 10-9.

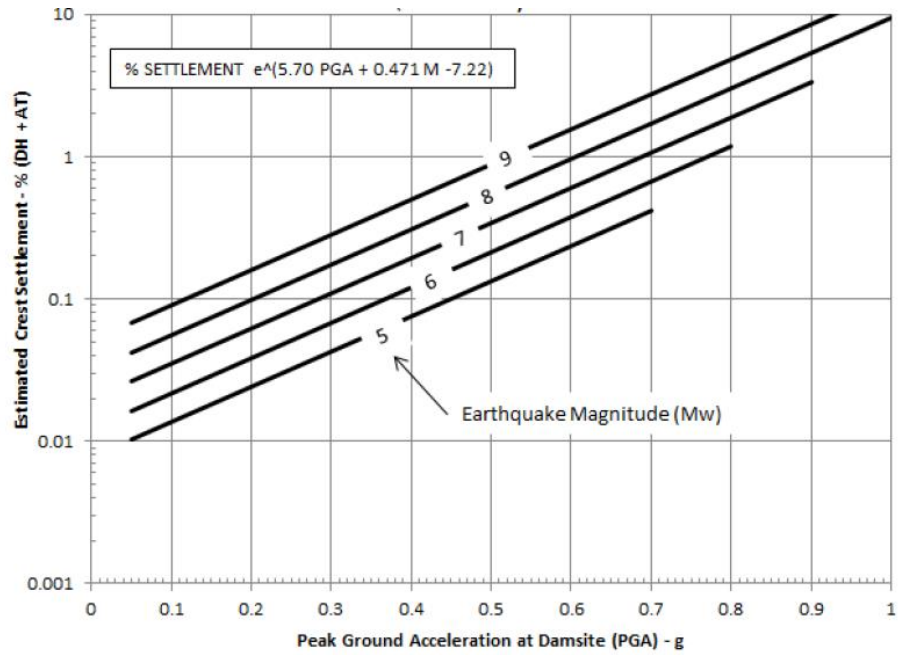


Figura N 13: Gráfica para determinación del porcentaje de asentamiento
Fuente: Wood (2022)

Una vez estimado el asentamiento porcentual de la cresta, se debe multiplicar por la suma de la altura de la presa más el espesor del suelo hasta llegar a roca según se muestra.

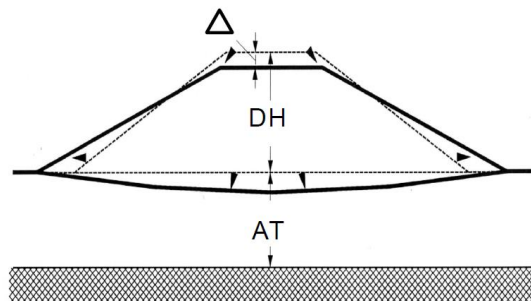


Figura N 14: Esquema para determinación del asentamiento
Fuente: Wood (2022)

$$\%Asentamiento = \frac{\Delta}{DH + AT} * 100$$

Donde:

DH: Altura de la presa (m)

AT: Espesor del estrato de suelo (m)

Δ: Asentamiento de la cresta (m)

2.4 Definición de términos básicos

Relave:

“El relave es un conjunto de desechos de procesos mineros de la concentración de minerales, usualmente constituido por una mezcla de rocas molidas, agua y minerales de ganga” (RAE, 2021).

Presa:

“Muro grueso de piedra u otro material que se construye a través de un río, arroyo o canal, para almacenar el agua a fin de derivarla o regular su curso fuera del cauce” (RAE, 2021).

Contaminar:

“Alterar nocivamente la pureza o las condiciones normales de una cosa o un medio por agentes químicos o físicos” (RAE, 2021).

Ambiente:

“Aire o atmósfera de un lugar” (RAE, 2021).

“Conjunto de condiciones o circunstancias físicas, sociales, económicas, etc., de un lugar, una colectividad o una época” (RAE, 2021).

Geotecnia:

“Aplicación de métodos científicos y principios de ingeniería para la adquisición, interpretación y uso del conocimiento de los materiales de la corteza terrestre y los materiales de la tierra para la solución de problemas de ingeniería y el diseño de obras de ingeniería. Es la ciencia aplicada de predecir el comportamiento de la Tierra, sus diversos materiales y procesos para hacer que la Tierra sea más adecuada para las actividades humanas y el desarrollo” (Villalaz, 2014)

Riesgo:

“Contingencia o proximidad de un daño”. (RAE,2021)

“Cada una de las contingencias que pueden ser objeto de un contrato de seguro”. (RAE, 2021)

2.5 Fundamentos teóricos que sustentan las hipótesis

2.5.1 Esquema de desarrollo de las hipótesis

El esquema presentado en el siguiente esquema muestra cómo se desarrollará el trabajo de investigación hasta sustentar la hipótesis. Lo que

se busca es que, mediante el modelamiento geotécnico, que se realizará en la presente investigación, y con la metodología del FMEA y las guías de MAC y CDA, poder analizar el riesgo geotécnico de la presa de relaves con el objetivo de obtener el factor de seguridad y el valor de riesgo, identificar distintos escenarios de falla y proponer medidas de mitigación ante estos, con la finalidad de prevenir futuras fallas en la presa de relaves.

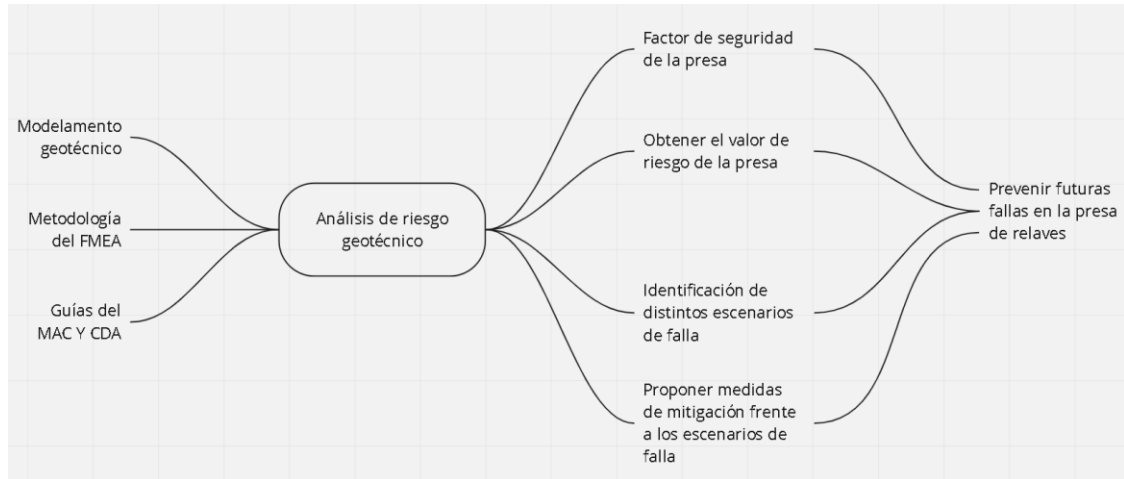


Figura N 15: Esquema de desarrollo de hipótesis
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

La presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín presenta un riesgo geotécnico bajo frente a futuras fallas.

3.1.2 Hipótesis específicas

- a) Los modos potenciales de falla de la presa de relaves son establecidos evaluando el riesgo geotécnico mediante la metodología del FMEA, y las guías del MAC y CDA.
- b) El factor de seguridad obtenido en el modelamiento geotécnico cumple con lo establecido por la normativa vigente.
- c) Los cambios en la morfología y estructura de la presa de relaves se conocen analizando el modo que el aumento del nivel del agua, un drenaje ineficiente, y que el principal componente se encuentre degradado y licuado, origina filtración y erosión interna.
- d) La inestabilidad de la estructura se prevé examinando la manera que las malas condiciones de los cimientos generan fallas en la fundación de la presa de relaves.
- e) Los mecanismos de control mínimos se implantan distinguiendo la forma que las inundaciones provocan desbordamientos en la presa de relaves.
- f) Los futuros deslizamientos de talud se previenen identificando como los terremotos producen fallas en la presa de relaves.

3.2 Sistema de variables

3.2.1 Definición conceptual de las variables

- a) Variable independiente: La variable independiente de la presente investigación es la presa de relaves debido a que todas las presas de relaves existentes presentan sus propias características en relación con la ubicación, material y método constructivo, relave que almacena, etc.

- b) Variable dependiente: La variable dependiente de la presente investigación es el riesgo geotécnico debido a que depende de las características específicas de la presa en cuestión.

3.2.2 Operacionalización de las variables

Tabla N°7

Matriz operacional de variables

Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Índices	Unidad de medida	Escala	Instrumento	Herramienta
Variable independiente: Presa de relaves	Estructura que almacena los relaves provenientes del proceso de extracción de minerales	Geología	Geomorfología	Composición, estructura, dinámica e historia del suelo	-	Cualitativa	Estudio de ingeniería de detalle	-
			Geología regional					
		Geología local	Ensayos de penetración estándar (SPT)	Tipología y estratigrafía del suelo	Número de golpes	Cuantitativa continua		ASTM D1586
		Investigaciones geotécnicas	Ensayos de permeabilidad in-situ		m/s			ASTM D4631
Ensayos de laboratorio	Resultados de los ensayos	Normas ASTM Y NLT						
		Sismicidad local	Análisis de peligro sísmico	Peligro sísmico	g			-

Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Índices	Unidad de medida	Escala	Instrumento	Herramienta
		Información hidrológica	Precipitación anual Precipitación máxima Evaporación	Interacción del agua en el medio ambiente	mm			
Variable dependiente: Riesgo geotécnico	Probabilidad de la existencia de una falla producida por factores geológicos, geotécnicos e hidrológicos	Riesgo Análisis estático y pseudo estático	Modos potenciales de falla Análisis de infiltración Análisis de estabilidad física Evaluación del potencial de licuación	Probabilidad Consecuencia Infiltración Estabilidad física Potencial de licuación	-	Cualitativa Factor de seguridad Cuantitativa continua	Matriz de riesgos Slide v 6.0	Guide to the Management of Tailings Facilities (MAC) CDA Dam Safety Guidelines

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Método de la investigación

El método significa el camino por seguir mediante una serie de operaciones y reglas prefijadas de antemano para alcanzar el resultado propuesto, ya que procura establecer los procedimientos que deben seguirse, en el orden de las observaciones, experimentaciones, experiencia y razonamientos y la esfera de los objetos a los cuales se aplica. (Baena, 2017, p.61)

La presente investigación tiene un método deductivo ya que contrastará la información previa; una orientación aplicada debido a que planteará controles mínimos a modos potenciales de falla; y un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo) ya que intervienen datos numéricos debido al modelamiento geotécnico y análisis probabilístico, y se recolecta datos de experiencias pasadas que serán utilizados como referencias.

4.2 Tipo de la investigación

“La técnica juega un papel muy importante en el proceso de investigación científica, a tal grado que se le puede definir como la estructura del proceso de la investigación científica” (Baena, 2017, p.61). La presente investigación es de tipo aplicativo ya que realizará un análisis de riesgo utilizando la metodología del FMEA, y las guías del MAC y CDA, con el fin de obtener una matriz de riesgos de la presa de relaves.

4.3 Nivel de la investigación

Según su naturaleza o profundidad, el nivel de una investigación se refiere al grado de conocimiento que posee el investigador en relación con el problema, hecho o fenómeno a estudiar. De igual modo cada nivel de investigación emplea estrategias adecuadas para llevar a cabo el desarrollo de la investigación. (Valderrama, 2017, p. 42)

Por todo lo mencionado se concluye que la presente investigación realizada tiene un nivel descriptivo ya que se tiene datos cuantitativos como los daños ante posibles tragedias y también datos cualitativos como son los tipos de falla, y se modelará

geotécnicamente para mediante un análisis probabilístico para obtener el riesgo geotécnico, y con el resultado obtenido elaborar la matriz de riesgos de la presa de relaves, y establecer los modos potenciales de falla y controles mínimos.

4.4 Diseño de la investigación

“El diseño de investigación proporciona un marco de referencia para la recopilación y el análisis de datos. Define líneas guías para la generación de evidencia adaptadas tanto al conjunto de criterios determinados, como a las preguntas de investigación” (Martínez, 2020). La presente investigación tiene un diseño no experimental y prospectivo. Es no experimental porque lo que se requiere es buscar y determinar la relación entre nuestras variables (riesgo geotécnico y la presa de relaves) y por último es prospectivo porque busca prever potenciales fallas en la presa de relaves.

4.5 Población y muestra

4.5.1 Población

La población de la presente investigación está determinada por las presas de relaves que se encuentran en las zonas conformadas con material de relave grueso y construidas por el método aguas abajo en el Departamento de Junín.

4.5.2 Muestra

La muestra de la presente investigación es la presa de relaves de la unidad minera Toromocho, ubicada en el Departamento de Junín.

4.6 Recolección de datos

4.6.1 Instrumento de recolección de datos

Para la recolección de datos se utilizarán formatos de elaboración propia para poder registrar la información necesaria de la ingeniería de detalle y estudios previos de la zona de influencia de la presa.

4.6.2 Métodos y técnicas

- Modelamiento geotécnico mediante el uso del software Slide versión 9.0.

- Análisis probabilístico.
- Matriz de riesgos.
- Revisión de información sobre parámetros geotécnicos, estudios hidrológicos y geológicos.

4.7 Descripción de procesamiento de análisis

Para el procesamiento de análisis del riesgo geotécnico se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Secciones geométricas críticas, parámetros geológicos-geotécnicos, cargas sísmicas, nivel freático, entre otros.
- b) Utilizar el método de equilibrio límite para evaluar la resistencia al deslizamiento del talud mediante el software Slide versión 6.0.
- c) Con los resultados obtenidos del modelamiento geotécnico, se realizará la evaluación del riesgo geotécnico mediante la metodología del FMEA, y las guías del MAC y CDA.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS GEOTECNICO

5.1 Ubicación

La unidad minera Toromocho es una mina de cobre y molibdeno, que es explotada a tajo abierto y se encuentra localizada en la parte central de los Andes del Perú, en el distrito de Morococha, provincia de Yauli, departamento de Junín, aproximadamente a 140 km al noreste de Lima; a una elevación aproximada entre 4 500 y 5 000 m.s.n.m.



Figura N 16: Ubicación de la unidad minera Toromocho
Fuente: Wood (2022)

5.2 Geomorfología

La geomorfología de las zonas de estudio son el resultado de distintos procesos tectónicos, volcánicos, orogenia y agentes de meteorización y erosión en superficie. De forma histórica, el área de Toromocho estuvo dominada por glaciares de montaña que ocurrieron en el Pleistoceno, y en la actualidad ya no se identifican masas glaciales en áreas colindantes de la presa de relaves.

En aspectos geomorfológicos se identificó efectos de erosión producto de avances y retrocesos glaciares que duraron hasta el Paleoceno (Ingemmet, 1983). La superficie del área de Toromocho presenta geoformas de valles glacioaluviales, colinas y estribaciones modeladas por agentes de erosión pluvial y aluvial.

5.3 Geología del macizo rocoso

La geología del macizo rocoso en el área de estudio está compuesta por secuencias estratigráficas, intrusiones ígneas, aureolas metamórficas y las estructuras geológicas que afectan todas las anteriores.

La secuencia estratigráfica desde la más antigua hasta la más reciente está constituida por derrames lávicos del Volcánico Catalina perteneciente al grupo Mitú de edad Permiana, sobre los cuales yace el grupo Pucará de edad Jurásica, consistente en dolomías silíceas en la base, seguido de un nivel basáltico y una facie dolomítica en la parte superior, sobre la cual se tiene al grupo Goyllarisquizga del Cretácico inferior compuesto por limolitas y lutitas en su base, sobre estas se encuentran limolitas silíceas y caliza, en la parte superior de este grupo se tiene un nivel basáltico, siguiendo la secuencia estratigráfica, encontramos una serie calcárea conformada por las formaciones Chulec, Pariahuanca y Jumasha, también pertenecientes al Cretácico inferior, sobreyaciendo a todo lo anterior se tiene la formación Casapalca la cual es mayormente pelítica, constituida en su mayoría por limolitas y una facie transicional entre la caliza de la formación Jumasha y la limolita que caracteriza la formación Casapalca que le confiere una composición margosa.

Finalmente, un evento magmático de edad Terciaria intruye a la secuencia sedimentaria formando una aureola metamórfica en el contacto con las calizas del grupo Pucará, aflorando como un Plutón cuya composición varía entre una monzonita y una granodiorita.

La tectónica regional tiene un dominio de esfuerzos compresivos, manifestados en plegamientos, así como una falla inversa o sobre escurrimiento de orientación NNO-SSE; además se manifiesta un sistema principal de fallas de dirección N-S y un sistema secundario de fallas con dirección E-O.

A continuación, se describe con mayor detalle las unidades geológicas en el párrafo anterior:

5.3.1 Volcánico Catalina – Grupo Mitu (Ps-mi)

Corresponde a los derrames lávicos con estratificación masiva de composición andesítica a dacítica, cuyo espesor se estima alrededor de los 700 m, posee un color marrón oscuro a negro distintivo, así mismo presenta sulfuros diseminados, que producto de la meteorización forman patinas de óxidos color marrón en los afloramientos, los cuales se encuentran en la margen izquierda del área de embalse, y se caracterizan por su mayor resistencia en comparación a las otras unidades de origen sedimentario con las que está en contacto.

5.3.2 Grupo Pucará (JTr-pu)

El Grupo Pucará es una secuencia de edad Jurásica que sobreyace de forma discordante al Volcánico Catalina y Grupo Mitu.

Para el área de estudio, se ubica en la divisoria de la cordillera Occidental aflorando exclusivamente en el sector oriental donde predomina una secuencia de calizas en bancos medianos y en capas delgadas de color gris claro que intercala con niveles de calizas margosas, margas, lutitas y capas de dolomitas, asimismo se intercala en forma esporádica capas de volcánicos de naturaleza básica y acida paralela a la estratificación que parecen corresponder a capas de sill.

Se subdivide en una secuencia de dolomitas de miembro inferior y superior separados por el basalto Montero. La dolomita del grupo Pucará presenta localmente alteración a mármol de color blanquecino en las proximidades a cuerpos intrusivos extensos de granodiorita identificados a poca profundidad.

La Formación Pucará inferior ubicada estructuralmente debajo de la cuenca del depósito de relaves en el sector norte, presenta un espesor aproximado de 100m a 200m, sujeto a interpretación estructural complementaria. El basalto

Montero ubicado entre los dos miembros del Grupo Pucará, presenta un espesor aproximado de 30m a 50m y se ubica truncado localmente dentro de la cuenca del depósito de relaves por el cuerpo intrusivo central de granodiorita. La Formación Pucara superior se superpone de manera concordante al basalto Montero en contacto erosivo, y presenta un espesor aproximado de 60m a 80m.

5.3.3 Grupo Goyllarisquizga (Ki-g)

El Grupo Goyllarisquizga es una secuencia de edad Cretácica que aflora al NE del depósito de relaves en forma de franja con orientación NO-SE. Pertenece a un ambiente dominado por erosión y levantamiento de estratos antiguos.

Es una secuencia de espesor aproximado de 300 m a 500 m, conformada de areniscas cuarzosas blanquecinas, en la base presenta limolitas rojizas que se intercalan con lutitas. Se encuentra conformada por 3 horizontes: Goyllarisquizga miembro inferior, Goyllarisquizga miembro superior y basaltos del Goyllarisquizga. El miembro inferior este compuesto en su mayoría de lutitas de color marrón rojizo a granate y limolita de color rojo a marrón amarillento identificable en las zonas altas al noreste del depósito de relaves. Se tiene la presencia de una estructura de falla de orientación NO-SE a lo largo del miembro inferior del Goyllarisquizga y en contacto con la Formación Pucara superior, que puede estar asociado con la fase intrusiva de granodiorita del Terciario.

Además, se tiene un nivel basáltico de espesor variable (5 m a 15 m) de color gris verdoso oscuro y de amplia extensión lateral. La Formación Chulec sobreyace en contacto con el basalto, asumiendo que esta capa de basalto esté relacionada con el final de la deposición clástica.

5.3.4 Formación Chulec (Ki-chu)

La Formación Chulec es una secuencia de edad Cretácica, con un espesor aproximado de 85 m a 120 m, y se divide en miembro inferior y miembro superior.

El miembro inferior está conformado de una secuencia con intercalación de calizas y dolomías litoclásticas a arcillosas, de color gris a medio oscuro, con

estratificación delgada a media y con horizontes de caliza lutácea gris oscura a negra y arcillita calcárea, carbonosa y fisible, de grano medio a fino. El miembro superior está constituido de roca caliza oolítica con una potencia de 15 m a 20 m, de una coloración gris clara y grano fino a medio.

5.3.5 Formación Pariatambo (Ki-pa)

Unidad perteneciente también al Cretácico inferior aflora de forma distintiva como superficies abruptas de color gris oscuro. Se estima que presenta un espesor promedio de 80 m, compuesto de caliza arcillosa a carbonosa de grano fino, distribuida en estratos delgados, con intercalaciones de arcillitas fisibles carbonosas negras, que gradan a dolomías carbonosas a arcillosas hacia el tope de la formación. Esta unidad separa de manera distintiva a la caliza de la formación Chulec, de la caliza de la formación Jumasha.

5.3.6 Formación Jumasha (Ks-j)

Se encuentra como parte de las laderas de los estribos del depósito de relaves, conformada de una secuencia de calizas en bancos gruesos de color gris claro. La Formación Jumasha es una secuencia extensa de calizas y dolomitas intercaladas con un espesor aproximado de 280m a 330m como resultado de un engrosamiento estructural producto de una falla inversa que causa repetición de estratos en superficie, y se divide en dos formaciones. La Formación Inferior Jumasha presenta un espesor de 10m a 15m de estratos de dolomita de coloración gris medio a oscuro, sobreyaciendo directamente sobre la Formación Pariatambo. La Formación Jumasha Superior representa la mayor parte de la secuencia y está compuesta de roca caliza de color gris claro y grano fino en capas medias a gruesas, con venillas ocasionales de calcita/dolomita, nódulos u oquedades alineadas, también están presentes horizontes de caliza arcillosa o caliza lutácea.

