UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD ESTÁTICA Y SÍSMICA DE UNA PRESA DE RELAVES MINEROS MEDIANTE MODELACIÓN GEOTÉCNICA EN PHASE^2

PRESENTADO POR:

BACH. VÍCTOR HUGO QUISPE FLORES

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA – PERÚ

2026

UNAM

ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA DE MINAS

Folio N° 087

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : [X]

Trabajo de Suficiencia Profesional : [ ]

Otro: ..... : [ ]

II. Documento de aprobación para la sustentación:

Resolución de Consejo de Facultad N° 084-2026-CF-FAIN-UNAM

Fecha: 16.04.2026

III. El Jurado ha dictaminado la (el) Tesis, TITULADO:

MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD ESTÁTICA Y SISMICA DE UNA PRESA DE RELAVES DE UNA MINA SUPERFICIAL MEDIANTE MODELACIÓN GEOTÉCNICA EN PHASE

Bachiller: Victor Hugo QUISPE FLORES

Asesor Principal: Dr. Christ Jesus BARRIGA PARIA

Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:

Como: APROBADO por UNANIMIDAD la sustentación de manera:

Presencial [X] Virtual [ ]

Con nota: catorce (14) por lo que; Sí [X] No [ ]

Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las 12:00 horas, del 16 de Abril del año 2026 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
Dr. Arquímedes León VARGAS LUQUE
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
MSc. Agapito FLORES JUSTO
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
Mgr. Juan Elías ROJAS CONDORI
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
Victor Hugo QUISPE FLORES
(Nombres y Apellidos)

DEDICATORIA

"A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de este camino. A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación. A mi familia, por ser mi fuente inagotable de motivación."

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios, por darme la fuerza y la sabiduría necesarias para llegar hasta aquí. A mis padres , por su apoyo incondicional, su amor, y por ser siempre mi mayor inspiración. A mi familia, por su constante motivación y compañía en este viaje académico.

A mi alma mater, la Universidad Nacional de Moquegua y a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por la formación académica y profesional brindada a lo largo de mi carrera universitaria.

Expreso mi profunda gratitud a mi asesor, Dr. Christ Barriga Paria, por su dedicación, orientación, y valiosos consejos a lo largo de todo este proceso. Su experiencia y apoyo fueron fundamentales para la realización de esta tesis.

Agradezco también a mis docentes y mentores, quienes compartieron su conocimiento y me guiaron en el desarrollo de este trabajo. A mis compañeros y colegas, quienes con su colaboración y camaradería hicieron de esta experiencia un aprendizaje enriquecedor.

Finalmente, extiendo mi agradecimiento a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron a la realización de este trabajo. Sin su ayuda y apoyo, este proyecto no habría sido posible.

RESUMEN

La presente investigación evalúa y mejora la estabilidad estática y sísmica de una presa de relaves mediante modelación geotécnica utilizando el software Phase². Inicialmente se realizó la caracterización geotécnica del macizo rocoso y del material de relave, considerando condiciones secas y saturadas, así como la aplicación de un coeficiente sísmico horizontal del 50 % del PGA, conforme a la Norma Técnica E.030 y las recomendaciones del U.S. Army Corps of Engineers. Los análisis del diseño inicial presentaron factores de seguridad aceptables, pero con márgenes reducidos en condiciones pseudoestáticas saturadas, lo que evidenció la necesidad de un rediseño para garantizar la estabilidad a largo plazo. Se propuso un nuevo diseño compuesto por cuatro taludes sucesivos de 10 metros de altura, bermas de 3 metros y una inclinación de 71°, el cual fue evaluado mediante elementos finitos. Los factores de seguridad mejoraron significativamente en todos los escenarios analizados, alcanzando valores de 3.697 (estático seco), 3.211 (pseudoestático seco), 3.105 (estático saturado) y 2.432 (pseudoestático saturado). La prueba estadística t-Student confirmó que estas mejoras son significativas desde el punto de vista geotécnico. Los resultados validan las hipótesis del estudio, demostrando que la correcta selección de parámetros geotécnicos y la modelación numérica contribuyen de manera directa a la estabilidad y seguridad de la presa de relaves durante su operación y crecimiento futuro.

Palabras clave: estabilidad de taludes, geotecnia, pseudoestático, modelación numérica.

ABSTRACT

This research evaluates and enhances the static and seismic stability of a tailings dam through geotechnical numerical modeling using the PHASE² software. The study begins with a detailed geotechnical characterization of the rock mass and tailings material, considering both dry and saturated conditions, as well as the application of a horizontal seismic coefficient equivalent to 50% of the Peak Ground Acceleration (PGA), following the Peruvian Seismic Design Code E.030 and the recommendations of the U.S. Army Corps of Engineers. The initial design analyses yielded acceptable safety factors; however, reduced stability margins were observed under saturated pseudo-static conditions, revealing the need for an optimized design to ensure long-term structural performance. An improved geometric configuration was proposed, consisting of four 10-meter-high slopes with 3-meter berms and an inclination of 71°, which was subsequently analyzed using the finite element method. The redesigned configuration produced a significant increase in safety factors for all scenarios evaluated, achieving values of 3.697 (dry static), 3.211 (dry pseudo-static), 3.105 (saturated static), and 2.432 (saturated pseudo-static). A paired t-Student test statistically validated these improvements, confirming that the enhanced stability results from the updated geotechnical parameters and the optimized geometry rather than random variability. The findings support the study's hypotheses and demonstrate that proper geotechnical characterization combined with numerical modeling directly contributes to improving the structural stability and operational safety of the tailings dam throughout its life cycle.

Keywords: slope stability, geotechnical modeling, pseudo-static analysis.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I 2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 2

1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 2

1.1.1 Descripción del problema *2*

1.1.2 Formulación del problema de investigación *3*

Interrogante general 3

Interrogantes específicas 3

1.2 OBJETIVOS 4

1.2.1 Objetivo general *4*

1.2.2 Objetivos específicos *4*

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 5

1.3.1 Justificación práctica *6*

1.3.2 Justificación teórica *6*

1.3.3 Justificación metodológica *7*

1.3.4 Importancia *7*

1.4 HIPÓTESIS 8

1.4.1 Hipótesis general *9*

1.4.2 Hipótesis específicas *9*

1.5 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES 9

1.5.1 Variable independiente *10*

1.5.2 Variable dependiente *10*

CAPÍTULO II 12

MARCO TEÓRICO 12

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA 12

2.1.1 Antecedentes internacionales *13*

2.1.2 Antecedentes nacionales *22*

2.1.3 Antecedentes locales *31*

2.2 BASES TEÓRICAS 32

2.2.1 Parámetros Sísmicos Fundamentales *33*

2.2.2 Enfoque Sísmico en Proyectos *34*

2.2.3 Criterio de Hoek & Brown *35*
2.2.4 Geología *36*
Geología Regional 36
Geología Local 38
Geología Estructural 39
Geodinámica Externa 39
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS 39
2.3.1 Análisis pseudoestático *40*
2.3.2 Análisis de tensiones y deformaciones *40*
2.3.3 Análisis de desplazamiento permanente *40*
2.3.4 Estudio de elementos finitos *41*
CAPÍTULO III 42
METODOLOGÍA 42
3.1 TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN 42
3.1.1 Tipo de Investigación *42*
3.1.2 Nivel de Investigación *43*
3.1.3 Diseño de investigación *43*
3.2 ÁMBITO TEMPORAL Y ESPACIAL 44
3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA 46
3.3.1 Población *46*
3.3.2 Muestra *46*
3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS 47
3.4.1 Técnicas *48*
3.4.2 Instrumentos *48*
3.5 PROCEDIMIENTO 50
3.5.1 Validación y confiabilidad de los instrumentos *51*
3.5.2 Validación de instrumentos de campo *51*
3.5.3 Validación de instrumentos de laboratorio *52*
3.5.4 Validación de los modelos Phase2 ..... *52*
Validación de Entrada 52
Validación Numérica 52
3.5.5 Confiabilidad de los datos *52*
3.6 ANÁLISIS DE DATOS 53

3.6.1 Técnicas de presentación de datos *53*
3.6.2 Técnicas de análisis de datos *53*
3.6.3 Integración de datos y presentación final *54*
CAPÍTULO IV 55
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 55
4.1 INTRODUCCIÓN 55
4.2 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE MATERIALES Y CONDICIONES DE FUNDACIÓN 56
4.2.1 Descripción general del material de relave *56*
4.2.2 Revisión geológica para área de estudio *57*
4.2.3 Caracterización fisiográfica y geomorfológica del área de estudio *57*
4.2.4 Clasificación geomecánica del área de estudio *58*
Mapeo Geológico y Geomecánico 58
Análisis Estereográfico 60
Orientación y distribución de las discontinuidades 61
Evaluación del Estado de Fisuración y del Índice de Calidad de Roca 62
Clasificación de la Masa Rocosa 66
Parámetros de Resistencia del Macizo Rocoso 67
Propiedades de Elasticidad 72
4.3 ESTABILIDAD FÍSICA 74
4.4 VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS 81
4.4.1 Hipótesis general *81*
4.4.2 Hipótesis específicas *82*
4.4.3 Prueba t-Student *82*
4.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS 85
4.5.1 Contraste con el Marco Teórico *86*
4.5.2 Comparación con estudios previos o literatura científica *86*
4.5.3 Análisis de costos del mejoramiento de la estabilidad estática y sísmica *88*
CONCLUSIONES 89
RECOMENDACIONES 90
REFERENCIAS 91
ANEXO 98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 36

Geología Ingemmet 50000 36

Figura 02 45

Mapa de Ubicación de la Unidad Minera Quellaveco 45

Figura 03 47

Vista satelital del área de la muestra a estudiar 47

Figura 04 59

Figura 05 60

Proyección estereográfica de las estaciones estudiadas 60

Figura 06 68

Valores para la constante mi 68

Figura 07 69

Factor de disturbancia “D” 69

Figura 08 73

Constantes Elásticas en Roca Intacta 73

Figura 09 75

Ubicación sección típica del macizo rocoso 75

Figura 10 76

Secciónes del macizo rocoso para el calculo del factor de seguridad en diferentes condiciones 76

Figura 11 77

Resultados de los análisis para la presa en diferentes condiciones 77

Figura 12 79

Secciónes mejoradas rocoso para el calculo del factor de seguridad bajo diferentes condiciones 79

Figura 13 80

Resultados de los análisis para la presa en diferentes condiciones 80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01 11

Operacionalización de las Variables 11

Tabla 02 46

Ubicación de los vértices de la muestra por estaciones geomecánicas 46

Tabla 03 49

Resumen de Técnicas y sus Instrumentos 49

Tabla 04 59

Orientación de las Estaciones Geomecánicas 59

Tabla 05 62

Resumen de los principales sistemas de discontinuidades identificados 62

Tabla 06 63

Grado de fracturamiento de la roca 63

Tabla 07 63

Evaluación del Grado de Fisuración del Macizo Rocoso 63

Tabla 08 65

RQD obtenido en las Estaciones Geomecánicas 65

Tabla 09 67

Clasificación geomecánica RMR y GSI 67

Tabla 10 67

Resultados de los Ensayos con el Martillo de Schmidt 67

Tabla 11 70

Parámetros de clasificación del macizo rocoso (Input) 70

Tabla 12 70

Parámetros de clasificación del macizo rocoso (Output) 70

Tabla 13 71

Valores de Cohesión y Ángulo de fricción interna del macizo rocoso 71

Tabla 14 74

Valores de Modulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson del macizo rocoso 74

Tabla 15 81

Resumen de los factores de seguridad obtenidos 81

Tabla 16 83

Valores de incremento en el factor de seguridad 83

Tabla 17 83

Valores de incremento en el factor de seguridad 83

Tabla 18 88

Comparación técnica y económica del diseño de la presa de relaves 88

INTRODUCCIÓN

La industria minera genera grandes volúmenes de residuos que deben ser gestionados de manera segura para evitar impactos ambientales y riesgos geotécnicos; entre estas infraestructuras, las presas de relaves constituyen elementos críticos, pues su estabilidad está directamente relacionada con la protección de las personas, el ambiente y la continuidad operativa de la mina, siendo que su falla puede generar liberación descontrolada de material, afectación de ecosistemas y daños a infraestructura, lo que exige un diseño y monitoreo basados en criterios rigurosos de ingeniería geotécnica; en este contexto, la evaluación de la estabilidad estática y sísmica resulta fundamental para garantizar la integridad estructural durante su construcción, operación y cierre, especialmente en la región andina del Perú, caracterizada por macizos rocosos fracturados y alta sismicidad, donde la normativa E.030 “Diseño Sismorresistente” y las recomendaciones del U.S. Army Corps of Engineers establecen criterios mínimos como el uso de coeficientes pseudoestáticos, los cuales deben ser complementados con métodos numéricos avanzados para comprender el comportamiento del macizo rocoso de fundación bajo diferentes condiciones hidrológicas y estados de carga; en este sentido, el método de elementos finitos se constituye como una herramienta eficaz para evaluar distribuciones de esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad en condiciones complejas, ztificada, correspondiente al macizo rocoso de cimentación donde se ancla la estructura, empleando parámetros geotécnicos actualizados y modelación numérica en Phase², donde inicialmente se evaluó el diseño original obteniéndose factores de seguridad que cumplen con valores normativos pero con márgenes reducidos en escenarios saturados y pseudoestáticos, particularmente en la zona de fundación, y a partir de ello se propuso un rediseño geométrico compuesto por cuatro taludes de 10 metros, bermas de 3 metros e inclinación de 71°, cuyo desempeño fue analizado nuevamente bajo condiciones secas, saturadas, estáticas y pseudoestáticas, evidenciando mejoras sustanciales en los factores de seguridad en la zona crítica evaluada, lo que permitió validar las hipótesis mediante análisis estadístico t-Student y demostrar la efectividad del enfoque de optimización aplicado al macizo rocoso de cimentación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción del problema

En la minería superficial, las presas de relaves representan una de las infraestructuras geotécnicas de mayor riesgo debido al almacenamiento de grandes volúmenes de material saturado, susceptible a deformaciones, licuefacción y fallas estructurales. En el talud de la Torre N°6 en la presa de relaves objeto de estudio, si bien se cuenta con diseños aprobados y monitoreo operacional, no se ha evaluado con suficiente precisión el comportamiento geomecánico del talud bajo condiciones extremas, como eventos sísmicos representativos de la sismicidad regional. Además, existe limitada integración entre el análisis estático, la respuesta dinámica frente a sismos y la condición sísmica del macizo rocoso de fundación.

La ausencia de una modelación numérica avanzada que considere las características geotécnicas reales del relave, las condiciones hidrogeológicas, la evolución del nivel freático y el análisis no lineal del comportamiento del suelo frente a cargas cíclicas, genera incertidumbre en la toma de decisiones operativas y en el diseño de recrecimientos seguros. Esta falta de evaluación integral mediante herramientas como Phase² puede comprometer la estabilidad estructural de la presa, incrementando el riesgo de fallas con consecuencias ambientales, económicas y sociales, especialmente en sectores críticos como la zona de cimentación sobre macizo rocoso, donde se transmiten y concentran los esfuerzos de la estructura.

Ante esta problemática, surge la necesidad de mejorar la estabilidad estática y sísmica del talud en la Torre N°6 de la presa de relaves, enfocando el análisis en la zona más crítica identificada, correspondiente al macizo rocoso de fundación donde se ancla la estructura. Para ello, se plantea la evaluación de su condición geomecánica y sísmica mediante modelación geotécnica numérica, que permita identificar los modos de falla potenciales, cuantificar desplazamientos y establecer medidas de mitigación efectivas orientadas a mejorar el desempeño estructural de la presa.

1.1.2 Formulación del problema de investigación

Las presas de relaves constituyen estructuras fundamentales para el manejo de los residuos generados por la actividad minera. Su estabilidad es crítica, especialmente en regiones sísmicas como el sur del Perú, especialmente en nuestra región, donde los eventos geodinámicos pueden inducir deformaciones, licuefacción, fallas de taludes y comprometer su integridad estructural. La seguridad de estas infraestructuras depende del diseño, los parámetros geotécnicos reales del relave, el control del nivel freático y el desempeño frente a cargas estáticas y dinámicas. Sin embargo, en muchas operaciones mineras, los análisis convencionales no integran de manera adecuada la evaluación sísmica, lo cual genera incertidumbre respecto al comportamiento residual de la presa tras un sismo.

En este contexto, la modelación numérica avanzada mediante software como Phase² permite simular condiciones estáticas y sísmicas, proporcionando una evaluación más precisa de factores de seguridad, desplazamientos y zonas vulnerables. Esta investigación se centra en mejorar la estabilidad de una presa de relaves de una mina superficial, mediante la modelación geotécnica, con el fin de contribuir a la gestión segura de estructuras mineras y la prevención de fallas con impactos ambientales, económicos y sociales.

Interrogante general

¿De qué manera la modelación geotécnica en Phase² permite mejorar la estabilidad estática y sísmica del talud de una presa de relaves de una mina superficial?

Interrogantes específicas

¿Cuál es el nivel actual de estabilidad estática del talud en la Torre N°6 de la presa de relaves considerando los parámetros geotécnicos reales del material de relave y las condiciones hidrogeológicas del depósito?

¿Cómo varía el factor de seguridad y el comportamiento del talud de la presa frente a cargas sísmicas representativas de la sismicidad regional utilizando Phase²?

1.2 Objetivos

La presente investigación tiene como propósito principal abordar la seguridad y estabilidad del talud en la Torre N°6 de la presa de relaves de una mina superficial mediante un enfoque cuantitativo y basado en modelación geotécnica avanzada. Dada la importancia de garantizar la integridad estructural de estas instalaciones, los objetivos planteados buscan establecer un marco de análisis que permita evaluar la respuesta de la presa bajo condiciones estáticas y sísmicas, considerando tanto su configuración actual como las proyecciones de crecimiento.

Los objetivos de este estudio se orientan a integrar información geotécnica de campo y laboratorio con técnicas de modelación numérica en Phase², permitiendo así estimar factores de seguridad, identificar zonas críticas y proponer estrategias de mejora. De esta manera, se busca proporcionar un enfoque sistemático para la evaluación y mitigación de riesgos asociados a la operación y expansión de la presa de relaves, asegurando su desempeño a corto y largo plazo.

1.2.1 Objetivo general

- Mejorar la estabilidad estática y sísmica del talud en la Torre N°6 en la presa de relaves de la mina superficial mediante modelación geotécnica en Phase².

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar la estabilidad estática del talud en la Torre N°6 de la presa utilizando métodos de análisis de equilibrio límite y modelación numérica para determinar los factores de seguridad bajo condiciones normales de operación.
- Analizar la estabilidad sísmica del talud en la Torre N°6 de la presa considerando aceleraciones de diseño y escenarios de sismo característicos de la zona, incluyendo evaluación de desplazamientos y licuefacción potencial del material de relave.
- Determinar la estabilidad estática y sísmica del talud en la Torre N°6 de la presa de relaves de la mina superficial mediante modelación geotécnica en Phase²
- Realizar la evaluación sísmica para determinar la respuesta del talud en la Torre N°6 de la presa luego de un evento sísmico, identificando posibles deformaciones permanentes y zonas críticas de riesgo.

1.3 Justificación e importancia

La seguridad y funcionalidad de una presa de relaves dependen directamente de su estabilidad geotécnica, especialmente en regiones de alta sismicidad como la zona andina del Perú, en especial de Moquegua. Una falla estructural en este tipo de infraestructura puede generar consecuencias irreversibles: pérdidas humanas, contaminación de cuerpos de agua, daños a ecosistemas y paralización de la actividad minera. Frente a ello, resulta imprescindible desarrollar estudios que no solo evalúen la estabilidad en condiciones estáticas, sino que también consideren el comportamiento de la presa ante eventos sísmicos y su respuesta sísmica. Por estas razones, la investigación se justifica en la necesidad de garantizar una gestión segura, sostenible y técnicamente fundamentada de los depósitos de relaves.

Asimismo, las tecnologías de modelación numérica como Phase² se han convertido en herramientas clave para comprender el comportamiento de los materiales que conforman una presa de relaves. A diferencia de los métodos tradicionales de equilibrio límite, la modelación mediante elementos finitos permite analizar deformaciones, esfuerzos, condiciones de drenaje, distribución de presiones intersticiales y evolución del factor de seguridad en distintos escenarios operativos. Su aplicación permite simular condiciones reales, evaluar posibles modos de falla y proponer soluciones de diseño más eficientes. En ese sentido, el uso de Phase² se convierte en un sustento metodológico sólido que aporta precisión y confiabilidad a la presente investigación.

Finalmente, esta investigación se justifica porque permite mejorar el diseño y operación de la presa mediante recomendaciones técnicas basadas en evidencia numérica y normativa vigente. El estudio contribuye a la toma de decisiones para mejorar la estabilidad estática y sísmica de la estructura, incorporar medidas de reforzamiento o drenaje cuando sea necesario, y prevenir escenarios de colapso o deformación crítica. Además, proporciona un marco técnico replicable para otras operaciones mineras que enfrentan condiciones geotécnicas similares, fortaleciendo la gestión de riesgos y promoviendo una minería responsable y sostenible.

1.3.1 Justificación práctica

El estudio de la estabilidad estática ***y*** sísmica de los taludes de presas de relaves requiere una base teórica sólida que involucre los principios de la mecánica de suelos, la teoría de esfuerzos y deformaciones, así como los fundamentos de la dinámica de suelos. La literatura especializada evidencia que los relaves, al ser materiales heterogéneos y con alta susceptibilidad, presentan comportamientos complejos ante cargas cíclicas y dinámicas. Sin embargo, en el contexto peruano existe una limitada cantidad de investigaciones que integren de manera conjunta estos factores dentro de un modelo numérico geotécnico aplicado a presas de relaves de minería superficial. Por ello, este trabajo contribuye a ampliar el cuerpo teórico existente, fortaleciendo el conocimiento sobre los mecanismos de falla y los factores que condicionan la estabilidad de estructuras construidas con relaves.

Además, la investigación aporta al desarrollo académico al establecer una correlación entre los factores de seguridad obtenidos en condiciones estáticas ***y*** sísmicas, y la respuesta estructural real que se espera en escenarios de operación, diseño o eventos extremos. Este aporte teórico permite validar la aplicabilidad de modelos numéricos como Phase² en el análisis de estabilidad de taludes de presas de relaves, proporcionando una base científica que puede ser utilizada para futuras investigaciones, normativas o actualizaciones en los criterios de diseño y operación de instalaciones de almacenamiento de relaves en zonas sísmicas.

1.3.2 Justificación teórica

Desde el punto de vista operativo, esta investigación es relevante porque permite evaluar si el talud en la Torre N°6 de la presa de relaves en estudio mantiene condiciones de estabilidad adecuadas bajo escenarios reales de operación y crecimiento. El análisis de estabilidad estática y sísmica proporciona información precisa para mejorar diseños, definir medidas de reforzamiento, mejorar sistemas de drenaje o controlar presiones intersticiales, evitando así fallas que puedan generar colapsos o afectaciones ambientales. Esto se traduce en una herramienta de gestión para la toma de decisiones en ingeniería, asegurando la continuidad operativa de la mina y el cumplimiento de normas nacionales e internacionales.

En términos sociales y ambientales, esta justificación adquiere relevancia al considerar que una falla en una presa de relaves puede desencadenar consecuencias severas para las comunidades, los recursos hídricos y los ecosistemas aledaños. La aplicación de esta investigación contribuye a la prevención de desastres y a la responsabilidad social minera, garantizando que las actividades extractivas se desarrollen bajo principios de seguridad, sostenibilidad y respeto ambiental. Por lo tanto, los resultados no solo benefician a la operación minera, sino que también protegen la integridad de las poblaciones y el entorno natural.

1.3.3 Justificación metodológica

Metodológicamente, esta investigación se fundamenta en el uso de modelación numérica mediante el software Phase², basado en el método de elementos finitos, lo que permite simular con precisión el comportamiento geotécnico del talud en la Torre N°6 de la presa ante distintas condiciones de carga. Este enfoque supera las limitaciones del método de equilibrio límite tradicional al incorporar análisis de tensiones, deformaciones, condiciones de drenaje y la evolución del factor de seguridad en el tiempo. De esta forma, se garantiza una evaluación más completa, realista y consistente con las condiciones geomecánicas del depósito de relaves.

Asimismo, la metodología integra el uso de parámetros geotécnicos obtenidos de ensayos de laboratorio y campo, ajustados a las características reales de los materiales presentes. La investigación contempla escenarios comparativos entre condiciones estáticas y sísmicas, permitiendo validar los resultados y definir propuestas de mejora estructural. Este enfoque metodológico sistematiza el proceso de análisis y establece una guía replicable para futuros estudios en otras unidades mineras, fortaleciendo así la capacidad técnica en ingeniería geotécnica aplicada al diseño y evaluación de taludes de presas de relaves.

1.3.4 Importancia

La presente tesis reviste gran importancia debido a que aborda uno de los desafíos más críticos en la ingeniería de minas y geotecnia: la estabilidad de taludes en las presas de relaves, infraestructuras esenciales para la gestión de residuos mineros y cuya falla puede generar impactos ambientales, sociales y económicos de gran

magnitud. El estudio propone un enfoque de modelación numérica avanzada utilizando PHASE2 (Rocscience), herramienta ampliamente aceptada para el análisis tensional–deformacional en medios geotécnicos complejos.

El valor de este trabajo radica en que permite evaluar y mejorar la respuesta de la presa tanto en condiciones estáticas como bajo solicitaciones sísmicas, considerando las características geomecánicas reales de los materiales, las condiciones de carga, las filtraciones y la geometría del depósito. Los resultados obtenidos aportan criterios técnicos fundamentales para:

- Mejorar la seguridad estructural mediante factores de seguridad más robustos.
- Prevenir fallas por deslizamiento o licuación, especialmente en escenarios sísmicos típicos de zonas de alta sismicidad como el Perú.
- Diseñar y validar medidas de mejora (bermas, refuerzos, drenajes, cambios en parámetros, entre otros) basadas en análisis numéricos comparativos.
- Contribuir al cumplimiento de estándares internacionales, como el GISTM (Global Industry Standard on Tailings Management), y de regulaciones nacionales sobre presas de relaves.
- Proveer una metodología replicable para proyectos mineros que requieran evaluación de estabilidad y análisis de comportamiento bajo diferentes escenarios operativos.

Además, la tesis genera un aporte académico significativo al demostrar el uso especializado de herramientas como PHASE^2 en el análisis integral de presas de relaves, promoviendo una gestión de depósitos más segura y alineada con la sostenibilidad minera.

1.4 Hipótesis

La estabilidad de los taludes en las presas de relaves constituye un aspecto crítico en la operación de minas superficiales, debido a los riesgos potenciales asociados con fallas estáticas y sísmicas. La correcta caracterización geotécnica del macizo rocoso, el material de relleno y los parámetros de cimentación permite predecir el comportamiento de la presa frente a cargas normales y eventos sísmicos. En este

contexto, la modelación numérica en Phase² proporciona una herramienta confiable para simular escenarios de carga, analizar factores de seguridad y evaluar posibles desplazamientos permanentes inducidos por sismos en zonas críticas.

La hipótesis busca validar la relación entre las estrategias de diseño, los parámetros geotécnicos y la respuesta estructural en la estabilidad del talud en la torre N°6 de la presa de relaves, permitiendo establecer recomendaciones concretas para asegurar su integridad.