5.3.7 Formación Casapalca (KTs-c)

Es una secuencia mayormente pelítica del Cretácico superior, compuesta por gruesa capas rojas de arcillita fisible y limolita, que sobreyace concordantemente sobre la formación Jumasha, el contacto con esta última es gradual conformando una facie margosa producto de la transición entre las

calizas Jumasha con las limolitas Casapalca. Esta unidad cubre un área de grande extensión al sur-oeste del depósito de relaves.

Como ya se mencionó, un nivel basal margoso cuya distribución lateral es discontinua, que aflora en el estribo oeste del depósito de relaves, pero desaparece o se acuña en la cabecera del Reclaim Pond. Aguas abajo del depósito de relaves, este nivel basal se caracteriza por su color amarillento y por su alto grado de meteorización en superficie propio de las margas, lo que contrasta con la secuencia de capas rojas, que caracteriza a la formación Casapalca. Se estima una potencia mayor de 1000m.

5.3.8 Eventos Intrusivos (T-mz/gd)

Dentro del área de estudio, a partir de los afloramientos de roca ígnea intrusiva existentes en la zona del depósito de relaves, se evidencia actividad ígnea correspondiente al Terciario, en el que varios pulsos magmáticos han intruido a la secuencia sedimentaria, cortando principalmente al grupo Pucará y al grupo Goyllarisquizga.

El cuerpo intrusivo está formado por rocas de composición monzonítica a granodiorítica, de cristales finos a medios. Acompañan a estos plutones intrusivos, diques de composición dacítica, que presentan un espesor promedio de 5 m y que cortan tanto al Grupo Pucará como a la Fm. Jumasha.

5.4 Geología superficial

La geología superficial en el área de estudio está parcialmente representada por los depósitos de edad cuaternaria, los cuales son principalmente de origen glacial, y también de origen gravitacional o coluvial. Entre los primeros tenemos básicamente a las morrenas de ablación tanto frontales como laterales, y los depósitos gravitacionales o coluviales están constituidos por conos de derrubios y derrubios de ladera. Además, se tiene presencia de depósitos antrópicos conformados por material de desmonte y orgánico.

5.4.1 Depósitos glaciales

Están constituidos principalmente por gravas limosas con arena y gravas arenosas con limos, con tamaños heterométricos de las partículas que los

conforman, acompañados de bloques y bolones de forma subangular con un diámetro promedio de 10 pulgadas. Los depósitos glaciares se distinguen por su relieve, configurando laderas de pendiente moderada a suave a los pies de las montañas.

5.4.2 Depósitos coluviales

Estos depósitos de origen relativamente reciente poseen una distribución espacial muy restringida, circunscribiéndose principalmente en las laderas y bases de escarpas rocosas muy pronunciadas, consistentes de fragmentos heterométricos producto de la caída y transporte de los bloques rocosos que conforman las partes altas de los afloramientos. Posteriormente por acción de la meteorización química, los fragmentos de roca pueden disgregarse en arenas e incluso desarrollar una matriz limo-arcillosa.

5.4.3 Depósitos antrópicos

Los depósitos antrópicos corresponden a la acumulación de sedimentos, rellenos, entre otros, generada por la acción humana. Se encuentra como material de desmonte en la parte inferior del estribo Oeste y en el estribo Este de la presa, compuesto predominantemente por arenas y finos. Existe otro depósito de material orgánico en el estribo este de la presa, conformado por acumulación de top soil el cual es la reserva para etapa de cierre de la mina. La geología de la zona de estudio se muestra en la Figura N 17.

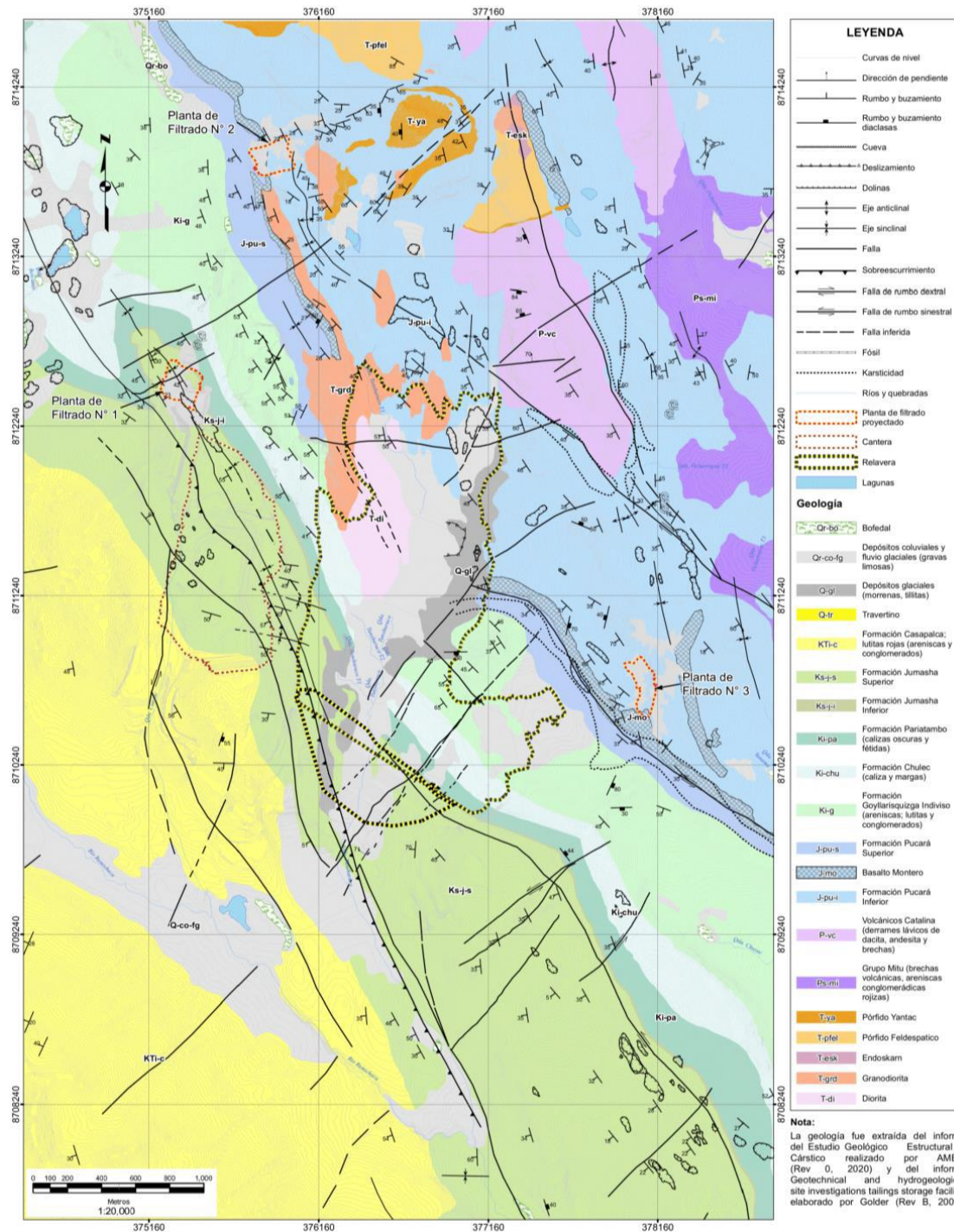


Figura N 17: Geología de la zona de estudio
Fuente: Wood (2022)

5.4.4 Procesos kársticos en la fundación de la presa de relaves Toromocho

En el informe de investigaciones geotécnicas para el diseño de la Etapa II, se desarrolla ampliamente este tema, haciendo un análisis y evaluación desde varias fuentes de información tanto directas como indirectas, las cuales dieron como conclusión la existencia de procesos kársticos en profundidad en el área

de fundación de la presa de relaves Toromocho. Asimismo, durante los trabajos de construcción al realizar la limpieza de fundación del estribo este se encontraron cavidades (de probable origen de disolución) que tuvieron que ser rellenadas con concreto dental, para el cumplimiento de las especificaciones técnicas de construcción, en dicho informe se menciona también que estos procesos se atenúan o disminuyen en dirección aguas abajo de la presa.

5.4.5 Falla inversa Toromocho

Esta falla fue identificada desde los primeros estudios realizados en el área y es confirmada durante la fase de construcción. Durante la limpieza de la fundación se ha evidenciado la presencia de esta falla de alcance regional, la cual se ubica a medio talud del estribo derecho y posee un alto ángulo de inclinación, lo que ha provocado principalmente un incremento aparente del espesor de la formación Jumasha. Asimismo, ha generado una zona de corte, donde los afloramientos de esta formación se encuentran disturbados, siendo un área propensa a caídas de rocas y deslizamientos.

5.5 Geodinámica externa

El riesgo geológico puede provenir de una fuente superficial correspondiente a los procesos geodinámicos externos o a una fuente interna o profunda que corresponde a los procesos geodinámicos internos tales como la actividad sísmica o la actividad volcánica. Cada uno de estos procesos externos e internos tiene sus propias características y niveles de peligrosidad.

El riesgo geológico asociado a la geología externa al área de estudio fue analizado y evaluado y determinó que esta actividad se circunscribe a las zonas inestables ubicadas en el área de influencia de la falla inversa y en lo que constituye su traza en superficie, estas zonas se caracterizan por un alto grado de fracturamiento y meteorización, que en temporadas de lluvias provoca caída de rocas y pequeños deslizamientos.

5.6 Alcance del diseño

La presa de relaves Toromocho fue diseñada para ser construida en una presa de arranque más seis (6) etapas de recrecimiento, con una elevación final de cresta en su diseño final de 4 755 m.s.n.m. (séptima etapa de crecimiento). Actualmente se encuentra en construcción la Etapa V de recrecimiento con una elevación final de cresta de 4 705 m.s.n.m.

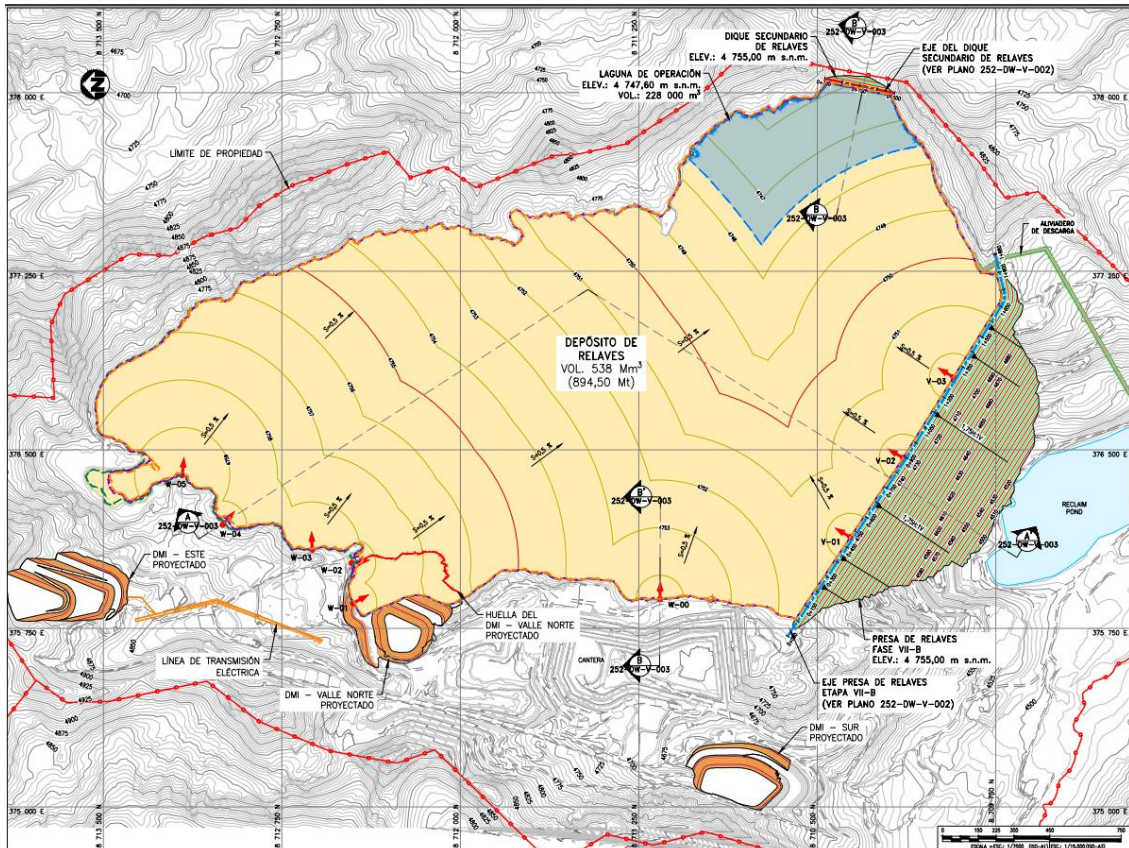


Figura N 18: Configuración general de la presa de relaves
Fuente: Wood (2022)

5.7 Criterios de diseño

Tabla N°8

Criterios de diseño

Criterio	Valor
Información general del lugar	
Ubicación	140 km al este de Lima - aproximadamente

Criterio	Valor	
Latitud y longitud	Latitud = 11,66° Sur Longitud = 76,13° Oeste	
Elevación	Variable entre 4500 a 5000 m.s.n.m.	
Clasificación de la presa	Extrema	
Información del análisis de estabilidad de la presa		
Método para el análisis de estabilidad de taludes de la presa	Equilibrio límite: Análisis estático y pseudo-estático	
Método riguroso para el análisis de deformaciones estática y dinámica	Análisis de elementos finitos	
Sismo máximo creíble (MCE)	0,54g	
Coefficiente sísmico para el análisis pseudo – estático	1/2 PGA	
Factor de seguridad mínimo para el análisis de estabilidad de taludes: Condición pseudo-estática	1,0	
Factor de seguridad mínimo para el análisis de estabilidad de taludes: Condición de fin de construcción	1,3	
Factor de seguridad mínimo para el análisis de estabilidad de taludes: Condición estática	1,5	
Recrecimiento		
Material	-	Cantera
Material cuerpo de la presa	-	Enrocado (Tipo 3)
Método de crecimiento	-	Aguas abajo
Cota máxima de coronamiento (Etapa VII-A)	m s.n.m.	4 742,5
Cota máxima de coronamiento (Etapa VII-B)	m s.n.m.	4 755,0
Ancho mínimo de cresta	m	Variable (15 – 18)
Talud de presa (aguas arriba)	zH/1V	1,33
Talud de presa (aguas abajo)	zH/1V	1,75
Producción diaria hasta febrero 2023	tpd	140 000
Producción diaria desde marzo 2023	tpd	170 000
Densidad de relave seca	t/m ³	1,66
Puntos de descarga operativos Etapas IV, V y	-	6

Criterio		Valor
VI		
Puntos de descarga operativos Etapa VII	-	9
Pendiente de disposición	-	Variable (0.0%, 0.1%, 0.2% y 0.3%)
Contenido de sólidos	(%)	58,7
Borde libre etapas IV, V y VI	m	10
Borde libre etapa VII	m	2,5

Fuente: Wood (2022)

5.8 Sección típica

La configuración geométrica del recrecimiento para la Etapa VII tiene en cuenta un talud aguas arriba de 1,33H:1V y un talud aguas debajo de 1,75H:1V. El ancho de la cresta varía en longitud de 15 m a 18 m. El cuerpo de la presa de relaves Toromocho está compuesto principalmente por enrocado (rockfill) de drenaje libre cimentada sobre el macizo rocoso y provista de un filtro (material Tipo 1) y material de transición (material Tipo 2) aguas arriba.

La estructura de la presa se considera como inherentemente estable (Cooke, 1993), debido a que el material que conforma la presa tiene la condición permeable evitando posibles efectos negativos de la elevación de presión de poros bajo condición estática y condición dinámica (acción de sismos).

El diseño de la Etapa VII de la presa de relaves, comprende la construcción del séptimo recrecimiento sobre la cresta de la presa de arranque. La Etapa VII se inicia en la cota 4 730 m s.n.m. y alcanza una cota de cresta de 4 755 m s.n.m., para el crecimiento de la presa se continúa utilizando el método de crecimiento aguas abajo.

5.9 Caracterización geotécnica de los materiales

La caracterización geotécnica de los materiales que conforman el cuerpo de la presa, el material de cimentación y los relaves para la Etapa VII, ha sido realizada

en base a la actualización de la información recopilada durante una campaña de investigaciones geotécnicas llevadas a cabo durante el 2021.

La finalidad de esta campaña fue de actualizar y complementar la información existente para la calibración del modelo geológico-geotécnico de la presa. La campaña de investigación geotécnica contempló la ejecución de veintitrés (23) calicatas, cuatro (4) perforaciones geotécnicas, veintisiete (27) ensayos DPL y la ejecución de ensayos geofísicos, de los cuales se tiene un total de veinticuatro (24) líneas de Refracción Sísmica (2 376m), once (11) ensayos unidimensionales MASW y nueve (09) ensayos unidimensionales MAM. Los siguientes ítems resumen la metodología de obtención de los parámetros geotécnicos para cada tipo de material analizado.

5.9.1 Basamento rocoso

La presa de relaves se encuentra cimentada sobre basamento rocoso de resistencia media a alta en el estribo este, y de resistencia baja a media en el estribo oeste. La sección analizada de máxima altura se encuentra cercano al estribo oeste. Para una mejor caracterización geotécnica, el basamento rocoso fue sub-dividido en: Basamento Rocosu Competente, Basamento Rocosu Fracturado, y Brecha de Falla, tal como se presenta en la Figura N 19.

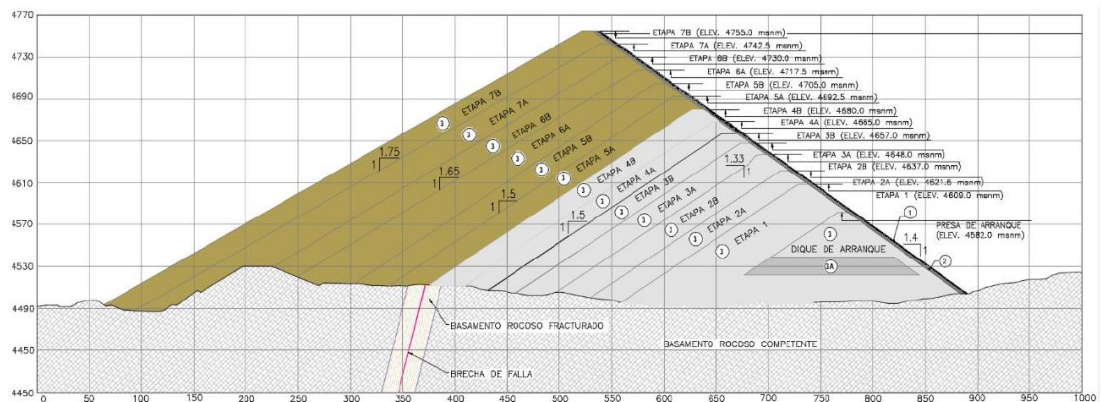


Figura N 19: Distribución de materiales de la presa de relaves
Fuente: Wood (2022)

a) Basamento rocoso competente

El basamento rocoso fue modelado de acuerdo con el criterio de ruptura de Hoek-Brown, obteniéndose la siguiente envolvente presentada en la

Figura N 20. Este material se utilizó en los análisis de deformaciones y estabilidad de taludes con peso unitario saturado de 25,4 kN/m³. Asimismo, la conductividad hidráulica asignada para este tipo de material se estima en 1,9x10⁻⁶ m/s.

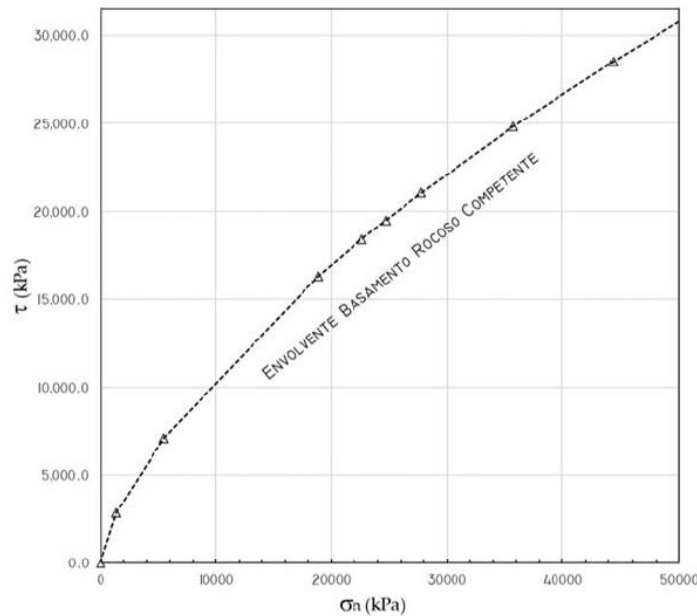


Figura N 20: Envolvente de resistencia al corte en función al esfuerzo normal
Fuente: Wood (2022)

b) Basamento rocoso fracturado

El basamento rocoso fue modelado de acuerdo con el criterio de rotura de Hoek-Brown, obteniéndose la siguiente envolvente presentada en la Figura N 21. Este material se utilizó en los análisis de deformaciones y estabilidad de taludes un peso unitario saturado de 24,6 kN/m³. Asimismo, la conductividad hidráulica asignada para este material se estima en de 6,9x10⁻⁷ m/s, ambos valores obtenidos de los ensayos de la campaña de campo realizada para la Ingeniería de Registro.

Las siguientes propiedades, módulo de elasticidad de 1,0 GPa y relación de Poisson de 0,30 fueron consideradas para los análisis de deformación estática.

Adicionalmente, a partir de las investigaciones geofísicas (2016, 2019 y 2021) se tiene que el valor de Gmax (para el análisis dinámico) oscila entre 0,8 y 2,8 GPa.