1.4.1 Hipótesis general

- La aplicación de los parámetros geotécnicos y el modelado numérico en Phase² influirá positivamente en la estabilidad estática y sísmica en el talud de la Torre N°6 de la presa de relaves de la mina superficial.

1.4.2 Hipótesis específicas

- La caracterización precisa de los materiales y la actualización de parámetros geotécnicos incrementará el factor de seguridad en el talud de la Torre N°6 de la presa en condiciones estáticas.
- La simulación de eventos sísmicos mediante Phase² permitirá identificar zonas críticas y proponer medidas de mitigación, mejorando la estabilidad sísmica del talud de la Torre N°6.

1.5 Operacionalización de las variables

La operacionalización de variables constituye un proceso fundamental en la investigación científica, ya que permite transformar conceptos teóricos en indicadores medibles y observables. En el contexto de esta tesis, que busca la mejora de la estabilidad estática y sísmica y la evaluación sísmica del talud en la Torre N°6 en una presa de relaves mediante modelación geotécnica en Phase^2, es necesario definir de manera precisa las variables independientes, dependientes e intervinientes, así como los indicadores que permitan evaluar su comportamiento de forma cuantitativa y objetiva.

Este procedimiento garantiza que los resultados obtenidos a través del modelado geotécnico puedan relacionarse directamente con la estabilidad del talud en

la Torre N°6 de la presa, facilitando la identificación de factores críticos, modos de falla potenciales y desplazamientos inducidos por sismos. Además, asegura que los parámetros geotécnicos de los materiales del terreno y los relaves se utilicen adecuadamente en la simulación, logrando una representación fiel del comportamiento real de la estructura. La Tabla 01 muestra la operacionalización de las variables.

1.5.1 Variable independiente

Modelación geotécnica mediante Phase2

Uso de software de elementos finitos para simular el comportamiento de taludes y estructuras de presas de relaves bajo condiciones estáticas y sísmicas. Implementación de modelos numéricos en Phase2 considerando propiedades geotécnicas del suelo y relaves, geometría del talud, cargas aplicadas y escenarios sísmicos. Para la medición se tendrá en consideración la extracción de resultados directamente del software Phase2 en condiciones de análisis estático y sísmico, cuantificando factores de seguridad y deformaciones.

1.5.2 Variable dependiente

Estabilidad de la presa de relaves

Capacidad del talud de la presa para mantener su integridad estructural frente a cargas propias y sísmicas sin producir fallas. Determinación de factores de seguridad bajo condiciones estáticas y dinámicas, evaluación de posibles desplazamientos permanentes y análisis sísmico. Para la medición se tendrá en comparación los factores de seguridad con valores normativos y recomendaciones de seguridad; análisis de desplazamientos y zonas críticas detectadas por Phase2.

Tabla 01

Operacionalización de las Variables

Tipo de variable	Nombre de la variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Técnica e instrumentos de medición
Variable independiente	Modelación geotécnica mediante Phase2	Uso del método de los elementos finitos (FEM) para analizar el comportamiento mecánico de estructuras geotécnicas bajo condiciones estáticas y sísmicas, permitiendo estimar esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad.	Simulación numérica geotécnica	Cohesión y ángulo de fricción interna, unidades: c en kPa; ϕ en grados (°) Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, unidades: E en MPa; ν adimensional. Distribución de esfuerzos y tensiones kPa (presión normal/cortante), MPa para tensiones principales.	Extracción de resultados del software Phase2 bajo análisis estático y sísmico; cuantificación de factores de seguridad, deformaciones y distribución de esfuerzos.
Variable Dependiente	Estabilidad de la presa de relaves	Capacidad del talud de la presa para conservar su integridad estructural frente a cargas gravitacionales y sísmicas, evitando la ocurrencia de fallas o desplazamientos	Estabilidad estructural y dinámica	Factor de seguridad estático Factor de seguridad sísmico	Comparación de los factores de seguridad con valores normativos y análisis de resultados obtenidos en Phase2 tensiones y zonas críticas

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del Problema

La estabilidad de las presas de relaves ha sido un tema central en la ingeniería geotécnica a nivel mundial, debido a los riesgos significativos que implican sus fallas. Casos históricos de colapso en países como Brasil, Canadá y Turquía han evidenciado las graves consecuencias humanas, económicas y ambientales, destacando la importancia de comprender los mecanismos de falla y los factores que afectan la seguridad de estas estructuras, como la inestabilidad de taludes, sobrepresión interna y sismicidad. Estos estudios internacionales han promovido la adopción de metodologías avanzadas de análisis, incluyendo modelación numérica, análisis de equilibrio límite y simulaciones sísmicas, que permiten anticipar posibles escenarios de falla y mejorar los diseños para reducir riesgos.

En el contexto nacional, el incremento de la minería superficial y el uso intensivo de presas de relaves en Perú ha generado desafíos adicionales. Muchos depósitos se encuentran sobre suelos blandos, con variaciones geotécnicas complejas y en zonas de alta sismicidad, lo que exige estudios detallados de estabilidad estática y sísmica. Investigaciones previas en unidades mineras de Ancash, Moquegua y Ayacucho han documentado la importancia de la caracterización geotécnica, el monitoreo continuo y el uso de modelos numéricos para predecir desplazamientos y evaluar factores de seguridad, aunque persisten limitaciones en la estandarización de metodologías y en la integración de datos de campo y laboratorio.

La revisión de antecedentes internacionales y nacionales permite identificar las brechas existentes y resalta la necesidad de aplicar herramientas modernas de análisis, como la modelación geotécnica en Phase², que integren parámetros de suelos, materiales de relleno, sismicidad y geometría de la presa. Esta integración es clave para mejorar la estabilidad de las presas de relaves, garantizar la seguridad operativa, minimizar el riesgo de desastres y proteger el medio ambiente, constituyendo la base teórica para el desarrollo del presente estudio.

2.1.1 Antecedentes internacionales

Clarkson y Williams (2021), en su investigación titulada "*An Overview of Conventional Tailings Dam Geotechnical Failure Mechanisms*" consideraron que comprender a profundidad los mecanismos de falla de las presas de relaves es fundamental para garantizar una gestión segura y responsable de estas estructuras. Este artículo tiene como propósito ofrecer un panorama integral que permita entender mejor los procesos geotécnicos que pueden comprometer la estabilidad de una presa de relaves, recopilando y analizando el conocimiento técnico, la experiencia operativa y los datos disponibles en torno a su diseño, monitoreo y operación. La revisión expone de manera clara los principios que rigen las fallas más comunes, tales como la inestabilidad de cimentaciones, la erosión interna y formación de tuberías, el rebosamiento, la filtración, los efectos de la sismicidad y la inestabilidad de taludes, explicando cómo estos factores se desarrollan, se agravan y pueden desencadenar el colapso estructural si no son controlados oportunamente. Asimismo, se resalta la importancia de la anticipación, el monitoreo constante y la implementación de diseños geotécnicos preventivos para mitigar los riesgos asociados. En esencia, este trabajo busca aportar una base técnica transparente y accesible para fortalecer la toma de decisiones y promover una gestión más segura y sostenible de las instalaciones de almacenamiento de relaves.

Halabi et al. (2022) en su investigación titulada "*Tailings Dam Failures: A Historical Analysis of the Risk*." revisaron el incremento de colapsos de presas de relaves de gran magnitud que ha generado una mayor conciencia social sobre la necesidad de comprender con profundidad los riesgos asociados a estas estructuras. En este contexto, el análisis de desastres pasados resulta fundamental para establecer perfiles de riesgo y promover políticas y medidas más eficaces para la reducción de peligros. El estudio desarrollado por los autores evaluó el comportamiento de los materiales posteriores a la falla, los métodos de construcción empleados, las causas de colapso y la distribución geográfica de los eventos a nivel mundial. El comportamiento post-falla se analizó considerando la presencia o ausencia de deslizamientos en flujo tras el colapso, mientras que el riesgo histórico se interpretó mediante curvas F–N, lo que permitió entender la seguridad histórica de estas presas y su relación con la

respuesta del material. Los datos obtenidos evidencian una relación directa entre el comportamiento en flujo y la magnitud de las consecuencias, así como una correlación entre las fallas en presas construidas aguas arriba, determinados materiales, causas específicas de colapso y ocurrencia de deslizamientos. El análisis de las curvas F–N revela que las presas construidas con el método aguas arriba representan los mayores niveles de inseguridad, mientras que otros métodos constructivos se mantienen dentro de márgenes de riesgo aceptables.

Luca et al. (2022) en su investigación titulada "*A new look at the statistics of tailings dam failures*", los autores estudiaron presas de relaves indicando que suelen elevarse de forma progresiva para incrementar la capacidad de la Instalación de Almacenamiento de Relaves (TSF), sin detener las operaciones mineras. Sin embargo, una gestión deficiente, el desconocimiento del comportamiento geotécnico de los relaves y la ineficacia en los sistemas de monitoreo han derivado en fallas catastróficas con consecuencias humanas, económicas y ambientales. Los autores indican que diversos estudios han analizado correlaciones entre variables como volumen almacenado, volumen liberado, altura de la presa, distancia de escorrentía y caudal máximo. Existen múltiples bases de datos sobre fallas de presas de relaves, aunque con distintos niveles de detalle. Este estudio utiliza una base de datos actualizada para calcular estadísticas de fallas y revisar correlaciones previamente reportadas entre volúmenes almacenados y liberados. Además, el trabajo desarrollado propone un nuevo modelo de regresión que relaciona el volumen liberado con características de la presa, como su altura y el volumen almacenado (factor de presa). Analizaron también el tipo de construcción, el material de conformación y el modo de falla, destacando que las presas construidas aguas arriba presentan mayor susceptibilidad a la licuefacción y fallas estructurales. Esta nueva correlación permite estimaciones más confiables del volumen de relaves liberado, útiles para análisis de runout y evaluación de riesgos. Finalmente, se confirma que no existe relación significativa entre el tamaño del estanque de agua y el volumen liberado durante una falla.

Blight et al. (2000) en su investigación titulada "*Issues In The Geotechnics Of Mining Wastes And Tailings*" los autores elaboraron por especialistas de ambos

hemisferios, el abordaje de cuatro de los principales retos asociados al manejo de residuos y relaves mineros. Los desechos derivados de la actividad minera no solo superan en cantidad a los de cualquier otra industria, sino que también ocupan extensas áreas de terreno, dejándolas inutilizadas. Un ejemplo ilustrativo se encuentra en la minería subterránea de oro a gran profundidad en Sudáfrica, donde, a lo largo del siglo pasado, se extrajeron y procesaron más de 8 000 millones de toneladas de mineral. No obstante, estas cifras resultan menores si se comparan con los volúmenes generados por la minería a cielo abierto y la remoción de sobrecarga. La cantidad y características de estos residuos varían significativamente según el tipo de explotación, el mineral procesado y factores del entorno, como la geología superficial, el clima y la configuración del terreno en cada operación minera.

Parreiras (2021) en su investigación titulada "*Utilização de modelos digitais de terreno com diferentes resoluções espaciais provenientes de dados lidar na simulação da ruptura da Barragem em Brumadinho- Minas Gerais*" realizó un estudio donde evaluó la falla hipotética de la presa B1 en Brumadinho (Brasil), evaluando cómo la resolución espacial del Modelo Digital del Terreno (MDT) influye en los resultados de la simulación hidrodinámica del flujo generado por su colapso. Se modelaron seis escenarios con idénticas condiciones de entrada, variando únicamente la resolución del MDT (1, 5, 10, 15, 20 y 25 m), generados a partir de datos LiDAR. Para cada caso se analizaron el área inundada, profundidad, velocidad, caudal máximo y tiempo de llegada de la ola de ruptura, comparando los resultados con datos reales del evento. Los MDT fueron validados estadísticamente según normas brasileñas y el desempeño se evaluó mediante el índice F y coeficientes de variación. Se concluye que todos los escenarios reproducen de forma similar el evento, siendo la velocidad la variable más sensible a los cambios de resolución, aunque sin discrepancias significativas. Por lo tanto, resoluciones mayores a 1:10.000 resultan adecuadas para representar eventos de magnitud similar.

Parreiras et al. (2022) en su investigación titulada "*Systematic review on the use of digital terrain models in dam rupture simulations*" indicaron que el estudio de fallas hipotéticas en presas permite simular el flujo generado por el colapso parcial o total de

estas estructuras, evaluando la propagación de la onda de inundación aguas abajo. Dichas simulaciones se desarrollan mediante programas de modelación hidrodinámica de fluidos, donde los principales datos de entrada corresponden a las propiedades físicas del fluido, el hidrograma de ruptura y el Modelo Digital del Terreno (MDT), el cual representa la topografía por donde se desplaza la onda. En este contexto, la presente revisión sistemática tuvo como finalidad recopilar y analizar bibliografía actualizada relacionada con la simulación de fallas hipotéticas de presas, con énfasis en la influencia de la representación topográfica del valle en los resultados hidráulicos. Este análisis se estableció como base metodológica para la posterior simulación del colapso de la presa B1 en Brumadinho, Minas Gerais (Brasil). La información recopilada fue organizada y clasificada en categorías temáticas, con el fin de abordar de forma estructurada el carácter multidisciplinario del problema.

Sousa (2022) en su investigación titulada "*Sensibilidade a parâmetros reológicos na modelagem de fluxo hiperconcentrado proveniente de rupturas de barragens de rejeitos de mineração*" la autora indica que el riesgo de falla en presas de relaves, aunque estadísticamente bajo, es significativamente mayor que en presas convencionales de almacenamiento de agua. Ante estos eventos, el modelado hidrodinámico de inundaciones constituye una herramienta esencial para identificar zonas vulnerables, estimar daños potenciales y establecer planes de alerta temprana y evacuación. No obstante, la precisión de estos modelos puede verse afectada por la variabilidad de los parámetros reológicos de los fluidos hiperconcentrados generados tras una ruptura, lo que introduce incertidumbres en los resultados simulados. En conjunto, los resultados indican que, si bien existen factores con mayor impacto en el modelado, la influencia de los parámetros reológicos es significativa y no debe ser ignorada en estudios de ruptura de presas de relaves.

Orduz y Barros (2020) en su investigación titulada "*A ascensão do capitalismo de desastre no Brasil: o rompimento da barragem de Fundäo e as técnicas e mecanismos de tortura na Bacia do Rio Doce*" los autores analizaron el desastre de la presa de relaves Fundão, operada por la empresa Samarco (Vale S.A./BHP Billiton), que colapsó en Mariana (Brasil), provocando 19 fallecidos, múltiples afectados y una

extensa devastación ambiental y social a lo largo de la cuenca del río Doce. La investigación se desarrolló mediante revisión bibliográfica y documental, trabajo de campo y entrevistas con la población afectada. El colapso de Fundão no solo representó una catástrofe ambiental y humana, sino que también constituyó el primer escenario de aplicación sistemática de estrategias de gestión post-desastre alineadas con políticas neoliberales en el país. Bajo este enfoque, la reparación de daños se organizó mediante mecanismos que, además de minimizar responsabilidades corporativas y reducir el gasto social, sometieron a las comunidades perjudicadas a procesos de presión económica, desgaste psicológico, debilitamiento social y desmovilización política. Dichas prácticas contribuyeron a contener la resistencia, acelerar la privatización de la gestión de la tragedia y consolidar un modelo de respuesta conocido como capitalismo de desastres.

De Melo (2022) en su investigación titulada "*Avaliação do transporte de sedimentos na ruptura de barragens de rejeito*" la actividad minera genera como subproducto grandes volúmenes de relaves, materiales sin valor económico que deben ser almacenados de manera segura. Habitualmente, estos residuos se depositan en presas de relaves, cuya construcción y operación deben equilibrar criterios de seguridad, eficiencia económica y mínima afectación ambiental. Para prevenir y evaluar este tipo de desastres, los estudios de rotura de presas emplean modelos hidrodinámicos capaces de simular la propagación de las inundaciones generadas por fallas hipotéticas. Sin embargo, un aspecto frecuentemente omitido en estos estudios es el transporte de sedimentos asociado al flujo de relaves, principalmente por la complejidad de representarlo matemáticamente. Este trabajo analiza la influencia de incorporar dicho fenómeno en la modelación de la ruptura de una presa de relaves, tomando como caso de estudio la presa de Fundão. La metodología se basó en la implementación de un modelo hidrodinámico bidimensional en HEC-RAS, considerando dos escenarios: uno que incluye transporte de sedimentos y otro que no.

Augustinus (2020) en su investigación titulada "*Rompimento de barragens em Mariana e Brumadinho (MG): desastres como meio de acumulação por despossessão*" el autor analizó el colapso de las presas de relaves en Mariana y Brumadinho (2015 y

2019, respectivamente), ambas ubicadas en Minas Gerais, que provocó cientos de muertes y la degradación masiva de las cuencas de los ríos Doce y Paraopeba. Estos eventos representan el punto culminante de una cadena de fallas que se inició con procesos de licenciamiento ambiental permisivos y continuó con una gestión deficiente de la reparación de daños, profundizando el sufrimiento de las poblaciones afectadas. Posteriormente, las instituciones públicas no solo dejaron de fortalecer el marco regulatorio, sino que promovieron su flexibilización. Como consecuencia, las empresas mineras consolidaron una cultura de neocoronelismo en los sistemas de gobernanza, lo que reforzó su capacidad de influencia frente a las demandas de las víctimas. Además, incrementaron su control territorial en las zonas impactadas a través de mecanismos de acaparamiento encubierto de tierras, intensificando así las desigualdades sociales y territoriales generadas por los desastres.

Macedo y Pereira (2024) en su investigación titulada "*As recentes falhas no gerenciamento de barragens de rejeito em Minas Gerais*" investigaron las recientes fallas en la gestión de presas de relaves en el estado de Minas Gerais que han generado cuestionamientos acerca de las deficiencias existentes en el marco legal y en los sistemas de gestión de estas estructuras, que permitieron la ocurrencia de eventos de gran magnitud. En este contexto, el presente estudio tiene como finalidad analizar, mediante una revisión bibliográfica, las causas asociadas a los colapsos de la presa B1 en Itabirito (2014), la presa Fundão en Mariana (2015) y la presa I en Brumadinho (2019). Los resultados evidencian que las causas de dichas fallas se vinculan tanto a vacíos en los procesos de licenciamiento ambiental y estructural, como al incumplimiento de los manuales operativos establecidos para la gestión de presas. Asimismo, se identificó que el sistema de automonitoreo implementado en Minas Gerais presenta fallas significativas, dado que las tres presas analizadas fueron consideradas estructuralmente estables antes de su colapso.

Herrera (2009) en su investigación titulada "*Modelagem do comportamento pós-sismo de uma barragem de rejeito*" el autor estudio los daños en geoestructuras ocasionados por cargas dinámicas provocadas por terremotos no siempre se manifiestan durante el evento sísmico; en numerosos casos, las afectaciones se

evidencian una vez finalizada la excitación sísmica. En este contexto, la presente tesis doctoral propone un flujo de trabajo integral para la evaluación de presas, que incorpora análisis estático, dinámico y sísmico. Para el desarrollo de esta metodología se empleó FLAC, uno de los softwares comerciales más utilizados para análisis dinámicos avanzados en geotecnia. La simulación realizada mediante diferencias finitas permitió explorar sus capacidades, aplicar estrategias de modelación y reconocer sus limitaciones. El caso de estudio corresponde a una presa de relaves ubicada en Argentina. Los aspectos evaluados incluyen el análisis estático inicial y la determinación del estado estacionario, que constituye la condición de partida para el análisis sísmico; el análisis dinámico propiamente dicho; y la evaluación de la estabilidad. En la etapa dinámica se investigaron las condiciones de borde más adecuadas, así como el tipo de amortiguamiento y sus parámetros.

Pérez (2015) en su investigación titulada "*Comportamento dinâmico de uma barragem de rejeitos com considerações de ameaça sísmica*" el autor estudio los terremotos se encuentran entre los desastres naturales más devastadores debido a su alto potencial destructivo, la magnitud de sus impactos y su ocurrencia repentina, capaz de desencadenar fenómenos secundarios como deslizamientos, licuefacción de suelos y flujos de detritos. En este contexto, la evaluación de la amenaza sísmica constituye un componente esencial de la ingeniería geotécnica, especialmente en proyectos críticos como las presas, debido a sus implicancias socioeconómicas, ambientales y de seguridad. Incluso en regiones de baja sismicidad, como Brasil, los análisis sísmicos de estas geoestructuras deben integrarse en el diseño como parte de las buenas prácticas ingenieriles, con el fin de garantizar su funcionamiento seguro a lo largo de toda su vida útil y proteger a las poblaciones aledañas. El objetivo principal de esta tesis doctoral es compilar información y desarrollar metodologías para el estudio de la amenaza sísmica y la respuesta dinámica de estructuras de tierra. Como aplicación práctica, se analiza un sistema de contención de relaves de bauxita localizado en Jamaica, una zona de alta actividad sísmica. A partir de un análisis probabilístico de peligros sísmicos regionales, se determinan los parámetros del sismo de diseño. Posteriormente, se evalúan la estabilidad de los taludes y los desplazamientos permanentes inducidos por el evento sísmico mediante metodologías simplificadas,

como el análisis pseudoestático y el método de Newmark, así como mediante enfoques avanzados basados en el método de elementos finitos (MEF).

Roza (2024) en su investigación titulada "*Monitoramento de Barragens de rejeito utilizando os métodos geofísicos de eletrorresistividade e microssísmica no Estado de Goiás*" el monitoreo de presas de relaves es una actividad fundamental para la prevención de fallas y riesgos operacionales, tradicionalmente basada en inspecciones visuales y en instrumentación geotécnica. Sin embargo, los recientes accidentes han evidenciado la necesidad de fortalecer estos sistemas, lo que ha promovido la incorporación de métodos geofísicos en las actividades de control y vigilancia. En este contexto, con el propósito de optimizar el monitoreo convencional durante y después del desmantelamiento de dos presas ubicadas en Catalão, Goiás, se llevó a cabo una campaña de adquisición de seis perfiles de resistividad eléctrica para evaluar las condiciones de saturación del subsuelo. Asimismo, se implementó un sistema de monitoreo microsísmico compuesto por quince estaciones sismográficas. A partir de las anomalías detectadas en la campaña de mayo de 2022 y de la interpretación de los cortes geológicos, se identificaron zonas críticas con materiales de alta humedad en sectores donde no se esperaba su presencia. El monitoreo microsísmico activo evidenció que las detonaciones no generaron vibraciones significativas en el macizo rocoso, mientras que las alertas registradas se atribuyeron principalmente a actividades humanas y al tránsito de maquinaria. En cuanto al monitoreo microsísmico pasivo, el tiempo reducido de observación no permitió registrar variaciones significativas en la velocidad de propagación de ondas que posibiliten un análisis concluyente del comportamiento del macizo.

Morgado (2022) en su investigación titulada "*Estudo das causas de rupturas de barragens de rejeito de mineração no Brasil e proposta para avaliação da operação*" la autora analiza el historial de fallas de presas de relaves en Brasil, identificando sus principales causas mediante información de investigaciones, informes técnicos y datos de la Agencia Nacional de Minería. Se constató que muchas presas presentaban anomalías detectables antes de su colapso, lo que destaca la importancia del monitoreo continuo. Como aporte, se propone un sistema de evaluación operativa basado en un

registro de presas con recomendaciones geotécnicas y un método de puntuación para determinar cuándo es necesaria la intervención de especialistas. Esta propuesta fue aplicada a dos casos reales, tanto en presas construidas aguas arriba como aguas abajo, y demostró que una operación adecuada y soporte técnico constante son cruciales para la estabilidad. Se concluye que implementar esta metodología podría prevenir fallas y mejorar la toma de decisiones durante la vida útil de las presas, reforzando la necesidad de buenas prácticas, monitoreo permanente e integración de los equipos de gestión.

Alencar (2019) en su investigación titulada " *Relatório de análise estatística sobre o projeto "Estabilidade e monitoramento de barragens de contenção de rejeitos*" la autora evaluó la estabilidad de una presa de relaves, denominada de manera confidencial "Polihamzeboscov 1". El comportamiento de la presa fue monitoreado mediante instrumentación geotécnica, específicamente un Indicador de Nivel de Agua (ILA), piezómetros (PI) y marcadores de superficie (SM). Para el análisis, se seleccionaron las secciones A y H. Dado el alto porcentaje de datos faltantes, se recurrió a una interpolación lineal diaria de los datos disponibles, a partir de la cual se calcularon promedios semanales. Con estas series se ajustaron modelos ARIMA para cada variable monitoreada. La prueba de Dickey-Fuller confirmó la estacionariedad tras la diferenciación, mientras que la prueba de Ljung-Box indicó independencia de los residuos. Sin embargo, no se verificó la normalidad de estos, por lo que la validez de los intervalos de confianza para predicciones futuras no queda garantizada. En términos generales, los modelos generaron predicciones constantes, equivalentes al último valor registrado.

Hamze-Guilart et al. (2025) en su investigación titulada "*Analyzing the Effect of Drainage on the Stability of Tailings Dams Using the Interpretation of Cross-Correlations*" los autores considerando la importancia del factor para la estabilidad de las estructuras estudiadas, la investigación examina la relación entre la precipitación, los niveles del embalse y los datos provenientes de la instrumentación geotécnica, a lo largo de las distintas etapas de elevación de una presa de relaves. Con el fin de evaluar la influencia del drenaje en el comportamiento de la presa, se modeló y analizó su respuesta frente a la infiltración, las fluctuaciones del nivel del agua del embalse y las

variaciones registradas por los instrumentos geotécnicos. A través del análisis de series temporales, utilizando funciones de autocorrelación y correlación cruzada, se identificaron patrones que permiten comprender la eficiencia del drenaje y su impacto en la estabilidad estructural. Para garantizar la validez del análisis, las series temporales fueron regularizadas y transformadas a formatos estacionarios. Los resultados evidencian diferencias en la eficiencia del sistema de drenaje dependiendo de la sección analizada y del nivel de elevación, aportando una visión más precisa del rol del drenaje en la estabilidad de la presa. Asimismo, la metodología propuesta es adaptable a otras configuraciones de almacenamiento de relaves, como presas construidas aguas abajo o depósitos en seco, contribuyendo al fortalecimiento de las estrategias de monitoreo y evaluación de riesgos.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Pinedo (2019) en su investigación titulada "*Análise Numérica do Potencial de Liquefação induzido por terremoto em uma barragem de rejeitos no Peru*" el autor estudio casos de presas de relaves en Perú, que se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, zona donde se concentra aproximadamente el 85 % de la actividad sísmica mundial. Como país minero por excelencia, cuenta con grandes infraestructuras asociadas a esta actividad, entre ellas las presas de relaves. En este contexto, la presente tesis evalúa el potencial de licuefacción dinámica de una presa de relaves situada en la zona centro del país, actualmente en proceso de recrecimiento mediante el método de línea central. La licuefacción es un fenómeno caracterizado por la pérdida súbita de rigidez y resistencia del suelo bajo cargas cíclicas, lo que puede comprometer la estabilidad estructural e incluso provocar el colapso. Para analizar este fenómeno, se realizaron simulaciones numéricas considerando sismos de magnitudes 8,2; 7,8 y 8,1, utilizando los modelos constitutivos UBCSand y Byrne para representar el comportamiento cíclico de los materiales susceptibles a licuefacción. Los resultados fueron comparados con métodos simplificados empleados en la práctica ingenieril para determinar el factor de seguridad frente a la licuefacción dinámica. Los análisis indican que los relaves finos ubicados por debajo del nivel freático presentan potencial de licuefacción, según la relación de presión de poros (ru); sin embargo, este no

compromete la estabilidad de la presa. Asimismo, se reportan los desplazamientos permanentes estimados en puntos críticos tanto de la estructura como del cuerpo de relaves.