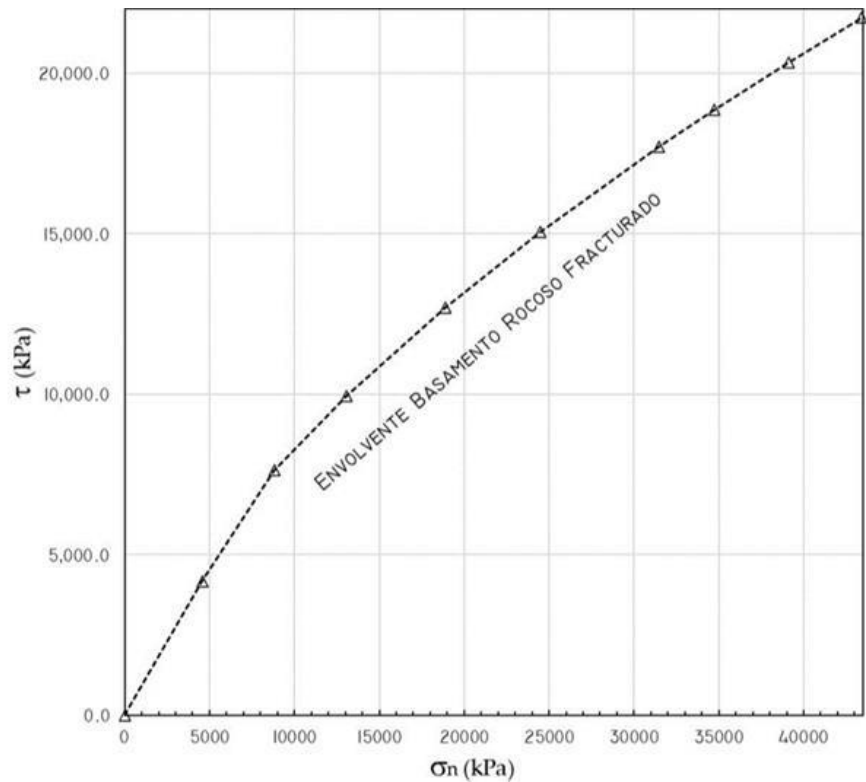


Figura N 21: Envolvente de resistencia al corte en función al esfuerzo normal
Fuente: Wood (2022)

c) Brecha de falla

Para este material se utilizó en los análisis de deformaciones y estabilidad de taludes un peso unitario saturado de 21 kN/m³, además, la conductividad hidráulica estimada para este material se estima en 1.22x10⁻⁷ m/s, ambos valores obtenidos de los ensayos de la campaña de campo realizada para la Ingeniería de Registro y campañas anteriores.

De acuerdo con las características de este material un ángulo de fricción de 40° y una cohesión nula fueron asignados. Se le consideró un módulo de elasticidad de 80 MPa y una relación de Poisson de 0,23 para los análisis de deformación estática.

5.9.2 Material de filtro (Tipo 1)

El material de filtro (Tipo 1), posee una clasificación SUCS que varía de arena bien graduada con limo (SW-SM) a grava bien graduada con arcilla y limo con arena (GW-GC), es predominantemente no plástico con IP que varía de 0 a 4. La distribución granulométrica varía de 45% a 52% de contenido de

grava, 39% a 46% de arena y 8% a 9% de fino. Además, posee partículas de tamaño máximo de 75 mm (3”).

De acuerdo con los resultados de laboratorio, el material Tipo 1 (Filtro) alcanzó una cohesión efectiva de 15 kPa y un ángulo de fricción interna efectiva igual a 37°, los cuales han sido utilizados en el cálculo de la resistencia cortante a través de la envolvente no lineal de Leps (1971) – Barton & Kjaernsli (1981). En la Figura N 22 se muestra la variación del ángulo de fricción en función del esfuerzo normal para el material Tipo 1. Es importante señalar que la curva se encuentra dentro del rango de variación existente para grandes confinamientos, según la literatura (Leps,1970).

El material Tipo 1 es permeable y cumple la función de filtro compatible con el material de relave, evitando la migración de partículas finas contenidas en el relave hacia el cuerpo de la presa. Los resultados de ensayos de permeabilidad realizados en laboratorio reportaron valores en el rango de $7,8 \times 10^{-4}$ – $3,0 \times 10^{-4}$ m/s para este material. Para fines del presente análisis se ha considerado una conductividad hidráulica de 5×10^{-4} m/s considerando la presencia del curb de concreto de juntas no selladas. Asimismo, se consideró un peso unitario saturado de 23,3 kN/m³, valor que se utilizó para los análisis de deformaciones y de estabilidad de taludes.

Adicionalmente, se asignó a este material un ángulo efectivo de fricción interna promedio de acuerdo con la formulación del modelo Hardening Soil de 40,1°, para los análisis de deformaciones y una envolvente de resistencia para los análisis de equilibrio límite, y cohesión nula para ambos análisis considerando su distribución granulométrica.

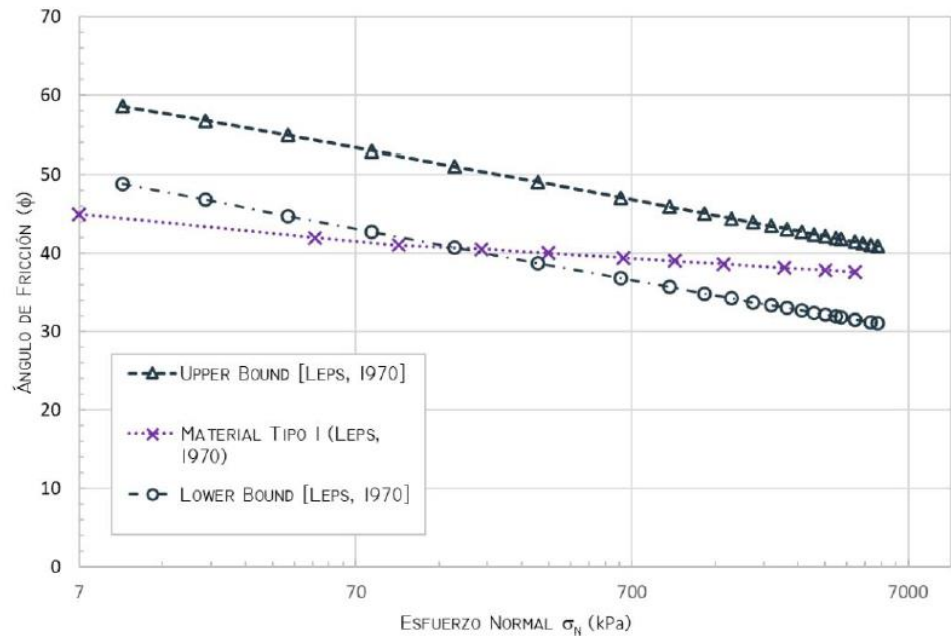


Figura N 22: Relación de ángulo de fricción con esfuerzo normal – Material Tipo 1
Fuente: Wood (2022)

La envolvente no lineal de resistencia del material Tipo 1 se muestra en la Figura N 23, la cual fue utilizada en los análisis de equilibrio límite.

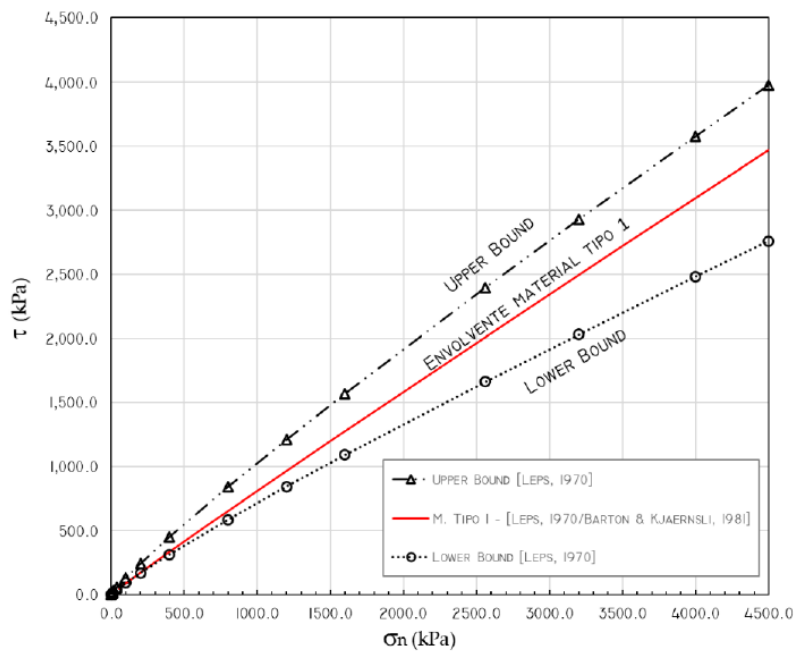


Figura N 23: Envolvente de resistencia al corte del material Tipo 1
Fuente: Wood (2022)

5.9.3 Material de transición (Tipo 2)

El material de Transición (Tipo 2), posee una variada clasificación SUCS, desde arena bien graduada con limo (SW-SM), grava pobremente graduada con limo con arena (GP-GM), y grava pobremente graduada con arcilla y limo con arena (GPGC); u plasticidad varía de nula a baja (IP de 0 a 7). La distribución granulométrica varía de 47% a 67% de contenido de grava, 27% a 43% de arena y 6% a 10% de fino. Además, posee partículas de tamaño máximo de 300 mm (12”).

De acuerdo con los resultados de laboratorio, indican que el material Tipo 2 (Transición) posee una cohesión efectiva que varía de 20 kPa a 64 kPa y un ángulo de fricción interna efectiva que varía de 34° a 36°. Para la estimación de la resistencia cortante se utilizó los valores más representativos obteniéndose la envolvente no lineal de Leps (1970) – Barton & Bjaernsli, (1981). En la Figura N 24 se muestra la variación del ángulo de fricción en función del esfuerzo normal para el material Tipo 2. Es importante señalar que la curva se encuentra dentro del rango de variación para grandes confinamientos, según la literatura (Leps,1970).

El material Tipo 2 también es permeable y cumple la función de filtro de transición compatible con el material de filtro (material Tipo 1) y el enrocado (material tipo 3).

Los ensayos de conductividad hidráulica en laboratorio (DOC-136) reportaron valores en el rango de $1,0 \times 10^{-2}$ – $4,6 \times 10^{-3}$ m/s para este material. Para fines del presente estudio se ha considerado un coeficiente de conductividad hidráulica promedio de $6,7 \times 10^{-3}$ m/s. Asimismo, se consideró un peso unitario saturado de 23,3 kN/m³, valor que se utilizó para los análisis de estabilidad de taludes y esfuerzo deformación.

Adicionalmente, se asignó a este material un ángulo de fricción efectivo promedio de acuerdo con la formulación del modelo HS de 38,8°, para los análisis de deformaciones y una envolvente de resistencia para los análisis de equilibrio límite.

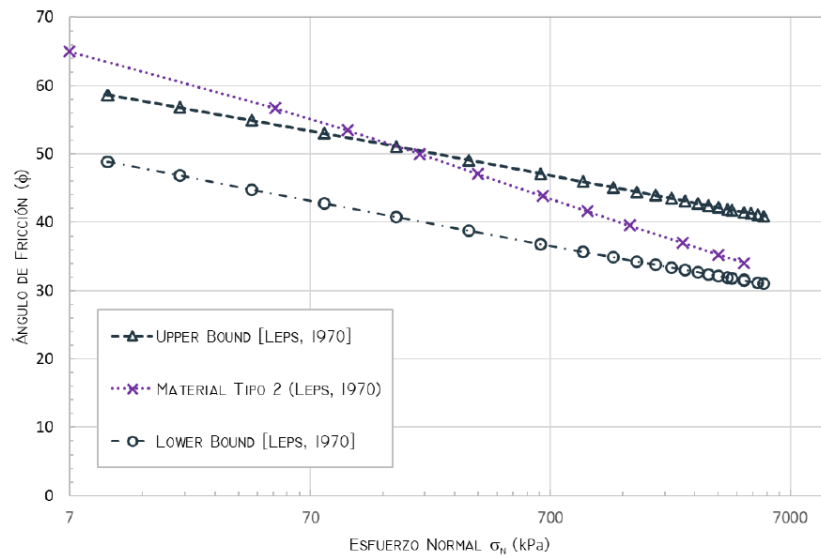


Figura N 24: Relación de ángulo de fricción con esfuerzo normal – Material Tipo 2
Fuente: Wood (2022)

La envolvente no lineal de resistencia del material Tipo 2 utilizado en los análisis de equilibrio límite se muestra en la Figura N 25.

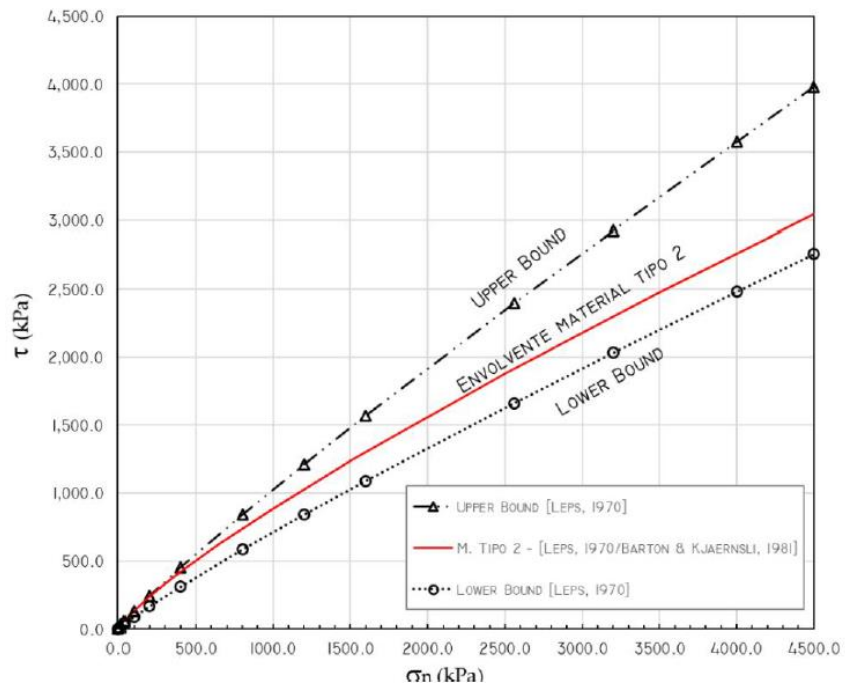


Figura N 25: Envolvente de resistencia al corte del material Tipo 2
Fuente: Wood (2022)

5.9.4 Material de enrocado (Tipo 3)

El material está conformado por enrocado (material Tipo 3), proveniente de rocas calizas, posee una clasificación SUCS de grava pobremente graduada

con arcilla y limo con arena (GP-GC); posee baja plasticidad ($IP=5$). La distribución granulométrica varía de 68% a 78% de contenido de grava, 15% a 24% de arena y 7% a 8% de fino. Además, posee partículas de tamaño máximo de 59”.

Debido al gran tamaño de partículas que posee el enrocado, fue necesario escalar la distribución granulométrica para poder realizar ensayos de compresión triaxial en probetas de 150 mm (6”) de diámetro. La distribución granulométrica escalada u homotética puede replicar, aproximadamente, la resistencia al corte del enrocado en condiciones reales de campo.

Es importante señalar que existen registros de ensayos compresión triaxial a gran escala en este tipo de material, en especímenes de 30 cm y 100 cm de diámetro. Estos ensayos se asemejan a la condición real de terreno y representan mejor el comportamiento de resistencia al corte.

El material Tipo 3 (Enrocado) posee una cohesión efectiva que varía de 0 kPa a 37,9 kPa y un ángulo de fricción interna efectiva que varía de $33,7^\circ$ a $38,8^\circ$. La resistencia cortante fue estimada utilizando los valores de ángulo de fricción más representativos y de mayor precisión que corresponden a las características granulométricas del Enrocado. Finalmente, la resistencia cortante fue estimada con el modelo no lineal de Leps, (1970) – Barton & Bjaernsli, (1981). En la Figura N 26 se muestra la variación del ángulo de fricción en función del esfuerzo normal para el material Tipo 3. Es importante señalar que la curva se encuentra dentro del rango de variación según la literatura (Leps,1970).

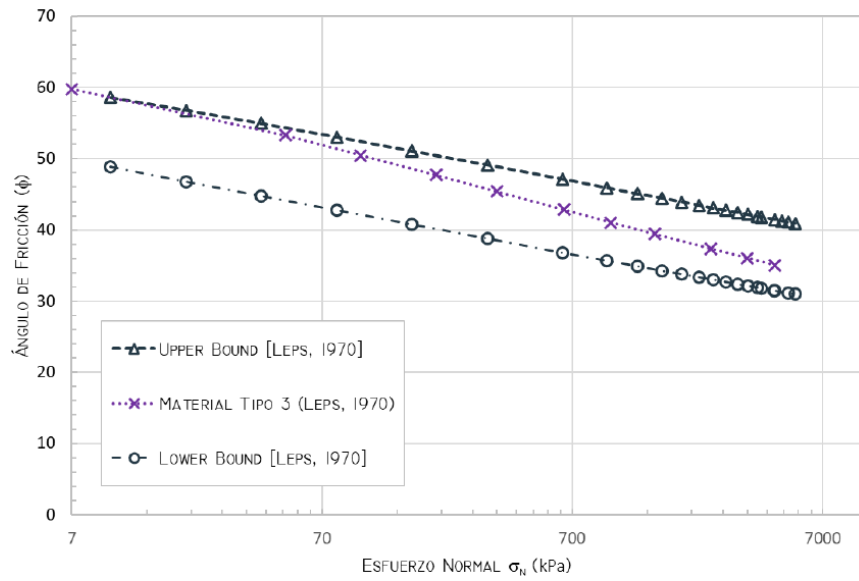


Figura N 26: Relación de ángulo de fricción con esfuerzo normal – Material Tipo 3
Fuente: Wood (2022)

Luego se generó la envolvente no lineal de resistencia del material Tipo 3 utilizado en los análisis de equilibrio límite. En la Figura N 27 se observa la envolvente obtenida.

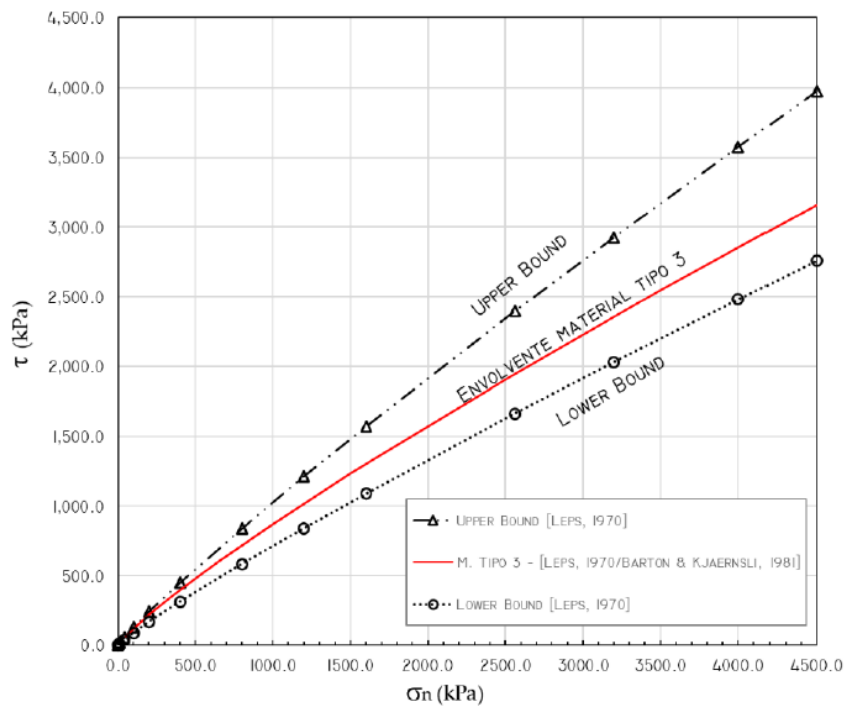


Figura N 27: Envolvente de resistencia al corte del material Tipo 3
Fuente: Wood (2022)

Para fines del presente estudio se ha considerado un coeficiente de conductividad hidráulica promedio de 5×10^{-3} m/s. Asimismo, se consideró un peso unitario saturado de 23,8 kN/m³.

5.9.5 Material de enrocado (Tipo 3A)

El material de enrocado Tipo 3A es considerado material de enrocado permeable de granulometría bien gradada compuesto por roca, grava y arena con tamaño máximo de partícula de 1,0 m. Para fines de este reporte se ha considerado un peso unitario saturado de 23 kN/m³ y un valor de conductividad hidráulica de 5×10^{-3} m/s. Se le asignó un ángulo de fricción efectivo promedio de 38,7° y cohesión nula, considerando su distribución granulométrica.

5.9.6 Relaves depositados

Los relaves corresponden al residuo que contiene mineral molido y agua el cual corresponde a la cola del proceso de flotación, conformados principalmente por arenas con importante presencia de materiales finos, dispuestos en estado saturado.

Las muestras de relave fueron extraídas del área cercana a la cara aguas arriba de la presa hacia el estribo oeste. Las muestras de relave fueron extraídas del área cercana a la cara aguas arriba de la presa hacia el estribo oeste.

Se determinó que el peso unitario promedio saturado es 18 kN/m³, obtenido de los ensayos de densidad máxima y mínima. La conductividad hidráulica promedio determinado de ensayos de laboratorio de pared flexible es de $1,94 \times 10^{-7}$ m/s.

Se asignó un ángulo de fricción interna en términos de esfuerzos efectivos no drenados de 21°, con cohesión nula, estos valores fueron seleccionados en base al reprocesamiento e interpretación de los resultados de los ensayos de laboratorio realizados en el año 2016 y 2021.

5.10 Propiedades y parámetros geotécnicos

La Tabla N°9 resume las propiedades y parámetros geotécnicos utilizados en la evaluación de la estabilidad física por el método de equilibrio límite y el análisis de

filtraciones, ambos análisis realizados con fines de estudiar la estabilidad de la presa de relaves. Adicionalmente, se analizó la estructura de contención ubicada al noroeste de la presa de relaves, la construcción de un dique secundario contemplará la misma distribución de materiales que la presa de relaves principal y comenzará su construcción durante la Etapa VI-B de recrecimiento.

Tabla N°9

Propiedades y parámetros geotécnicos de los materiales

Material	Peso unitario (kN/m ³)		ϕ' (°)	ϕ' (°)	c' (kPa)	k (m/s)
	Seco	Saturado				
Tipo 1	22	23,3			0	5,0E-4
Tipo 2	21,6	23,3			0	6,7E-3
Tipo 3A	22,8	23,8			0	5E-3
Tipo 3	21,6	23	38,7	38,7	0	5E-3
Relaves depositados	14	18	21	-	0	1,9E-7
Basamento rocoso competente	24,4	25,4				1,9E-6
Basamento rocoso fracturado	23,6	24,6				6,9E-7
Brecha de falla	20	21	-	40	0	1,2E-7

Fuente: Wood (2022)

5.11 Coeficiente sísmico

Tabla N°10

Coeficiente sísmico

Descripción	Unidad	Criterio	Fuente
Estabilidad de taludes			
Factor de seguridad estático mínimo	-	1,5	CDA (2019), Marcuson and Curro (1981), USACE, Hynes-
Factor de seguridad pseudo-estático mínimo	-	1,0	Griffin and Franklin (1984), ANCOLD (2011)
Sismicidad			
Aceleración máxima de diseño (475)	g	0,54	Estudio de Peligro Sísmico,

Descripción	Unidad	Criterio	Fuente
años)			Wood (2019)
Coefficiente sísmico	g	0,27	Hynes-Griffin and Franklin (1984)

Fuente: Elaboración propia

5.12 Resultados del análisis de estabilidad física

Para el análisis de estabilidad física se ha analizado dos escenarios:

- Escenario 1: Presencia de una geomembrana en el área de contacto de la presa de relaves con el relave depositado.
- Escenario 2: Falla de la geomembrana en el área de contacto de la presa de relaves con el relave depositado.

En la Tabla N°11 se presentan los resultados obtenidos de los análisis de estabilidad física para las secciones A-A' y B-B', analizados en condiciones estática y pseudo-estática considerando el nivel freático en el cuerpo de la presa de relaves.

Tabla N°11

Resultados de los análisis de estabilidad física

Escenario	Sección analizada	Análisis	Factor de seguridad	
			Equilibrio límite	Mínimo requerido
Escenario 1	Sección A-A'	Estático	1.71	1.5
		Pseudo- estático	1.02	1.0
	Sección B-B'	Estático	1.71	1.5
		Pseudo- estático	1.03	1.0
Escenario 2	Sección A-A'	Estático	1.47	1.5
		Pseudo- estático	0.87	1.0
	Sección B-B'	Estático	0.95	1.5
		Pseudo- estático	0.52	1.0

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los factores de seguridad de taludes obtenidos presentados en la Tabla N°11 y en la Figura N 28 hasta la Figura N 35, son mayores a los mínimos requeridos de acuerdo con los valores presentados en la Tabla N°10 . Por lo tanto, se concluye que el diseño de la Etapa VII de la presa de relaves se considera estable bajo las condiciones analizadas y con la información disponible a la fecha de análisis.

5.12.1 Escenario 1

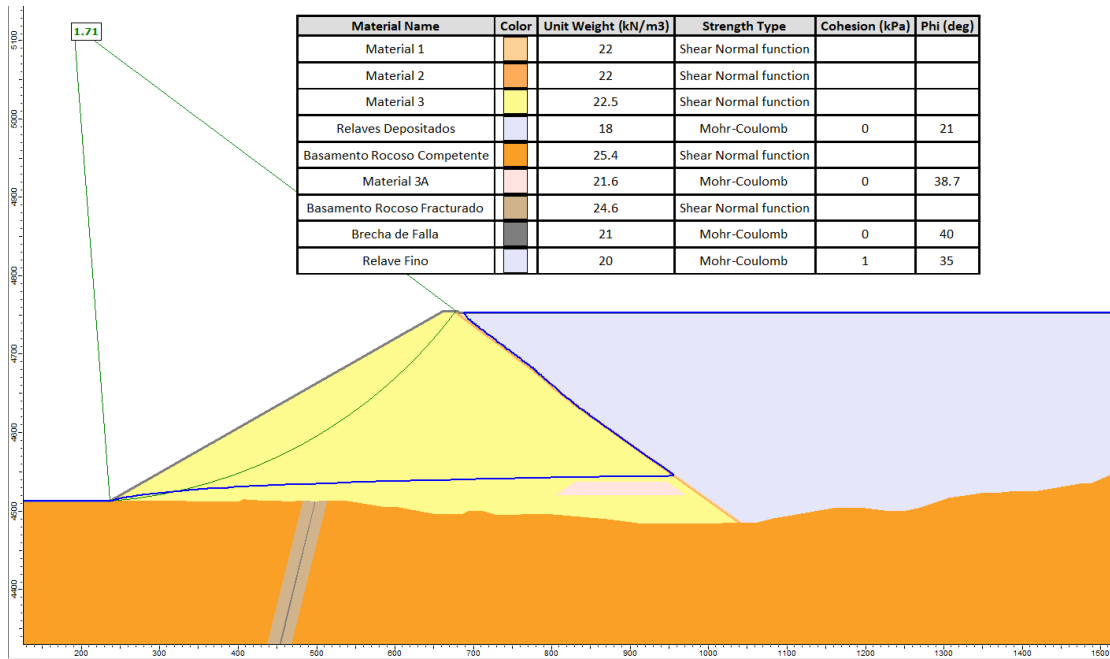


Figura N 28: Análisis de estabilidad estático - Sección A-A'

Fuente: Elaboración propia

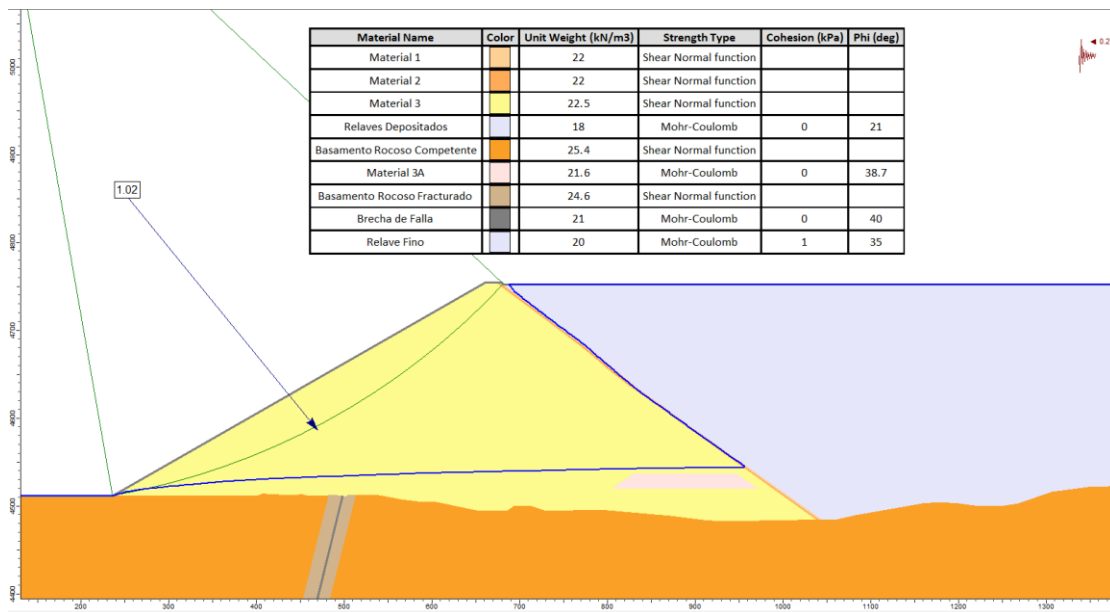


Figura N 29: Análisis de estabilidad pseudo-estático - Sección A-A'

Fuente: Elaboración propia

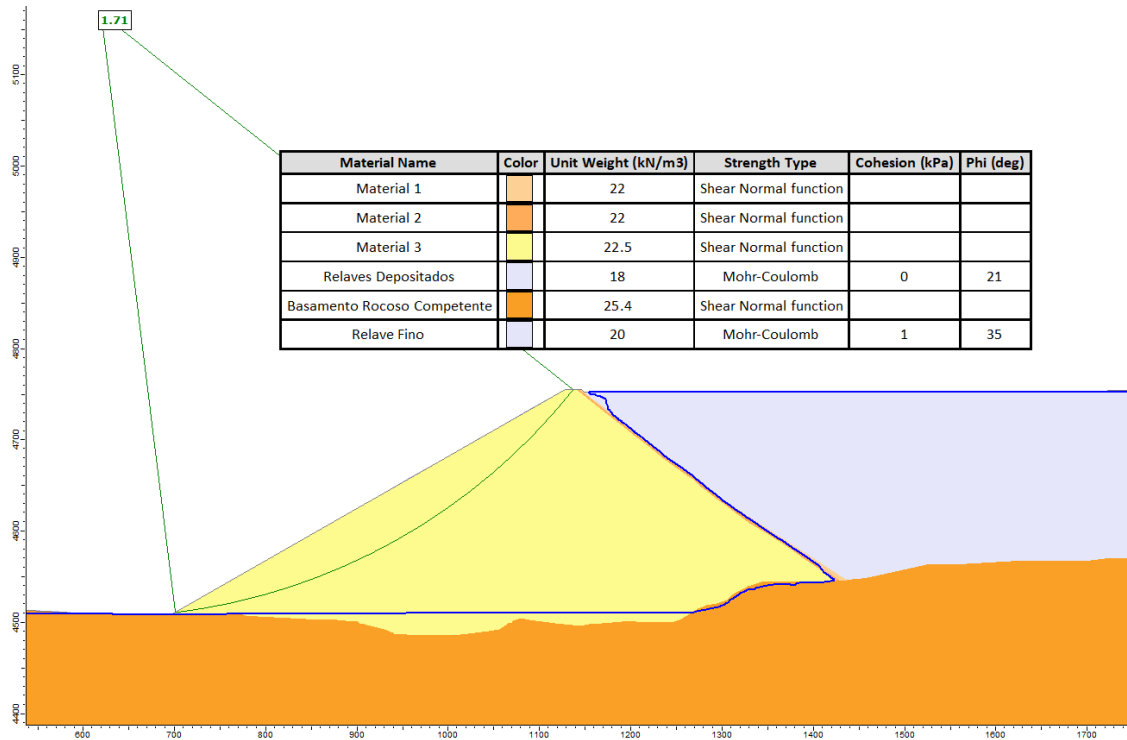


Figura N 30: Análisis de estabilidad estático - Sección B-B'
Fuente: Elaboración propia

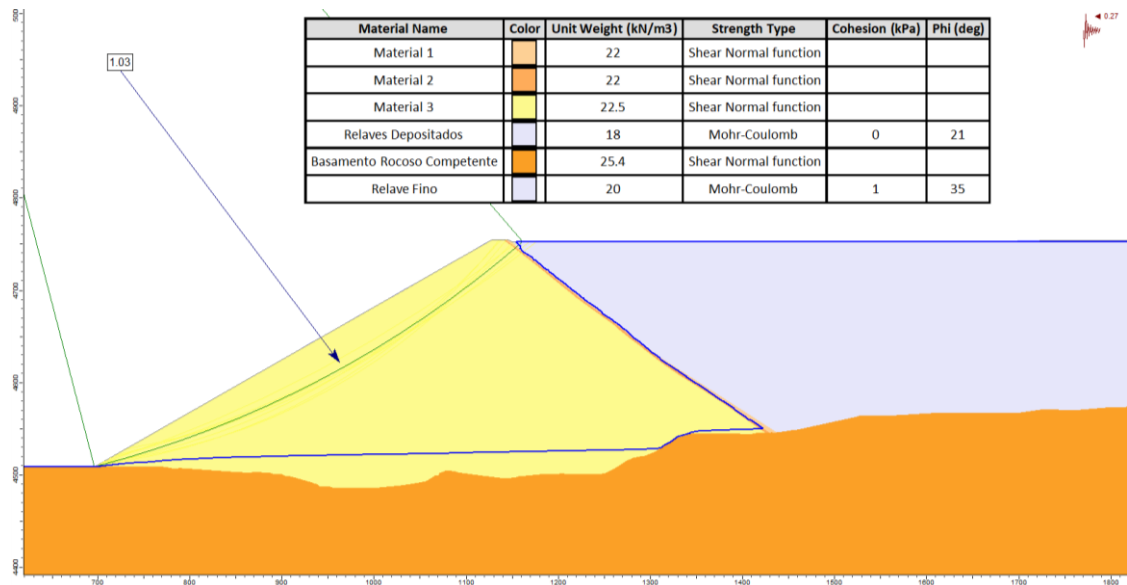


Figura N 31: Análisis de estabilidad pseudo-estático - Sección B-B'
Fuente: Elaboración propia

5.12.2 Escenario 2

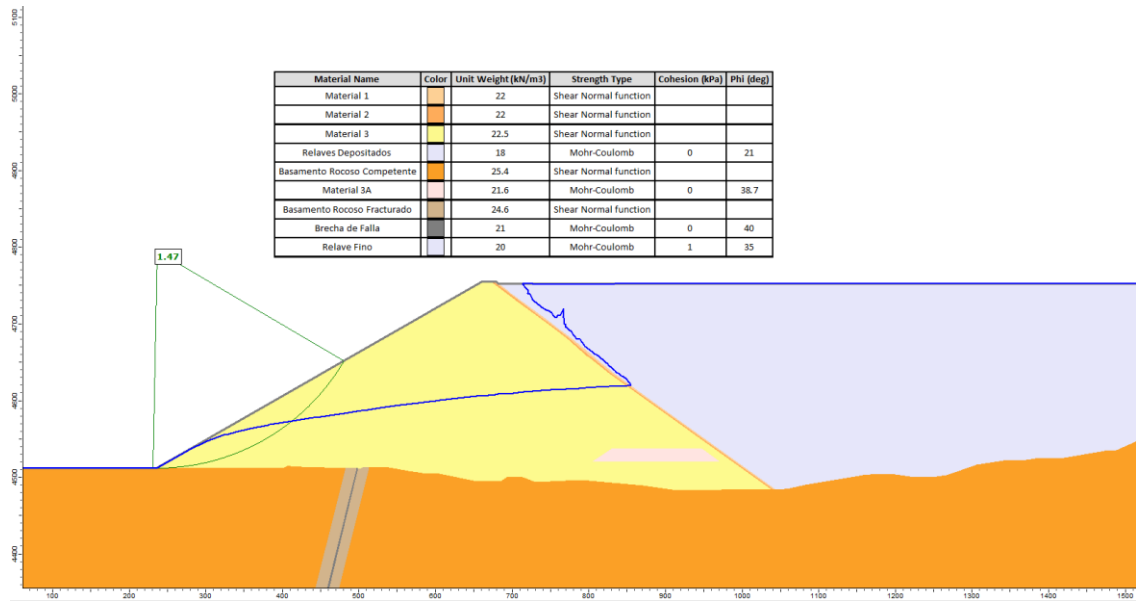


Figura N 32: Análisis de estabilidad estático - Sección A-A'
Fuente: Elaboración propia

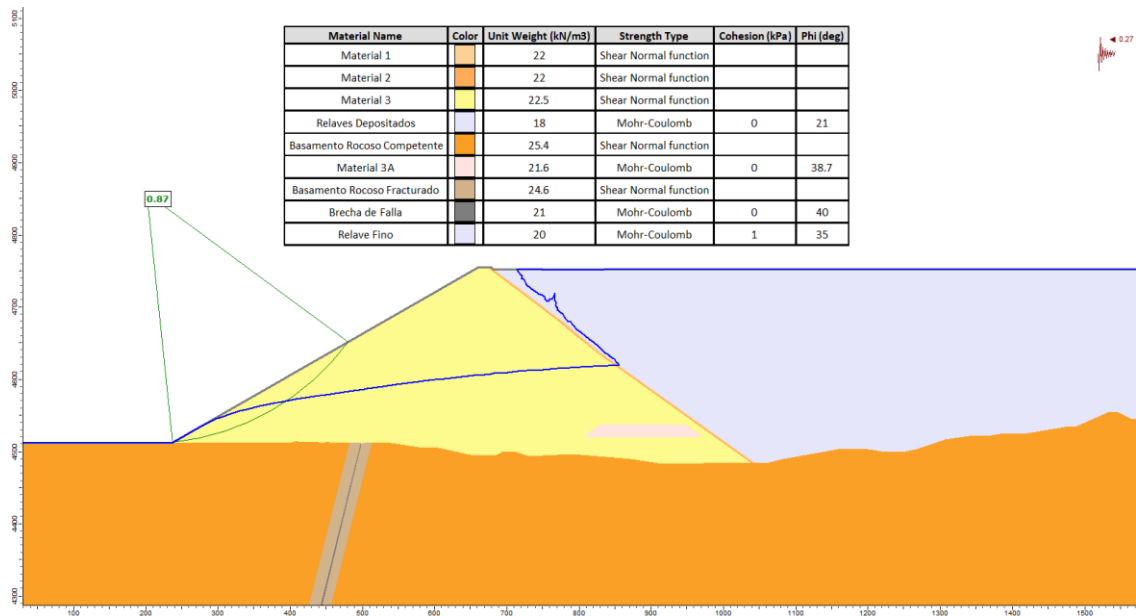


Figura N 33: Análisis de estabilidad pseudo-estático - Sección A-A'
Fuente: Elaboración propia

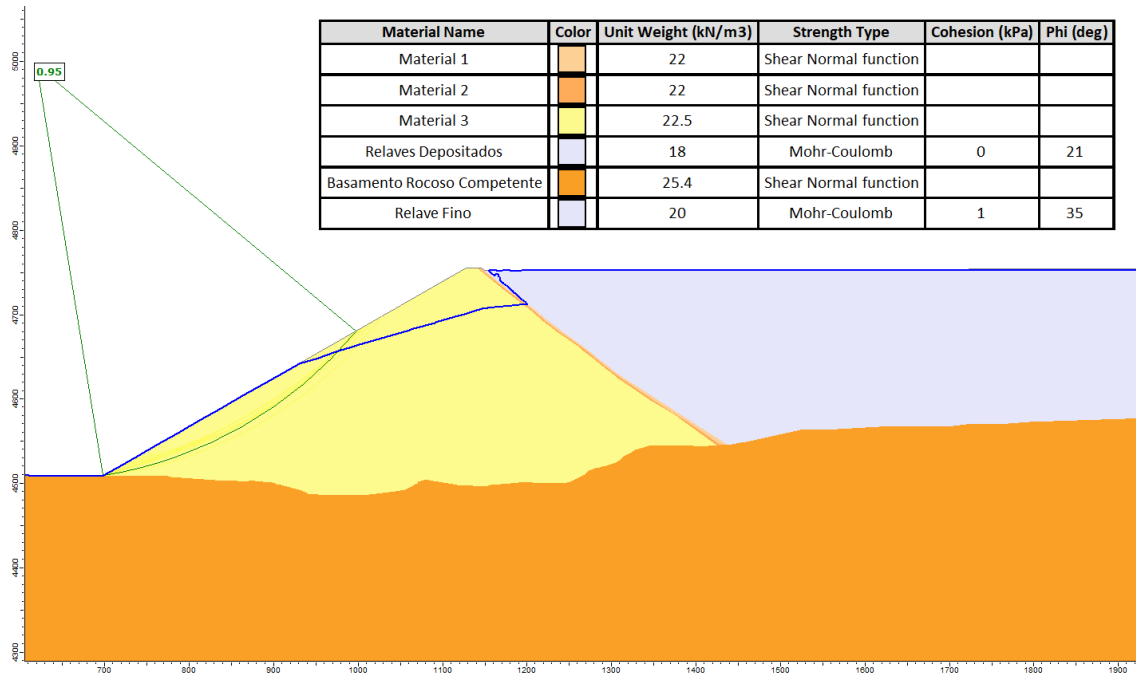


Figura N 34: Análisis de estabilidad estático - Sección B-B'
Fuente: Elaboración propia

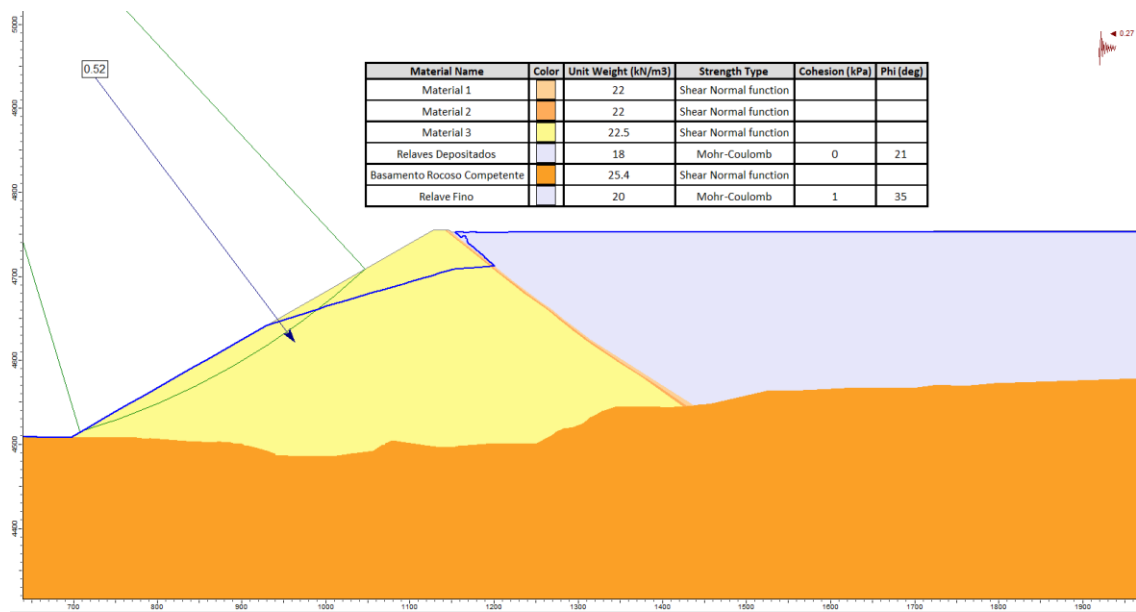


Figura N 35: Análisis de estabilidad pseudo-estático - Sección B-B'
Fuente: Elaboración propia

5.13 Resultados del análisis de infiltraciones

Para el análisis de infiltraciones se ha analizado dos escenarios:

- Escenario 1: Presencia de una geomembrana en el área de contacto de la presa de relaves con el relave depositado.
- Escenario 2: Falla de la geomembrana en el área de contacto de la presa de relaves con el relave depositado.

En la Tabla N°12 se presentan los resultados obtenidos de los análisis de infiltraciones para las secciones A-A' y B-B'.

Tabla N°12

Resultados de los análisis de infiltraciones

Escenario	Sección analizada	Caudal (m ³ /d/m)	Ancho de análisis (m)	Caudal (m ³ /h)	Caudal (l/s)
Escenario 1	Sección A-A'	232.63	900	8723.63	2423.23
	Sección B-B'	9.75	750	304.68	84.63
Escenario 2	Sección A-A'	2161.1	900	81041.25	22511.46
	Sección B-B'	3664.2	750	114506.25	31807.29

Fuente: Elaboración propia

De la tabla se puede apreciar que para ambas secciones se tiene una diferencia considerable entre los resultados de ambos escenarios.