Ivan (2020) en su investigación titulada "*Análise numérica de comportamento sísmico da barragem de rejeitos Otapara, Peru* "el autor reafirmo que el Perú se encuentra en una región de alta sismicidad, donde los sismos se originan principalmente por la interacción convergente entre las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana. En este contexto geodinámico se desarrollan importantes actividades mineras y la construcción de grandes infraestructuras, como las presas de relaves, destinadas al almacenamiento masivo de materiales en espacios reducidos. Este estudio analiza el comportamiento sísmico de una presa de relaves ubicada en Arequipa, Perú, construida mediante el método de crecimiento aguas arriba. Durante un sismo ocurrido en 2013, la estructura presentó grietas, asentamientos en la cresta y pequeños volcanes de arena, evidenciando una disminución de la resistencia de los relaves posiblemente asociada a fenómenos de licuefacción. La amenaza sísmica fue evaluada mediante métodos probabilísticos, y el movimiento sísmico de diseño se generó utilizando técnicas de ajuste espectral. Se desarrollaron análisis pseudoestáticos de estabilidad de taludes, así como estimaciones de desplazamientos permanentes y del potencial de licuefacción dinámica mediante metodologías simplificadas. Finalmente, el análisis del tranque se efectuó mediante el método de elementos finitos, empleando el modelo constitutivo UBC3D-PLM para representar el comportamiento mecánico de los relaves bajo cargas cíclicas.

Cabrera (2021) en su investigación titulada "*Previsão numérica do comportamento sísmico da Barragem de Rejeitos de Alpamarca no Peru*" el autor revisó en la investigación desarrolla un análisis del comportamiento dinámico de la presa de relaves Alpamarca, ubicada en una zona de elevada sismicidad en la región central del Perú. Dado el considerable impacto ambiental, económico y social que podría generar una falla estructural bajo cargas dinámicas, los estudios de peligro sísmico constituyen un componente esencial en el diseño de presas de relaves. Para ello, se aplicaron análisis probabilísticos de amenaza sísmica mediante el software de

código abierto OpenQuake, incorporando leyes de atenuación adaptadas a las condiciones geológicas propias del territorio peruano. La simulación del comportamiento dinámico de la estructura requirió la generación de movimientos sísmicos de diseño, obtenidos a partir del espectro de aceleraciones de ocurrencia uniforme determinado en el estudio de amenaza sísmica y considerando la clasificación de peligrosidad de la presa. Asimismo, se presentan y discuten técnicas de procesamiento de acelerogramas orientadas a optimizar el esfuerzo computacional en los análisis en el dominio del tiempo, manteniendo la precisión necesaria para la fiabilidad de los resultados.

Hancco (2025) en su investigación titulada "*Previsão numérica do comportamento sísmico da Barragem de Rejeitos de Alpamarca no Peru*" la autora analizó los principales retos asociados a estas estructuras es la correcta evaluación del comportamiento dinámico de los materiales arenosos sometidos a cargas sísmicas, considerando que un porcentaje considerable de las fallas de presas de relaves registradas a nivel mundial está vinculado a eventos sísmicos. En este sentido, comprender los mecanismos de falla resulta esencial para mitigar o evitar la pérdida de vidas humanas, daños ambientales irreversibles y consecuencias económicas severas. En este contexto, el presente estudio desarrolla un análisis dinámico de una presa de relaves construida mediante el método ciclónico, ubicada en una de las zonas de mayor actividad sísmica del Perú, sometiéndola a cargas cíclicas de alta magnitud. El objetivo principal es comparar el desempeño de dos modelos constitutivos —PM4Sand y Hardening Soil Small (HSS)— utilizando el software de elementos finitos PLAXIS 2D. Ambos modelos fueron calibrados con base en una extensa campaña experimental y ensayos de laboratorio. En ambos modelos, los relaves de underflow mostraron estabilidad y ausencia de potencial de licuefacción bajo las condiciones de carga simuladas. Entre los registros sísmicos evaluados, el sismo de Ático generó las mayores respuestas dinámicas, evidenciando la relevancia de factores como la frecuencia dominante y la duración del movimiento, además del valor de PGA. Los asentamientos obtenidos en las simulaciones se mantuvieron por debajo del 1 %, clasificándose como de daño moderado según el criterio de Swaisgood (2013), y resultaron significativamente menores que los estimados mediante métodos empíricos.

Huaña (2015) en su investigación titulada el autor "*Diseño de depósitos de relaves filtrados*" realizó su tesis desarrollando el proceso integral de diseño y construcción de depósitos de relaves filtrados, desde la obtención del relave, su transporte, trabajabilidad, compactación y geometría final. Se abordó el estado del arte y la evolución tecnológica que permite obtener relaves con humedades menores al 13%, incluyendo experiencias en el Perú. Los tipos de depósitos, sistemas de filtración, estabilidad en las etapas de vida de la presa y los dos casos de estudio: Ramahuayco (sierra, Ayacucho) con mezcla de relave y material de cantera, y Pahuaypite 2 (costa, Ica) con relaves filtrados que se secan hasta 7 % para su compactación. Los criterios de diseño, operación, estructuras, sistema de monitoreo y parámetros de compactación, el diseño geotécnico, considerando geología, hidrología, sismicidad, factores de seguridad, nivel freático, modelación numérica, estabilidad y comparativa entre ambos casos. Finalmente, el quinto capítulo presenta conclusiones, recomendaciones y anexos con ensayos geotécnicos, planos, análisis de estabilidad y registro fotográfico de las obras en ejecución.

Escalante (2023) en su investigación titulada "*Diseño de un depósito de relaves reubicado frente a los problemas de contaminación del relave Ticapampa, Recuay – Ancash – 2018 – 2019.*" el autor plantea un diseño de un depósito con base impermeable destinado al transporte, almacenamiento y encapsulamiento de los relaves existentes. Esta propuesta surge ante la necesidad de detener el flujo de relaves con remanentes de sulfuros, los cuales afectan las áreas situadas aguas abajo en la provincia de Recuay. En esta zona, las condiciones como la topografía variable, la escasa vegetación y las precipitaciones intensas potencian la dispersión de contaminantes, convirtiéndola en un entorno altamente vulnerable. Para sustentar la propuesta, se realizó un estudio geológico, geomorfológico y geodinámico del área de Ticapampa, identificando el volumen del depósito actual, las rutas de escorrentía con sulfuros y los eventos de contaminación ocurridos durante épocas de lluvias, que han afectado suelos y cuerpos de agua. Con esta información, se seleccionó un nuevo emplazamiento para el depósito de relaves, ubicado sobre terrazas aluviales formadas por antiguos procesos glaciares del Pleistoceno. Estas terrazas están compuestas por arenas, gravillas, gravas, cantos rodados, depósitos calcáreos, travertinos y horizontes de suelos orgánicos, lo

cual proporciona condiciones geotécnicas adecuadas para la construcción de una base impermeable y estructuras de confinamiento. En la zona norte del área de estudio destaca la quebrada Colea Racra, cuyo origen se localiza en la cordillera Negra; esta quebrada mantiene un caudal constante, transporta sedimentos aluviales y desemboca en el río Santa, lo que refuerza la necesidad de controlar el arrastre de contaminantes provenientes de los relaves.

Sánchez (2013) en su investigación titulada "*Diseño Geotécnico de Presas en Depósito de Relaves*" el autor evaluó la operación de la mina, cuya investigación consistió en la recuperación de los relaves previamente depositados, con el propósito de reprocesar los minerales residuales que aún contienen valores económicos aprovechables, como metales preciosos y sulfuros complejos. Este proceso de retratamiento incluye actividades de remoción, transporte, acondicionamiento y procesamiento metalúrgico, lo que permite optimizar el uso de recursos y reducir el volumen de relaves almacenados históricamente. Sin embargo, los nuevos relaves generados como resultado de la reprocesamiento se continúan depositando en otros sectores del mismo depósito existente, lo que ha generado una progresiva reducción del espacio disponible y ha aumentado el riesgo ambiental y geotécnico debido a la sobreutilización del depósito actual. Ante este escenario, el objetivo principal del proyecto es diseñar un nuevo depósito de relaves que permita almacenar de forma segura y eficiente los relaves reprocesados, garantizando la estabilidad geotécnica, la mínima afectación ambiental y la continuidad operativa de la unidad minera. El nuevo diseño busca aprovechar al máximo la capacidad de depósito dentro del área asignada al proyecto, mediante la optimización de la geometría de la estructura, la implementación de sistemas de drenaje y control de filtraciones, y la adopción de criterios de operación progresiva y cierre sostenible. Asimismo, el proyecto considera aspectos clave como la caracterización geotécnica de los relaves, el análisis de riesgos sísmicos, la selección de materiales de construcción, la gestión del agua y el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

Canturin (2024) en su investigación titulada "*Propuesta de metodología para la determinación de escenarios de falla en depósitos de relaves bajo enfoques de*

riesgo" el autor reviso las más de 400 fallas en presas de relaves, y en el Perú identificó 20 casos. Estas fallas pueden deberse a sismos, deslizamientos, sobrepasos u otros factores, los cuales varían según las características y condiciones específicas de cada depósito. Por ello, se requiere una gestión integral de riesgos que considere la evaluación de escenarios potenciales de falla y sus consecuencias. Esta tesis propone una metodología para identificar y analizar escenarios de falla en depósitos de relaves bajo un enfoque de riesgos, basada en la revisión de guías nacionales e internacionales. El proceso incluye recopilación de información, identificación de peligros y selección de mecanismos de falla creíbles, los cuales se evalúan mediante la herramienta FMEA, considerando severidad, probabilidad y capacidad de detección para clasificar el nivel de riesgo. Los mecanismos con mayor prioridad se consideran escenarios de falla críticos, asociados a condiciones hidrológicas de tipo "Sunny Day" o "Rainy Day". La metodología se aplicó al depósito de relaves Quiulacocha, donde se identificaron 20 peligros y 4 escenarios de riesgo muy alto. Finalmente, se recomienda estandarizar la identificación de mecanismos de falla y considerar su inclusión en la normativa minera (D.S. N°024-2016-EM).

Infante (2014) en su investigación titulada "*Estudio geotécnico para el diseño de la presa de relaves Collparacra minera Milpo Ancash - Perú*" el autor analizó la Presa de Relaves Collparacra que formó parte de un proyecto principal, perteneciente a la Empresa Minera Milpo, y se ubica en el distrito de Conchucos, provincia de Pallasca, departamento de Áncash, en la región norte del Perú, dentro de la Cordillera Occidental de los Andes. El objetivo principal de esta tesis profesional es determinar la caracterización geológica y geotécnica del área destinada a la cimentación de la presa de relaves Collparacra, proporcionando datos confiables para el diseño y construcción de esta estructura. Para ello, se desarrollaron trabajos de gabinete, campo y laboratorio. Estas actividades incluyeron la recopilación y análisis de información previa, el mapeo geológico superficial, investigaciones geofísicas, ejecución de calicatas, perforaciones y la toma de muestras representativas de suelo y roca para su posterior análisis en laboratorio. La investigación geológica comprendió el levantamiento geológico, geomorfológico y estructural del área de estudio, con el propósito de identificar las unidades litológicas, las formas del relieve y los rasgos tectónicos predominantes.

Asimismo, se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de los materiales presentes en el terreno de fundación, la permeabilidad, la presencia de estructuras geológicas relevantes y los posibles factores de inestabilidad.

Rodas (2024) en su investigación titulada "*Evaluación del método CDA para el análisis de rotura de presas de relaves y su aplicación en una presa de Ancash - Perú*" el autor evaluó la confiabilidad de la metodología propuesta por la Asociación Canadiense de Presas (CDA) para el análisis de rotura de presas de relaves, comparándola con metodologías empleadas en el Perú. Para ello, se aplicaron los once pasos establecidos en el Boletín Técnico de la CDA y se contrastaron con el enfoque convencional desarrollado por Quisca (2016), adoptado por el Comité Peruano de Grandes Presas (COPEGP) en 2018. El modelamiento hidráulico y la elaboración de mapas de inundación se realizaron utilizando HEC-RAS 6.2 y QGIS 3.28, permitiendo simular flujos Newtonianos y no Newtonianos, así como visualizar los resultados georreferenciados. El caso de estudio corresponde a una presa de relaves ubicada en Huari, Áncash, a 4280 m.s.n.m., donde se recopiló información geomorfológica, hidrográfica, meteorológica y del uso del suelo. Los resultados muestran que la metodología de la CDA identifica áreas de afectación mayores tras una rotura, en comparación con métodos tradicionales. Esto evidencia su mayor rigurosidad y abre una línea de investigación para mejorar el análisis de rotura y la gestión de seguridad en presas de relaves en el Perú.

Alberto (2017) en su investigación titulada "*Gestión de calidad en la construcción de una presa de relaves*" tuvo como objetivo presentar una metodología de gestión de calidad para la construcción de presas de tierra, estandarizando procedimientos que cumplan con los requerimientos nacionales e internacionales. La construcción de una presa exige controlar la variabilidad de los materiales, garantizar requisitos técnicos y aplicar procesos constructivos ordenados bajo estándares de calidad. En la presa de relaves analizada, la fundación se ejecutó en una zona de suelo saturado y con flujos superficiales continuos, lo que generó dificultades y necesidad de ajustes en los procesos. Se enfrentaron problemas como la insuficiencia de la cantera inicial para el relleno de fundación y la búsqueda de una nueva fuente de materiales

adecuados. Se implementó una gestión de control de calidad (CQA y CQC) en campo y laboratorio para asegurar parámetros de densidad, compactación y permeabilidad en los materiales utilizados. El relleno fino impermeable (morrena) requirió especial manejo para evitar saturación, especialmente en temporada de lluvias. Todo el proceso se desarrolló bajo un Plan de Control de Calidad aprobado por QA y supervisado por la residencia de obra, incorporando también medidas de seguridad. Finalmente, se documentaron los procedimientos, registros, protocolos, planos as built y el cumplimiento de especificaciones, consolidándose en un Dossier de Control de Calidad aprobado por la empresa minera El Brocal.

Borja (2017) en su investigación titulada "*Estudio Integral de una presa de relaves cimentada sobre arcilla blanda*" el autor realizó un estudio con el propósito de evaluar la estabilidad física de la presa de relaves en su configuración y en su futura etapa de crecimiento, considerando que se encuentra cimentada sobre suelos blandos saturados y ubicada en una zona de alta sismicidad. Para ello, se llevó a cabo una recopilación exhaustiva de información proveniente de estudios geotécnicos previos, incluyendo investigaciones de campo y ensayos de laboratorio. A partir de esta revisión, se actualizaron los parámetros geotécnicos de los materiales que conforman la presa, complementando la información existente con nuevos ensayos y exploraciones desarrollados específicamente para el presente estudio. Las investigaciones geotécnicas incluyeron la ejecución y supervisión de calicatas, perforaciones diamantinas, pruebas de muestreo, ensayos de piezocono sísmico y estudios geofísicos. En laboratorio, se realizaron ensayos estándares y pruebas especiales para caracterizar el comportamiento mecánico e hidráulico de los materiales. Con estos datos se efectuaron los análisis geotécnicos correspondientes: infiltración, consolidación unidimensional, respuesta sísmica, estabilidad de taludes y desplazamientos permanentes inducidos por sismo, tanto para la etapa actual como para el escenario de crecimiento de la presa. Los resultados indican que la configuración actual de la presa de relaves presenta condiciones adecuadas de estabilidad física. No obstante, para su etapa de crecimiento se requieren medidas de estabilización adicionales, a fin de garantizar su seguridad durante la construcción y su desempeño a largo plazo.

Solis (2019) en su investigación titulada "*Análisis de suelos para determinar la estabilidad de talud en el servicio de almacenamiento de relaves de la Presa Huachucaja – El Brocal*" el autor realizó la investigación de la presa de relaves Huachuacaja – El Brocal, tuvo como objetivo evaluar y garantizar la estabilidad de la presa de relaves mediante el uso del software Slide y otras herramientas especializadas de análisis geotécnico, con el fin de determinar los factores de seguridad conforme a la normativa peruana. La metodología propuesta considera el reforzamiento del suelo de relave mediante geoceldas o geomallas, acompañado de un proceso adecuado de compactación, con el propósito de asegurar la estabilidad de los taludes. Es importante destacar que la presa debe soportar relaves mineros, los cuales corresponden a residuos del proceso de concentración de minerales. Estos relaves están compuestos por una mezcla de rocas finamente molidas, agua, minerales de ganga y, en menor proporción, metales pesados como cobre, plomo, mercurio y metaloides como el arsénico. Debido a que los relaves contienen elementos químicos que pueden afectar el medio ambiente, su manejo requiere ser transportado y almacenado en depósitos o presas de relaves, donde los sólidos se sedimentan gradualmente, mientras que el agua es recuperada o se evapora. Este proceso forma depósitos estratificados de materiales finos, por lo que el manejo adecuado de relaves es fundamental para recuperar agua, evitar filtraciones y proteger los suelos y acuíferos subterráneos. Se estima que, por cada tonelada de concentrado producido, se generan aproximadamente 30 toneladas de relave.

Salazar (2018) en su investigación titulada "*Estabilidad Física de la Presa de Relaves para el Nivel de Crecimiento Hasta la Cota 4,320 m.s.n.m. Utilizando Relave Cicloneado*" el autor realizó una investigación con el propósito de determinar cómo influye la construcción de diques de presa con relave cicloneado en la estabilidad física de la presa de relaves entre las cotas 4,316 y 4,320 m s.n.m.; para ello, se planteó como objetivo general evaluar dicha influencia, formulando la hipótesis de que el uso de relave cicloneado en la construcción del dique contribuye positivamente a la estabilidad física de la estructura en su etapa de crecimiento. El estudio se desarrolló bajo el método científico, es de tipo aplicada, con un nivel explicativo-descriptivo y un diseño cuasi-experimental. La población considerada está conformada por diversas compañías mineras que emplean tratamientos similares de relaves, seleccionándose mediante

muestreo intencionado al dique de la presa de relaves del Consorcio de Ingenieros Ejecutores Mineros S.A. como caso representativo. Los resultados permiten concluir que la construcción de diques con relave cicloneado mejora las condiciones de estabilidad física de la presa de relaves en el tramo evaluado, confirmando la hipótesis planteada.

2.1.3 Antecedentes locales

Alave (2024) en su investigación titulada "*Competencias desarrolladas en el Área de Operaciones del proyecto «Servicio de movimiento de tierras para la operación de la presa de relaves para la minera Quellaveco - Moquegua*" el autor evidencia las competencias técnicas aplicadas en el proyecto de construcción de la presa de relaves, desarrollado en el Área de Operaciones, donde se implementó la metodología Lean Construcción para optimizar las actividades de movimiento de tierras. Se detalla la ejecución del recrecimiento de la presa de relaves desde la etapa 1 hasta la etapa 8, empleando material de relleno tipo 1A, demostrando el cumplimiento de los estándares geotécnicos establecidos. Para ello, se aplicaron rigurosos controles durante el proceso constructivo, tales como ensayos de granulometría, determinación de humedad óptima, verificación de segregación de materiales, control de compactación y supervisión del material proveniente de cantera. En la gestión de la producción, se evaluó el cumplimiento de rendimientos teóricos y reales para una adecuada asignación de recursos por frente de trabajo, conforme al volumen diario estipulado en el plan semanal, cuyos resultados se reflejaron en altos valores del PPC (Porcentaje de Plan Cumplido). Adicionalmente, se aplicaron indicadores de desempeño para la gestión de equipos, analizando disponibilidades físicas y mecánicas, horas de uso y niveles de aprovechamiento. Esta evaluación permitió detectar recursos subutilizados y aplicar acciones correctivas oportunas, como la rotación de maquinaria, optimizando las horas mínimas operativas y asegurando reportes de valorización precisos para el área de Oficina Técnica.

Huayhua (2019) en su investigación titulada "*Implementación del plan de respuesta a emergencias en la construcción de presa de relaves – Consorcio JJC – Besalco S.A.C. - CIA*" realizó una evaluación de la construcción de la presa de relaves

de Quellaveco, ubicada en la quebrada Cortadera del distrito de Torata (provincia Mariscal Nieto, Moquegua), entre los 3 100 y 4 300 m s. n. m. y a unos 40 km al noreste de la ciudad de Moquegua, cuenta con un Plan de Respuesta a Emergencias elaborado conforme al capítulo XVII del D.S. N.° 024-2016-EM. Las responsabilidades del personal y del Comité de Emergencias antes, durante y después de un evento crítico, y la identificación de actividades de alto riesgo como control de energías peligrosas. El trabajo de investigación detalla los niveles de emergencia, flujogramas de comunicación, y recursos técnicos de protección, como estaciones de rescate. En síntesis, el plan proporciona lineamientos técnicos y operativos para actuar de manera oportuna y eficaz ante posibles emergencias durante la construcción de la presa de relaves en base de los posibles problemas durante la construcción en condiciones estáticas o sísmicas.

2.2 Bases teóricas

La estabilidad de presas de relaves constituye uno de los aspectos más críticos en la gestión integral de los depósitos mineros, debido al riesgo potencial que representan ante condiciones estáticas y dinámicas. En el contexto de la minería superficial, la creciente altura de las estructuras de contención y la complejidad geotécnica de los materiales empleados exigen un análisis riguroso que garantice su comportamiento seguro durante la operación y post-cierre.

Las bases teóricas que sustentan esta investigación se enfocan en los principios de la mecánica de suelos y de rocas, la teoría de esfuerzos y deformaciones, y los criterios de falla aplicables a materiales geotécnicos, los cuales permiten comprender el comportamiento de los relaves y de los materiales de fundación frente a solicitaciones estáticas y sísmicas. Asimismo, se abordan los fundamentos de la modelación numérica mediante el método de los elementos finitos (FEM), técnica implementada en el software Phase2, que posibilita la simulación detallada del estado tensional y la evaluación de los factores de seguridad ante distintas condiciones de carga.

De igual modo, se incluyen los conceptos relativos a la sismicidad regional, la respuesta dinámica del terreno y las metodologías de análisis pseudoestático y

dinámico aplicadas a presas de relaves. Estas bases teóricas proporcionan el marco conceptual necesario para el desarrollo del modelamiento geotécnico y la optimización del diseño, orientado a garantizar la estabilidad estructural y ambiental de la presa, en concordancia con los estándares técnicos y normativos vigentes.

2.2.1 Parámetros Sísmicos Fundamentales

De acuerdo con Fardin (2024) la conceptualización es esencial para su evaluación y se presenta de forma simplificada, destacando únicamente los parámetros relevantes para la ingeniería. El resultado de la ruptura tectónica y el movimiento en la litosfera es la generación de vibraciones sísmicas que se propagan en todas direcciones en forma de onda, las cuales pueden ser registradas por instrumentos específicos llamados sismógrafos o acelerómetros. Según datos presentados por Castilho (2017), las vibraciones en el suelo también pueden ser inducidas por otros fenómenos con diferentes aceleraciones y frecuencias, como detonaciones, el movimiento gravitacional de masas y el tráfico de maquinaria pesada. El punto en la corteza terrestre donde comienza la liberación de estas tensiones acumuladas se denomina hipocentro, y su proyección sobre la superficie es el epicentro. La distancia entre el epicentro y el hipocentro es la profundidad focal. Por lo tanto, cuanto más cerca del epicentro se encuentre un lugar determinado, mayores serán los efectos del terremoto debido a la mayor energía de las ondas (Assumpção; Dias Neto, 2001).

Según Loayza (2009) en cuanto a los tipos de propagación de ondas, las ondas longitudinales, u ondas P, son aquellas cuyas vibraciones son paralelas a la dirección de propagación, es decir, se propagan mediante movimientos sucesivos de dilatación y contracción. Las ondas que vibran perpendicularmente a la dirección de propagación y presentan deformaciones tangenciales se denominan ondas transversales, u ondas S.

De acuerdo con Assumpção y Dias Neto (2001) las ondas Rayleigh son combinaciones de vibraciones P y S, mientras que las ondas Love se caracterizan por la superposición de ondas S con vibraciones horizontales en las capas más superficiales de la corteza terrestre (. Respecto a la magnitud de un terremoto, la intensidad y la magnitud merecen especial atención. Por otro lado, para cuantificar los movimientos

sísmicos, es necesario considerar los parámetros de amplitud (aceleración, velocidad y desplazamiento) y los parámetros de contenido, como la frecuencia y la duración.

E acuerdo con Kramer (1996) la intensidad de un terremoto es una descripción cualitativa de sus efectos en una ubicación determinada, como las observaciones de los daños causados o la reacción humana ante el evento. Esta magnitud subjetiva puede ser útil para evaluar registros antes del desarrollo del equipo necesario para realizar estas mediciones, lo que permite comparar los niveles de temblor y sus tasas de recurrencia. La intensidad se clasifica comúnmente mediante las escalas de Rossi-Forel (RF), Mercalli Modificada (MMI), la Agencia Meteorológica de Japón (JMA) o Medvedev-Spoonheuer-Karnik (MSK). Estas clasificaciones se obtienen a través de entrevistas con observadores presentes en las zonas afectadas. La capacitación previa es útil en regiones con alta recurrencia de eventos para minimizar la subjetividad.

2.2.2 Enfoque Sísmico en Proyectos

El enfoque sísmico en proyectos de ingeniería civil y minera constituye un componente esencial del diseño geotécnico moderno, especialmente en regiones con alta actividad tectónica como el territorio peruano. La consideración adecuada de los efectos sísmicos permite evaluar el desempeño estructural y funcional de las obras ante eventos dinámicos, garantizando su seguridad, resiliencia y continuidad operativa.

En el ámbito de las presas de relaves, taludes y otras estructuras de contención, el análisis sísmico adquiere relevancia particular debido a la naturaleza no lineal y heterogénea de los materiales involucrados, así como a la posible amplificación de las ondas sísmicas en suelos saturados o parcialmente consolidados. Este enfoque implica la integración de parámetros sísmicos representativos —como aceleraciones máximas del terreno, espectros de respuesta y mecanismos de licuefacción— dentro de los modelos de estabilidad y deformación.

El uso de herramientas numéricas, como el método de los elementos finitos (FEM) implementado en Phase2, permite simular de manera más realista la respuesta del macizo geotécnico ante cargas dinámicas. De esta manera, se optimiza el diseño y se reducen los riesgos de falla estructural, contribuyendo a la sostenibilidad y seguridad de los proyectos mineros y de infraestructura.

Kramer (1996) demuestra en la Figura 25 cómo una longitud de onda larga asociada a una baja frecuencia puede provocar que el suelo sobre la superficie de ruptura se mueva en fase. Por el contrario, una longitud de onda corta con alta frecuencia puede provocar movimientos de regiones del suelo en direcciones opuestas.

Según Jibson (2011) se desarrollaron diversos métodos para evaluar la estabilidad de taludes durante terremotos. El análisis pseudoestático fue el primer método; consistía simplemente en añadir una fuerza volumétrica permanente que representaba la sacudida sísmica a un análisis estático de equilibrio límite. El análisis de tensiones y deformaciones, un desarrollo posterior, implicaba un modelado mucho más complejo de los taludes mediante una malla en la que las tensiones y deformaciones internas dentro de los elementos se calculaban en función de las cargas externas aplicadas, incluidas la gravedad y las cargas sísmicas. El análisis de tensiones y deformaciones proporcionaba el modelo más realista del comportamiento de los taludes, pero es muy complejo y requiere una gran cantidad de datos de alta calidad sobre las propiedades del suelo, así como un modelo preciso de su comportamiento.

En 1965, Newmark desarrolló un método que salva la brecha entre estos dos tipos de análisis. Su modelo de bloque deslizante es fácil de aplicar y proporciona un índice útil del comportamiento co-sísmico del talud. Las modificaciones posteriores al análisis de bloque deslizante lo han hecho aplicable a una gama más amplia de tipos de deslizamientos. El análisis de bloque deslizante ofrece quizás la mayor utilidad de todos los tipos de análisis. Es mucho más fácil de aplicar que el análisis de tensión-deformación, y proporciona información mucho más útil que el análisis Pseudoestático (Jibson, 2011).

2.2.3 Criterio de Hoek & Brown

La representar el comportamiento no lineal de macizos rocosos fracturados, permitiendo incorporar la calidad geotécnica del macizo mediante el Índice Geológico de Resistencia (GSI), así como la influencia de la interconexión de discontinuidades y el grado de alteración. Este criterio describe la resistencia última del macizo mediante una envolvente no lineal que depende de parámetros empíricos calibrados para roca intacta y para el macizo fracturado, considerando que la resistencia varía en función

del confinamiento aplicado. Su empleo resulta adecuado para modelaciones numéricas avanzadas, dado que refleja de manera más realista la transición entre condiciones de baja y alta presión confinante, a diferencia del criterio lineal de Mohr–Coulomb. Hoek & Brown (1980, 1997) establecen que el criterio puede expresarse mediante la Ecuación 1, generalizada:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s\right)^a \quad (1)$$

donde m_b, s y a dependen del GSI y del factor de disturbación del macizo, permitiendo ajustar el comportamiento mecánico a condiciones reales de campo.

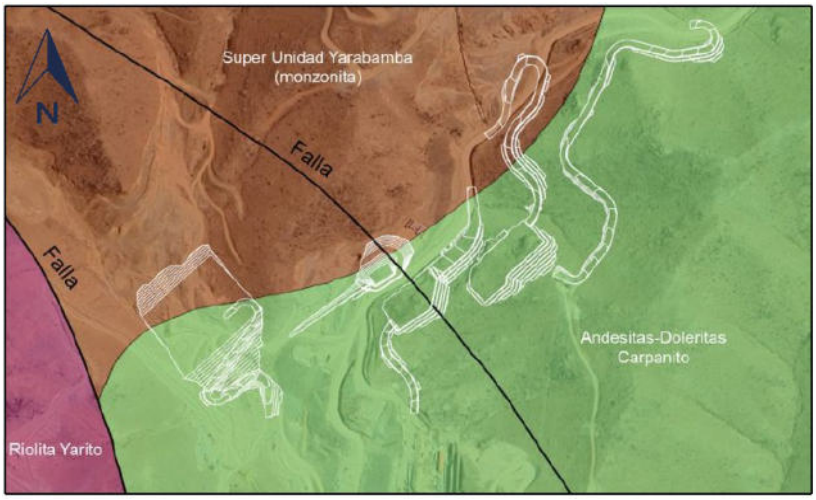
2.2.4 Geología

Geología Regional

A escala regional, el área de estudio se encuentra sobre unidades litológicas pertenecientes al Grupo Toquepala, dentro del cual destaca la Formación Quellaveco, constituida por una secuencia de rocas volcánicas de composición andesítica y riolítica. Estas unidades afloran ampliamente en la zona y representan una importante porción del basamento volcánico del sur peruano (Figura 01). A continuación, se describen sus principales unidades litoestratigráficas.

Figura 01

Geología Ingemmet 50000



Nota: Geocatmin

Formación Quellaveco

La Formación Quellaveco está integrada por diferentes unidades volcánicas que incluyen andesitas, riolitas y tobas asociadas, dispuestas en miembros estratigráficos bien diferenciados. Las unidades relevantes para el proyecto son las siguientes:

Andesitas Carpanito (Ksp-ca-do)

Este miembro está compuesto por lavas andesíticas coherentes, de color gris oscuro, textura afanítica y con estratificación visible. Afloran principalmente en los valles del río Capillune y en la parte superior de las quebradas Yarito y Cortadera. Desde un punto de vista geomorfológico, estas rocas conforman parte de las unidades Montañosas y de Escarpas de Ladera, mostrando un comportamiento geotécnicamente estable debido a su naturaleza maciza y competente.

Riolita Samanape (Ksp-sa-an y Ksp-sa-tb)

Antes conocida como “Serie Alta”, esta unidad se expone ampliamente en los alrededores del tajo del Proyecto Quellaveco y se subdivide en dos miembros:

Miembro Inferior (Ksp-sa-an)

Compuesto por derrames lávicos y depósitos piroclásticos del inicio del Terciario. Sus lavas son coherentes, de composición andesítica, color gris a gris oscuro, textura porfirítica y estratificación marcada. Se encuentran expuestas en la margen izquierda del río Asana y conforman las estribaciones del cerro Condorani. En la quebrada Cortadera se observa la presencia conjunta de estas andesitas en la parte superior y de tobas riolíticas hacia los bordes de la quebrada Yarito, donde también se registran pequeños depósitos de desmonte.

Miembro Superior (Ksp-sa-tb)

Constituido por tobas lapillíticas de color blanco a crema, fuertemente estratificadas. Presentan bloques irregulares y redondeados por erosión, cubiertos por

suelos sueltos, ichu y vegetación dispersa. Mineralógicamente están formadas por fragmentos líticos y pómez en una matriz tobácea intensamente alterada.

Afloran en las laderas de Pampa Caracoles, en la zona este del cerro Condorani y a lo largo del sector este de la carretera a Quellaveco. Este miembro sobreyace de manera discordante al miembro inferior y subyace a la Formación Huaylillas.

Riolita Yarito (Ksp-ya-ri)

Unidad compuesta por lavas riolíticas de color gris violáceo, textura fina, silicificadas, parcialmente afaníticas y de alta resistencia mecánica. Afloran extensamente al suroeste del futuro tajo Quellaveco, cubriendo aproximadamente el 60% del acceso a Pampa Tolar y la quebrada Cortadera.

Al sur de la confluencia entre las quebradas Cortadera y Yarito, su presencia es regional, intruyendo secuencias volcánicas de la Formación Paralaque y las riolitas Samanape. Presenta un contacto fallado (Falla Micalaco) con los intrusivos de la Súper Unidad Yarabamba.

Riolita Tinajones (Ksp-ti-ri)

Conformada por una secuencia de lavas riolíticas coherentes de color blanco crema, estratificadas, fracturadas y con textura porfirítica con cristales de cuarzo en matriz afanítica. Sus afloramientos se encuentran en el río Charaque, que delimita el área del futuro tajo y del depósito de desmonte del Proyecto Quellaveco.

Geología Local

En el área específica de emplazamiento del proyecto, las rocas observadas corresponden principalmente a las Andesitas Carpanito, pertenecientes a la Formación Quellaveco. Estas rocas volcánicas presentan una matriz afanítica de tonalidad gris verdosa y una resistencia a la compresión simple que varía entre 50 MPa y 150 MPa, evidenciando un comportamiento mecánico competente. El grado de meteorización

registrado oscila entre moderado y alto, lo cual influye en la disminución de la calidad del macizo rocoso en zonas puntuales.

Geología Estructural

Durante el reconocimiento superficial del área de estudio no se identificaron fallas activas en las zonas proyectadas para la Torre de Captación N.° 6. Sin embargo, de acuerdo con la cartografía regional (Hoja 35-U – INGEMMET), se reconocen fallas de orientación predominante NW–SE, las cuales han generado sistemas de diaclasamiento en el macizo rocoso. Estas discontinuidades fueron medidas y caracterizadas mediante estaciones geomecánicas y trabajo de campo, permitiendo evaluar su influencia en la estabilidad estructural del terreno.

Geodinámica Externa

En la zona se identificaron procesos de geodinámica activa, entre los que destacan:

- Derrumbes activos: Asociados principalmente a zonas con elevado fracturamiento y meteorización, generando inestabilidad en taludes naturales.
- Desprendimiento de rocas: Ocurre en sectores con pendientes pronunciadas y alto grado de fracturamiento, favoreciendo la caída de bloques y la movilización de material.

Estos procesos representan factores condicionantes que deben ser considerados en los análisis de estabilidad y en la planificación del diseño geotécnico del proyecto.

2.3 Definición de términos

Con el propósito de facilitar la comprensión y correcta interpretación de los conceptos empleados en el desarrollo de la presente investigación, se incluye a continuación la definición de los principales términos técnicos y científicos relacionados con la estabilidad de presas de relaves y la modelación geotécnica.

Este apartado busca uniformizar el lenguaje técnico utilizado, evitando ambigüedades y garantizando la coherencia conceptual a lo largo del documento. Las

definiciones aquí presentadas se basan en fuentes especializadas, normas técnicas nacionales e internacionales, y literatura académica actualizada, que respaldan el marco teórico y metodológico del estudio.

De esta manera, se proporciona al lector una referencia clara sobre los significados específicos de los términos vinculados a la mecánica de suelos y rocas, la modelación numérica con elementos finitos, y los criterios de estabilidad estática y sísmica, asegurando una lectura precisa y consistente del trabajo de investigación.

2.3.1 Análisis pseudoestático

La primera documentación conocida sobre este método en la literatura técnica fue realizada por Terzhagi (1950). El análisis pseudoestático modela la sacudida sísmica como una fuerza volumétrica permanente que se suma al diagrama fuerza-volumen de un análisis estático de equilibrio límite convencional. Normalmente, solo se considera la componente horizontal del sismo.

2.3.2 Análisis de tensiones y deformaciones

En 1960, Ray Clough, de la Universidad de California, Berkeley, desarrolló y denominó el método de elementos finitos para el análisis de ingeniería este método se basó en métodos matemáticos desarrollados. El modelado por elementos finitos utiliza una malla para modelar un sistema deformable; la deformación en cada nodo de la malla se calcula en respuesta a una tensión aplicada. Este método pronto comenzó a aplicarse a taludes, en particular a presas de tierra, y proporcionó un análisis de deformación permanente (Clough, 1960).

2.3.3 Análisis de desplazamiento permanente

Newmark (1965) introdujo un método para evaluar el comportamiento de taludes durante terremotos que salva la brecha entre el análisis pseudoestático excesivamente simplista y el análisis de tensión-deformación excesivamente complejo. El método de Newmark modela un deslizamiento de tierra como un bloque rígido que se desliza sobre un plano inclinado; el bloque tiene una aceleración de fluencia o crítica conocida, la aceleración necesaria para vencer la resistencia basal e iniciar el deslizamiento.

2.3.4 Estudio de elementos finitos

Timchenko, A. y Briaud, J.-L. (2023) indican que la estabilidad de taludes se evalúa típicamente mediante análisis bidimensional de deformación plana. Sin embargo, muchos taludes presentan geometrías tridimensionales (3D). Diversos investigadores han estudiado la estabilidad de taludes, pero han encontrado que el factor de seguridad (FS) es similar al del caso de deformación plana. El método de elementos finitos (MEF) de taludes, considerando el ángulo de inclinación, el ángulo de vista en planta, el radio de curvatura y la altura del talud. No obstante, 220 casos, utilizando un modelo de suelo elástico-plástico perfecto junto con el método de reducción de la resistencia al corte del MEF, muestran que el campo de desplazamientos es muy diferente en las esquinas en comparación con la deformación plana, con diferencias que superan el 100%.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Tipo y nivel de investigación

La metodología de investigación de este estudio se centra en el análisis geotécnico de una presa de relaves, empleando un enfoque que combina la recopilación de datos, la modelación numérica y la evaluación de estabilidad. Para ello, se define el tipo de investigación y el nivel de investigación, los cuales guían el diseño del estudio, la recolección de información y el análisis de resultados. Estos elementos permiten estructurar el trabajo de manera sistemática, asegurando que los hallazgos sean válidos, aplicables y contribuyan a la optimización de la estabilidad estática y sísmica de la presa.

3.1.1 Tipo de Investigación

El tipo de investigación empleado en este estudio es aplicado, ya que se orienta a la resolución de un problema concreto relacionado con la estabilidad estática y sísmica de una presa de relaves en una mina superficial. Este enfoque permite aplicar conocimientos y técnicas de ingeniería geotécnica para optimizar la seguridad y el diseño de la presa, utilizando herramientas avanzadas de modelación numérica, análisis de factores de seguridad y evaluación sísmica. La investigación aplicada se justifica por la necesidad de generar resultados prácticos que contribuyan a la toma de decisiones en operaciones mineras reales y al cumplimiento de normativas de seguridad.

Este tipo de investigación se apoya en información de campo y laboratorio, incluyendo caracterización geotécnica, ensayos de laboratorio sobre propiedades mecánicas de los materiales para el empleo del criterio de Hoek & Brown, y monitoreo instrumental de la presa. La integración de estos datos permite diseñar y validar modelos de simulación que reproduzcan el comportamiento de la estructura bajo condiciones estáticas y sísmicas, y anticipar posibles escenarios de falla.

Además, la investigación aplicada se complementa con la revisión de antecedentes nacionales e internacionales, así como de normativas técnicas vigentes,

asegurando que las soluciones propuestas sean técnicamente viables, seguras y replicables en otras instalaciones de almacenamiento de relaves. Este enfoque permite que los resultados tengan una aplicación directa en la optimización de la estabilidad y la reducción de riesgos asociados a la operación de presas de relaves.

3.1.2 Nivel de Investigación

El nivel de investigación es explicativo-descriptivo, ya que se busca describir las condiciones actuales de la presa de relaves y explicar los factores que afectan su estabilidad física y sísmica. La parte descriptiva permite detallar la geometría de la presa, las características de los suelos y relaves, así como los parámetros obtenidos de los ensayos de laboratorio para el empleo del criterio de Hoek & Brown y del monitoreo instrumental. Esta descripción constituye la base para cualquier análisis de mejora del diseño y la predicción de comportamientos bajo condiciones extremas.

El componente explicativo se centra en determinar cómo influyen variables como la resistencia del suelo, la compactación de relaves, la presión de poros y la sismicidad local en la estabilidad de taludes y en la generación de desplazamientos permanentes. Este nivel de análisis permite identificar los mecanismos de falla potenciales, evaluar los factores de seguridad bajo diferentes escenarios y proponer medidas de mitigación.

Finalmente, el nivel explicativo-descriptivo se complementa con la modelación geotécnica mediante Phase², la cual permite simular tanto condiciones estáticas como sísmicas, evaluando el comportamiento integral de la presa. Este enfoque asegura que los resultados obtenidos no solo sean descriptivos, sino que también expliquen las causas de posibles inestabilidades, sirviendo de base para la toma de decisiones en la gestión de riesgo y planificación de obras de ingeniería en minería.

3.1.3 Diseño de investigación

El diseño de investigación establece la estructura y el procedimiento mediante el cual se desarrollará el estudio sobre la estabilidad de la presa de relaves. Este diseño permite organizar las etapas de recolección de datos, modelación geotécnica y análisis de resultados, asegurando que la investigación siga un enfoque sistemático y coherente

con los objetivos planteados. Se busca así minimizar errores y garantizar la validez de los hallazgos respecto a la mejora de la estabilidad estática y sísmica de la presa.

Se emplea un diseño cuasi-experimental, ya que se realizan análisis comparativos de la configuración actual de la presa y su configuración de crecimiento, utilizando modelación numérica en Phase^2 y herramientas geotécnicas complementarias. Este enfoque permite evaluar los efectos de distintos parámetros geotécnicos sobre la estabilidad de los taludes y predecir el comportamiento de la presa ante cargas sísmicas, sin intervenir directamente en la estructura existente, respetando la seguridad de la operación minera.

Asimismo, el diseño incorpora un análisis integral de datos provenientes de estudios de campo, laboratorio para el empleo del criterio de Hoek & Brown y literatura técnica especializada. La combinación de métodos cuantitativos y cualitativos facilita la interpretación de resultados, la identificación de factores críticos de riesgo y la propuesta de medidas de mitigación. De esta manera, el diseño de investigación asegura que las conclusiones sean aplicables a la mejora de la estabilidad de la presa, contribuyendo a la gestión segura y eficiente de los relaves mineros (Hernández y Mendoza, 2018).

3.2 Ámbito temporal y espacial

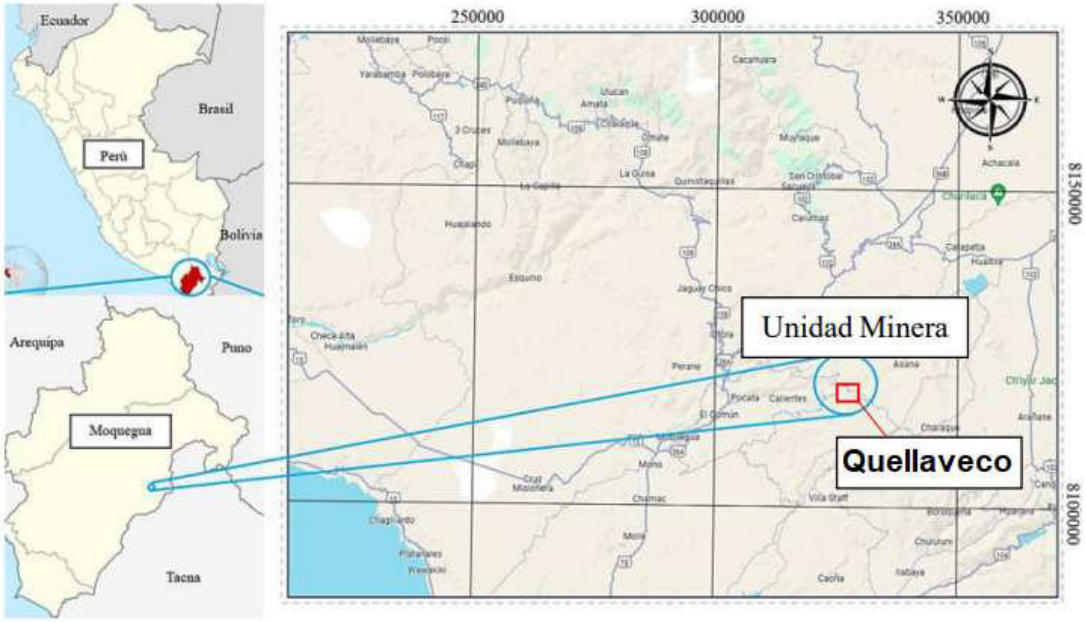
El desarrollo de la presente investigación se llevó a cabo durante el periodo comprendido del 2025, abarcando las etapas de recopilación de información geotécnica, procesamiento de datos, modelación numérica en el software PHASE^2 y análisis comparativo de los escenarios de estabilidad estática y sísmica de la presa de relaves. Este intervalo temporal incluye la revisión bibliográfica, la evaluación de parámetros geomecánicos, la construcción de los modelos, la calibración de estos y la interpretación de resultados necesarios para proponer las medidas de mejoramiento de la estabilidad.

El ámbito espacial de la investigación se centra en la Unidad Minera Quellaveco (Figura 02), ubicada en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua. Esta área fue seleccionada debido a la presencia de la presa de relaves

objeto de estudio, cuyo análisis de estabilidad estático y sísmico resulta crítico para garantizar la seguridad de la operación minera y la protección del entorno. La investigación abarca tanto la infraestructura existente de la presa como las zonas circundantes que podrían verse afectadas por su comportamiento geotécnico.

Figura 02

Mapa de Ubicación de la Unidad Minera Quellaveco



Nota: Elaboración propia en base a Google Maps, Sistema de coordenadas UTM.

Se consideran en el estudio las áreas operativas y zonas de almacenamiento de relaves, incluyendo los taludes aguas abajo y las secciones destinadas a futuros incrementos de altura. Esta delimitación permite recopilar información precisa sobre las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrológicas que afectan la estabilidad de la presa. Asimismo, se integran datos de campo, ensayos de laboratorio para el empleo del criterio de Hoek & Brown y registros históricos de operación de la mina para obtener un panorama completo de la interacción entre la estructura y su entorno.

Finalmente, el análisis geotécnico y sísmico se desarrolla dentro de este ámbito espacial con el objetivo de generar resultados aplicables directamente a la gestión de la presa de relaves en Quellaveco. Esto asegura que las recomendaciones y medidas de mitigación propuestas sean pertinentes, realistas y factibles, fortaleciendo la seguridad

de la operación minera y minimizando riesgos ambientales y sociales en la región de influencia.

3.3 Población y muestra

La definición clara de la población y la muestra de estudio permitirá enfocar el análisis en los elementos más críticos de la presa garantizando los resultados esperados.

3.3.1 Población

La población del estudio está constituida por el conjunto de componentes geotécnicos y estructurales que conforman la presa de relaves, específicamente el talud en la torre N°6 de la Unidad Minera Quellaveco.

3.3.2 Muestra

La muestra está constituida por los sectores críticos seleccionados de manera intencionada, donde la estabilidad es más vulnerable en el talud de la torre N°6, la Tabla 02 muestra las coordenadas del polígono de estudio por las estaciones geomecánicas determinadas, como el talud con pendiente pronunciada en la torre N°6. La selección se realiza considerando la influencia de cada elemento en la estabilidad del talud de la presa denominada Torre 6.

Tabla 02

Ubicación de los vértices de la muestra por estaciones geomecánicas

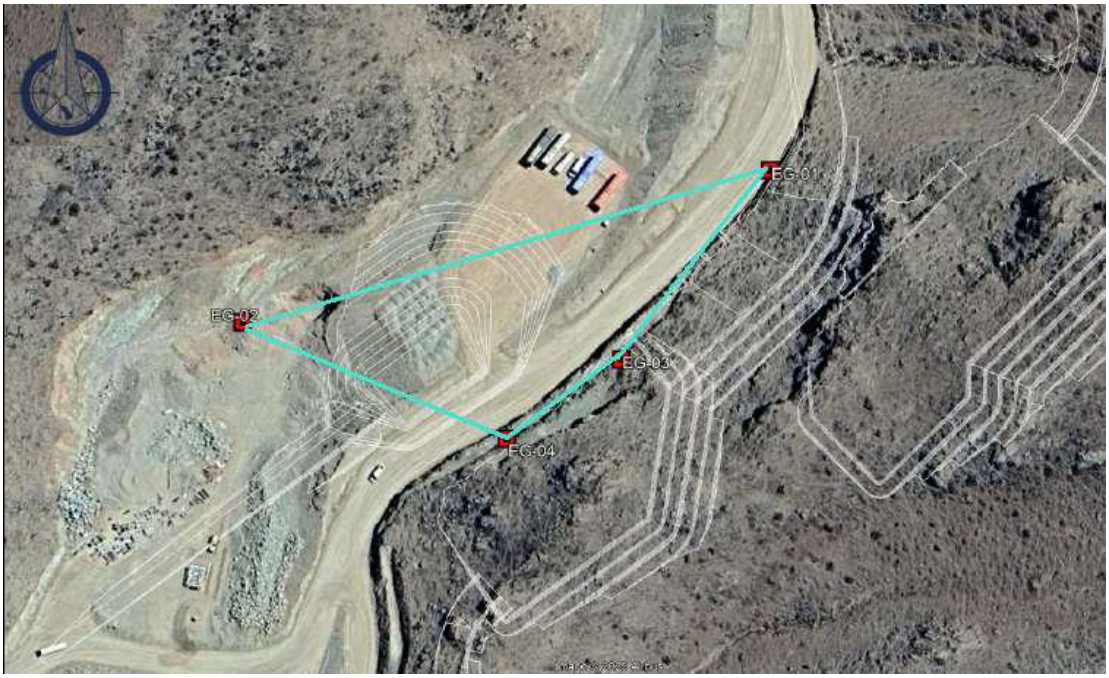
Estación Geomecánica	Coordenadas UTM	
	NORTE	ESTE
EG-01	8099091.75	319901.26
EG-02	8099052.97	319707.96
EG-03	8099043.30	319853.91
EG-04	8099016.61	319819.58

Nota: Sistema WGS-86, El mapeo geomecánico se ejecutó mediante la metodología de celdas de detalle en cuatro estaciones, cuyas ubicaciones y parámetros registrados

La Figura 03 muestra gráficamente las estructuras que se encuentran en la unidad minera y la ubicación satelital de las cuatro estaciones geomecánicas que forman el polígono de la muestra de este estudio.

Figura 03

Vista satelital del área de la muestra a estudiar



Nota: Obtenido de Google Earth Pro, 2025

3.4 Técnicas e instrumentos

Para la investigación sobre la mejora de la estabilidad estática y sísmica y evaluación sísmica de una presa de relaves mediante modelación geotécnica en Phase^2, es esencial contar con información precisa y confiable. La recolección de datos geotécnicos, geológicos, hidráulicos y sísmicos permite alimentar los modelos de análisis y obtener resultados representativos para la estabilidad de la presa. Para este propósito, se emplean técnicas e instrumentos tanto de campo como de laboratorio, combinando métodos directos e indirectos de medición.

El registro de resultados se estructurará como un formato técnico que permitirá documentar de manera ordenada y trazable toda la información obtenida en las simulaciones estáticas y sísmicas desarrolladas en Phase^2 para la presa de relaves. Este formato incluirá los datos generales del modelo, los parámetros geotécnicos empleados, las condiciones de carga, las características de la malla y los valores obtenidos de factores de seguridad, deformaciones, esfuerzos y presiones de poros.

Contendrá la comparación con métodos analíticos y los criterios de validación utilizados, lo que permitirá verificar la coherencia y fiabilidad de los resultados.

3.4.1 Técnicas

Trabajo de campo, incluye inspección visual de los taludes a analizar revisión de la topografía, verificación del mapeo geológico y registro de condiciones actuales del área de estudio. Datos de investigación geotécnica se realizará para evaluar propiedades del macizo rocoso donde estará la presa de relaves.

En el desarrollo del registro de resultados se empleará información proveniente de la Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente, de los parámetros de peligrosidad sísmica proporcionados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y de las recomendaciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), las cuales establecen criterios técnicos para la evaluación de estabilidad, selección de parámetros sísmicos y análisis de desempeño de presas y diques.

Estos lineamientos sustituirán el uso de datos provenientes de pruebas geofísicas y permitirán definir de manera adecuada los coeficientes sísmicos, aceleraciones de diseño y escenarios de carga, garantizando que la modelación estática y sísmica en Phase^2 se sustente en valores normativos, oficiales y de reconocida autoridad internacional, asegurando así la coherencia, robustez y fiabilidad de los resultados obtenidos para la estabilidad de la presa de relaves.

3.4.2 Instrumentos

Instrumentos de laboratorio, se utilizan para ensayos para la obtención de propiedades físicas y mecánicas, los cuales determinan los parámetros necesarios para la modelación en Phase^2. Instrumentos de campo: Piezómetros, inclinómetros y estaciones meteorológicas permitirán medir niveles freáticos, deformaciones y variaciones de presión intersticial en tiempo real, fundamentales para el análisis de estabilidad sísmica, de acuerdo con la necesidad.