El enmallado y las condiciones de borde realizados en el análisis de infiltración se muestran en la Figura N 36 y Figura N 37.

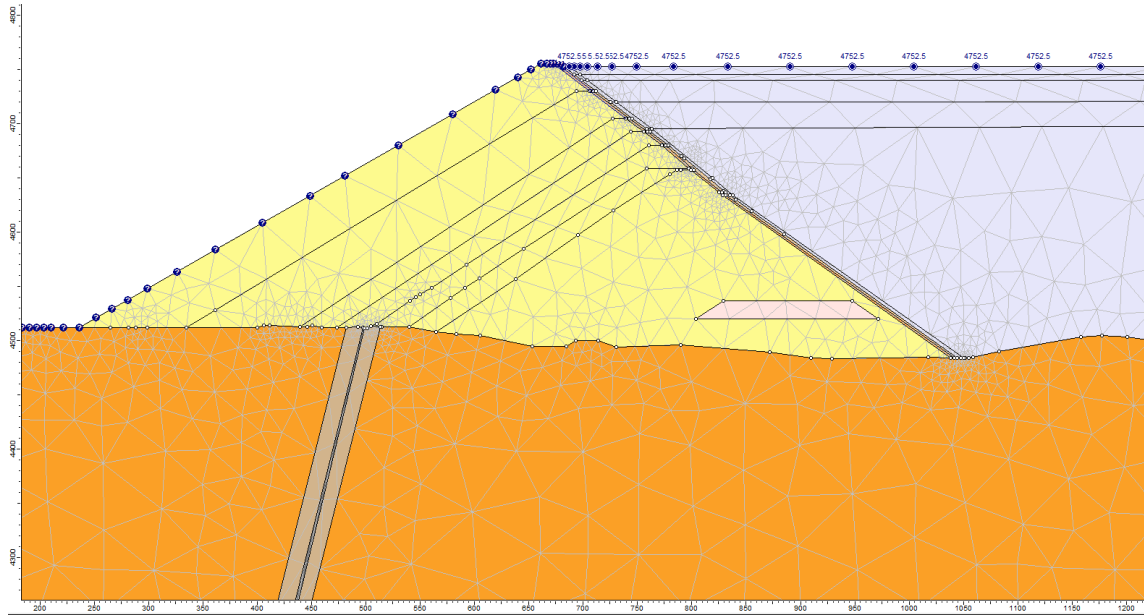


Figura N 36: Enmallado y condiciones de borde - Sección A-A'
 Fuente: Elaboración propia

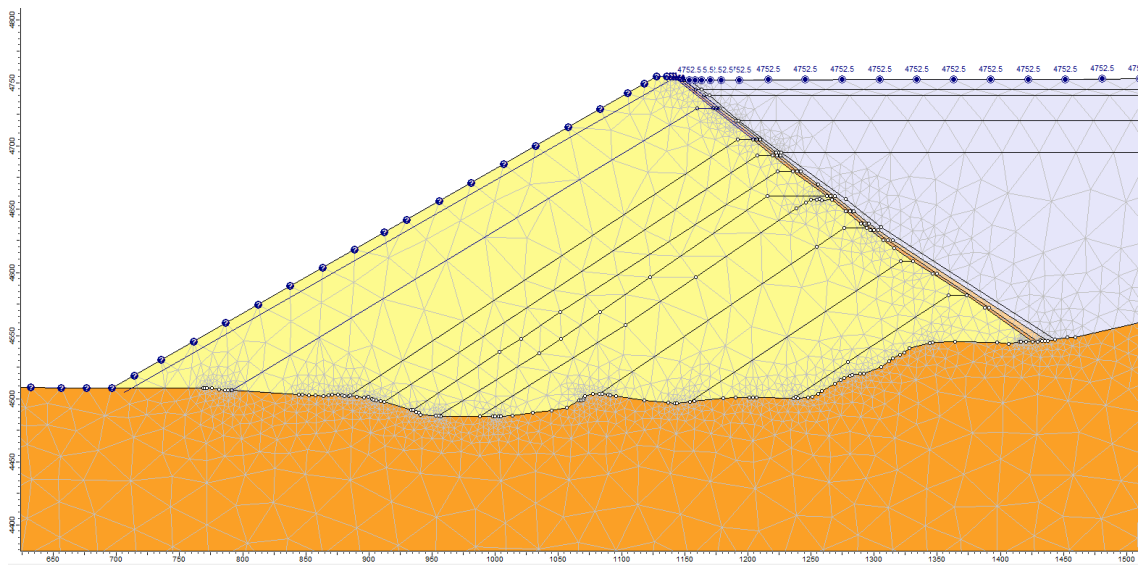


Figura N 37: Enmallado y condiciones de borde - Sección B-B'
 Fuente: Elaboración propia

Los resultados del análisis de infiltración para cada etapa se muestran desde la Figura N 38 hasta la Figura N 49.

5.13.1 Escenario 1

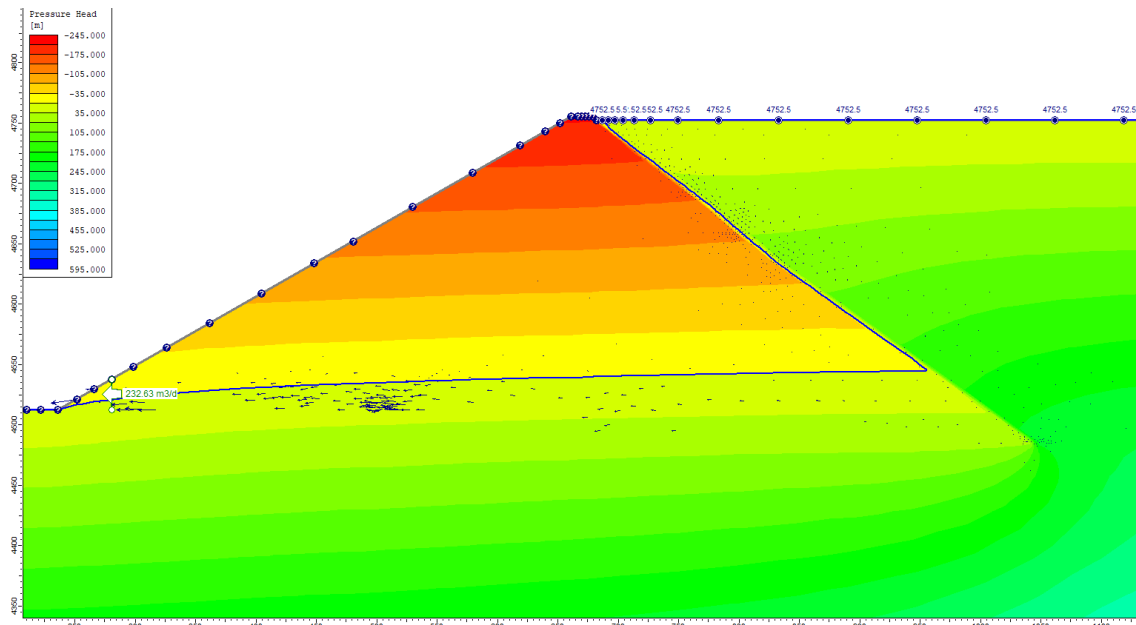


Figura N 38: Análisis de infiltración pressure head - Sección A-A'
Fuente: Elaboración propia

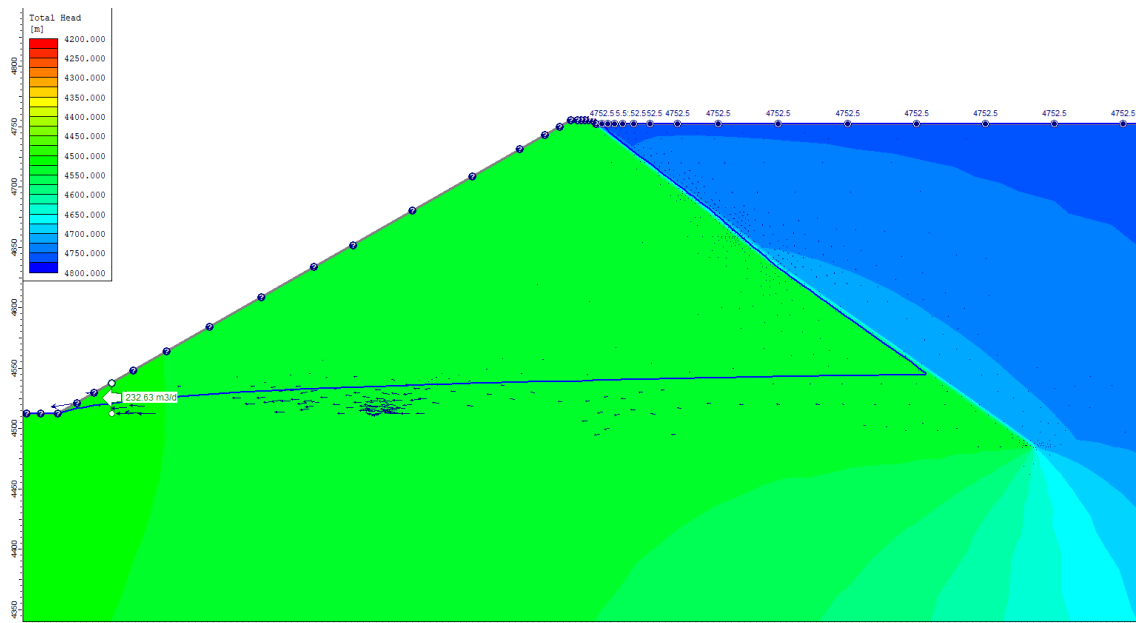


Figura N 39: Análisis de infiltración total head - Sección A-A'
Fuente: Elaboración propia

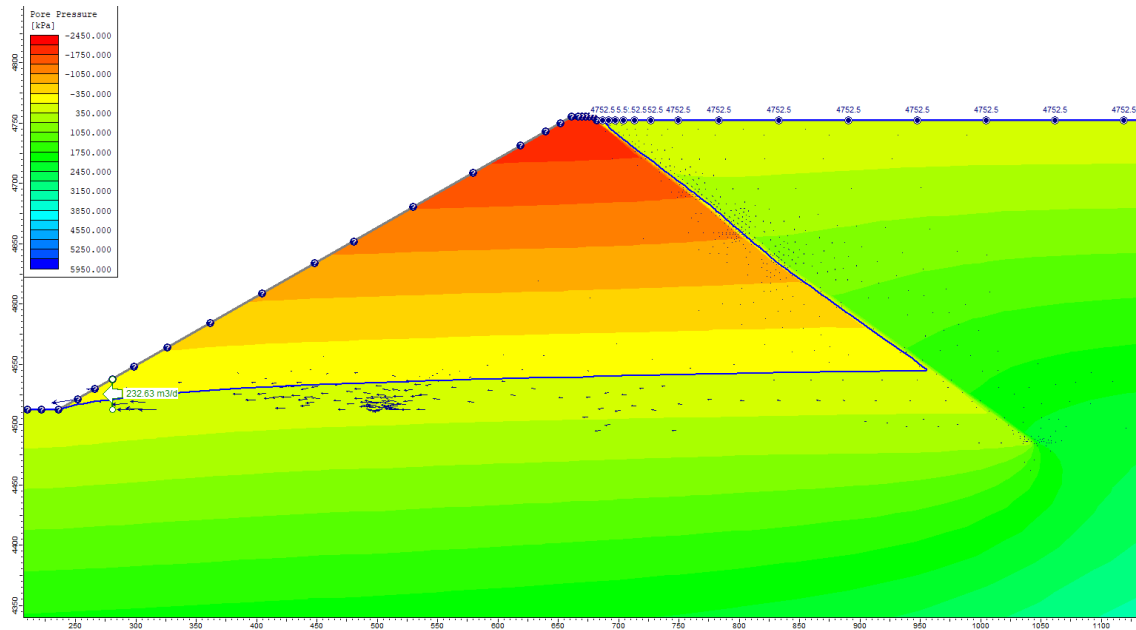


Figura N 40: Análisis de infiltración pore pressure - Sección A-A'
 Fuente: Elaboración propia

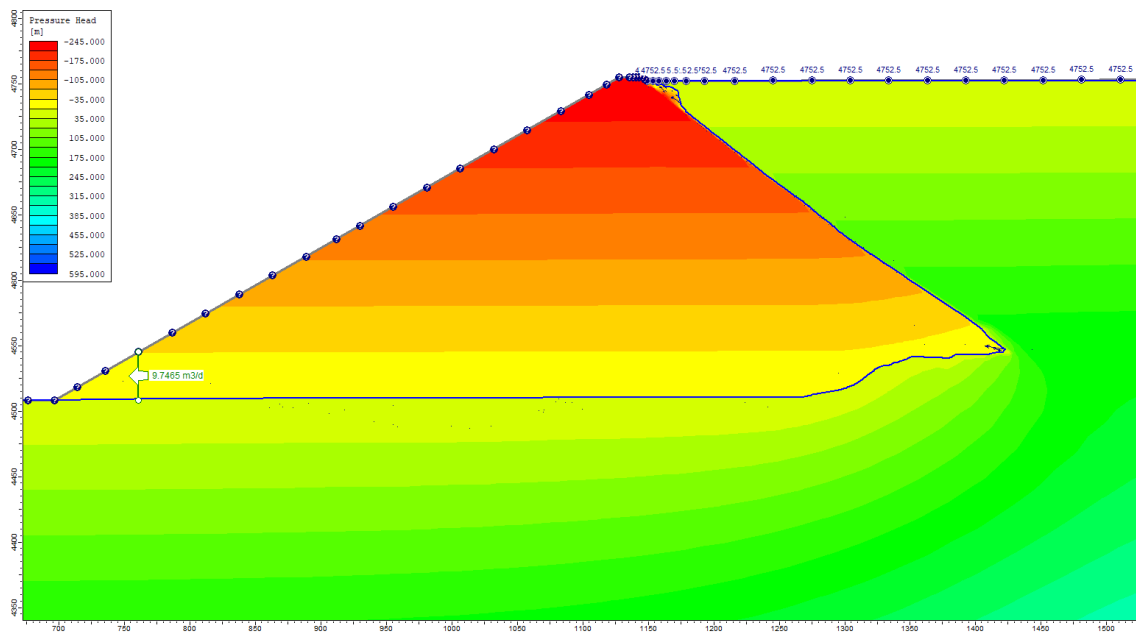


Figura N 41: Análisis de infiltración pressure head - Sección B-B'
 Fuente: Elaboración propia

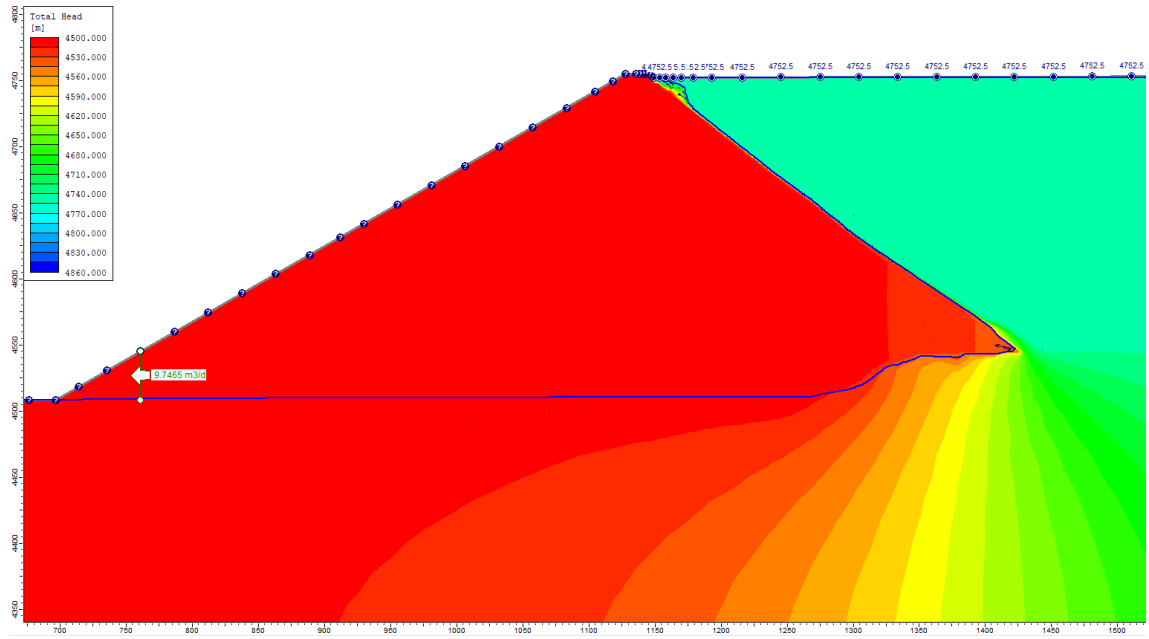


Figura N 42: Análisis de infiltración total head - Sección B-B'
Fuente: Elaboración propia

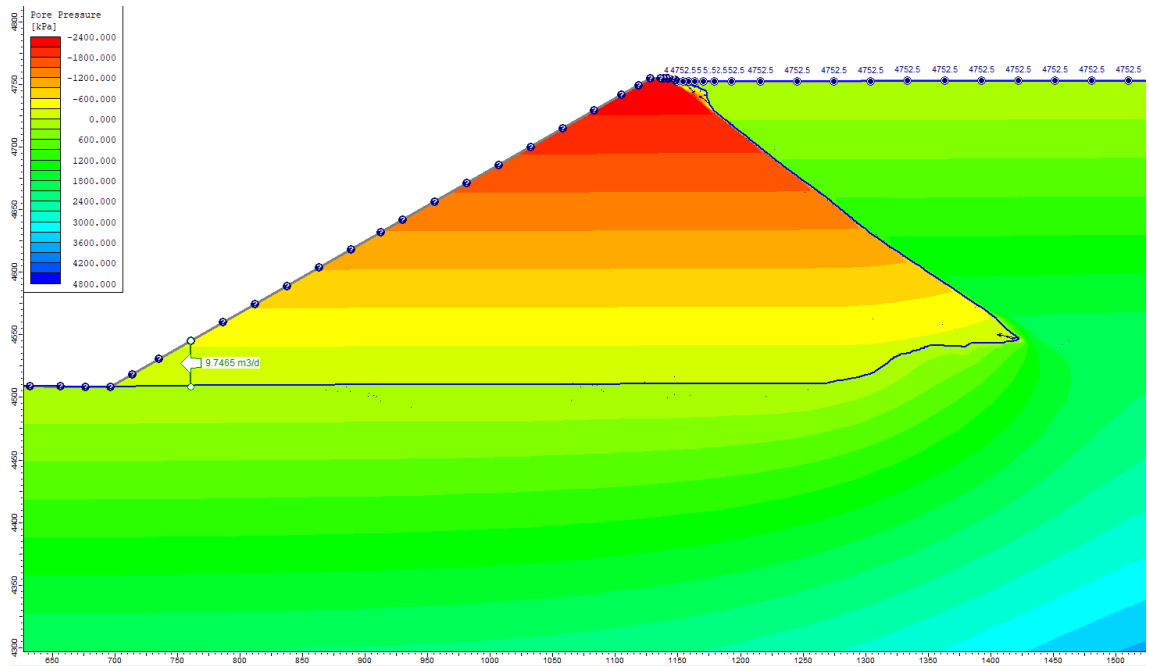


Figura N 43: Análisis de infiltración pore pressure - Sección B-B'
Fuente: Elaboración propia

5.13.2 Escenario 2

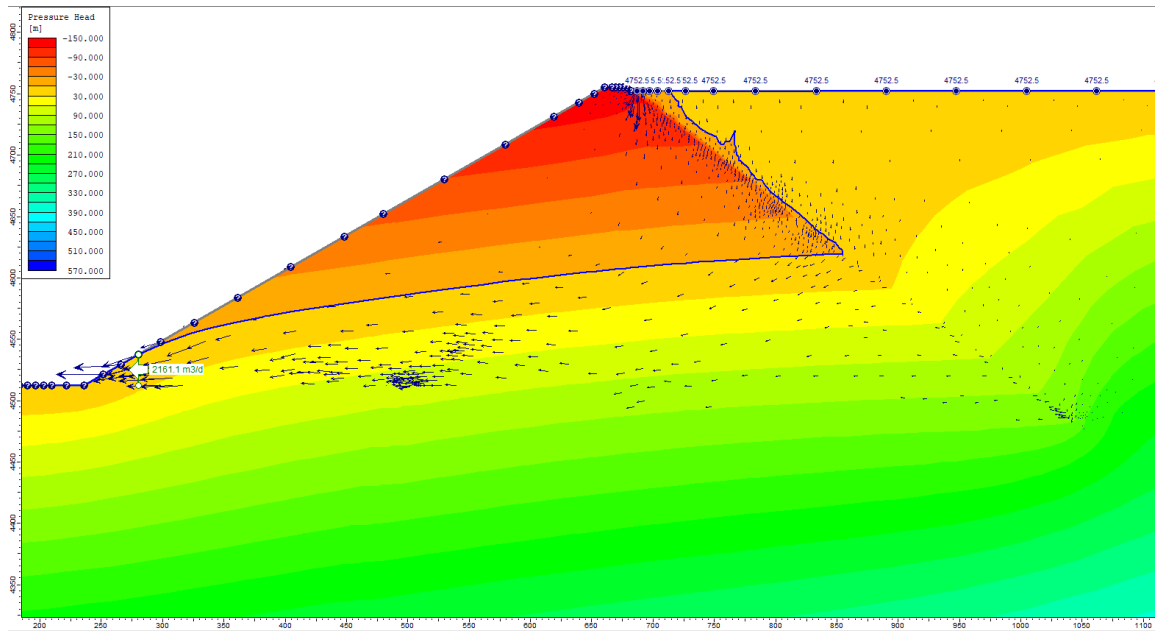


Figura N 44: Análisis de infiltración pressure head - Sección A-A'
Fuente: Elaboración propia