Software y modelación: La información obtenida se integra en programas especializados como Phase^2 y CAD para simular condiciones de carga estática, sísmica y sísmica, y prever posibles escenarios de falla. Siendo importante la base de datos de

operaciones mineras o producción de la cantera, de formar resumida se puede ver las técnicas e instrumento en la Tabla 03.

Tabla 03

Resumen de Técnicas y sus Instrumentos

Técnica	Instrumento
Observación directa	Ficha de campo, cámara, brújula geológica, cinta métrica
Levantamiento geotécnico	Instrumentos de caracterización
Ensayos de laboratorio	Prensa uniaxial, probetas de roca, balanza, instrumentos de medición
Modelado numérico (FEM)	Phase2
Revisión documental	Informes técnicos, planos topográficos
Entrevistas técnicas (opcional)	Guía de entrevista, grabadora o notas

Nota: Elaboración Propia

El uso de Phase^2 facilitó la construcción de un modelo geotécnico representativo de la presa de relaves, considerando parámetros geotécnicos como cohesión, ángulo de fricción interna, peso unitario, módulo de elasticidad y condiciones de presión de poros. El software permitió incorporar condiciones sísmicas mediante cargas pseudoestáticas, lo que hizo posible evaluar la respuesta del sistema ante eventos sísmicos y determinar los cambios en los factores de seguridad de la estructura.

Entre las principales funcionalidades del software utilizadas en la investigación se encuentran: la generación de la geometría del modelo de la presa de relaves, la definición de propiedades de los materiales, la discretización del dominio mediante mallas de elementos finitos, la aplicación de condiciones de frontera y cargas, así como la simulación de diferentes escenarios de estabilidad antes y después de las medidas de mejoramiento propuestas. De esta manera, el software Phase^2 constituyó un instrumento fundamental para la simulación, análisis y evaluación de la estabilidad geotécnica, permitiendo comparar distintos escenarios de diseño y proponer alternativas de mejoramiento que incrementen la seguridad de la presa frente a condiciones estáticas y sísmicas (la ficha técnica se puede ver en el Anexo 02).

3.5 Procedimiento

El procedimiento aplicado en la presente investigación se estructuró en etapas secuenciales que permitieron evaluar y mejorar la estabilidad estática y sísmica de la presa de relaves mediante modelación geotécnica. Las fases se concentraron en Recolección y revisión de información, ee recopiló la información geotécnica disponible del proyecto: estudios de suelos, ensayos de laboratorio, parámetros resistentes, características geométricas de la presa, niveles freáticos, condiciones hidrogeológicas y registros sísmicos representativos. Asimismo, se revisó normativa técnica y literatura especializada en estabilidad de presas de relaves.

También se realizó la Caracterización geotécnica, con la información obtenida se definieron los parámetros geomecánicos necesarios para la modelación: cohesión, ángulo de fricción, peso unitario, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y permeabilidad. Estos parámetros fueron clasificados y ajustados según su representatividad y confiabilidad. La Construcción del modelo numérico en PHASE^2 para la elaboración del modelo bidimensional de la presa, ingresando la geometría real del dique, los estratos del terreno, la disposición de los relaves y las condiciones de borde. Se definió la malla de elementos finitos, priorizando una adecuada discretización en zonas críticas.

La Definición de escenarios de análisis, ee establecieron dos escenarios principales como en Análisis estático, considerando únicamente las cargas gravitacionales y el estado tensional inicial y el Análisis pseudoestático, incorporando el coeficiente sísmico horizontal correspondiente a la zona sísmica del proyecto. La Calibración del modelo, el modelo fue calibrado mediante ajustes iterativos de parámetros, comparando resultados con comportamientos típicos de presas de relaves y recomendaciones técnicas especializadas, garantizando una representación realista de la respuesta del depósito.

La Evaluación de estabilidad, se obtuvieron los factores de seguridad mediante el método de reducción de esfuerzos (Strength Reduction Method), analizándose los mecanismos de falla predominantes y las deformaciones generadas en cada escenario. Además, el Diseño y análisis de medidas de mejoramiento, con base en los resultados,

se propusieron alternativas de mejora tales como incorporación de bermas, variación geométrica, optimización del drenaje o reforzamientos. Cada alternativa fue modelada nuevamente en PHASE2, evaluando su impacto en la estabilidad.

Finalmente, la Interpretación y comparación de resultados, se compararon los factores de seguridad antes y después de las mejoras propuestas, determinando la eficacia de cada medida y seleccionando la solución con mayor efecto positivo sobre la estabilidad. La Elaboración de conclusiones y recomendaciones, se sintetizaron los hallazgos y se emitieron recomendaciones técnicas basadas en la modelación numérica, orientadas a garantizar un diseño seguro y acorde con la normativa vigente.

3.5.1 Validación y confiabilidad de los instrumentos

La correcta adquisición de datos es esencial para garantizar la confiabilidad de los análisis geotécnicos en presas de relaves. La validación de los instrumentos de medición y ensayos de laboratorio asegura que los parámetros obtenidos reflejen las condiciones reales del terreno y los materiales, permitiendo que la modelación en Phase2 y los análisis de estabilidad sean precisos y consistentes. Además, la confiabilidad de los instrumentos minimiza errores sistemáticos y aleatorios, fortaleciendo la toma de decisiones en el diseño, operación y evaluación sísmica de la presa.

3.5.2 Validación de instrumentos de campo

La validación de los instrumentos que se utilizaron en el monitoreo geotécnico de la presa de relaves se llevó a cabo aplicando tanto métodos estadísticos paramétricos como no paramétricos, con el fin de asegurar la confiabilidad de los datos y su adecuada interpretación. En el caso de que los datos presenten una distribución normal y varianzas homogéneas, se aplicarán pruebas paramétricas como la prueba t, ANOVA y correlación de Pearson para evaluar la concordancia y precisión de las mediciones. Si los datos no cumplen con los supuestos de normalidad, se emplearán pruebas no paramétricas como Wilcoxon, Mann–Whitney, Kruskal–Wallis y correlación de Spearman, las cuales permitirán analizar la consistencia y tendencias de los registros sin depender de distribuciones específicas. De esta manera, se garantizará la validez estadística de los resultados obtenidos por los instrumentos de campo y laboratorio.

3.5.3 Validación de instrumentos de laboratorio

La confiabilidad de los instrumentos y de los datos obtenidos fue evaluada juntamente con la calibración y validación del modelo numérico en el software Phase^2, empleando procedimientos de retroanálisis (back-analysis) que compararán los valores observados con los simulados bajo condiciones estáticas y sísmicas. Los resultados de ambas aproximaciones estadísticas (paramétrica y no paramétrica) permitirán determinar el grado de correlación y el nivel de ajuste entre las mediciones y la respuesta modelada, utilizando métricas como el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación intraclase (ICC). Asimismo, se aplicarán simulaciones Monte Carlo para cuantificar la incertidumbre y obtener intervalos de confianza de los factores de seguridad, asegurando que el modelo final represente de manera fiable el comportamiento real de la presa de relaves.

3.5.4 Validación de los modelos Phase2

Validación de Entrada

Consistirá en confirmar que los parámetros ingresados al modelo son representativos del terreno real, como la comparación de los parámetros utilizados (c, φ, γ, E, ν, k) que serán obtenidos a partir del criterio de Hoek & Brown, de ser necesario un Back-analysis de taludes cercanos, y un rango recomendado en literatura (Hoek, Duncan & Wright, Bowles). Para validar que la aceleración de diseño provendrá de espectros de peligrosidad sísmica regional proporcionados por el IGP.

Validación Numérica

Esta validación se llevará a cabo verificando la consistencia y estabilidad del análisis mediante pruebas de sensibilidad y control de convergencia. En primera instancia, se evaluará el efecto del refinamiento de la malla ejecutando simulaciones con las opciones de la discretización comprobándose que las variaciones en el factor de seguridad no superen el 3–5%, asegurando así la independencia frente al tamaño de los elementos.

3.5.5 Confiabilidad de los datos

Se aplicaron métodos estadísticos para detectar valores atípicos y errores sistemáticos en series de datos continuos de instrumentos de campo. Los resultados se

integraron en un sistema de gestión de información geotécnica, permitiendo trazabilidad y verificación de la exactitud de los datos. La combinación de validación de campo y laboratorio asegura que los parámetros geotécnicos empleados en el análisis de estabilidad y simulación sísmica reflejen con alta confiabilidad las condiciones reales de la presa.

3.6 Análisis de datos

El análisis y la presentación de los datos obtenidos en estudios geotécnicos de presas de relaves es fundamental para interpretar correctamente la estabilidad estática y sísmica de la estructura. Los datos recopilados de campo, laboratorio y modelación numérica deben organizarse y procesarse mediante métodos cuantitativos y cualitativos, garantizando que los resultados sean claros, comprensibles y aplicables en la toma de decisiones para mejorar la seguridad de la presa. Asimismo, la correcta visualización de los datos permite identificar tendencias, anomalías y correlaciones relevantes para la evaluación sísmica.

3.6.1 Técnicas de presentación de datos

- Tablas y matrices de datos, se emplean para organizar los parámetros geotécnicos obtenidos de laboratorio (densidad, cohesión, ángulo de fricción, módulo de elasticidad) y de instrumentos de campo (piezómetros, inclinómetros, extensómetros).
- Gráficos y diagramas, se utilizan histogramas, diagramas de dispersión y curvas de consolidación para mostrar variaciones de parámetros y relaciones entre variables geotécnicas.
- Mapas temáticos y modelos 3D, se elaboran mapas de propiedades del suelo y zonas de mayor riesgo, complementados con modelos tridimensionales generados en software de modelación geotécnica como Phase2.

3.6.2 Técnicas de análisis de datos

- Estadística descriptiva, permite resumir los datos mediante medidas de tendencia central, dispersión y coeficientes de variación, identificando valores representativos y posibles anomalías.

- Análisis comparativo, se comparan los resultados obtenidos con normas nacionales, recomendaciones internacionales y antecedentes de presas similares.
- Análisis numérico, se utiliza la modelación geotécnica en Phase^2 para simular condiciones estáticas y sísmicas, evaluando factores de seguridad, desplazamientos y deformaciones permanentes.
- Análisis de sensibilidad, determina cómo las variaciones en los parámetros geotécnicos influyen en la estabilidad del talud, priorizando los factores críticos que requieren control.

3.6.3 Integración de datos y presentación final

- Los resultados se presentan de manera integrada, combinando datos de campo, laboratorio y modelación numérica en reportes, tablas resumen y visualizaciones gráficas.
- Se elaboran informes técnicos y gráficos explicativos que facilitan la comprensión de los escenarios de riesgo, apoyando la toma de decisiones para la mejora de la estabilidad y la planificación de medidas preventivas.
- Esta metodología asegura que la información sea precisa, confiable y útil tanto para la evaluación sísmica como para la gestión integral de la presa de relaves.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Introducción

El presente capítulo expone los resultados obtenidos tras la modelación geotécnica realizada en Rocscience Phase2 para evaluar la estabilidad estática y sísmica de la presa de relaves. Se presentan los parámetros utilizados, la configuración del modelo numérico y el comportamiento de la estructura bajo distintos escenarios de carga. La interpretación de los resultados se desarrolla a partir de la identificación de posibles mecanismos de falla, en concordancia con lo señalado en los antecedentes por Clarkson y Williams (2021), quienes destacan la importancia de comprender procesos como la inestabilidad de cimentaciones, filtraciones y efectos sísmicos en la seguridad de estas estructuras.

El análisis se contrasta con los estudios históricos de riesgo presentados por Halabi et al. (2022), que evidencian la mayor vulnerabilidad de presas construidas con el método aguas arriba. Finalmente, los resultados también se discuten considerando los aportes estadísticos de Luca et al. (2022), quienes relacionan variables como la altura de la presa y el volumen almacenado con la magnitud de los relaves liberados durante una falla. De esta manera, la modelación numérica se integra con la literatura especializada para fortalecer la interpretación técnica de la estabilidad de la presa analizada.

La información obtenida y procesada fue de la unidad minera que constituye uno de los cinco yacimientos cupríferos más importantes a nivel mundial. Se ubica en la región Moquegua y su desarrollo está a cargo de una compañía minera global y diversificada. El proyecto comprende diversas instalaciones de procesamiento que, además del tajo abierto y el chancador primario, incluyen la planta concentradora ubicada en la Quebrada Papujune y la presa de relaves situada en la quebrada Cortadera, aproximadamente a 8 km al sur de la planta.

En el Área 4000, denominada zona Cortadera, se emplaza el sistema de transporte de relaves encargado de conducir el material proveniente de la planta de

Papujune hacia la presa de arranques. Dicho sistema ha sido concebido bajo un esquema de “descarga cero”, a fin de permitir la reutilización del agua almacenada en la presa y su retorno continuo a la planta concentradora. Como parte del sistema de recuperación de agua de la laguna de clarificación, se construye la Torre N° 5, cuya función es captar el recurso hídrico y conducirlo, mediante un sistema de bombeo, hacia la Estación Intermedia.

Se proyecta la edificación de la Torre de Captación N.° 6, cuyo emplazamiento constituye el objeto de estudio de la presente tesis, desarrollado a nivel aplicativo esta investigación. Para este propósito, se ejecutaron investigaciones geomecánicas in situ, consistentes en cuatro estaciones geomecánicas, con la finalidad de caracterizar el comportamiento cinemático del macizo rocoso y definir los diseños de taludes requeridos para las plataformas de cimentación de las estructuras mencionadas.

4.2 Caracterización Geotécnica de Materiales y Condiciones de Fundación

La caracterización geotécnica constituye un componente fundamental para el desarrollo del análisis numérico de la estabilidad de la presa de relaves, ya que proporciona los parámetros físicos y mecánicos necesarios para representar con precisión el comportamiento del material en los modelos computacionales. En esta sección se describen detalladamente las propiedades del relave depositado, del material estructural de la presa y de la fundación, las cuales fueron obtenidas mediante ensayos de laboratorio y correlaciones geotécnicas basadas en normativas internacionales.

Asimismo, se analizan las condiciones de humedad, resistencia al corte, rigidez y deformabilidad, aspectos que influyen directamente en la respuesta del talud bajo cargas estáticas y sísmicas. Esta caracterización permite garantizar que los parámetros utilizados en Phase2 reflejen fielmente las condiciones reales del terreno y de la estructura, constituyendo la base sobre la cual se desarrolla el análisis de estabilidad presentado en las secciones posteriores.

4.2.1 Descripción general del material de relave

El material de relave utilizado en la construcción de la presa fue caracterizado mediante ensayos de laboratorio que determinaron su comportamiento resistente y

deformacional. El relave presenta una textura predominantemente fina, con fracciones arenosas y limosas que influyen en la cohesión aparente y en la rigidez del depósito. Su origen mineralógico reflejó una composición con partículas de cuarzo, feldespato y fragmentos de roca triturada producto del proceso minero. Esta conformación granulométrica condiciona significativamente la permeabilidad, resistencia al corte y respuesta dinámica del depósito, especialmente ante cargas sísmicas recurrentes en la región de Moquegua.

4.2.2 Revisión geológica para área de estudio

Para el desarrollo de los estudios geológicos y geotécnicos en el área correspondiente a la Torre de Captación N.°6, resultó esencial establecer de manera precisa las condiciones iniciales que caracterizan el entorno del proyecto. Entre los aspectos fundamentales se encuentra la definición de la geología local y las características físico–mecánicas del terreno en las zonas evaluadas.

Como primera etapa, se efectuó una revisión exhaustiva de la información bibliográfica disponible para la región, la cual incluyó fotografías aéreas y satelitales, el Boletín 15-A del Cuadrángulo de Moquegua (35-U) elaborado por INGEMMET, así como los informes geofísicos MQ22-350-RE-4320-GO1005 correspondientes a la Ingeniería de detalle de la Torre de Captación N.°5 y MQ22-350-RE-4320-GO1003 de la Ingeniería Básica del sistema de barcazas, entre otros documentos técnicos relevantes.

Una vez recopilada y analizada la información secundaria, se procedió a realizar un reconocimiento geológico directo en el área de estudio, lo que permitió identificar las unidades litológicas presentes, caracterizar su distribución espacial y determinar las estructuras geológicas predominantes, tales como fracturas, diaclasas, planos de estratificación y otros elementos que condicionan el comportamiento geotécnico del terreno.

4.2.3 Caracterización fisiográfica y geomorfológica del área de estudio

El área de estudio corresponde a la Unidad Geomorfológica Escarpa de Ladera, caracterizada por la presencia de macizos rocosos de origen volcánico e intrusivo. El relieve predominante es abrupto, con un paisaje semiárido, altamente disectado y con

pendientes pronunciadas que conforman flancos de escarpa bien definidos. Estas condiciones geomorfológicas reflejan un entorno estructuralmente complejo y susceptible a procesos erosivos y de inestabilidad local.

Las zonas propuestas para la instalación de la Torre de Captación N° 6 se ubican en el flanco derecho de la Quebrada Cortadera, donde se observan afloramientos rocosos de naturaleza volcánica, principalmente de composición andesítica. La quebrada se caracteriza por su marcada profundidad y angostura, además de presentar pendientes muy inclinadas que configuran un paisaje abrupto e irregular. El sector se desarrolla a elevaciones superiores a los 3 000 msnm, lo que contribuye a una morfología escarpada y distintiva del ámbito altoandino.

4.2.4 Clasificación geomecánica del área de estudio

Mapeo Geológico y Geomecánico

Con el propósito de caracterizar de manera integral las condiciones geológicas y geomecánicas del área de estudio, se llevó a cabo un mapeo geológico superficial detallado. Este trabajo incluyó la identificación de las unidades litológicas presentes, así como el reconocimiento de los rasgos geomorfológicos y estructurales que influyen directamente en el comportamiento del macizo rocoso. El levantamiento permitió delimitar las zonas con mayor fracturamiento, variaciones litológicas y evidencias de procesos geodinámicos activos, información fundamental para la posterior clasificación geomecánica.

El mapeo geomecánico de los taludes rocosos se desarrolló utilizando la metodología de celdas de detalle, la cual permite obtener una caracterización precisa del macizo rocoso. Este método consiste en registrar sistemáticamente las propiedades intrínsecas de la roca intacta, como la resistencia a la compresión simple y el índice de calidad de la roca (RQD), así como las características de las principales familias de discontinuidades. Para cada familia estructural se determinaron parámetros esenciales como el tipo de discontinuidad, orientación (rumbo y buzamiento referidos al norte geográfico), resistencia de las paredes, espaciamiento, persistencia, abertura, tipo de relleno, rugosidad y grado de alteración o meteorización (Figura 04).

Figura 04

Ubicación de las estaciones geomecánicas



Nota: El mapeo geomecánico se realizó mediante la metodología de celdas de detalle, evaluando propiedades del macizo rocoso y discontinuidades.

Mediante esta metodología se ejecutaron cuatro estaciones geomecánicas, cuya localización específica se presenta en la Tabla 02. La información obtenida permite evaluar la calidad del macizo rocoso, identificar los controles estructurales dominantes y establecer la base para la clasificación geomecánica y los análisis de estabilidad de taludes realizados en etapas posteriores, su orientación también es importante para ello, la Tabla 04 muestra el buzamiento y rumbo (Dip/Dipdirection).

Tabla 04

Orientación de las Estaciones Geomecánicas

Estación Geomecánica	Dip / Dip. Dir
EGT-I	60/120
EGT-II	70/320
EGT-III	70/150
EGT-IV	70/150

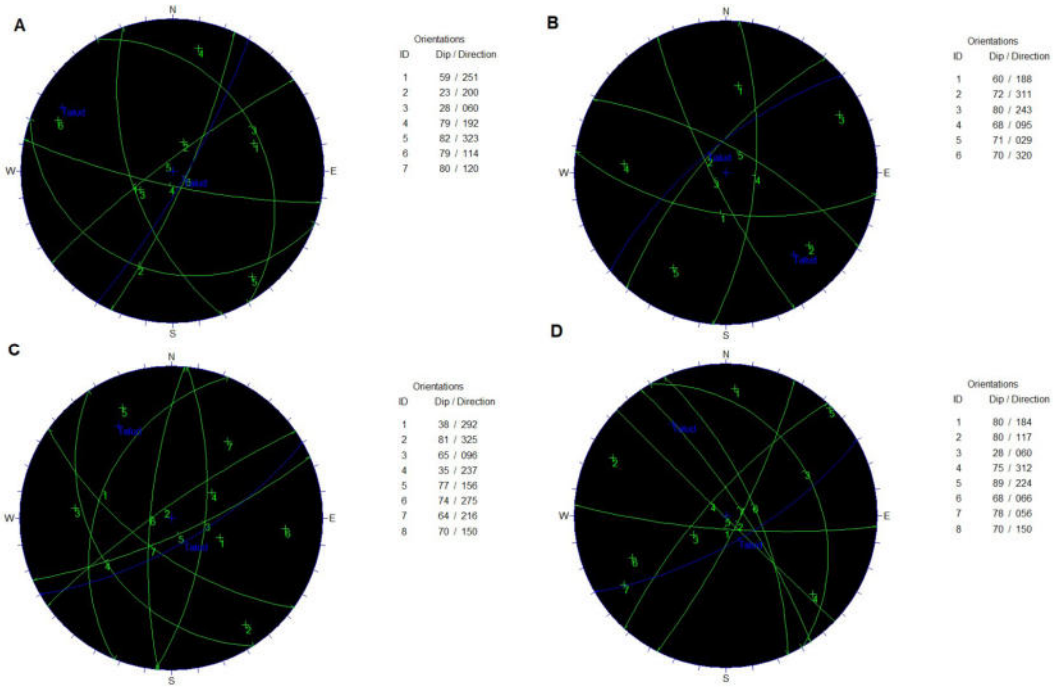
Nota: El mapeo geomecánico se ejecutó en cuatro estaciones, cuyas ubicaciones y parámetros registrados fueron designadas estratégicamente.

Análisis Estereográfico

Utilizando el software DIPs v.5.103 desarrollado por Rocscience, se efectuó el análisis estadístico de las discontinuidades del macizo rocoso registradas en cada estación geomecánica. Este análisis se realizó mediante la metodología de proyección estereográfica, lo que permitió determinar con precisión la orientación y el buzamiento de las principales familias de discontinuidades presentes en el área de estudio. Los resultados individuales del análisis estereográfico para cada estación se incluyen como en la Figura 05, que se ven con detalle en el Anexo 03.

Figura 05

Proyección estereográfica de las estaciones estudiadas



Nota: Representación de las familias de discontinuidades: A representa a la EGT-I, B representa a la EGT-II, C representa a la EGT-III y D a EGT-IV

Se elaboró un análisis estereográfico, integrando todas las discontinuidades medidas en el ámbito del área de estudio. Este análisis integrado permitió identificar las familias estructurales dominantes y su distribución espacial; sus resultados se presentan y describen en las figuras correspondientes (A, B, C y D).

El análisis cinemático desarrollado para taludes con buzamiento de 70° (equivalentes a inclinaciones 1H/3V) y 78° (1H/5V) evidenció una práctica ausencia

de mecanismos de falla planar (plane), así como una tendencia aproximada del 20% a fallas por cuña (wedge) y 18% a fallas por vuelco (toppling). Estos valores se consideran técnicamente aceptables, ya que se encuentran por debajo del umbral del 30% de probabilidad de falla recomendado en la literatura especializada, particularmente en las Guidelines for Open Pit Slope Design de Stacey & Read (2009).

Orientación y distribución de las discontinuidades

El análisis de la distribución estructural del macizo rocoso se llevó a cabo empleando el software DIPs v.5.103 de Rocscience, mediante el cual se procesó estadísticamente la información recopilada en cada estación geomecánica. Para ello, se utilizó la metodología de proyección estereográfica en red de Schmidt–Lambert, lo que permitió definir con precisión la orientación, buzamiento y dispersión angular de los principales sistemas de discontinuidades presentes en el área de estudio. Esta evaluación permitió identificar los conjuntos estructurales dominantes y caracterizar su comportamiento cinemático potencial.

En la Estación EGT-I, las discontinuidades muestran una primera familia con buzamiento pronunciado (59° hacia 251°), una segunda con buzamiento suave a moderado (23° hacia 200°), y una tercera con buzamiento moderado (26° hacia 60°), evidenciando una estructura relativamente dispersa y multifamiliar. La Estación EGT-II presenta un conjunto de discontinuidades más inclinadas, destacando buzamientos de 80° hacia 188° en la primera familia, 72° hacia 311° en la segunda, y 80° hacia 243° en la tercera, lo cual indica un macizo fuertemente fracturado con estructuras casi verticales.

En la Estación EGT-III, los datos registran variaciones significativas: la primera familia muestra un buzamiento moderado (38° hacia 292°), la segunda es casi vertical (81° hacia 325°), mientras que la tercera presenta un buzamiento alto (68° hacia 96°), configurando un macizo con tres familias dominantes bien definidas y orientadas de forma divergente. Finalmente, en la Estación EGT-IV, las discontinuidades presentan dos familias casi verticales (80° hacia 184° y 80° hacia 117°) y una tercera familia con buzamiento moderado (28° hacia 60°), reflejando un patrón estructural similar al de EGT-III, con marcadas inclinaciones y discontinuidades bien desarrolladas.

La Tabla 05 presenta el resumen consolidado de los rumbos y buzamientos correspondientes a las familias de discontinuidades identificadas en cada estación, constituyendo la base estructural para los análisis geotécnicos posteriores. En conjunto, la Tabla 04 evidencia un macizo rocoso caracterizado por múltiples familias estructurales, con presencia de discontinuidades de buzamiento alto a subvertical, lo cual tiene implicancias directas en la evaluación cinemática, estabilidad de taludes y clasificación geomecánica del área del proyecto.

Tabla 05

Resumen de los principales sistemas de discontinuidades identificados

Estación Geomecánica	Discontinuidad 1		Discontinuidad 2		Discontinuidad 3	
	Dip	Dip Dir.	Dip	Dip Dir.	Dip	Dip Dir.
	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)	(°)
EGT-I	59	251	23	200	26	60
EGT-II	80	188	72	311	80	243
EGT-III	38	292	81	325	68	96
EGT-IV	80	184	80	117	28	60

Nota: Elaboración propia

Evaluación del Estado de Fisuración y del Índice de Calidad de Roca

La evaluación del grado de fracturamiento del macizo rocoso se realizó en función del espaciamiento entre discontinuidades, siguiendo los criterios establecidos por la ISRM (1978), los cuales permiten clasificar el macizo según la densidad de fracturas presentes. Este parámetro es fundamental para determinar la calidad estructural del macizo, su grado de integridad y su influencia en la estabilidad de taludes y el comportamiento tensional de la roca.

La Tabla 06 presenta la relación entre el espaciamiento de discontinuidades y el grado de fracturamiento. De acuerdo con esta clasificación, macizos con espaciamientos superiores a 2,00 m son considerados masivos, mientras que espaciamientos entre 0,60 y 2,00 m corresponden a macizos poco fracturados. Valores comprendidos entre 0,20 y 0,60 m representan macizos fracturados, y aquellos entre 0,06 y 0,20 m se catalogan como muy fracturados. Finalmente, espaciamientos

menores a 0,06 m caracterizan macizos triturados, indicando un alto nivel de deformación y pérdida de cohesión estructural.

Tabla 06

Grado de fracturamiento de la roca

Espaciamiento entre fracturas (m)	Grado de Fracturamiento
> 2,00	Masivo
0,60 – 2,00	Poco fracturado
0,20 – 0,60	Fracturado
0,06 – 0,20	Muy fracturado
< 0,06	Triturado

Nota: Modificado de ISRM (1978)

La Tabla 07 presenta la caracterización del grado de fracturamiento del macizo rocoso en las cuatro estaciones geomecánicas evaluadas, a partir del espaciamiento medido entre discontinuidades, parámetro fundamental para determinar la calidad estructural de la roca según los criterios de la ISRM (1978). En las estaciones EGT-I y EGT-II, el espaciamiento entre fracturas se encuentra en el rango de 0,20 – 0,60 m, lo que clasifica al macizo como fracturado, indicando una densidad de discontinuidades moderada a alta, que puede influir en la reducción de la resistencia global y favorecer mecanismos de inestabilidad local en taludes.

Por otro lado, en las estaciones EGT-III y EGT-IV, los espaciamientos registrados varían entre 0,60 – 2,00 m, lo cual ubica al macizo dentro de la categoría de poco fracturado. Este intervalo refleja una menor densidad de discontinuidades y, por tanto, un macizo estructuralmente más competente, con mejor capacidad portante y menor susceptibilidad a fallas controladas por fracturas.

Tabla 07

Evaluación del Grado de Fisuración del Macizo Rocoso

Estación Geomecánica	Espaciamiento entre fracturas (m)	Grado de Fracturamiento
EGT-I	0,20 – 0,60	Fracturado
EGT-II	0,20 – 0,60	Fracturado
EGT-III	0,60 – 2,00	Poco fracturado
EGT-IV	0,60 – 2,00	Poco fracturado

Nota: Datos obtenidos en las Estaciones Geomecánicas

En función de los espaciamientos registrados en las cuatro estaciones geomecánicas, se concluye que los macizos rocosos presentes en el área del proyecto exhiben un estado estructural que varía entre “fracturado” y “poco fracturado”, evidenciando una heterogeneidad espacial en la densidad de discontinuidades. Este comportamiento estructural influye directamente en la calidad geomecánica del macizo, su resistencia y la posible movilización de bloques, constituyendo un insumo clave para los análisis de estabilidad.

Para complementar esta evaluación y cuantificar la calidad del macizo rocoso, se determinó el RQD (Rock Quality Designation) mediante la metodología propuesta por Palmström (2005). Este enfoque se basa en una correlación empírica entre el índice RQD y el JV (Joint Volumetric Count), entendido como el número total de discontinuidades por metro cúbico de roca. La relación utilizada es la Ecuación 01:

$$RQD = 110 - 2.5 \times JV \quad (01)$$

Donde:

JV = Número de discontinuidades por m^3 de macizo rocoso.

El método establece que RQD = 100% cuando JV ≤ 4 y RQD = 0% cuando JV > 44, reflejando límites superiores e inferiores de calidad del macizo.

Este procedimiento permite estimar de forma confiable el RQD en condiciones de afloramiento, especialmente útil cuando no se dispone de testigos de perforación. De esta manera, se calculó el JV específico para cada estación geomecánica, obteniéndose los valores que se presentan a continuación, los cuales constituyen la base para la posterior clasificación geomecánica del macizo rocoso (RMR, GSI o Q).

En la estación EGT-I, se obtuvo un JV de 19, equivalente a un RQD del 62%, lo que clasifica la calidad del macizo como Regular, reflejando un fracturamiento moderado. De manera similar, la estación EGT-II registró un JV de 26 y un RQD del 45%, también dentro de la categoría de Regular, indicando un macizo más fracturado y de menor integridad estructural en comparación con EGT-I.

Por otro lado, la estación EGT-III muestra un JV significativamente menor (12), que se traduce en un RQD del 80%, clasificando este sector como de Buena calidad geomecánica. Este resultado evidencia un macizo con menor densidad de discontinuidades y, por tanto, mayor competencia y continuidad estructural.

Finalmente, en EGT-IV, el JV registrado fue de 28, generando un RQD del 40%, valor correspondiente nuevamente a la categoría Regular, lo que indica un macizo con alta densidad de discontinuidades y con condiciones estructurales menos favorables frente a esfuerzos y procesos de inestabilidad.

Los resultados muestran que el área de la zona de estudio presenta una variabilidad estructural significativa, con predominancia de macizos de calidad regular, y únicamente un sector (EGT-III) con una calidad geomecánica considerada buena. Esta información es fundamental para definir los parámetros geotécnicos representativos y para sustentar los análisis de estabilidad de taludes y diseño del proyecto.

La Tabla 08 presenta la evaluación de la calidad del macizo rocoso mediante el cálculo del parámetro JV (Joint Volumetric Count) y su correlación con el RQD (%) utilizando la metodología de Palmström (2005). Estos índices permiten cuantificar la densidad volumétrica de discontinuidades y, en consecuencia, estimar la integridad estructural del macizo rocoso en cada una de las estaciones geomecánicas evaluadas.

Tabla 08

RQD obtenido en las Estaciones Geomecánicas

Estación Geomecánica	J_V	RQD (%)	Calidad
EGT-I	19	62	Regular
EGT-II	26	45	Regular
EGT-III	12	80	Buena
EGT-IV	28	40	Regular

Nota: RQD para el cálculo del RMR como se ve en el Anexo 04, obtenidos a partir de la Suma de las longitudes de todos los fragmentos de testigo de roca mayores a 10 cm recuperados en la perforación, entre la Longitud total del tramo perforado o del testigo considerado por 100.

Clasificación de la Masa Rocosa

Clasificación RMR_{89} y GSI

La caracterización geomecánica del macizo rocoso se desarrolló utilizando el sistema de clasificación RMR89 propuesto por Bieniawski (1989), el cual integra de manera sistemática los principales parámetros que controlan el comportamiento estructural y resistente de la roca. Para la determinación del RMR básico (RMR_{89}) se evaluaron los siguientes componentes:

- Resistencia a la compresión simple de la roca intacta,
- RQD (Rock Quality Designation),
- Espaciamiento entre discontinuidades,
- Condiciones geomecánicas de las discontinuidades (rugosidad, apertura, relleno, persistencia y alteración),
- Condiciones de agua subterránea.

Una vez obtenido el RMR básico, se aplicó, cuando correspondía, el factor de ajuste por orientación de las discontinuidades, con el fin de obtener el RMR ajustado, que representa de manera más realista el comportamiento geotécnico del macizo en función de su disposición estructural respecto a los taludes analizados. Paralelamente, se estimó el GSI (Geological Strength Index) utilizando la correlación empírica propuesta por Hoek, Kaiser y Bawden (1995), la cual establece que si $RMR_{89}>23$ se usa la Ecuación 01.

$$GSI=RMR_{89}-5 \quad (1)$$

Dado que el macizo rocoso evaluado corresponde a un entorno seco, se asignó la puntuación máxima de 15 puntos en el componente de agua del sistema RMR89. De igual modo, no se aplicaron correcciones por orientación de discontinuidades cuando esta condición no afectaba significativamente la estabilidad del talud. La Tabla 09 siguiente presenta un resumen consolidado con los valores obtenidos de RMR_{89} (básico y ajustado) y del GSI a partir del uso de la Ecuación 01, permitiendo comparar la calidad geomecánica del macizo en cada una de las estaciones estudiadas y establecer su influencia en los análisis de estabilidad posteriores.

Tabla 09

Clasificación geomecánica RMR y GSI

Estación geomecánica	RMR_{89}	GSI	Calidad del macizo rocoso según RMR
EGT-I	61	56	Buena
EGT-II	56	51	Buena
EGT-III	68	63	Buena
EGT-IV	61	56	Buena

Nota: Resumen los resultados obtenidos de las clasificaciones. Si RMR_{89}<23: no recomendado para estimar el GSI

Parámetros de Resistencia del Macizo Rocoso

La estimación de los parámetros resistentes del macizo rocoso se realizó a partir de los resultados obtenidos mediante el ensayo con esclerómetro o Martillo de Schmidt, cuyos valores se presentan en la Tabla 10. Este ensayo es ampliamente utilizado en operaciones mineras por su rapidez y eficiencia para evaluar la resistencia superficial de la roca intacta en frentes de explotación y labores subterráneas.

Tabla 10

Resultados de los Ensayos con el Martillo de Schmidt

Estación Geomecánica	Litología	UCS (MPa)	Clase ISRM (1981)	Descripción
EGT-IV	Andesitas	50	R4	Dura

Nota: Resistencia a la compresión simple de la roca intacta

A partir de estos datos y considerando el índice GSI determinado previamente, se procedió a la estimación de los parámetros de resistencia del macizo utilizando el criterio de Hoek–Brown. Para ello, se adoptó un valor de mi = 25 (Figura 06), correspondiente a rocas ígneas típicas de entornos mineros, y se seleccionó un factor de perturbación D = 0,70, representativo de un macizo afectado por una voladura controlada, tal como recomienda Hoek–Brown Failure Criterion (2022).

Figura 06

Valores para la constante mi

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates * Breccias *	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2 Greywackes (18 ± 3)	Claystones 4 ± 2 Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
		Organic				Chalk 7 ± 2
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites 20 ± 3	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6	Gneiss 28 ± 5	
	Foliated**			Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3 Diorite 25 ± 5 Granodiorite (29 ± 3)			
		Dark	Gabbro 27 ± 3 Norite 20 ± 5	Dolerite (16 ± 5)		
	Hypabyssal		Porphyries (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5) Andesite 25 ± 5	Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5)	
		Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

Nota: Valores de la constante mi, para la roca intacta, por grupo de roca.

La selección de un factor de perturbación D = 0,70 (Figura 07) responde a la necesidad de representar adecuadamente el nivel de alteración inducido en el macizo rocoso por las operaciones de perforación y voladura propias de un entorno minero.

Este valor refleja un macizo moderadamente perturbado, coherente con escenarios donde se ejecuta una voladura controlada de buena calidad, caracterizada por una adecuada distribución de cargas explosivas, tiempos de retardo optimizados y una mínima sobre–rotura en los contornos.

Figura 07

Factor de disturbancia “D”

	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Nota: Hoek-Brown (2012)

Según las directrices actualizadas del Hoek–Brown Failure Criterion (2022), un valor de D en este rango es representativo de macizos que, si bien conservan una parte significativa de su integridad estructural, presentan zonas localizadas de daño, microfracturamiento y relajación de esfuerzos alrededor del frente excavado. La adopción de este factor permite ajustar realísticamente los parámetros de resistencia del macizo para su uso en análisis numéricos y evaluaciones de diseño geotécnico.

La Tabla 14 presenta la estimación de los parámetros de resistencia del macizo rocoso obtenidos mediante la aplicación del criterio de falla Hoek–Brown (2022), integrando como datos de entrada el GSI, la resistencia a compresión simple de la roca intacta (UCS), el parámetro mi propio de rocas ígneas y el factor de perturbación del macizo (D). Para las cuatro estaciones geomecánicas evaluadas (EGT-I a EGT-IV), se adoptó una UCS de 50 MPa, un valor mi = 25 representativo de andesitas, y un factor de perturbación D = 0,70, correspondiente a un macizo moderadamente afectado por voladura controlada, como se detallan en la Tabla 11.

Tabla 11

Parámetros de clasificación del macizo rocoso (Input)

Parámetros de entrada				
Área	GSI	UCS (MPa)	mi	D
EGT-I	56	50	25	0,7
EGT-II	51	50	25	0,7
EGT-III	63	50	25	0,7
EGT-IV	56	50	25	0,7

Nota: Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 12 muestran una variación en los parámetros derivados del criterio Hoek–Brown: “mb”, que representa el parámetro reducido del macizo rocoso; “s”, asociado al nivel de fracturamiento y la calidad estructural del macizo; y “a”, que expresa la curvatura de la envolvente de falla. Se observa que las estaciones con valores de GSI más altos (como EGT-III con GSI = 63) presentan valores mayores de mb y s, lo que indica mejores condiciones geomecánicas y mayor competencia estructural. Por el contrario, estaciones con GSI menor (como EGT-II con GSI = 51) muestran valores reducidos de estos parámetros, reflejando un macizo más fracturado y con menor cohesión estructural. El parámetro “a” permanece relativamente constante en todas las estaciones, como es característico en macizos de calidad intermedia.

Tabla 12

Parámetros de clasificación del macizo rocoso (Output)

Parámetros de salida			
Área	mb	s	a
EGT-I	2.22842132	0.00170054	0.50377339
EGT-II	1.69311179	0.00082391	0.50535011
EGT-III	3.27366055	0.00469002	0.50228716
EGT-IV	2.22842132	0.00170054	0.50377339

Nota: Elaboracion propia

A partir de los parámetros obtenidos mediante el criterio Hoek–Brown y la caracterización geomecánica previamente desarrollada, se determinaron los parámetros efectivos de resistencia al corte del macizo rocoso para los taludes globales de mayor altura en las áreas evaluadas. Los valores equivalentes de cohesión (c) y ángulo de fricción (ϕ), calculados mediante la conversión a los parámetros de Mohr–Coulomb, se presentan en las Ecuaciones 02 y 03. Estos parámetros constituyen los insumos fundamentales para el análisis de estabilidad global de taludes.

$$\phi' = \sin^{-1}\left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}\right] \quad (2)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}\left[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}\right](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+\left(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}\right)/\left((1+a)(2+a)\right)}} \quad (3)$$

Donde: σ_3n=〖σ'〗_3max/σ_ci

La Tabla 13 presenta los parámetros de resistencia al corte del macizo rocoso, expresados en términos de cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ), obtenidos mediante la conversión del criterio Hoek–Brown al equivalente lineal de Mohr–Coulomb, para una altura de talud de 15 m en cada una de las áreas evaluadas (EGT-I a EGT-IV). Estos valores representan la respuesta promedio del macizo rocoso ante esfuerzos cortantes en condiciones de estado limite último y son empleados directamente en los análisis de estabilidad global de taludes.

Tabla 13

Valores de Cohesión y Ángulo de fricción interna del macizo rocoso

Área	Altura máxima del talud (m)	c (MPa)	Ø (°)
EGT-I	15	0.3020556	60.0478146
EGT-II	15	0.2492188	58.4135269
EGT-III	15	0.4171344	62.0053778
EGT-IV	15	0.3020556	60.0478146

Nota: Parámetros para ser utilizados en el análisis de estabilidad global

Los resultados muestran que la cohesión varía entre 0.249 MPa y 0.417 MPa, reflejando diferencias en la calidad geomecánica del macizo en cada estación. El valor más elevado registrado en EGT-III indica un macizo relativamente más competente y con mayor capacidad de transmitir esfuerzos, concordante con su mayor GSI y mejor condición estructural. De igual manera, el ángulo de fricción interna, cuyos valores se encuentran entre 58.41° y 62.00°, evidencia una marcada influencia del grado de interbloqueo y de la resistencia de las superficies de discontinuidad. Las estaciones con mejores condiciones estructurales (como EGT-III) presentan ángulos de fricción superiores, lo que sugiere un mayor aporte friccional al mecanismo resistente.

Propiedades de Elasticidad

Entre los parámetros más relevantes se encuentran el Módulo de Elasticidad o también llamado de Módulo de Young (E) caracteriza la rigidez del material al establecer la relación lineal elástica entre el esfuerzo axial aplicado y la deformación unitaria resultante en esa misma dirección. Por su parte, el coeficiente de Poisson (ν) describe la proporción entre la deformación lateral y la deformación axial asociada al estado tensional. Ambos parámetros, que pueden obtenerse mediante ensayos de compresión simple u otros ensayos mecánicos complementarios, permiten definir el comportamiento deformacional de la roca intacta (Figura 08)

A continuación, se muestra la presentan rangos típicos de estos valores para distintas litologías. De acuerdo con González de Vallejo (2002), las rocas duras y de comportamiento predominantemente frágil suelen presentar módulos de Young elevados y valores bajos de ν, mientras que rocas más blandas y de comportamiento dúctil exhiben menor rigidez y coeficientes de Poisson más altos.

La Figura 08 muestra que el módulo de elasticidad dinámico (Ed) suele ser mayor que el módulo estático, debido a que se determina mediante métodos geofísicos o ensayos dinámicos que implican deformaciones muy pequeñas, donde el material responde con mayor rigidez. Este parámetro es particularmente relevante en estudios de respuesta sísmica y propagación de ondas en el macizo rocoso.

Figura 08

Constantes Elásticas en Roca Intacta

Roca intacta	Módulo de elasticidad estático, E kg/cm^2 ($\times 10^4$)	Módulo de elasticidad dinámico, E_d kg/cm^2 ($\times 10^4$)	Coeficiente de Poisson, ν
Andesita	3,0-4,0		0,23-0,32
Anfibolita	1,3-9,2	4,6-10,5	
Anhidrita	0,15-7,6		
Arenisca	0,3-6,1	0,5-5,6	0,1-0,4 (0,24-0,31)
Basalto	3,2-10	4,1-8,7	0,19-0,38 (0,25)
Caliza	1,5-9,0 (2,9-6,0)	0,8-9,9	0,12-0,33 (0,25-0,30)
Cuarcita	2,2-10 (4,2-8,5)		0,08-0,24 (0,11-0,15)
Diabasa	6,9-9,6	6,0-9,8	0,28
Diorita	0,2-1,7	2,5-4,4	
Dolomía	0,4-5,1	2,2-8,6	0,29-0,34
Gabro	1-6,5		0,12-0,20
Gneiss	1,7-8,1 (5,3-5,5)	2,5-10,5	0,08-0,40 (0,20-0,30)
Esquisto	0,6-3,9 (2,0)		0,01-0,31 (0,12)
Granito	1,7-7,7	1,0-8,4	0,1-0,4 (0,18-0,24)
Grauvaca	4,7-6,3	2,3-10,7	
Limolita	5,3-7,5	0,7-6,5	0,25
Lutita	0,3-2,2	1,0-7,0	0,25-0,29
Marga	0,4-3,4	1,0-4,9	
Mármol	2,8-7,2		0,1-0,4 (0,23)
Micaesquisto	0,1-2,0		
Pizarra	0,5-3,0		
Sal	0,5-2,0		0,22
Toba	0,3-7,6		0,24-0,29
Yeso	1,5-3,6		

Nota: Obtenido de González de Vallejo et al., 2002

La Tabla 14 presenta los parámetros elásticos empleados para la modelación geotécnica del macizo rocoso en las diferentes áreas evaluadas (EGT-I a EGT-IV). El módulo de elasticidad (E) muestra una variabilidad significativa entre estaciones, con valores que oscilan entre 13,7 GPa y 28,6 GPa, reflejando diferencias en la rigidez del macizo asociadas a variaciones en la calidad estructural, grado de fracturamiento y condición litológica local. El valor más alto, correspondiente al área EGT-III, indica un macizo con mayor competencia y menor deformabilidad, consistente con sus mejores indicadores geomecánicos (mayor GSI y RQD). Por el contrario, el valor más bajo observado en EGT-II sugiere una roca con mayor susceptibilidad a deformaciones elásticas ante la aplicación de esfuerzos.

Tabla 14

Valores de Modulo de Elasticidad y Coeficiente de Poisson del macizo rocoso

Área	E (MPa)	ν
EGT-I	18,867,434	0,28
EGT-II	13,725,873	0,28
EGT-III	28,596,739	0,28
EGT-IV	18,867,434	0,28

Nota: Elaboración propia

En todos los casos, se adoptó un coeficiente de Poisson promedio $\nu = 0,28$, típico de rocas ígneas del tipo Andesita, el cual representa un comportamiento transversal moderado ante cargas uniaxiales. La uniformidad de este parámetro refleja que, pese a la variación en la rigidez, el macizo mantiene una respuesta deformacional lateral similar en las diferentes zonas analizadas.

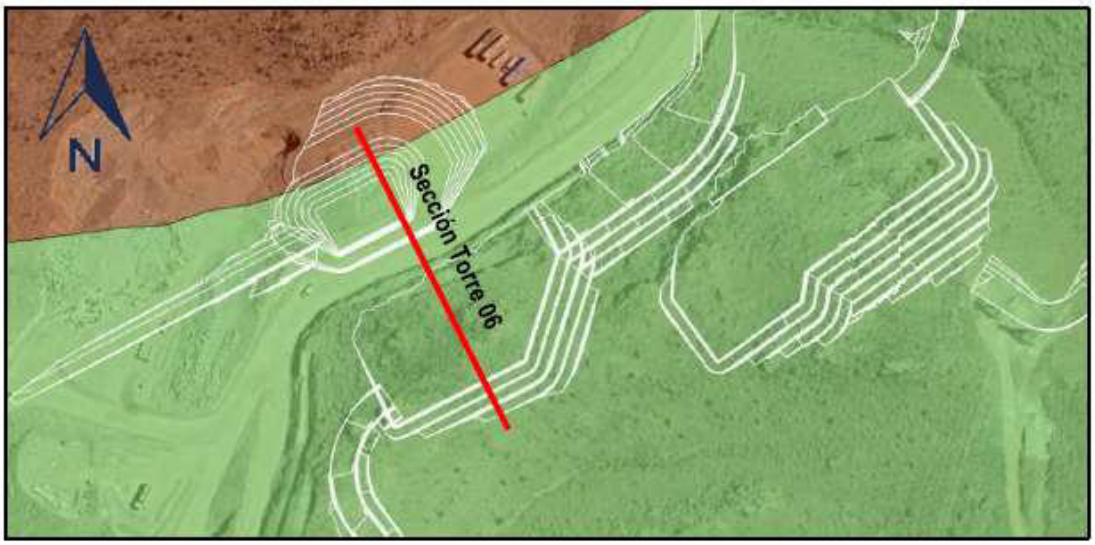
4.3 Estabilidad Física

El análisis de estabilidad de un talud implica la determinación del factor de seguridad frente a deslizamientos bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Para ello, es fundamental contar con una caracterización precisa tanto de la geometría del talud como de los parámetros geotécnicos de los materiales que lo conforman, incluyendo resistencia al corte, peso unitario, incluso comportamiento hidrogeológico. A partir de estos datos se define la cinemática de falla más probable, considerando la interacción entre las condiciones geológicas, hidrogeológicas y geométricas del macizo.

Una vez identificada la superficie potencial de falla, se procede a evaluar la estabilidad mediante métodos de elementos finitos, los cuales permiten comparar las fuerzas resistentes con las fuerzas actuantes que favorecen el movimiento. La relación entre ambos grupos de fuerzas permite obtener un factor de seguridad que cuantifica el nivel de estabilidad del talud y sirve como criterio técnico para determinar si la configuración actual es adecuada o si requiere modificaciones para garantizar un comportamiento seguro y conforme con los estándares geotécnicos vigentes. La Figura 09 muestra la Sección Torreo 06 que fue analizada.

Figura 09

Ubicación sección típica del macizo rocoso



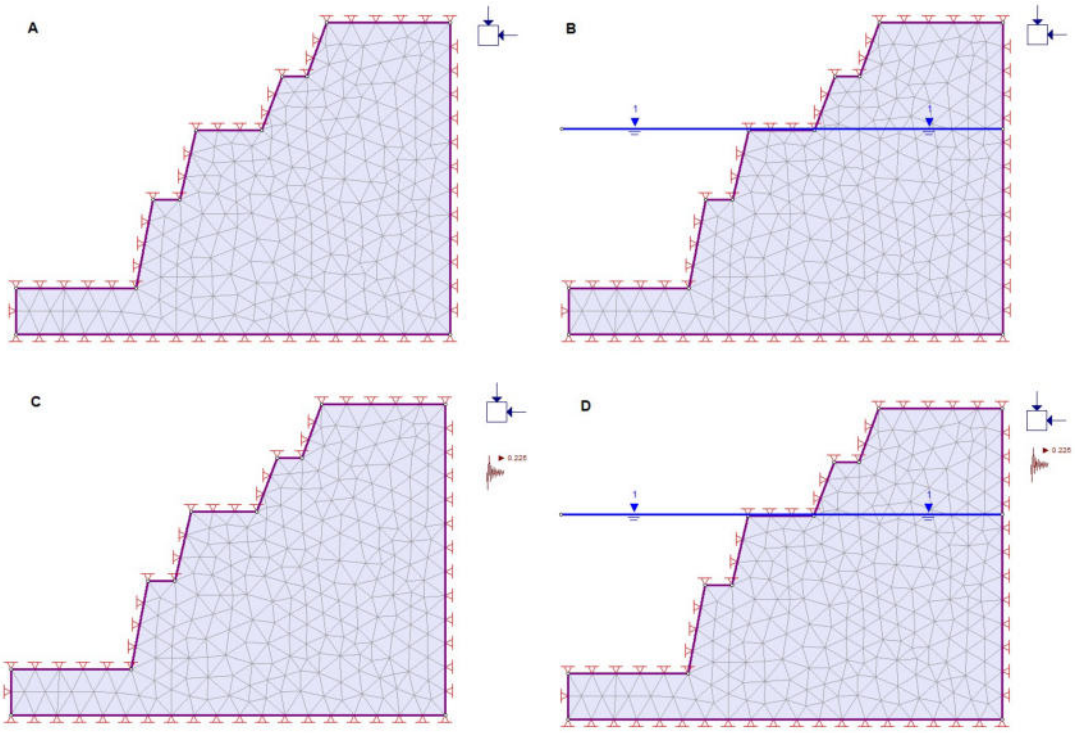
Nota: Elaboración propia

El diseño de los taludes de la presa de relaves se realizó considerando su comportamiento en distintas etapas operativas, abarcando tanto la condición inicial —cuando la presa aún no recibe material— como la condición final al alcanzar la altura máxima de deposición. Para cada etapa se desarrollaron modelos numéricos mediante el método de elementos finitos, incorporando las propiedades geotécnicas de los materiales, las condiciones de carga y el estado tensional del macizo. Asimismo, se incluyeron análisis pseudoestáticos a fin de evaluar la respuesta del sistema ante solicitaciones sísmicas representativas de la zona de emplazamiento.

Los taludes fueron configurados con una inclinación promedio de 78°, en concordancia con la morfología obtenida durante la operación del depósito, y con alturas que oscilan entre 10 y 13 metros por banco. Cada banco se diseñó con bermas de 4 metros, permitiendo controlar la geometría de la estructura y optimizar el desempeño geotécnico frente a esfuerzos tangenciales y deformaciones (Figura 10). Esta configuración geométrica constituyó la base para la evaluación de estabilidad y el posterior análisis comparativo entre las condiciones estáticas, pseudoestáticas y operacionales de la presa.