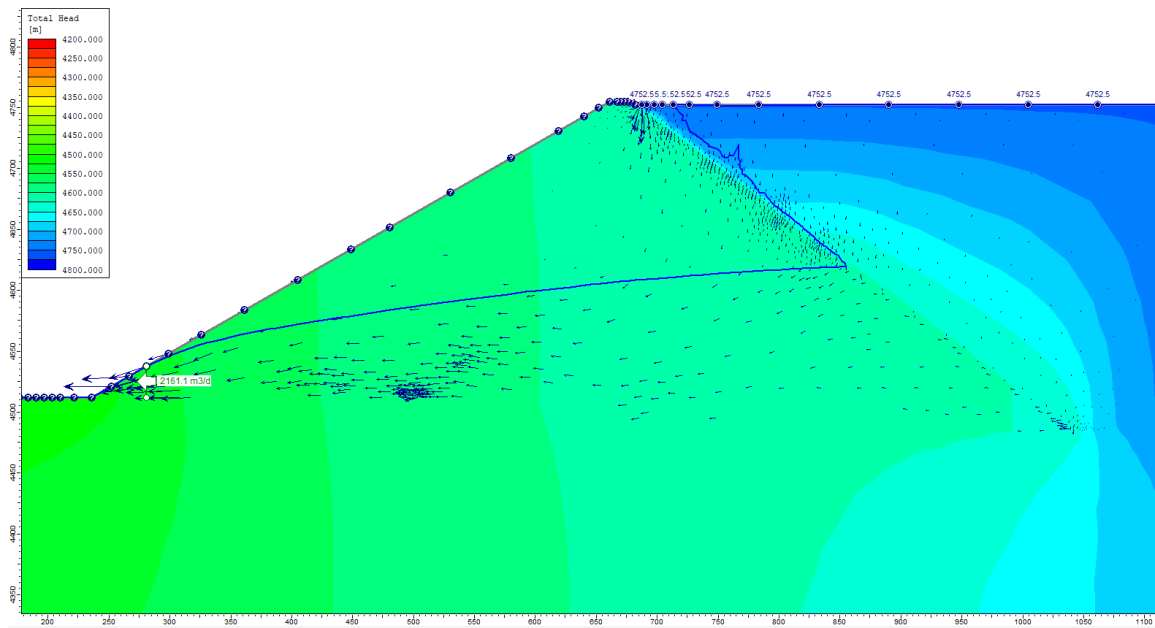


Figura N 45: Análisis de infiltración total head - Sección A-A'
Fuente: Elaboración propia

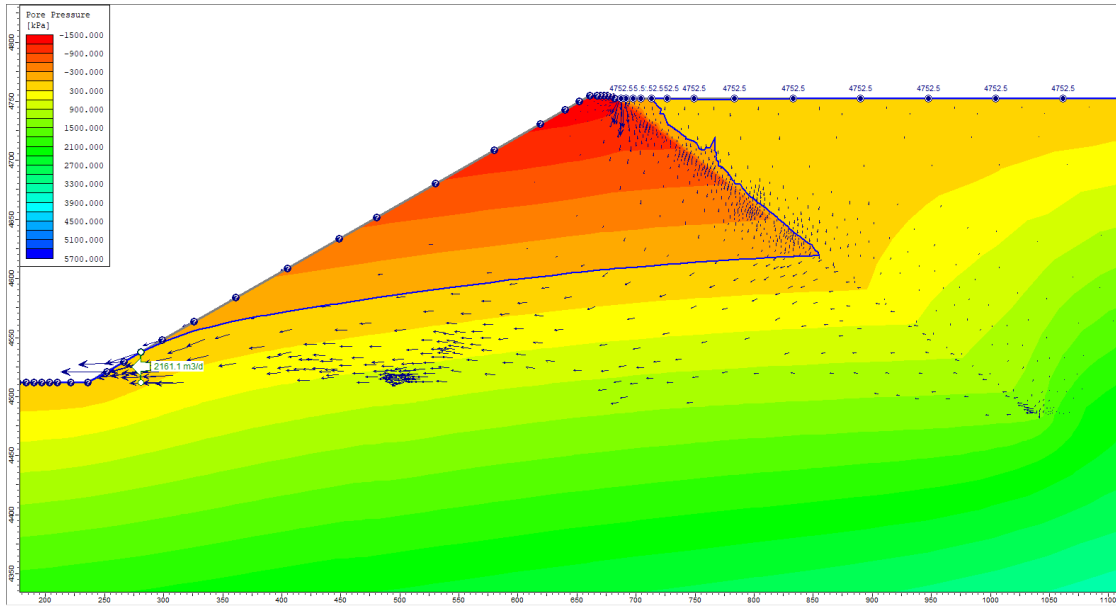


Figura N 46: Análisis de infiltración pore pressure - Sección A-A'
 Fuente: Elaboración propia

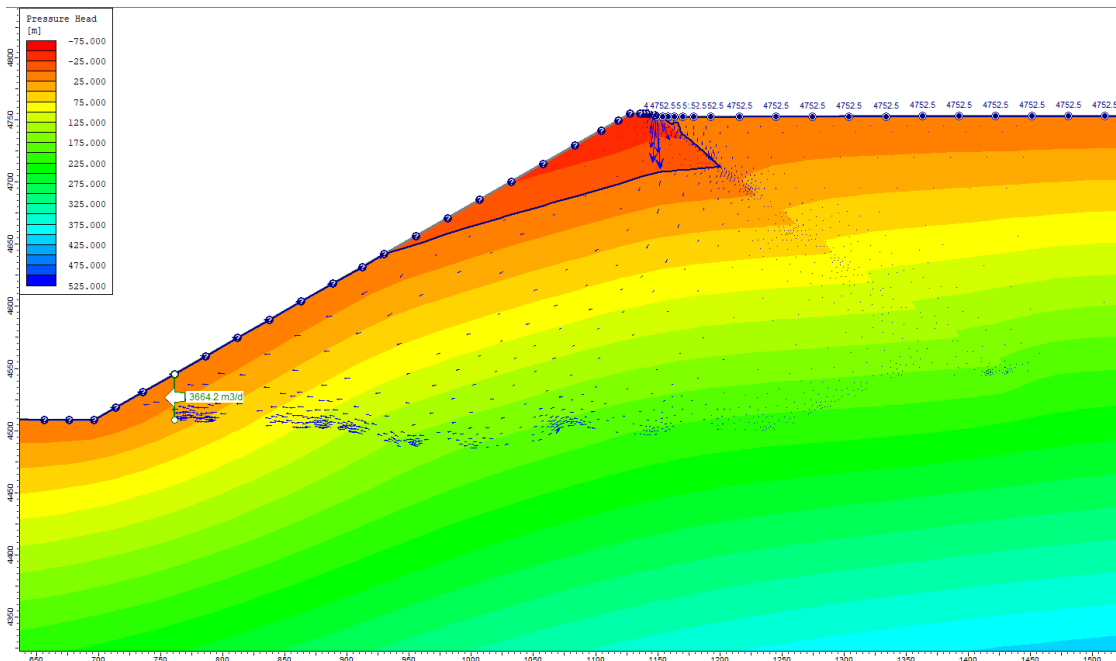


Figura N 47: Análisis de infiltración pressure head - Sección B-B'
 Fuente: Elaboración propia

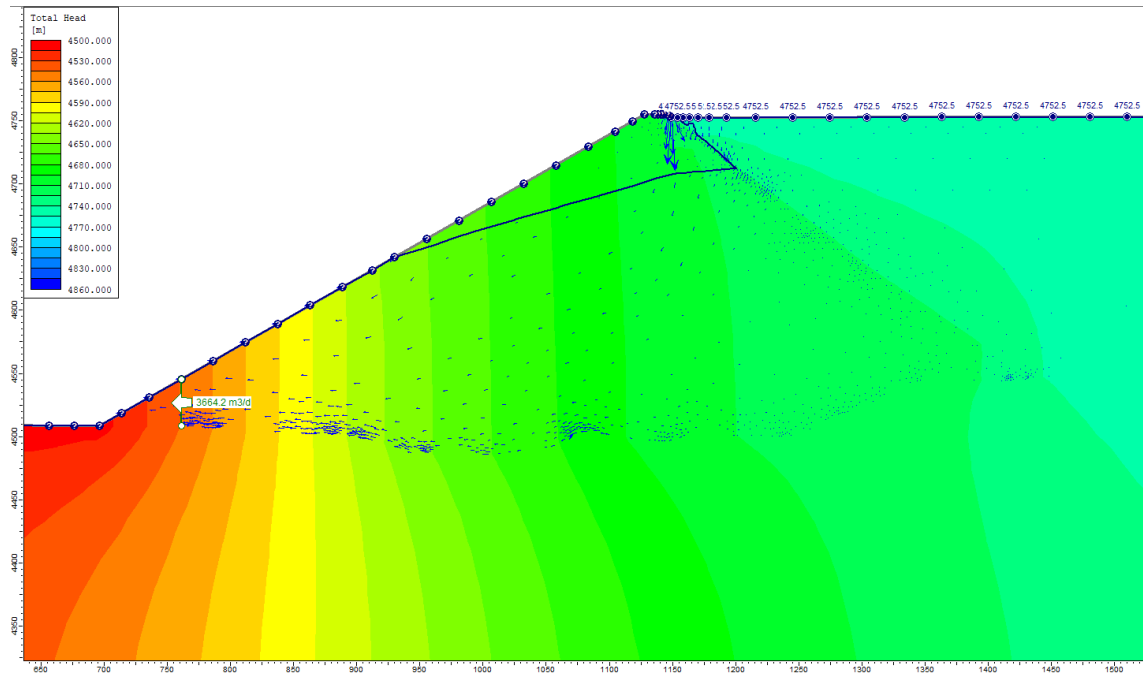


Figura N 48: Análisis de infiltración total head - Sección B-B'
Fuente: Elaboración propia

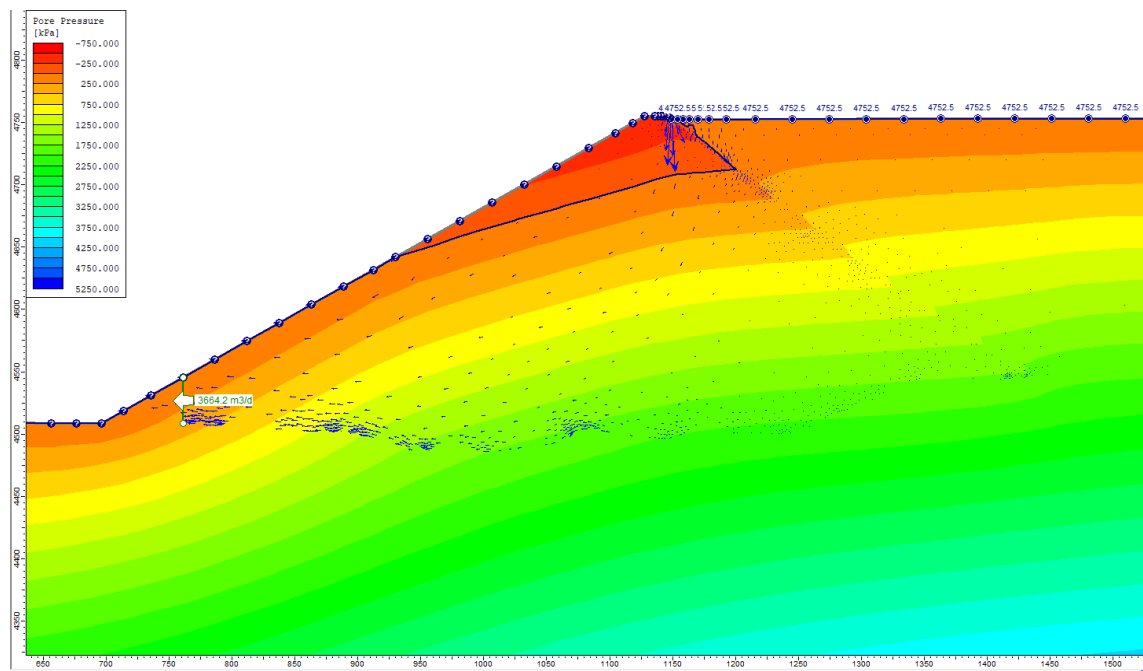


Figura N 49: Análisis de infiltración pore pressure - Sección B-B'
Fuente: Elaboración propia

5.14 Resultados del análisis de desplazamientos por sismo

Los resultados de los análisis de desplazamientos permanentes inducidos por sismo y el asentamiento se muestran en la

Tabla N°13.

Tabla N°13

Resultados del analisis de desplazamientos simplificado

Sección	Rango de Desplazamientos		Asentamiento de la cresta	Deformación Máxima Permisible
	P(D) \approx 0 ⁽¹⁾ %	B&M (2019) ⁽²⁾ (cm)	Swaissggod (2003-2013) (cm)	⁽³⁾ (cm)
A-A'	19	0.01 – 0.05	400.16	242.8
B-B'	17	0.01 – 0.05	353.72	246.5

Notas:

(1) De acuerdo con Bray & Macedo (2019), P(D) \approx 0 se define como la probabilidad de tener desplazamientos menores a 0.5 cm.

(2) Rangos de desplazamientos con una probabilidad de ocurrencia de 16 % y 84 %.

(3) Considerado como un 1 % de la altura de la falla.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VI: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Presentación de los resultados

6.1.1 Identificación de modos de falla

La identificación de modos potenciales de falla se realizó considerando la última información de campo, estudio hidrológico, peligro sísmico, la caracterización e investigación de sitio, el diseño geométrico y los materiales que componen el cuerpo y la fundación de la presa de relaves, los cuales se detallan a continuación:

- Falla por rebalse / Overtopping
- Falla de la estructura de la presa y/o taludes / Structural failure
- Falla de la fundación / Foundation failure
- Tubificación o erosión interna / Piping and internal erosion

Asimismo, estos modos de falla evaluados se encuentran incluidos en la Guide to the Management of Tailings Facilities Version 3.1 (2019) del Mining Association of Canada (MAC).

6.1.2 Evaluación de las causas potenciales de falla

Una vez identificados los modos de falla, se identificaron las causas que podrían generar cada uno de los modos de falla, y se verificaron si los eventos o causas (trigger) son creíbles.

Tabla N°14

Evaluación de los modos potenciales de falla

Modo potencial de falla	Evento	Causas/Trigger
Falla por rebalse / <i>Overtopping</i>	Rebalse de la presa genera pérdida a gran escala de su contenido.	<ul style="list-style-type: none">• Precipitación extrema (PMP) + capacidad inadecuada de bombeo. (La precipitación excede la capacidad de bombeo).• Precipitación extrema (PMP) + alto nivel de agua de la laguna de operación (Deficiente manejo de aguas combinado con una precipitación extrema).• Sismo de gran magnitud y/o vientos

Modo potencial de falla	Evento	Causas/Trigger
		<p>extremos que generen oleaje alto.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sismo de gran magnitud y/o mantenimiento inadecuado que produce rotura de las tuberías de descarga de relaves ubicadas en la cresta de la presa.
<p>Falla de la estructura de presa y/o taludes / <i>Structural failure</i></p>	<p>Falla que produce inestabilidad estructural de presa y/o taludes</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sismo de gran magnitud que genera esfuerzos de corte mayores a la resistencia del material. • Sismo de gran magnitud que conduce al agrietamiento y/o deformaciones de la presa. • Nivel piezométrico alto que genera reducción de la resistencia cortante del material. • Inadecuado diseño de ingeniería, factores de seguridad y criterios de diseño. • Inadecuado control y aseguramiento de calidad de los materiales que componen el cuerpo de la presa.
<p>Tubificación o erosión interna / <i>Piping and internal erosion</i></p>	<p>Erosión interna del material del dique o fundación que produce pérdida a gran escala de agua y relaves.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Agua almacenada junto al talud aguas arriba de la presa (con playas menores a 100 m o sin playa de relaves). • Sismo de gran magnitud que conduce al asentamiento excesivo, agrietamiento y/o deformaciones del filtro y/o dren. • Inadecuado diseño del filtro y/o dren que compone el cuerpo de la presa. • Inadecuado control y aseguramiento de calidad del material de filtro y/o dren que compone el cuerpo de la presa. • Falla en el revestimiento de la presa que impacta sobre el sistema de filtro.
<p>Falla de la fundación /</p>	<p>Falla que produce inestabilidad estructural</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sismo de gran magnitud que origina licuación del material residual de la

Modo potencial de falla	Evento	Causas/Trigger
<i>Foundation failure</i>	de la fundación	<p>fundación.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nivel piezométrico con un alto nivel de infiltración ubicado en la fundación de la presa. • Sismo de gran magnitud que conduce a la activación de las fallas geológicas locales y/o regionales ubicadas en la fundación de la presa. • Movimiento diferencial debido al peso de la presa y presencia de fallas geológicas locales y/o regionales ubicadas en la fundación de la presa.

Fuente: Elaboración propia

6.1.3 Identificación de efectos o consecuencias de falla

Los principales efectos o consecuencias asociados a los modos potenciales de falla se describen a continuación:

- Falla de la presa;
- Derrames ambientales;
- Multas y/o cargos;
- Pérdida de infraestructura aguas abajo; y
- Pérdida potencial de vidas humanas.

6.1.4 Criterios de probabilidad de falla propuesta

La calificación de probabilidad deberá de ser desarrollada en cinco categorías de puntuación (1 a 5), descripción (raro a muy probables) y probabilidad.

En la Tabla N°15 se presentan los criterios de probabilidad propuestos para el desarrollo del próximo análisis de riesgo de la presa de relaves, estos valores son convencionales en la industria de los análisis de riesgo.

Tabla N°15

Ejemplo típico de criterios de probabilidad

Puntuación	Descripción	Probabilidad
1	Raro	Ocurrencia rara o en circunstancias excepcionales <10 % de probabilidad de ocurrencia
2	Improbable	Improbable de ocurrir en condiciones normales de operación 10 % hasta 35 % de probabilidad de ocurrencia
3	Posible	El evento puede ocurrir, pero no es esperado 35 % hasta 65 % de probabilidad de ocurrencia
4	Probable	El evento puede ocurrir en cualquier momento 65 % hasta 90 % de probabilidad de ocurrencia
5	Muy probable	Es muy probable que ocurra el evento en cualquier momento > 90 % de probabilidad de ocurrencia

Fuente: Elaboración propia

6.1.5 Criterios de consecuencia propuesta

De acuerdo con ICOLD Bulletin 139, la calificación de riesgo es definida como el daño consecuente a una falla de una presa de relaves, y es generalmente evaluado considerando mínimamente cuatro categorías como son:

- Pérdidas de vidas humanas;
- Daño ambiental;
- Costo del daño físico; e
- Impacto social y/o reputación pública.

En la Tabla N°16 se presentan los criterios de consecuencia propuesta el desarrollo del análisis de riesgo de la presa de relaves.

Tabla N°16

Ejemplo típico de criterios de consecuencia

Nivel	Puntuación	Gasto de capital y efectivo	Salud y seguridad	Medio ambiente	Social/Patrimonio cultural	Reputación	Cumplimiento
Insignificante	1	<\$5M Utilidad de la operación <\$1M Daños a la propiedad	No requiere tratamiento médico	Daño limitado a un área mínima de baja importancia	Daño reparable de bajo nivel a estructuras comunes	Preocupación pública restringida a quejas locales.	Infracción menor de la ley con queja formal.
Menor	2	\$5-50M Utilidad de la operación \$1-5M Daños a la propiedad	Primeros auxilios menores - sin impacto incapacitante en las personas	Efectos menores en el entorno biológico o físico	Impactos menores a mediano plazo en la población local. Daño reparable.	Atención y reclamos menores, adversos del público local o de los medios	Múltiples infracciones menores de las leyes con quejas menores o norma que requiere rectificación.
Moderado	3	\$50-100M Utilidad de la operación \$5-50M Daños a la propiedad	Lesión tratada médicamente sin impacto permanente	Efectos moderados a corto plazo pero que no afectan la función del ecosistema	Problemas sociales en curso. Daños permanentes a las estructuras / elementos de importancia cultural.	Atención de los medios y/o mayor preocupación por parte de la comunidad local. Críticas de las	Infracción menor de las leyes que resulta en enjuiciamiento. Incumplimiento de la auditoría estándar.

Nivel	Puntuación	Gasto de capital y efectivo	Salud y seguridad	Medio ambiente	Social/Patrimonio cultural	Reputación	Cumplimiento
						ONG.	
Mayor	4	\$100-500M Utilidad de la operación \$50-200M Daños a la propiedad	Lesión de tiempo perdido	Graves efectos ambientales a medio plazo	Problemas sociales graves en curso. Daño significativo a estructuras / elementos de importancia cultural.	Atención adversa significativa de los medios nacionales/públicos/ONG.	Infracción significativa de las leyes que resulta en enjuiciamiento. Incumplimiento de la auditoría estándar.
Catastrófico	5	> \$500M Utilidad de la operación > \$200M Daños a la propiedad	Fatalidad o lesiones múltiples incapacitantes (permanentes) potencialmente mortales	Deterioro ambiental muy grave a largo plazo de la función del ecosistema	Graves impactos sociales. Daño significativo a mediano plazo a estructuras/elementos de importancia cultural.	Graves protestas públicas o mediáticas (cobertura internacional).	Múltiples incumplimientos significativos de las leyes. Pérdida única de certificación a nivel internacional.

Fuente: Elaboración propia

6.2 Análisis de los resultados

6.2.1 Matriz de riesgo propuesta

La Guide to the Management of Tailings Facilities Version 3.1 (2019) propone una matriz típica de evaluación de riesgos cualitativos, considerando la probabilidad de falla y el nivel de consecuencia asociado.

Tabla N°17

Matriz de riesgo analizada para los modos de falla estudiados

		Consecuencia				
		1. Insignificante	2. Menor	3. Moderado	4. Mayor	5. Catastrófico
Probabilidad	5. Muy probable	5	10	15	20	25
	4. Probable	4	8	12	16	20
	3. Posible	3	6	9	12	15
	2. Improbable	2	4	6	8	10
	1. Raro	1	2	3	4	5

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°18

Resultados de la matriz de riesgo propuesta para los modos de falla estudiados

		Nivel de riesgo: C X P
Modos de falla	Rebalse	10
	Inestabilidad de talud	10
	Erosión interna	5
	Falla de fundación	10

Fuente: Elaboración propia

Los resultados que se reflejan en la Tabla N°18 son la clasificación que se le da obtenidos de la multiplicación de las variables de consecuencia y probabilidad. Así demostrando el rango donde se encuentra el nivel de riesgo del análisis realizado en la tesis.

Aplicando controles mínimos el nivel de riesgo obtenido puede ser reducido (riesgo residual). La Tabla N°19 muestra el nivel de riesgo residual obtenido. Se puede ver la matriz propuesta a mayor detalle en el Anexo 2.

Tabla N°19

Resultados de la matriz de riesgo residual propuesta para los modos de falla estudiados

		Nivel de riesgo: C X P
Modos de falla	Rebalse	5
	Inestabilidad de talud	5
	Erosión interna	3
	Falla de fundación	5

Fuente: Elaboración propia

6.3 Contrastación de hipótesis

- Hipótesis principal: La presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín presenta un riesgo geotécnico bajo frente a futuras fallas.

La hipótesis principal no se cumplió, debido a que el riesgo de la presa de relaves obtenido en la investigación es un riesgo catastrófico/improbable frente a futuras fallas.

- Hipótesis específica 1: Los modos potenciales de falla de la presa de relaves son establecidos evaluando el riesgo geotécnico mediante la metodología del FMEA, y las guías del MAC y CDA.

La hipótesis específica 1 se cumplió, debido a que mediante las pautas de las guías del MAC y CDA se evaluó el riesgo geotécnico de la presa de relaves, y según la metodología del FMEA se propuso una matriz de riesgos donde se establecieron los modos potenciales de falla.

- Hipótesis específica 2: El factor de seguridad obtenido en el modelamiento geotécnico cumple con lo establecido por la normativa vigente.

La hipótesis específica 2 no se cumplió, debido a que en análisis de estabilidad física del escenario 2 (presa de relaves sin geomembrana) el factor de seguridad obtenido es inferior a lo establecido en la normativa vigente (FS estático > 1.5, FS pseudo-estático > 1).

- Hipótesis específica 3: Los cambios en la morfología y estructura de la presa de relaves se conocen analizando el modo que el aumento del nivel del agua, un drenaje ineficiente, y que el principal componente se encuentre degradado y licuado, origina filtración y erosión interna.

La hipótesis específica 3 se cumplió, debido a que mediante los análisis realizados se determinó que la erosión interna del material del dique o fundación produce pérdida a gran escala de aguas y relaves, y es ocasionado por las siguientes causas: Agua almacenada junto al talud aguas arriba de la presa (con playas menores a 100 m o sin playa de relaves); sismo de gran magnitud que conduce al asentamiento excesivo, agrietamiento y/o deformaciones del filtro y/o dren; inadecuado diseño del filtro y/o dren que compone el cuerpo de la presa; inadecuado control y aseguramiento de calidad material de filtro y/o dren que compone el cuerpo de la presa; falla en el revestimiento de la presa que impacta sobre el sistema de filtro.

- Hipótesis específica 4: La inestabilidad de la estructura se prevé examinando la manera que las malas condiciones de los cimientos generan fallas en la fundación de la presa de relaves.

La hipótesis específica 4 se cumplió, debido a que mediante los análisis realizados se determinó que la falla en la fundación produce inestabilidad estructural en la fundación, y es ocasionado por las siguientes causas: Sismo de gran magnitud que origina licuación del material residual de la fundación; nivel piezométrico con un alto nivel de infiltración ubicado en la fundación de la presa; sismo de gran magnitud que conduce a la activación de las fallas geológicas locales y/o regionales ubicadas en la fundación de la presa; movimiento diferencial debido al peso de la presa y presencia de fallas geológicas locales y/o regionales ubicadas en la fundación de la presa.

- Hipótesis específica 5: Los mecanismos de control mínimos se implantan distinguiendo la forma que las inundaciones provocan desbordamientos en la presa de relaves.

La hipótesis específica 5 se cumplió, debido a que mediante los análisis realizados se determinó que el rebalse de la presa genera pérdida a gran escala de su contenido, y es ocasionado por las siguientes causas: Precipitación extrema (PMP) + capacidad inadecuada de bombeo. (La precipitación excede la capacidad de bombeo); precipitación extrema (PMP) + alto nivel de agua de la laguna de operación (Deficiente manejo de aguas combinado con una precipitación extrema); sismo de gran magnitud y/o vientos extremos que generen oleaje alto; sismo de gran magnitud y/o mantenimiento inadecuado que produce rotura de las tuberías de descarga de relaves ubicadas en la cresta de la presa.

- Hipótesis específica 6: Los futuros deslizamientos de talud se previenen identificando como los terremotos producen fallas en la presa de relaves.

La hipótesis específica 6 se cumplió, debido a que mediante los análisis realizados se determinó que la falla que produce inestabilidad estructural de la presa y/o taludes es uno de los potenciales modos de falla de la presa de relaves, y es ocasionado por las siguientes causas: Sismo de gran magnitud que genera esfuerzos de corte mayores a la resistencia del material; sismo de gran magnitud que conduce el agrietamiento y/o deformaciones de la presa; nivel piezométrico alto que genera reducción a la resistencia cortante del material; inadecuado diseño de ingeniería, factores de seguridad y criterios de diseño; inadecuado control y aseguramiento de calidad de los materiales que componen el cuerpo de la presa.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se discuten los resultados obtenidos en la matriz de riesgos propuesta elaborada mediante la metodología del FMEA y las pautas de las guías del MAC y CDA.

Como resultado de los análisis geotécnicos realizados en la presente investigación (análisis de estabilidad física, análisis de infiltraciones y análisis de deformaciones simplificado) mediante el software Slide V.9.0 y hojas de cálculo, se obtiene que los modos de falla más probables de la presa de relaves son el rebalse, la inestabilidad del talud, la erosión interna y la falla en la fundación. Estos modos de falla se plasman en una matriz de riesgos elaborada mediante la metodología del FMEA, en la cual se obtienen los niveles de riesgo de los modos de falla y se describen las medidas de control mínimas ante posibles fallas.

Como resultado de la investigación se obtiene que el riesgo de la presa de relaves es un riesgo catastrófico/improbable frente a futuras fallas, pero aplicando las pautas de seguridad de las guías del MAC Y CDA, este riesgo disminuye a uno catastrófico/raro (ver Anexo 2). Según Wood (2021) la presa de relaves presenta un nivel de riesgo catastrófico/improbable, lo cual se ajusta a lo demostrado en la presente investigación donde en la matriz de riesgo propuesta se obtiene un riesgo catastrófico/improbable para la mayoría de los modos de falla.

El riesgo geotécnico se plasma en una matriz de riesgos según la metodología del FMEA y las pautas de las guías del MAC Y CDA; según la matriz de riesgos propuesta se identifican cuatro modos potenciales de falla, sus causas, impacto y controles. Según The Mining Association of Canada (2017) el modo de fallos y análisis de efectos es el proceso de revisar tantos componentes, ensamblajes y subsistemas como sea posible para identificar posibles modos de falla en un sistema y sus causas y efectos, lo cual se corrobora con la matriz de riesgos propuesta en la investigación.

El modo que el aumento del nivel del agua, un drenaje ineficiente, y que el principal componente se encuentre degradado y licuado, origina filtración y erosión interna en la presa de relaves, lo cual produce cambios en la morfología y estructura de la presa de relaves. Según Lyu (2019) la filtración y erosión son unos de los principales modos de fallas en presa de relaves debido a que el campo de filtración induce directamente la inestabilidad de la presa de relaves, lo cual comprueba los resultados de la investigación donde se obtiene un nivel de riesgo catastrófico/improbable para el modo de falla de

erosión interna del material del dique o fundación que produce pérdida a gran escala de aguas y relaves.

Las malas condiciones de los cimientos generan fallas en la fundación de la presa de relaves, lo cual produce inestabilidad de la estructura. Según Lyu (2019) las malas condiciones de los cimientos es uno de los principales modos de fallas en presa de relaves debido a que producen inestabilidad de los cimientos de la presa de relaves, lo cual comprueba los resultados de la investigación donde se obtiene un nivel de riesgo catastrófico/improbable para el modo de falla que produce inestabilidad estructural de la fundación.

Las inundaciones provocan desbordamientos en la presa de relaves, lo cual puede ser mitigado mediante mecanismos de control mínimos. Según Lyu (2019) el desbordamiento es uno de los principales modos de fallas en presa de relaves debido a que producen inundaciones que hacen que la pendiente de la presa de relaves se vuelva inestable, lo cual comprueba los resultados de la investigación donde se obtiene un nivel de riesgo catastrófico/raro para el modo de falla de rebalse de la presa que genera pérdida a gran escala de su contenido.

Los terremotos producen fallas en la presa de relaves, lo cual puede ser mitigado previniendo futuros deslizamientos de talud. Según Lyu (2019) inestabilidad estática y sísmica es uno de los principales modos de fallas en presa de relaves, la cual es producida por un efecto de terremoto, lo cual comprueba los resultados de la investigación donde se obtiene un nivel de riesgo catastrófico/improbable para el modo de falla que produce inestabilidad estructural de presa y/o taludes

CONCLUSIONES

1. Se determina el riesgo geotécnico de la presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín, obteniendo un nivel de riesgo promedio catastrófico/improbable (10); asumiendo las pautas de seguridad de presas del CDA y MAC se puede tener un nivel de riesgo promedio catastrófico/raro (5), lo cual puede reducir los niveles de probabilidad y mitigar todo tipo de evento improbable, por lo cual la hipótesis principal no se cumplió.
2. Se evalúa el riesgo geotécnico de la presa de relaves mediante análisis de estabilidad física, análisis de infiltraciones y análisis de desplazamientos simplificado; los cuales se plasman en una matriz de riesgos según la metodología del FMEA y las pautas de las guías del MAC Y CDA; según la matriz de riesgos propuesta se identifican cuatro modos potenciales de falla, sus causas, impacto y controles.
3. Los análisis de estabilidad físicos de la presa de relaves realizados en el software Slide V.9.0., son considerados según los parámetros recopilados de la información de esta, esto incluían parámetros geotécnicos, información sísmica, infiltraciones, suelo rocoso, etc. De todos los análisis realizados se puede concluir que los resultados sobrepasan los factores de seguridad mínimos para todo tipo de estructuras (Escenario 1) con un factor de seguridad estático de 1.71 y pseudo-estático de 1.02 para la sección A-A', y un factor de seguridad estático de 1.71 y pseudo-estático de 1.03 para la sección B-B'; a excepción de que la geomembrana impermeabilizante de la presa de relaves falle (Escenario 2), la cual presenta un factor de seguridad estático de 1.47 y pseudo-estático de 0.87 para la sección A-A', y un factor de seguridad estático de 0.95 y pseudo-estático de 0.52 para la sección B-B', por lo cual la hipótesis específica 2 no se cumplió, debido a que el factor de seguridad obtenido es inferior a lo establecido en la normativa vigente (FS estático > 1.5, FS pseudo-estático > 1).
4. Se determina que la erosión interna del material del dique o fundación produce pérdida a gran escala de aguas y relaves, y es ocasionado por las siguientes causas: Agua almacenada junto al talud aguas arriba de la presa (con playas

menores a 100 m o sin playa de relaves); sismo de gran magnitud que conduce al asentamiento excesivo, agrietamiento y/o deformaciones del filtro y/o dren; inadecuado diseño del filtro y/o dren que compone el cuerpo de la presa; inadecuado control y aseguramiento de calidad material de filtro y/o dren que compone el cuerpo de la presa; falla en el revestimiento de la presa que impacta sobre el sistema de filtro. Se obtiene un nivel de riesgo promedio catastrófico/raro (5) para este modo de falla.

5. Se determina que la falla en la fundación produce inestabilidad estructural en la fundación, y es ocasionado por las siguientes causas: Sismo de gran magnitud que origina licuación del material residual de la fundación; nivel piezométrico con un alto nivel de infiltración ubicado en la fundación de la presa; sismo de gran magnitud que conduce a la activación de las fallas geológicas locales y/o regionales ubicadas en la fundación de la presa; movimiento diferencial debido al peso de la presa y presencia de fallas geológicas locales y/o regionales ubicadas en la fundación de la presa. Se obtiene un nivel de riesgo promedio catastrófico/improbable (10) para este modo de falla.
6. Se determina que el rebalse de la presa genera pérdida a gran escala de su contenido, y es ocasionado por las siguientes causas: Precipitación extrema (PMP) + capacidad inadecuada de bombeo. (La precipitación excede la capacidad de bombeo); precipitación extrema (PMP) + alto nivel de agua de la laguna de operación (Deficiente manejo de aguas combinado con una precipitación extrema); sismo de gran magnitud y/o vientos extremos que generen oleaje alto; sismo de gran magnitud y/o mantenimiento inadecuado que produce rotura de las tuberías de descarga de relaves ubicadas en la cresta de la presa. Se obtiene un nivel de riesgo promedio catastrófico/improbable (10) para este modo de falla.
7. Se determina que la falla que produce inestabilidad estructural de la presa y/o taludes es uno de los potenciales modos de falla de la presa de relaves, y es ocasionado por las siguientes causas: Sismo de gran magnitud que genera esfuerzos de corte mayores a la resistencia del material; sismo de gran magnitud que conduce el agrietamiento y/o deformaciones de la presa; nivel piezométrico alto que genera reducción a la resistencia cortante del material; inadecuado diseño

de ingeniería, factores de seguridad y criterios de diseño; inadecuado control y aseguramiento de calidad de los materiales que componen el cuerpo de la presa. Se obtiene un nivel de riesgo promedio catastrófico/improbable (10) para este modo de falla.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que la mina tenga cuidado con los riesgos catastróficos como resultado de los niveles de riesgo de los modos de falla ejecutados. Esto con la finalidad de que se implementen nuevas reglas de seguridad para un mejor control de las medidas.
2. Se recomienda ponerle énfasis en las causas principales donde más afecta o hace que los modos de falla fallen más severamente ya sea por la activación de sismos, deslizamiento, etc. Estas siempre van a generar un nivel de riesgo medio hacia arriba por lo tanto es recomendable que se implemente un plan de contingencia, plan de acción donde se encuentre las medidas de control propuestas en el Anexo 2.
3. También se recomienda realizar un análisis de rotura de presas, esto con la finalidad de saber y mapear la mayor cantidad de zonas de riesgo que podrían ser afectados por los modos de falla.
4. Los mecanismos o causas de falla que realizarán una consecuencia como tal de nivel catastróficamente hablando serian por una causa de sismos. En estas atenciones siempre es mejor mantener a la mano los manuales o informaciones de registros sísmicos actualizados para poder configurar los sistemas de alerta temprana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANCOLD (1994). Guidelines on Risk Assessment.
- ANCOLD (1998). Guidelines for the Design of Dams for Earthquake.
- Arias, C. (2021). Mejoramiento de la gestión de una presa de relaves para disminuir los riesgos ambientales y de seguridad (tesis de maestría). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.
- Baena, G. (2017). Metodología de la investigación.
- Calvo, L. (2021). Caracterización de los riesgos en el crecimiento horizontal y vertical de presas de relaves de mediana minería del departamento de Ayacucho (tesis de maestría). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.
- Canadian Dam Association (2014). Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams.
- Concha Larrauri, P., y Lall, U. (2017). Assessing Risks of Mine Tailing Dam Failures.
- Cristobal, E. (2018). Construcción del recrecimiento del depósito de relaves animón, Etapa II a la cota 4621 m.s.n.m para el control de contaminación ambiental en la compañía minera Chungar S.A.C.- Pasco - 2017 (tesis de pregrado).
- Dammert, A. (2020). La importancia del sector minero para el Perú. *Journal of Economics, Finance and International Business*.
- De La Cruz, S. (2017). Evaluación del fallo de presas de relaves con el método del árbol de fallos (tesis de maestría). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- De La Cruz, Y., y Valderrama, E. (2021). Evaluación del riesgo de deslizamiento de un depósito de relave inoperativo en la Cabecera de cuenca del Río Rímac, Chicla – Huarochirí – Lima considerando variables geotécnicas en el proceso de análisis jerárquico (tesis de pregrado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
- Estudios Mineros del Perú S.A.C. (2006). Manual de minería.

- Figuroa, A., Solans, D., Gonzalez, C., y Campaña, J. (2017). Comportamiento sísmico de presas de relaves construidas aguas abajo y línea central. *Obras y Proyectos*, (21), 30-37.
- Hernández, T., y Guardado, R. (2010). Funcionamiento y mecanismos de rotura en presas de relaves mineros: Estudio de caso la presa de colas de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba De Moa.
- Kheirkhah, J., y Amiri, M. (2020). Environmental Risk Assessment of Sungun Copper Mine Tailing Dam Using EFMEA Method. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- Lyu, Z., Chai, J., Xu, Z., Qin, Y., y Cao, J. (2019). A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. *Advances in Civil Engineering Volume 2019*.
- Martínez, C. (2020). Diseño de investigación, muestreo y métodos de recolección de datos.
- Menéndez, J., y Muñoz, S. (2021). Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros.
- MINEM (1998). Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina.
- MINEM (2015). Guía ambiental para el manejo de relaves mineros.
- Oldecop, L., y Rodríguez, R. (2007). Mecanismos de fallas de las presas de residuos mineros. *Revista Digital Del Cedex*, (148), 181.
- Osinergmin (2017). La industria de la minería en el Perú.
- Paullo, V., y Segovia, M. (2020). Evaluación de riesgo geotécnico de la presa de relave N°03 en la unidad minera Pallancata – Ayacucho (tesis de pregrado). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.
- RAE (2021). Diccionario de la lengua española.
- Ramírez, N. (2007). Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves.

- Rausand, M., y Hoylan, A. (2004). Teoría de la confiabilidad del sistema: modelos, métodos estadísticos y aplicaciones.
- Romero, W. (2018). Método para la identificación de peligros, evaluación de riesgos y determinación de controles en base a la norma OHSAS 18001:2007 en el recrecimiento de la presa de relaves etapa 2 – Mina Toromocho (tesis de maestría). Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú.
- The Mining Association of Canada (2017). A Guide to the Management of Tailings Facilities.
- Valderrama, S. (2017). Pasos para elaborar proyectos y tesis de investigación científica. San Marcos.
- Villena, J. (2018). Calidad del agua y desarrollo sostenible. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública, (35), 304-308.
- Wood (2021). Estudio de ingeniería de detalle de la presa de relaves Toromocho – Etapa 5.
- Wood (2022). Estudio de ingeniería conceptual de la presa de relaves Toromocho – Etapa 7.

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Indicadores	Instrumentos	Metodología
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable independiente	<ul style="list-style-type: none"> • Geomorfología • Geología regional • Geología local • Ensayos de penetración estándar (SPT) • Ensayos de permeabilidad in-situ • Ensayos de laboratorio • Análisis de peligro sísmico • Precipitación anual • Precipitación máxima 	Para la recolección de datos se utilizarán formatos de elaboración propia para poder registrar la información necesaria de la ingeniería de detalle y estudios previos de la zona de influencia de la presa.	<ul style="list-style-type: none"> • Modelamiento geotécnico mediante el uso del software Slide versión 9.0 • Análisis probabilístico • Matriz de riesgos • Revisión de información sobre parámetros geotécnicos, estudios hidrológicos y geológicos
¿Cómo es un análisis del riesgo geotécnico en una presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín?	Analizar el riesgo geotécnico para prevenir futuras fallas en una presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín.	La presa de relaves aguas abajo en el departamento de Junín presenta un riesgo geotécnico bajo frente a futuras fallas.	Presa de relaves			
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable dependiente			
¿Cómo evaluar el riesgo geotécnico de la presa de relaves utilizando la metodología del	Evaluar el riesgo geotécnico de la presa de relaves para establecer los modos potenciales de falla; utilizando	Los modos potenciales de falla de la presa de relaves son establecidos evaluando el riesgo geotécnico mediante	Riesgo geotécnico			

FMEA, y las guías del MAC y CDA?	la metodología del FMEA, y las guías del MAC y CDA.	la metodología del FMEA, y las guías del MAC y CDA.
¿De qué manera el modelamiento geotécnico de la presa de relaves cumple con el factor de seguridad establecido por la normativa vigente?	Modelar geotécnicamente la presa de relaves, para verificar si el factor de seguridad cumple con lo establecido por la normativa vigente.	El factor de seguridad obtenido en el modelamiento geotécnico cumple con lo establecido por la normativa vigente.
¿De qué modo el aumento del nivel de agua, un drenaje ineficiente, y que el principal componente se encuentre degradado y licuado, origina	Analizar el modo que el aumento del nivel del agua, un drenaje ineficiente, y que el principal componente se encuentre degradado y licuado, origina filtración y erosión	Los cambios en la morfología y estructura de la presa de relaves se conocen analizando el modo que el aumento del nivel del agua, un drenaje ineficiente, y que el principal componente se

- Evaporación
- Modos potenciales de falla
- Análisis de infiltración
- Análisis de estabilidad física
- Evaluación del potencial de licuación

filtración y erosión interna en la presa de relaves?	interna en la presa de relaves, para conocer cambios en la morfología y estructura de la presa de relaves.	encuentre degradado y licuado, origina filtración y erosión interna.
Examinar la manera		
¿De qué manera las malas condiciones de los cimientos generan fallas en la fundación de la presa de relaves?	que las malas condiciones de los cimientos generan fallas en la fundación de la presa de relaves, para prever la inestabilidad de la estructura.	La inestabilidad de la estructura se prevé examinando la manera que las malas condiciones de los cimientos generan fallas en la fundación de la presa de relaves.
¿De qué forma las inundaciones provocan desbordamientos en la presa de relaves?	Distinguir la forma que las inundaciones provocan desbordamientos en la presa de relaves, para implantar	Los mecanismos de control mínimos se implantan distinguiendo la forma que las inundaciones provocan

	mecanismos de control mínimos.	desbordamientos en la presa de relaves.
¿Cómo los terremotos producen fallas en la presa de relaves?	Identificar como los terremotos producen fallas en la presa de relaves, para prevenir futuros deslizamientos de talud.	Los futuros deslizamientos de talud se previenen identificando como los terremotos producen fallas en la presa de relaves.