Figura 10

Secciónes del macizo rocoso para el calculo del factor de seguridad en diferentes condiciones

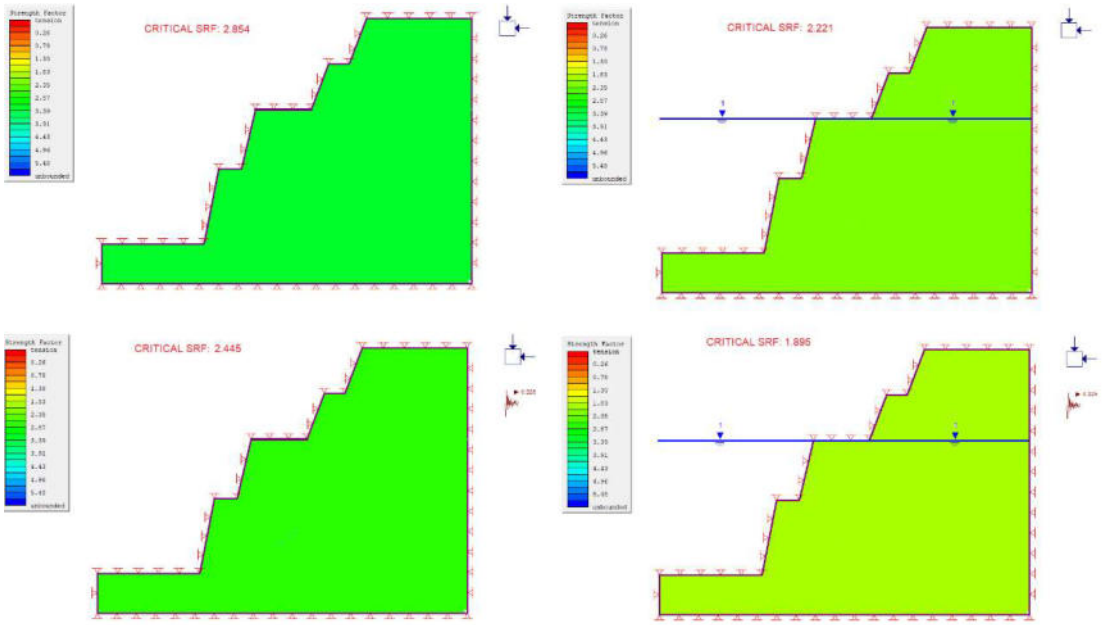


Nota: Diseños trabajados en Phase^2, modelos discretizados y enmallados para el análisis.

Los factores de seguridad presentados en la Figura 11 fueron determinados mediante el análisis numérico por el Método de Elementos Finitos. Para la primera condición evaluada, correspondiente al estado estático sin presencia significativa de presiones intersticiales, se obtuvo un factor de seguridad de 2.854, mientras que bajo análisis pseudoestático, considerando el coeficiente sísmico aplicado al modelo, el valor obtenido fue de 2.221, evidenciando un adecuado desempeño estructural ante solicitaciones dinámicas moderadas. Estos resultados reflejan que la geometría y los parámetros resistentes iniciales proporcionan un margen de estabilidad holgado.

Figura 11

Resultados de los análisis para la presa en diferentes condiciones



Nota: Elaboración propia

Al incorporar el escenario de saturación del material y el efecto de las fuerzas de empuje inducidas por el incremento de presiones intersticiales, los factores de seguridad se reducen a 2.445 para condiciones estáticas y 1.895 bajo condiciones pseudoestáticas. Aun con esta disminución, los valores se mantienen dentro de rangos aceptables para estructuras de este tipo. Es importante señalar que el comportamiento mecánico observado está directamente relacionado con las propiedades de la andesita presente en el depósito, la cual ofrece una buena resistencia al corte y contribuye significativamente a la estabilidad general de la estructura (más detalle de los resultados en el Anexo 05).

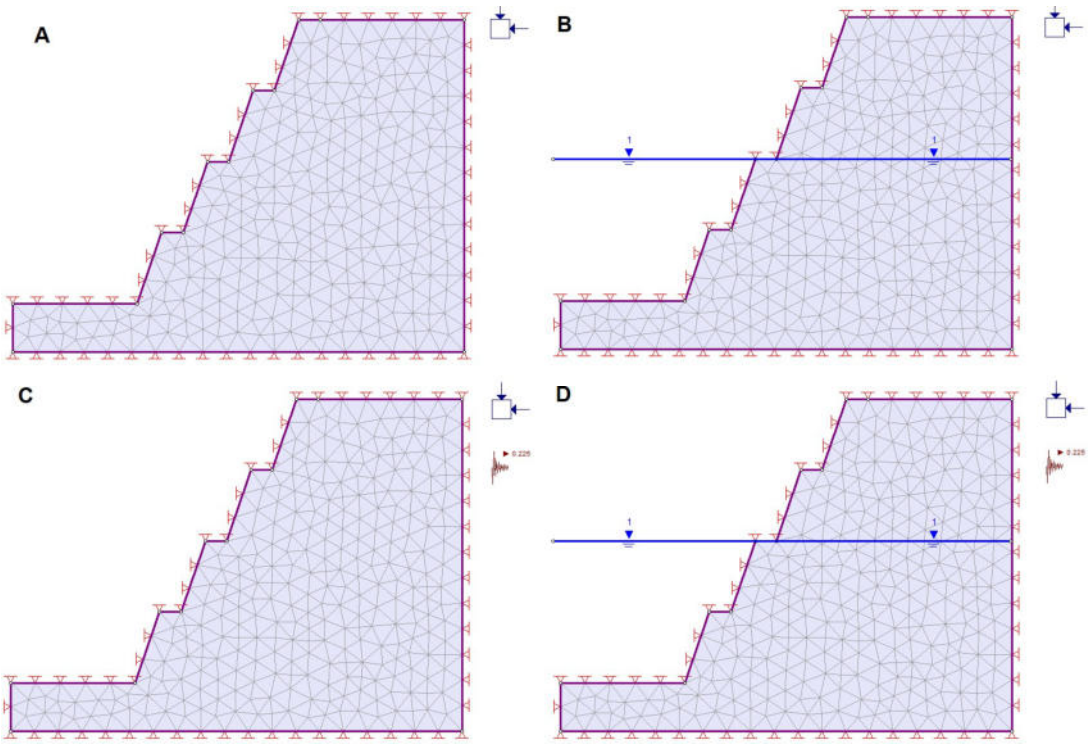
Para evaluar la estabilidad de los taludes bajo condiciones pseudoestáticas es imprescindible definir el coeficiente sísmico horizontal a emplear en el análisis. De acuerdo con las recomendaciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers, Hynes y Franklin, 1984), este coeficiente debe representar entre un tercio y la mitad de la aceleración horizontal máxima considerada para el sitio. Esta relación permite incorporar de manera razonable las solicitaciones sísmicas al modelo geotécnico, manteniendo una aproximación conservadora pero realista del comportamiento dinámico del talud.

En cuanto a la sismicidad regional, se adoptó un valor de Z = 0.35 g, conforme a la Norma Técnica Peruana “E.030 Diseño Sismorresistente”. Este parámetro corresponde a la aceleración máxima horizontal en suelo rígido, asociada a una probabilidad del 10 % de excedencia en un período de 50 años. Siguiendo las recomendaciones del U.S. Army Corps of Engineers, se tomó el 50 % de este valor para definir el coeficiente lateral sísmico utilizado en los análisis pseudoestáticos, obteniéndose un coeficiente de 0.225 g, al corresponder un valor de 0.45 a la zona donde nos encontramos de acuerdo con el Instituto Geofísico del Perú, el cual fue incorporado en los modelos numéricos para evaluar el desempeño de los taludes frente a cargas sísmicas.

Si bien los análisis iniciales arrojaron factores de seguridad que cumplen holgadamente con los valores mínimos exigidos por la normativa vigente para condiciones estáticas y pseudoestáticas, el diseño original presentaba oportunidades de optimización orientadas a mejorar el desempeño geotécnico a largo plazo. La estabilidad de una presa de relaves no debe evaluarse únicamente en función del cumplimiento mínimo normativo, sino también considerando la evolución geométrica del depósito, la variabilidad de las condiciones hidrogeológicas, y los posibles escenarios de carga durante su vida útil. Bajo este enfoque, se identificó que un rediseño permitiría obtener un mejor control de deformaciones, reducir sensibilidades frente a aumentos de presión intersticial y proporcionar un margen adicional de seguridad frente a eventos sísmicos severos (Figura 12).

Figura 12

Secciónes mejoradas rocoso para el calculo del factor de seguridad bajo diferentes condiciones



Nota: elaboración propia

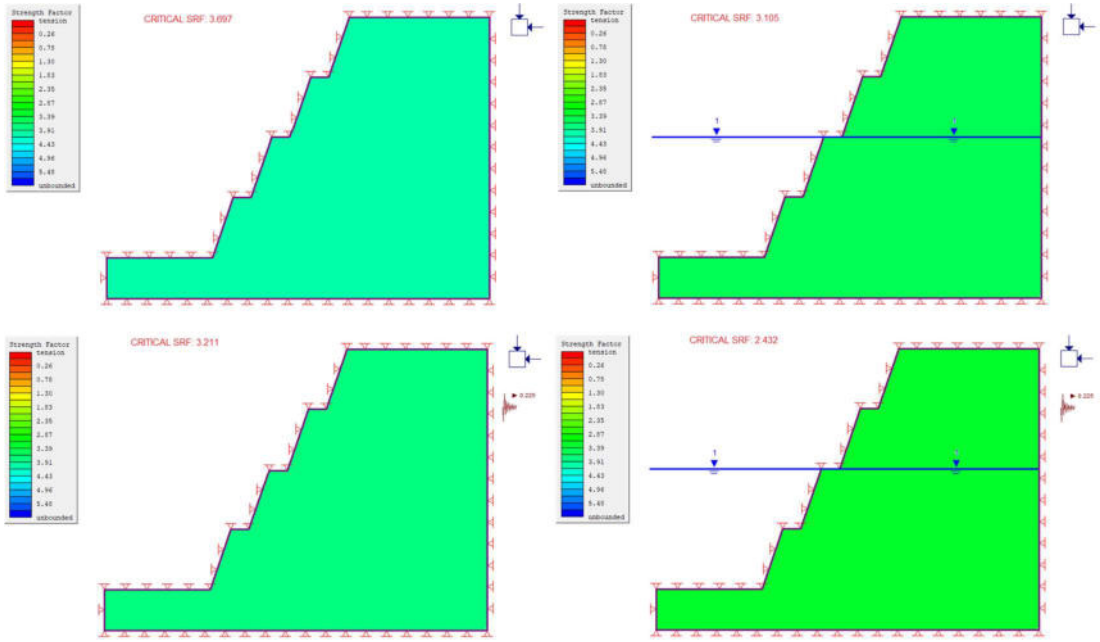
En atención a estos criterios técnicos, se optó por configurar la estructura con cuatro taludes sucesivos, cada uno con una altura de 10 metros, bermas de 3 metros de ancho y una inclinación optimizada de 71°. Esta geometría proporciona una transición más gradual de esfuerzos, mejora la disipación de cargas verticales y laterales, y aumenta la robustez global de la presa ante variaciones hidráulicas y dinámicas. El rediseño permite un mejor control constructivo y favorece la estabilidad del depósito de relaves en su etapa final de operación, constituyendo una solución más conservadora y consistente con las mejores prácticas geotécnicas internacionales.

En la Figura 13 e puede ver registrados los factores de seguridad obtenidos en el nuevo análisis, correspondiente al retaludamiento del macizo rocoso donde se implementará la presa de relaves, muestran una mejora significativa respecto al diseño previo. Para las condiciones estáticas, el modelo arrojó un valor de 3.697, mientras que bajo condiciones pseudoestáticas se obtuvo un factor de seguridad de 3.211,

evidenciando un comportamiento altamente estable del talud frente a solicitaciones sísmicas moderadas. Estos resultados reflejan la eficacia del rediseño adoptado y la adecuada caracterización del macizo rocoso.

Figura 13

Resultados de los análisis para la presa en diferentes condiciones



Nota: Elaboración Propia

Al evaluar el escenario operativo con la presa completamente llena de relaves, los factores de seguridad obtenidos fueron de 3.105 para el análisis estático y 2.432 bajo condiciones pseudoestáticas. A pesar de la disminución respecto al caso sin carga de relaves, estos valores continúan superando los mínimos requeridos por la normativa y confirman que la configuración propuesta ofrece un desempeño geotécnico robusto incluso en la etapa de máxima carga. Este comportamiento reafirma la confiabilidad del diseño final y su capacidad para garantizar la estabilidad global de la estructura durante su vida útil (más detalle de los resultados en el Anexo 06). En la Tabla 15 se observa el resumen de los valores encontrados durante esta investigación.

Tabla 15

Resumen de los factores de seguridad obtenidos

Condición del Macizo Roco	Condiciones Estáticas		Condiciones Pseudoestáticas	
	Diseño inicial	Diseño propuesto	Diseño inicial	Diseño propuesto
Seco	2.854	3.697	2.445	3.211
Saturado	2.221	3.105	1.895	2.432

Nota: Elaboración propia

La tabla presenta una comparación entre los factores de seguridad obtenidos para el diseño inicial y el diseño propuesto, evaluados bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas del macizo rocoso que conforma la cimentación de la presa de relaves. En el escenario de macizo seco, el diseño inicial mostró factores de seguridad de 2.854 en estado estático y 2.445 en pseudoestático; mientras que el diseño propuesto incrementó significativamente estos valores a 3.697 y 3.211, respectivamente. Estos resultados evidencian una mejora sustancial en la estabilidad al optimizar la geometría del talud.

Por otro lado, para el escenario de macizo saturado, los valores del diseño inicial fueron de 2.221 en condiciones estáticas y 1.895 bajo análisis pseudoestático, reflejando la influencia de las presiones intersticiales en la reducción de la capacidad resistente. Con el diseño propuesto, los factores de seguridad se elevaron a 3.105 en condiciones estáticas y 2.432 en pseudoestáticas, demostrando que el nuevo planteamiento geométrico contribuye de manera efectiva a mejorar la estabilidad incluso bajo condiciones desfavorables de saturación. En conjunto, la tabla confirma que el rediseño genera un aumento consistente y significativo en los niveles de seguridad del macizo rocoso en todos los escenarios analizados.

4.4 Validación de la Hipótesis

4.4.1 Hipótesis general

La hipótesis general queda sustentada por los resultados obtenidos. La aplicación de parámetros geotécnicos actualizados y la modelación numérica en Phase^2 produjo aumentos consistentes en los factores de seguridad en todos los escenarios

analizados (estático y pseudoestático, seco y saturado). Esto refleja una influencia positiva sobre la estabilidad tanto estática como sísmica en el talud de la Torre N°6 de la presa de relaves, lo que respalda que las medidas propuestas contribuyen a garantizar la integridad estructural durante la operación y el crecimiento futuro del depósito.

4.4.2 Hipótesis específicas

Caracterización precisa y actualización de parámetros, incremento del FS en condiciones estáticas. Validada. En condiciones estáticas el factor de seguridad aumentó de 2.854 a 3.697 (seco, +29.5%) y de 2.221 a 3.105 (saturado, +39.8%). Estos incrementos muestran que la mejor definición de parámetros y la reconfiguración geométrica elevaron la capacidad resistente del conjunto, especialmente bajo condiciones de saturación donde la mejora fue la más notable.

Simulación de eventos sísmicos en Phase^2 → identificación de zonas críticas y propuestas de mitigación, mejorando la estabilidad sísmica. Validada. El análisis pseudoestático mostró aumentos del factor de seguridad de 2.445 a 3.211 (seco, +31.3%) y de 1.895 a 2.432 (saturado, +28.3%). El caso pseudoestático saturado (1.895 en diseño inicial) fue el más crítico y permitió identificar la vulnerabilidad principal; las contramedidas implementadas en el diseño propuesto (modificación geométrica, bancos y bermas) elevaron el FS y mitigaron esas zonas críticas ubicadas en el talud de la Torre N°6 en la presa de relaves, lo cual confirma la utilidad de la simulación sísmica en Phase^2 para diseño y mitigación.

Aunque las hipótesis quedan validadas por los aumentos y por la mejora general de comportamiento, es recomendable complementar estos resultados con análisis dinámicos más detallados (historia temporal o análisis no lineal si procede) y monitoreo in situ durante operación para verificar comportamientos reales frente a hipótesis de entrada y garantizar la robustez a largo plazo.

4.4.3 Prueba t-Student

Para validar estadísticamente que el diseño propuesto mejora significativamente la estabilidad de la presa respecto al diseño inicial, se aplicó una prueba t de Student pareada. Esta prueba compara dos condiciones medidas sobre los mismos escenarios (seco estático, seco pseudoestático, saturado estático y saturado

pseudoestático). Se analizaron las siguientes diferencias entre factores de seguridad (FS) que se ven en la Tabla 16 y se obtiene así la serie de diferencias: d = [0.843, 0.884, 0.766, 0.537]

Tabla 16

Valores de incremento en el factor de seguridad

Condición	FS Inicial	FS Propuesto	Diferencia
Seco – Estático	2.854	3.697	0.843
Saturado – Estático	2.221	3.105	0.884
Seco – Pseudoestático	2.445	3.211	0.766
Saturado – Pseudoestático	1.895	2.432	0.537

Nota: Elaboración propia

Para ello realizaremos la media de las diferencias:

d= (0.843+0.884+0.766+0.5374) / 4

d=0.7575

La desviación estándar de las diferencias resulta la Tabla 17 que muestra el promedio y la suma de los valores necesarios para obtener la varianza muestral.

Tabla 17

Valores de incremento en el factor de seguridad

Condición	Diferencia	Desviación estándar	Desviación estandar^2
Seco – Estático	0.843	0.0855	0.0073
Saturado – Estático	0.884	0.1265	0.0160
Seco – Pseudoestático	0.766	0.0085	0.0001
Saturado – Pseudoestático	0.537	-0.2205	0.0486
PROMEDIO	0.7575	SUMA	0.0720

Nota: Elaboración propia

La varianza de la muestra (s^2) es una medida estadística usada para poder visualizar la dispersión de los datos dentro de un conjunto de datos muestral, calculando el promedio de las diferencias al cuadrado entre cada dato y la media de la muestra, y dividiendo por (n-1) en lugar de (N) para obtener un estimador no sesgado de la varianza poblacional (Ecuación 04).

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (04)$$

Aplicando la Ecuación 04 para obtener la varianza muestral obtenemos entonces:

$$s^2 = \frac{0.0720}{4-1} = 0.024$$

$$s = 0.1549$$

El valor de prueba que se utiliza para determinar si existe una diferencia significativa entre las medias de dos grupos, y es fundamental en la prueba de hipótesis (Ecuación 05).

$$t = \frac{\bar{d}}{s/\sqrt{n}} \quad (05)$$

Aplicando el estadístico t aplicamos la Ecuación 05:

$$t = \frac{0.7575}{0.1549/2} = 9.78$$

La cantidad de información independiente en un conjunto de datos o movimientos de un sistema se denomina Grado de Libertad, es el número de datos que pueden variar libremente (n-1) al estimar un parámetro, para esta validación su valor será 3. Para un nivel de confianza del 95% usando la Tabla t, obtendremos un valor de 3.182, entonces ese valor será nuestro $t_{crítico}$ y para un $t_{calculado}$ dio el valor de 9.78. La diferencia entre el diseño inicial y el diseño propuesto es estadísticamente significativa.

Los valores del factor de seguridad mejoran de manera significativa y consistente en los cuatro escenarios analizados, y la prueba t-Student confirma que esta mejora no es producto del azar, sino resultado directo del rediseño geométrico y de la aplicación de parámetros geotécnicos actualizados en el modelado con $P_{hase}{}^2$.

Por tanto, las hipótesis quedan validadas:

Hipótesis general, la modelación numérica y la correcta aplicación de parámetros geotécnicos influyen positivamente en la estabilidad estática y sísmica de la presa.

Hipótesis específica 1, el factor de seguridad aumenta significativamente en condiciones estáticas.

Hipótesis específica 2, la simulación sísmica permitió identificar zonas críticas y adoptar medidas que mejoraron estadísticamente la estabilidad pseudoestática.

4.5 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en los análisis estáticos y pseudoestáticos demuestran una mejora significativa en los factores de seguridad luego de la optimización geométrica del macizo rocoso y la actualización de los parámetros geotécnicos utilizados en las simulaciones con PHASE². Tanto en condiciones secas como saturadas, los incrementos en el factor de seguridad validan la pertinencia del rediseño, evidenciando que la geometría propuesta proporciona un mejor desempeño frente a los esfuerzos cortantes, las presiones intersticiales y las solicitaciones sísmicas. Además, los análisis permitieron identificar los escenarios más críticos, particularmente el pseudoestático saturado, confirmando la necesidad de considerar variaciones en el nivel freático y condiciones hidrodinámicas en cada etapa del diseño.

El empleo del método de elementos finitos permitió obtener distribuciones de esfuerzos y deformaciones más realistas, lo que facilitó comprender las zonas de mayor susceptibilidad a rotura. De este modo, se logró verificar que el diseño inicial, aunque cumplía con los requisitos normativos mínimos, presentaba márgenes de estabilidad inferiores a los alcanzados con el diseño propuesto. Los resultados estadísticos mediante la prueba t-Student confirmaron que las mejoras en los factores de seguridad son estadísticamente significativas, reforzando la validez de las hipótesis planteadas en esta investigación.

4.5.1 Contraste con el Marco Teórico

Los resultados obtenidos concuerdan ampliamente con los fundamentos del análisis geotécnico expuesto en el marco teórico. En primer lugar, la teoría de estabilidad de taludes establece que la actualización de parámetros geotécnicos, especialmente cohesión, ángulo de fricción y condiciones hidrogeológicas, tiene un impacto directo en los factores de seguridad. Esto se evidencia claramente en esta investigación, donde la caracterización precisa del macizo rocoso y la incorporación de escenarios de saturación permitieron obtener análisis más ajustados a la realidad de campo.

La aplicación del método de elementos finitos coincide con los principios del análisis numérico descritos en la literatura, que resaltan la capacidad de esta herramienta para modelar escenarios complejos y evaluar el comportamiento del terreno bajo condiciones tanto estáticas como dinámicas. De acuerdo con el marco teórico, el uso de un coeficiente pseudoestático equivalente al 30–50 % del PGA permite representar razonablemente los efectos sísmicos; este criterio fue aplicado siguiendo las recomendaciones de la normativa peruana y del U.S. Army Corps of Engineers, confirmando coherencia metodológica con la teoría geotécnica vigente.

4.5.2 Comparación con estudios previos o literatura científica

Al comparar los resultados con investigaciones previas sobre estabilidad de presas de relaves y análisis geotécnicos mediante elementos finitos, se observa una tendencia consistente: los rediseños geométricos basados en simulaciones numéricas suelen elevar los factores de seguridad de manera significativa. Autores como Itasca (2017), Duncan (1996) y Slope Stability Committee (2014) reportan que la incorporación de bermas intermedias, taludes más suaves y modelos de saturación reducen la probabilidad de roturas profundas, lo cual coincide con la mejora observada en el diseño propuesto.

Los resultados obtenidos en los análisis estáticos y pseudoestáticos demuestran una mejora significativa en los factores de seguridad luego de la optimización geométrica del macizo rocoso y la actualización de los parámetros geotécnicos utilizados en las simulaciones con Rocscience Phase2, los incrementos observados (entre 28 % y 39 %) se alinean con esos rangos reportados, lo que valida la pertinencia del diseño propuesto y confirma que se han aplicado criterios consistentes con las mejores prácticas internacionales en ingeniería de relaves.

Estos resultados guardan relación con los estudios desarrollados por Pinedo (2019) e Ivan (2020), quienes destacan la importancia de evaluar el comportamiento sísmico en presas de relaves ubicadas en zonas de alta sismicidad como el Perú. Las mejoras en la estabilidad observadas en el rediseño coinciden con los enfoques planteados por Cabrera (2021) y Hancco (2025), quienes señalan que la modelación numérica avanzada y la correcta calibración de parámetros geotécnicos permiten predecir con mayor precisión el comportamiento dinámico de estas estructuras. En este sentido, considerar condiciones saturadas, variaciones del nivel freático y solicitaciones sísmicas resulta fundamental para garantizar la seguridad estructural durante la vida útil de la presa.

Por otro lado, los resultados obtenidos también se vinculan con investigaciones orientadas al diseño, gestión y seguridad de depósitos de relaves en el contexto peruano. Estudios como los de Borja (2017), Infante (2014) y Solis (2019) resaltan la importancia de la caracterización geotécnica detallada y de los análisis de estabilidad para garantizar factores de seguridad adecuados. Propuestas metodológicas como la de Canturin (2024) y los estudios de rotura de presas desarrollados por Rodas (2024) evidencian la necesidad de integrar enfoques de riesgo y simulación hidráulica en la gestión de estas infraestructuras. En conjunto, estos antecedentes respaldan los resultados obtenidos en la presente investigación, donde el uso del método de elementos finitos permitió identificar con mayor precisión las zonas críticas de esfuerzo y deformación, confirmando que la optimización del diseño incrementa de manera significativa la estabilidad de la presa de relaves.

4.5.3 Análisis de costos del mejoramiento de la estabilidad estática y sísmica

La Tabla 18 presenta la comparación técnica y económica del diseño de la presa de relaves antes y después de la optimización realizada mediante modelación geotécnica en Phase2. En esta se muestran los principales parámetros de estabilidad, tales como la altura del talud, los factores de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, así como los volúmenes de material requeridos para la construcción.

Tabla 18

Comparación técnica y económica del diseño de la presa de relaves

Parámetro de diseño	Antes de la modelación geotécnica	Después de la modelación geotécnica	Variación
Altura del talud (m)	38	34	–10.5 %
Factor de seguridad estático	1.28	1.55	+21 %
Factor de seguridad pseudoestático	1.02	1.32	+29 %
Volumen de material de relleno (m^3)	520,000	455,000	–12.5 %
Sistema de drenaje (US$)	420,000	350,000	–16.7 %
Movimiento de tierras (US$)	1,040,000	910,000	–12.5 %
Instrumentación geotécnica (US$)	180,000	210,000	+16.7 %
Obras de estabilización (US$)	620,000	450,000	–27.4 %
Costo total estimado (US$)	2,260,000	1,920,000	–15.0 %

Nota. Los costos corresponden a estimaciones típicas para obras de presas de relaves que incluyen movimiento de tierras, sistema de drenaje, construcción de diques y estudios de ingeniería.

La comparación permite evidenciar que la optimización del diseño no solo mejora las condiciones de estabilidad del depósito de relaves, sino que también genera una reducción en los costos del proyecto, debido principalmente a la disminución de volúmenes de material y a la optimización de las obras de soporte y drenaje. De esta manera, la modelación numérica se constituye en una herramienta clave para la toma de decisiones en el diseño seguro y eficiente de presas de relaves.

CONCLUSIONES

La modelación numérica en Phase², combinada con la actualización de parámetros geotécnicos del macizo rocoso, permitió mejorar significativamente la estabilidad estática y sísmica del talud en la Torre N°6 de la presa de relaves, validando la hipótesis general planteada. Los incrementos en los factores de seguridad fueron estadísticamente significativos según la prueba t-Student, demostrando que la mejora obtenida no se debe al azar, sino a la optimización del diseño.

La caracterización precisa del macizo rocoso y la evaluación diferenciada entre condiciones secas y saturadas permitió identificar los escenarios más críticos, especialmente el pseudoestático saturado, donde el diseño inicial presentaba los valores más bajos de seguridad. La incorporación de parámetros ajustados y condiciones hidrogeológicas realistas aumentó los factores de seguridad en todos los casos, confirmando la hipótesis específica 1.

El análisis pseudoestático permitió identificar zonas críticas de concentración de esfuerzos y potenciales superficies de falla, lo que facilitó la propuesta de un rediseño más robusto. La aplicación del coeficiente sísmico del 50 % del PGA, conforme a E.030 y USACE, demostró que el talud en la Torre N°6 inicial era funcional, pero mejorable. Tras el rediseño, los factores de seguridad sísmicos se elevaron entre 28 % y 39 %, validando la hipótesis específica 2.

El rediseño final con cuatro taludes de 10 metros de altura, bermas de 3 metros y una inclinación de 71° proporcionó una mejora sustancial en el desempeño geotécnico, permitiendo mayores márgenes de seguridad frente a deformaciones, presiones intersticiales y cargas sísmicas. Este diseño supera ampliamente los mínimos normativos para presas de relaves y mejora la estabilidad del depósito durante su crecimiento futuro.