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2

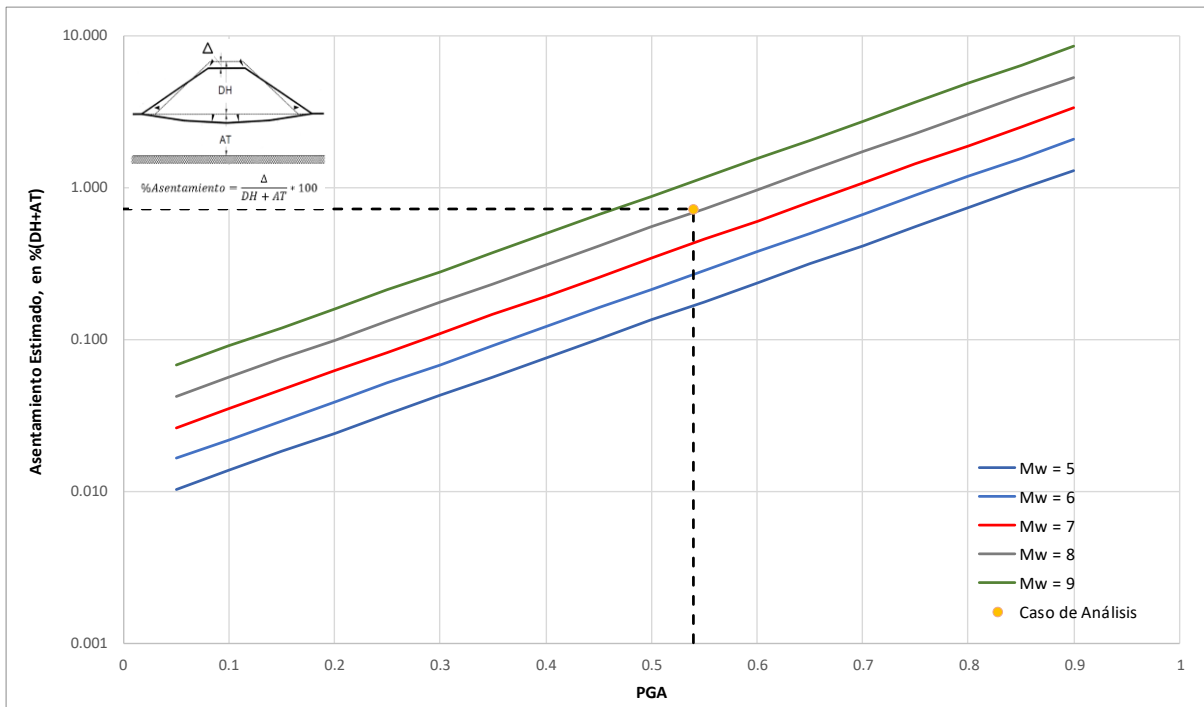
Predicción de deformación de presas debido a sismo

PREDICCIÓN DE DEFORMACIÓN DE PRESAS DEBIDO A SISMO

Según la metodología de James R. Swaisgood (2013)

Datos iniciales	Cálculos
PGA = 0.54 (Valor del Peak Ground Acceleration)	$\%Asentamiento = e^{5.70PGA+0.471M-7.22}$
Mw = 8.1 (Magnitud del Sismo)	%Asentamiento = 0.721

Gráfica:



Fuente: Elaboración propia

Anexo 3

Análisis de desplazamientos simplificados (Sección A-A')

Análisis de Deformación por el Método de Bray & Macedo 2019 (BM19)

Sección A-A' (TSF - Etapa 7)

1.0 Parámetros de Entrada

1.1 Magnitud del Sismo (M_w) / *Earthquake's moment magnitude*

$M_w = 8.3$ Se consideró la mayor magnitud de sismo asociada a la fuente que gobierna la sismicidad en la zona del proyecto.

1.2 Velocidad de ondas de corte promedio / *Average shear wave velocity of the sliding mass*

$V_s = 535 \text{ m/s}$ Valor basado en Seed e Idriss (1970)

1.3 Altura promedio de la masa en deslizamiento / *Sliding block height*

$H = 36.53 \text{ m}$ Obtenido del análisis de estabilidad pseudo-estático considerando el coeficiente de fluencia/*yield coefficient* K_y .

2.0 Cálculos

2.1 Periodo fundamental inicial del deslizamiento / *Initial fundamental period of sliding mass*

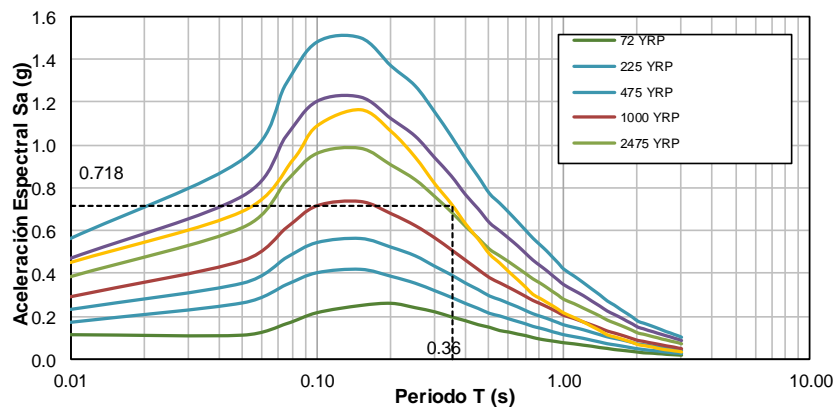
$T_s = 0.27 \text{ s}$ Calculado bajo consideraciones de la altura promedio de la masa deslizante (H) y la velocidad de corte (V_s).

2.2 Periodo Degradado igual a 1.3 veces el Periodo Fundamental / *Degraded period equal to 1.3 times the initial fundamental period of the slope*

$1.3T_s = 0.36 \text{ s}$

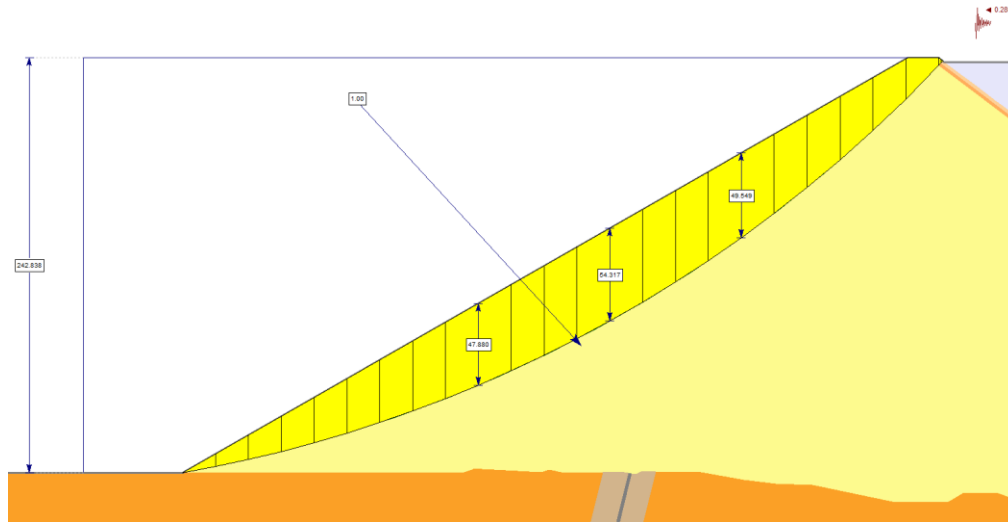
2.3 Aceleración Espectral del Periodo Degradado (1.3 veces el Periodo Fundamental) / *Spectral acceleration at a degraded period (1.3 times the initial fundamental period of the slope)*

$S_a = 0.72 \text{ g}$ La aceleración espectral es considerada como la aceleración para un periodo de 1.3 del periodo T_s .



2.4 Aceleración de fluencia / Yield acceleration

$k_y = 0.285 \text{ g}$ Aceleración límite por encima de la cual se producen deformaciones permanentes, FS=1.



2.5 Determinación del PGV (cm/s) / Determination of the PGV (cm/s)

$R = 23 \text{ km}$ Distancia de ruptura de la falla

$PGV = 63.52 \text{ cm/s}$ Determinado según Bray, Rodriguez-Marek & Gillie (2009)

2.6 Parámetros de Ingreso Adicionales / Additional Input Parameters

$P1 = 84 \%$ Cálculos para una probabilidad de excedencia de 16%,
 $P2 = 50 \%$ 50% y 84%
 $P3 = 16 \%$

3.0 Resultados

Caso de Análisis: Deterministic and Pseudo-Probabilistic

Determinado según Bray & Macedo (2019)

3.1 Desplazamiento sísmico de la estructura / Seismic displacement

$P(D=0) = 19\%$ Probabilidad de desplazamientos menores a 0.5 cm

$D1 = <0.5 \text{ cm}$ Desplazamiento obtenidos para una probabilidad de 16%

$D2 = 5.46 \text{ cm}$ Desplazamiento obtenidos para una probabilidad de 50%

$D3 = 12.71 \text{ cm}$ Desplazamiento obtenidos para una probabilidad de 84%

3.2 Razón porcentual respecto a la altura de la falla / *Seismic Displacement to Failure Height Ratio*

$$\begin{aligned} H_{\text{Falla}} &= 242.8 \text{ m} \\ \Delta_{D1} &= 0.01 \% \\ \Delta_{D2} &= 0.02 \% \\ \Delta_{D3} &= 0.05 \% \end{aligned}$$

3.3 Resumen de Resultados / Summary of Results

Rango de los Desplazamientos Sismicos:	<0.5 - <0.5	cm
Desplazamiento máximo permisible (1% Altura):	242.8	cm
Rango de las razones porcentuales entre la altura de	0.01 - 0.05	%

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4

Análisis de desplazamientos simplificados (Sección B-B')

Análisis de Deformación por el Método de Bray & Macedo 2019 (BM19)

Sección B-B' (TSF - Etapa 7)

1.0 Parámetros de Entrada

1.1 Magnitud del Sismo (M_w) / *Earthquake's moment magnitude*

$M_w = 8.3$ Se consideró la mayor magnitud de sismo asociada a la fuente que gobierna la sismicidad en la zona del proyecto.

1.2 Velocidad de ondas de corte promedio / *Average shear wave velocity of the sliding mass*

$V_s = 535 \text{ m/s}$ Valor basado en Seed e Idriss (1970)

1.3 Altura promedio de la masa en deslizamiento / *Sliding block height*

$H = 35.27 \text{ m}$ Obtenido del análisis de estabilidad pseudo-estático considerando el coeficiente de fluencia/*yield coefficient* K_y .

2.0 Cálculos

2.1 Periodo fundamental inicial del deslizamiento / *Initial fundamental period of sliding mass*

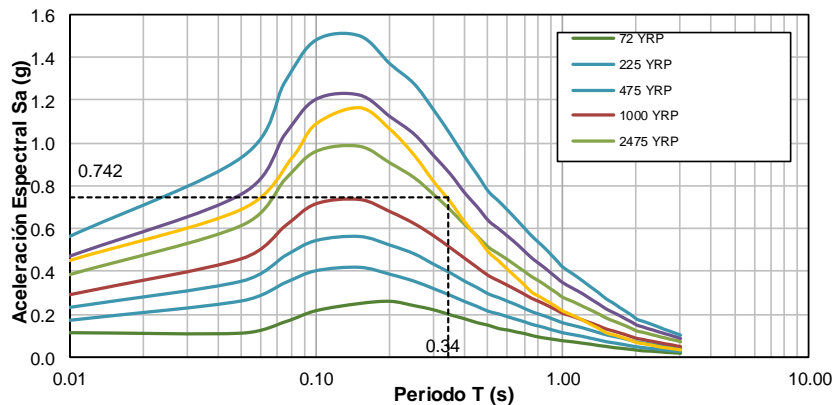
$T_s = 0.26 \text{ s}$ Calculado bajo consideraciones de la altura promedio de la masa deslizante (H) y la velocidad de corte (V_s).

2.2 Periodo Degradado igual a 1.3 veces el Periodo Fundamental / *Degraded period equal to 1.3 times the initial fundamental period of the slope*

$1.3T_s = 0.34 \text{ s}$

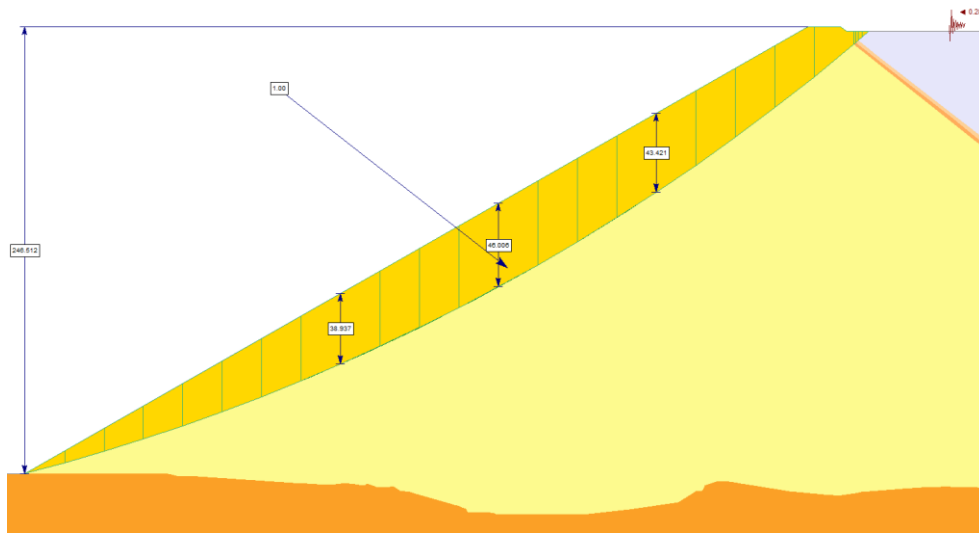
2.3 Aceleración Espectral del Periodo Degradado (1.3 veces el Periodo Fundamental) / *Spectral acceleration at a degraded period (1.3 times the initial fundamental period of the slope)*

$S_a = 0.74 \text{ g}$ La aceleración espectral es considerada como la aceleración para un periodo de 1.3 del periodo T_s .



2.4 Aceleración de fluencia / Yield acceleration

$k_y = 0.285 \text{ g}$ Aceleración límite por encima de la cual se producen deformaciones permanentes, FS=1.



2.5 Determinación del PGV (cm/s) / Determination of the PGV (cm/s)

$R = 23 \text{ km}$ Distancia de ruptura de la falla

$PGV = 63.52 \text{ cm/s}$ Determinado según Bray, Rodriguez-Marek & Gillie (2009)

2.6 Parámetros de Ingreso Adicionales / Additional Input Parameters

$P1 = 84 \%$ Cálculos para una probabilidad de excedencia de 16%,
 $P2 = 50 \%$ 50% y 84%
 $P3 = 16 \%$

3.0 Resultados

Caso de Análisis: Deterministic and Pseudo-Probabilistic

Determinado según Bray & Macedo (2019)

3.1 Desplazamiento sísmico de la estructura / Seismic displacement

$P(D=0) = 17\%$ Probabilidad de desplazamientos menores a 0.5 cm

$D1 = <0.5 \text{ cm}$ Desplazamiento obtenidos para una probabilidad de 16%

$D2 = 5.90 \text{ cm}$ Desplazamiento obtenidos para una probabilidad de 50%

$D3 = 13.53 \text{ cm}$ Desplazamiento obtenidos para una probabilidad de 84%

3.2 Razón porcentual respecto a la altura de la falla / *Seismic Displacement to Failure Height Ratio*

$$\begin{aligned} H_{\text{Falla}} &= 246.5 \text{ m} \\ \Delta_{D1} &= 0.01 \% \\ \Delta_{D2} &= 0.02 \% \\ \Delta_{D3} &= 0.05 \% \end{aligned}$$

3.3 Resumen de Resultados / Summary of Results

Rango de los Desplazamientos Sismicos:	<0.5 - <0.5	cm
Desplazamiento máximo permisible (1% Altura):	246.5	cm
Rango de las razones porcentuales entre la altura de	0.01 - 0.05	%

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5

Matriz de riesgo propuesta

IDENTIFICACION DEL DIQUE	REF	MODOS POTENCIALES DE FALLA	DESCRIPCION DE EVENTOS Y FALLAS	¿ES CREIBLE EL MODO DE FALLA?	CAUSA	¿ES CREIBLE LA CAUSA?	¿Es el modo de falla creíble para el evento?	AREA DE RIESGO	FASE DEL PROYECTO	IMPACTOS 'consecuencia si se realiza el riesgo'	DUEÑO DEL RIESGO	CONTROLES EXISTENTES				CONTROLES ADICIONALES				Estado (abierto/cerrado)	
												CONTROLES EXISTENTES	PROBABILIDAD	CONSECUENCIA	CALIFICACION DE RIESGO	CONTROLES REQUERIDOS	PROBABILIDAD	CONSECUENCIA	CALIFICACION DE RIESGO RESIDUAL		FECHA LIMITE DE ACCION
ANALISIS DE RIESGO GEOTECNICO DE UNA PRESA DE RELAVES AGUAS ABAJO EN EL DEPARTAMENTO DE JUNIN	R1	REBALSE	REBALSE DE LA PRESA GENERA PERDIDA A GRAN ESCALA DE SU CONTENIDO	SI	Precipitación extrema (PMP) + capacidad inadecuada de bombeo. (La precipitación excede la capacidad de bombeo)	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	Monitoreo de niveles de agua. CQA. Minimizar la cantidad de agua.	Raro	Catastrófico	5	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Moderado	3	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
					Precipitación extrema (PMP) + alto nivel de agua de la laguna de operación (Deficiente manejo de aguas combinado con una precipitación extrema)	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	Monitoreo de niveles de agua. CQA. Minimizar la cantidad de agua.	Raro	Catastrófico	5	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Moderado	3	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
					Sismo de gran magnitud y/o vientos extremos que generen oleaje alto	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	Monitoreo de niveles de agua. CQA. Minimizar la cantidad de agua.	Improbable	Catastrófico	10	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Catastrófico	5	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
					Sismo de gran magnitud y/o mantenimiento inadecuado que produce rotura de las tuberías de descarga de relaves ubicadas en la cresta de la presa	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	Monitoreo de niveles de agua. CQA. Minimizar la cantidad de agua.	Improbable	Catastrófico	10	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Catastrófico	5	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
	R2	INESTABILIDAD DEL TALUD/ FALLA DEL DIQUE POR SUS TALUDES	FALLA QUE PRODUCE INESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE PRESA Y/O TALUDES	SI	Sismo de gran magnitud que genera esfuerzos de corte mayores a la resistencia del material	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	Mantener los controles de diseño para minimizar asentamientos excesivos. CQA del material.	Improbable	Catastrófico	10	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Catastrófico	5	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
					Sismo de gran magnitud que conduce el agrietamiento y/o deformaciones de la presa	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	Mantener los controles de diseño para minimizar asentamientos excesivos. CQA del material.	Improbable	Catastrófico	10	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Catastrófico	5	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
					Nivel piezométrico alto que genera reducción a la resistencia cortante del material	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	Mantener los controles de diseño para minimizar asentamientos excesivos. CQA del material.	Improbable	Catastrófico	10	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Catastrófico	5	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
					Inadecuado diseño de ingeniería, factores de seguridad y criterios de diseño	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	Mantener los controles de diseño para minimizar asentamientos excesivos. CQA del material.	Improbable	Catastrófico	10	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Catastrófico	5	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
					Inadecuado control y aseguramiento de calidad de los materiales que componen el cuerpo de la presa	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	Mantener los controles de diseño para minimizar asentamientos excesivos. CQA del material.	Improbable	Catastrófico	10	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Catastrófico	5	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
	R3	EROSION INTERNA/ TUBIFICACION	EROSION INTERNA DEL MATERIAL DEL DIQUE O FUNDACION QUE PRODUCE PERDIDA A GRAN ESCALA DE AGUAS Y RELAVES	SI	Agua almacenada junto al talud aguas arriba de la presa (con playas menores a 100 m o sin playas de relaves)	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	CQA. Monitoreo.	Raro	Catastrófico	5	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Moderado	3	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
					Sismo de gran magnitud que conduce al asentamiento excesivo, agrietamiento y/o deformaciones del filtro y/o dren	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	CQA. Monitoreo.	Improbable	Catastrófico	10	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Catastrófico	5	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
					Inadecuado diseño del filtro y/o dren que compone el cuerpo de la presa	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	CQA. Monitoreo.	Raro	Catastrófico	5	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Moderado	3	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
					Inadecuado control y aseguramiento de calidad material de filtro y/o dren que compone el cuerpo de la presa	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	CQA. Monitoreo.	Raro	Catastrófico	5	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Moderado	3	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
					Falla en el revestimiento de la presa que impacta sobre el sistema de filtro	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y mutas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	CQA. Monitoreo.	Raro	Catastrófico	5	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante asperseras en la relavera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List. Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Moderado	3	Inmediata	Abierto - Acción en progreso

R4	FALLA DE LA FUNDACION	FALLA QUE PRODUCE LA INESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE LA FUNDACION	SI	Sismo de gran magnitud que origina licuación del material residual de la fundación	SI	SI	Operations/Operaciones	Operations/Operaciones	Falla de la presa; derrames ambientales y multas, cargos; pérdida de infraestructura aguas abajo; la planta se cierra hasta que se reconstruya la presa; las operaciones se detienen mientras se reconstruye la infraestructura de aguas abajo, impactos cerca al río, pérdida potencial de vidas humanas.	Ops Team/Equipo de Operaciones	Mantener los controles de diseño para minimizar asentamientos excesivos. COA del material.	Improbable	Catastrófico	10	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante aspersas en la retenera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List, Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Catastrófico	5	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
				Nivel piezométrico con un alto nivel de infiltración ubicado en la fundación de la presa	SI		Operations/Operaciones	Operations/Operaciones		Ops Team/Equipo de Operaciones	Mantener los controles de diseño para minimizar asentamientos excesivos. COA del material.	Raro	Catastrófico	5	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante aspersas en la retenera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List, Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Moderado	3	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
				Sismo de gran magnitud que conduce a la activación de las fallas geológicas locales y/o regionales ubicadas en la fundación de la presa	SI		Operations/Operaciones	Operations/Operaciones		Ops Team/Equipo de Operaciones	Mantener los controles de diseño para minimizar asentamientos excesivos. COA del material.	Improbable	Catastrófico	10	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante aspersas en la retenera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List, Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Catastrófico	5	Inmediata	Abierto - Acción en progreso
				Movimiento diferencial debido al peso de la presa y presencia de fallas geológicas locales y/o regionales ubicadas en la fundación de la presa	SI		Operations/Operaciones	Operations/Operaciones		Ops Team/Equipo de Operaciones	Mantener los controles de diseño para minimizar asentamientos excesivos. COA del material.	Raro	Catastrófico	5	Plan de preparación y respuesta ante emergencias. Uso de los 3 puntos de apoyo. Regado y mantenimiento mediante aspersas en la retenera. Capacitación básica en seguridad y salud ocupacional. Check List, Orden de trabajo. IPERC.	Raro	Moderado	3	Inmediata	Abierto - Acción en progreso

Fuente: Elaboración propia