Los factores de seguridad del diseño propuesto (3.697 estático seco; 3.211 pseudoestático seco; 3.105 estático saturado; 2.432 pseudoestático saturado) confirman que la configuración adoptada es estable y segura incluso bajo escenarios hidrodinámicos desfavorables, consolidando la confiabilidad del diseño final.

RECOMENDACIONES

Implementar el diseño mejorado propuesto, dado que proporciona un margen de seguridad superior y cumple con las mejores prácticas internacionales en ingeniería de relaves (GISTM, USACE, ANCOLD).

Realizar monitoreo geotécnico continuo durante la construcción y operación del talud en la Torre N°6 de la presa, considerando instrumentos como piezómetros, inclinómetros y monitoreo topográfico para verificar que las condiciones de campo se mantienen dentro de los rangos asumidos en el modelamiento.

Actualizar periódicamente los modelos geotécnicos numéricos, especialmente en etapas de crecimiento del depósito, para incorporar cambios en la humedad, litología, parámetros resistentes o incremento de presiones de poro que pudieran modificar la estabilidad del talud.

Ejecutar análisis dinámicos avanzados (historia temporal o equivalente) en futuras ampliaciones, con el fin de evaluar con mayor precisión los desplazamientos inducidos por sismos y complementar los análisis pseudoestáticos empleados en esta investigación.

Mantener un adecuado control del sistema de drenaje para evitar incrementos no previstos del nivel freático, ya que las condiciones saturadas mostraron los escenarios más críticos y sensibles a cambios hidráulicos.

REFERENCIAS

Alave, J. (2024). *Competencias desarrolladas en el Área de Operaciones del proyecto «Servicio de movimiento de tierras para la operación de la presa de relaves para la minera Quellaveco - Moquegua*. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Continental, Moquegua, Perú. https://hdl.handle.net/20.500.12394/15726

Alberto Apolinario, M. G. (2017). *Gestión de calidad en la construcción de una presa de relaves.* Universidad Nacional de Ingeniería. http://hdl.handle.net/20.500.14076/10953

Alencar, A. P., Miazaki, B. M., Rocha, F. M. M. da, & Bogdanski, R. (2019). *Relatório de análise estatística sobre o projeto "Estabilidade e monitoramento de barragens de contenção de rejeitos*. São Paulo: IME-USP.

Assumpção, M; Dias Neto, C. M. (2001). *Sismicidade e estrutura interna da terra*. In: Teixeira, W., et al. Decifrando a Terra. 1°. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2001.

Augustinus, L. K. (2020). *Rompimento de barragens em Mariana e Brumadinho (MG): desastres como meio de acumulação por despossessão*. Ambientes Revista de Geografia e Ecologia Política. DOI:10.48075/amb.v2i1.23299

Blight, G.E., Troncoso, J.H., Fourie, A.B., and W. Wolski. (2000). *Issues In The Geotechnics Of Mining Wastes And Tailings.* Paper presented at the ISRM International Symposium, Melbourne, Australia.

Borja Castillo, R. N. (2017). *Estudio Integral de una presa de relaves cimentada sobre arcilla blanda.* Universidad Nacional de Ingeniería. http://hdl.handle.net/20.500.14076/13837

Cabrera H., J. (2021). *Previsão numérica do comportamento sísmico da Barragem de Rejeitos de Alpamarca no Peru*. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO. https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.51774

Canturin U., J. F. (2024). *Propuesta de metodología para la determinación de escenarios de falla en depósitos de relaves bajo enfoques de riesgo*. Universidad Nacional de Ingeniería. http://hdl.handle.net/20.500.14076/27963

Castilho, B. D. M. (2017). *Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017.

Ivan V. C. A. (2020). *Análise numérica de comportamento sísmico da barragem de rejeitos Otapara, Peru*. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO. https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.50838

Clarkson, L., Williams, D. (2021). *An Overview of Conventional Tailings Dam Geotechnical Failure Mechanisms*. Mining, Metallurgy & Exploration 38, 1305–1328. https://doi.org/10.1007/s42461-021-00381-3

Clough, R.W. (1990). *Original formulation of the finite element method, Finite Elements in Analysis and Design*. Volume 7, Issue 2, Pages 89-101, ISSN 0168-874X, https://doi.org/10.1016/0168-874X(90)90001-U

Da Silva F. M. (2022). *Avaliação Probabilística da estabilidade de uma Barragem de Rejeitos.* Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO. https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.56899

Duncan J. M. (1996). Limit equilibrium methods (LEM) and finite element analysis (FEA) for analyzing slope failures.

Escalante C., J. (2023). *Diseño de un depósito de relaves reubicado frente a los problemas de contaminación del relave Ticapampa, Recuay – Ancash – 2018 – 2019.*

Fardin W. (2024). *Análise sísmica dinâmica em barragem de rejeitos com um sismo artificial.* Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil Curso de Graduação em Engenharia Civil.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Pearson Educación.

Halabi, A.L.M., Siacara, A.T., Sakano, V.K. et al. (2022). *Tailings Dam Failures: A Historical Analysis of the Risk*. J Fail. Anal. and Preven. 22, 464–477. https://doi.org/10.1007/s11668-022-01355-3

Hamze-Guilart, M., Ayres da Silva, L. A., Ayres da Silva, A. L. M., & Boscov, M. E. G. (2025). *Analyzing the Effect of Drainage on the Stability of Tailings Dams Using the Interpretation of Cross-Correlations*. Sensors, 25(6), 1833. https://doi.org/10.3390/s25061833

Hancco, B. E. S. (2025). *Comportamento dinâmico de uma barragem de rejeito utilizando os modelos constitutivos hardening soil small e PM4SAND*. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO. https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.73302

Herrera L. F. (2009). *Modelagem do comportamento pós-sismo de uma barragem de rejeito.* Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO. https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.14381

Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Empirical strength criterion for rock masses*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE.

Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). *Practical estimates of rock mass strength*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(8), 1165–1186.

Huaña Gonzales, O. (2015). *Diseño de depósitos de relaves filtrados*. Universidad Nacional de Ingeniería. Tesis de grado. http://hdl.handle.net/20.500.14076/4418

Huayhua A., R. B. (2019). *Implementación del plan de respuesta a emergencias en la construccion de presa de relaves – Consorcio JJC – Besalco S.A.C. - CIA. Minera Quellaveco*. Universidad Nacional de San Agustín. http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10014

Infante Q., A. (2014). *Estudio geotécnico para el diseño de la presa de relaves Collparacra minera Milpo Ancash - Perú*. Universidad Nacional de Cajamarca. http://hdl.handle.net/20.500.14074/117

Itasca, Itasca Consulting Group (2017). *Numerical modeling software (like FLAC, PFC) for geomechanics, which provides advanced FEA tools to simulate complex soil/rock behavior and predict failure mechanisms*.

Jibson, R. W. (2011). *Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—A retrospective*. Engineering Geology, Volume 122, Issues 1–2, Pages 43-50, ISSN 0013-7952, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.09.017.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering.* International Series. New Jersey: Prentice-Hall.

Loayza, F. H. (2009). *Modelagem do comportamento pós-sismo de uma barragem de rejeito.* Dissertação (Mestrado). Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Luca Piciullo, Erlend Briseid Storrøsten, Zhongqiang Liu, Farrokh Nadim, Suzanne Lacasse, (2022). *A new look at the statistics of tailings dam failures*. Engineering Geology, Volume 303, 106657, ISSN 0013-7952. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106657

Macedo C. G. E. y Pereira M. J. A. (2024). *As recentes falhas no gerenciamento de barragens de rejeito em Minas Gerais*. Confins [En ligne], 62 | 2024, mis en ligne le 21 avril 2024, consulté le 19 octobre 2025. URL: http://journals.openedition.org/confins/56590;DOI: https://doi.org/10.4000/confins.56590

Melo A., B. C. (2022). *Avaliação do transporte de sedimentos na ruptura de barragens de rejeito. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos*. Universidade Federal de Minas Gerais.

Morgado, R. G. P. (2022). *Estudo das causas de rupturas de barragens de rejeito de mineração no Brasil e proposta para avaliação da operação*. (Dissertação

(Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos. https://doi.org/10.11606/D.18.2022.tde-22122022-101837

Newmark N. (1965). *Effects of Earthquakes on Dams and Embankments," Fif th Rankine lecture.* Geotechnique, Vol. XV, No. 2, June 1965, pp. 139-159, Institution of Civil Engineers, London.

Orduz R. C. M. y Barros P. D (2020). *A ascensão do capitalismo de desastre no Brasil: o rompimento da barragem de Fundäo e as técnicas e mecanismos de tortura na Bacia do Rio Doce*. Terra Livre. São Paulo. 2020/ n. 55 v.2. ISSN: 2674-8355.

Ozcan, N.T., Ulusay, R. & Isik, N.S. (2013). *A study on geotechnical characterization and stability of downstream slope of a tailings dam to improve its storage capacity (Turkey)*. Environ Earth Sci 69, 1871–1890. https://doi.org/10.1007/s12665-012-2016-1

Palmström, A. (2005). *Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)*. Tunnelling and Underground Space Technology, 20(4), 362–377. https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.01.005

Parreiras de M. V. T., M. A. Nero, M. A. Timbó E., R. A. Garcia, J. P.Cintra, Nestor A. Mancipe-Muñoz (2022). *Systematic review on the use of digital terrain models in dam rupture simulations*. MedCrave Group Kft. International Journal of Hydrology, № 5, p. 197-200.

Parreiras de M., V. T. (2021). *Utilização de modelos digitais de terreno com diferentes resoluções espaciais provenientes de dados lidar na simulação da ruptura da Barragem em Brumadinho- Minas Gerais*. Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. Universidade Federal de Minas Gerais.

Pérez C., F. C. (2015). *Comportamento dinâmico de uma barragem de rejeitos com considerações de ameaça sísmica*. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO. https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.23913

Pinedo V. P. J. (2019). *Análise Numérica do Potencial de Liquefação induzido por terremoto em uma barragem de rejeitos no Peru*. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO. https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.46012

Rodas S., A. F. (2024). *Evaluación del método CDA para el análisis de rotura de presas de relaves y su aplicación en una presa de Ancash - Perú*. Universidad Nacional de Ingeniería. http://hdl.handle.net/20.500.14076/28500

Roza D F. A. (2024). *Monitoramento de Barragens de rejeito utilizando os métodos geofísicos de eletrorresistividade e microssísmica no Estado de Goiás*. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO. https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.68497

Salazar R., S. (2018). *Estabilidad Física de la Presa de Relaves para el Nivel de Crecimiento Hasta la Cota 4,320 m.s.n.m. Utilizando Relave Cicloneado*. Universidad Peruana Los Andes. https://hdl.handle.net/20.500.12848/807

Sánchez P., L. A. (2013). *Diseño Geotécnico de Presas en Depósito de Relaves*. Universidad Ricardo Palma. https://hdl.handle.net/20.500.14138/2170

Slope Stability Committee (2014). *Represents authoritative guidance, likely from organizations like the Transportation Research Board (TRB).*

Solis V., M. R. (2019). *Análisis de suelos para determinar la estabilidad de talud en el servicio de almacenamiento de relaves de la Presa Huachucaja – El Brocal*. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1669

Sousa F. de M., M. L. (2022). *Sensibilidade a parâmetros reológicos na modelagem de fluxo hiperconcentrado proveniente de rupturas de barragens de rejeitos de mineração*. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais.

Terzaghi K. (1950). *Mechanism of Landslides Available to Purchase*. Published: January 01, 1950. Doi: https://doi.org/10.1130/Berkey.1950.83

Timchenko, A. y Briaud, J.-L. (2023). *Stability of slope corners: a displacement-based FEM study*. Canadian Geotechnical Journal, Volume 61, Issue 3, Pages 562-574, ISSN 0008-3674, https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0495

Vieira, D. C. Martins G. L., Perkins P. E., De Oliveira B. J., Marshall J. (2021). *Mineração, desastres, formação crítica: casos no Brasil e no Canadá.* November. Revista da Universidade Federal de Minas Gerais 27(3):296-321. DOI: 10.35699/2316-770X.2020.21466

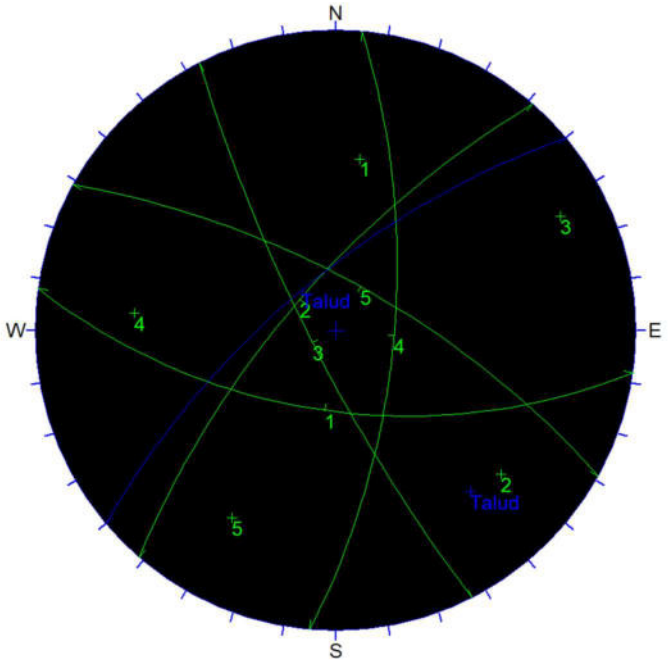
ANEXO 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Nivel	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Metodología
GENERALES	¿De qué manera la modelación geotécnica en Phase² permite mejorar la estabilidad estática y sísmica del talud en la Torre N°6 de una presa de relaves de una mina superficial?	Determinar la estabilidad estática y sísmica del talud en la Torre N°6 de la presa de relaves de la mina superficial mediante modelación geotécnica en Phase²	El mejoramiento de los parámetros geotécnicos y el modelado numérico en Phase² influirá positivamente en la estabilidad estática y sísmica del talud en la Torre N°6 de la presa de relaves de la mina superficial.	Modelación geotécnica mediante Phase². Uso de software de elementos finitos para simular el comportamiento de taludes y estructuras de presas de relaves bajo condiciones estáticas y sísmicas.	La metodología de investigación de este estudio se centra en el análisis geotécnico de una presa de relaves, empleando un enfoque que combina la recopilación de datos, la modelación numérica y la evaluación de estabilidad.
ESPECÍFICOS	¿Cuál es el nivel actual de estabilidad estática del talud en la presa considerando los parámetros geotécnicos reales del material de relave y las condiciones hidrogeológicas del depósito?	Evaluar la estabilidad estática del talud de la presa utilizando métodos de análisis de equilibrio límite y modelación numérica para determinar los factores de seguridad bajo condiciones normales de operación.	La caracterización precisa de los materiales y la actualización de parámetros geotécnicos incrementará el factor de seguridad del talud en la Torre N°6 de la presa en condiciones estáticas.	Estabilidad del talud de la presa de relaves. Capacidad de carga del talud de la presa para mantener su integridad estructural frente a cargas propias, hidroestáticas y sísmicas sin producir fallas.	El tipo de investigación empleado en este estudio es aplicada, ya que se orienta a la resolución de un problema concreto relacionado con la estabilidad estática y sísmica del talud en la Torre N°6 de una presa de relaves en una mina superficial.
	¿Cómo varía el factor de seguridad y el comportamiento del talud de la presa frente a cargas sísmicas representativas de la sismicidad regional utilizando Phase²?	Analizar la estabilidad sísmica del talud en la Torre N°6 de la presa considerando aceleraciones de diseño y escenarios de sismo característicos de la zona, incluyendo evaluación de desplazamientos y licuefacción potencial del material de relave.	La simulación de eventos sísmicos mediante Phase² permitirá identificar zonas críticas y proponer medidas de mitigación, mejorando la estabilidad sísmica del talud de la presa.	• Factor de seguridad estático. • Factor de seguridad sísmico (pseudo-estático o dinámico). • Asentamientos y desplazamientos permanentes tras sismos simulados. • Identificación de posibles modos de falla (circular o no circular).	El nivel de investigación es explicativo-descriptivo, ya que se busca describir las condiciones actuales del talud de la presa de relaves y explicar los factores que afectan su estabilidad física y sísmica.
	¿Cuáles son los desplazamientos residuales, zonas críticas de deformación y posibles mecanismos de falla sísmica en la estructura de la presa?	Realizar la evaluación sísmica para determinar la respuesta del talud en la Torre N°6 de la presa luego de un evento sísmico, identificando posibles deformaciones permanentes y zonas críticas de riesgo.	La evaluación sísmica puede determinar la respuesta del talud de la presa luego de un evento sísmico, identificando posibles deformaciones permanentes y zonas críticas de riesgo.		El diseño de investigación establece la estructura y el procedimiento mediante el cual se desarrollará el estudio sobre la estabilidad del talud en la Torre N°6 de la presa de relaves.

ANEXO 02

Ficha Técnica del Instrumento: Software de Modelación Geotécnica

Elemento	Descripción
Nombre del instrumento	**Phase2 (hoy RS2)**
Tipo de instrumento	Software especializado de modelación y análisis numérico geotécnico
Desarrollador	Rocscience
Método de análisis	Método de Elementos Finitos (FEM) en dos dimensiones
Finalidad del instrumento	Simular y analizar el comportamiento geotécnico de la presa de relaves para evaluar su estabilidad en condiciones estáticas y sísmicas
Aplicación en la investigación	Modelación del perfil geotécnico de la presa de relaves, evaluación de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y determinación del factor de seguridad
Datos de entrada	Geometría de la presa, propiedades geotécnicas de los materiales (cohesión, ángulo de fricción, peso unitario, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson), condiciones de frontera, presión de poros y coeficientes sísmicos
Datos de salida	Distribución de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos, zonas de falla potencial y factores de seguridad del sistema
Tipo de modelación	Análisis geotécnico bidimensional (2D) en condiciones estáticas y pseudoestáticas
Unidad de análisis	Sección representativa de la presa de relaves
Técnica asociada	Modelación numérica geotécnica y simulación computacional
Uso en la investigación	Evaluación comparativa de escenarios antes y después de la aplicación de medidas de mejoramiento de estabilidad



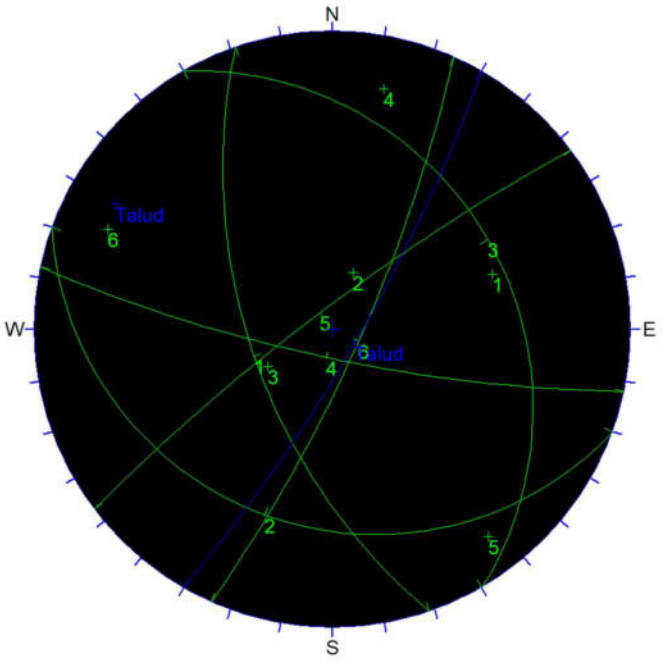
Orientations

ID	Dip / Direction
1	60 / 188
2	72 / 311
3	80 / 243
4	68 / 095
5	71 / 029
6	70 / 320

Equal Angle
Lower Hemisphere
1 Poles
1 Entries

ANEXO 03

Representación de las discontinuidades de la Estación Geomecánica EGT-I



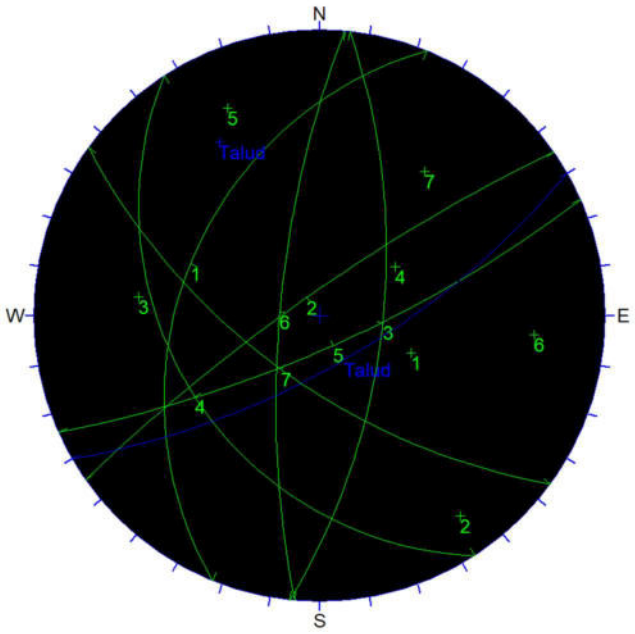
Orientations

ID	Dip / Direction
1	59 / 251
2	23 / 200
3	28 / 060
4	79 / 192
5	82 / 323
6	79 / 114
7	80 / 120

Equal Angle
Lower Hemisphere
1 Poles
1 Entries

Representación de las discontinuidades de la Estación Geomecánica EGT-II

Representación de las discontinuidades de la Estación Geomecánica EGT-III

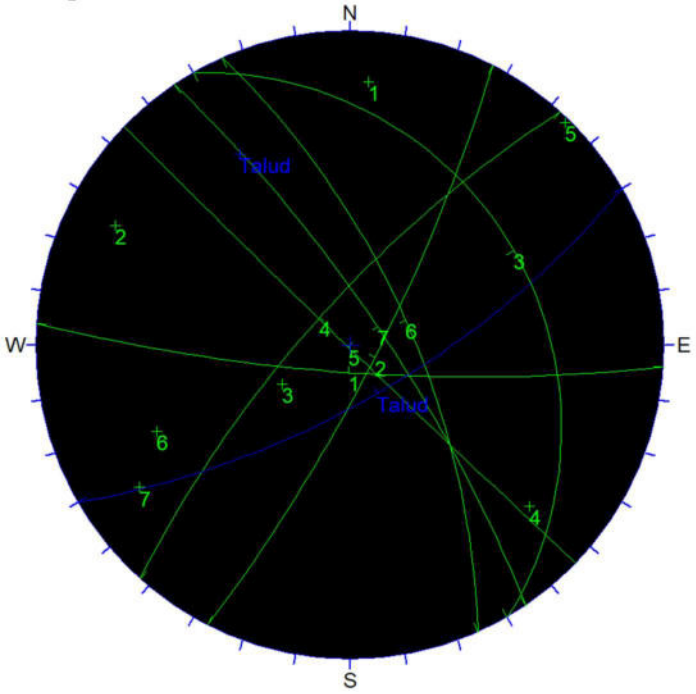


Orientations

ID	Dip / Direction
1	38 / 292
2	81 / 325
3	65 / 096
4	35 / 237
5	77 / 156
6	74 / 275
7	64 / 216
8	70 / 150

Equal Angle
Lower Hemisphere
1 Poles
1 Entries

Representación de las discontinuidades de la Estación Geomecánica EGT-IV



Orientations

ID	Dip / Direction
1	80 / 184
2	80 / 117
3	28 / 060
4	75 / 312
5	89 / 224
6	68 / 066
7	78 / 056
8	70 / 150

Equal Angle
Lower Hemisphere
1 Poles
1 Entries

ANEXO 04

Valores de RQD para cálculo del RMR en la estación EG-01

PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN - RMR BÁSICO									
1	RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA	INDICE DE LA CARGA PUNTUAL	> 10 Mpa	4-10 Mpa	2 - 4 Mpa	1 - 2 Mpa	Para Rangos bajos se prefiere compresión uniaxial.		
		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL	> 250 Mpa	100 - 250 Mpa	50 - 100 Mpa	25 - 50 Mpa	5-25 Mpa	1-5 Mpa	<1 Mpa
	Valoración		15	12	7 (9)	4	2	1	0
2	INDICE DE CALIDAD DE ROCA RQD		90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50 %	<25%		
	Valoración		20	17 (15)	13	8	3		
3	ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES		> 2 m.	0,6 - 2 m.	0.2 - 0.6 m.	0,06 - 0,2 m.	< 0,06 m.		
	Valoración		20	15	10 (9)	8	5		
4	CONDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES		Superf. Muy rugosas. Sin continuidad. Sin separaciones. Sin paredes alteradas.	Superf. Ligeramente rugosas. Abertura < 1 mm. Paredes ligeramente alteradas	Superf. Ligeramente rugosas Abertura <1 mm. Paredes fuertemente alteradas.	Espejos de falla o Relleno falla< 5 mm. o Aberturas 1-5 mm continuas.	Relleno Blando > 5 mm. o Aberturas > 5 mm Continuas.		
	Valoración		30	25	20 (14)	10	0		
5	AGUA FREATICA	Cantidad de infiltración por 10 m de Afloramiento	Nulo	< 10 litros/min.	10 - 25 litros/min.	25 - 125 litros/min.	>125 litros/min.		
		(Presión de agua en la junta) / (Esfuerzo principal o mayor)	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 -0.5	> 0.5		
		CONDICIÓN GENERAL	Totalmente Seco	Lig. Humedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	Valoración		15	10	7	4	0		

Valores de RQD para cálculo del RMR en la estación EG-02

PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN - RMR BÁSICO									
1	RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA	INDICE DE LA CARGA PUNTUAL	> 10 Mpa	4-10 Mpa	2 - 4 Mpa	1 - 2 Mpa	Para Rangos bajos se prefiere compresión uniaxial.		
		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL	> 250 Mpa	100 - 250 Mpa	50 - 100 Mpa	25 - 50 Mpa	5-25 Mpa	1-5 Mpa	<1 Mpa
	Valoración		15	12	7 (9)	4	2	1	0
2	INDICE DE CALIDAD DE ROCA RQD		90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50 %	<25%		
	Valoración		20	17 (15)	13	8	3		
3	ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES		> 2 m.	0,6 - 2 m.	0.2 - 0.6 m.	0,06 - 0,2 m.	< 0,06 m.		
	Valoración		20	15	10 (9)	8	5		
4	CONDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES		Superf. Muy rugosas. Sin continuidad. Sin separaciones. Sin paredes alteradas.	Superf. Ligeramente rugosas. Abertura < 1 mm. Paredes ligeramente alteradas	Superf. Ligeramente rugosas Abertura <1 mm. Paredes fuertemente alteradas.	Espejos de falla o Relleno falla< 5 mm. o Aberturas 1-5 mm continuas.	Relleno Blando > 5 mm. o Aberturas > 5 mm Continuas.		
	Valoración		30	25	20 (14)	10	0		
5	AGUA FREATICA	Cantidad de infiltración por 10 m de Afloramiento	Nulo	< 10 litros/min.	10 - 25 litros/min.	25 - 125 litros/min.	>125 litros/min.		
		(Presión de agua en la junta) / (Esfuerzo principal o mayor)	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 -0.5	> 0.5		
		CONDICIÓN GENERAL	Totalmente Seco	Lig. Humedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	Valoración		15	10	7	4	0		

Valores de RQD para cálculo del RMR en la estación EG-03

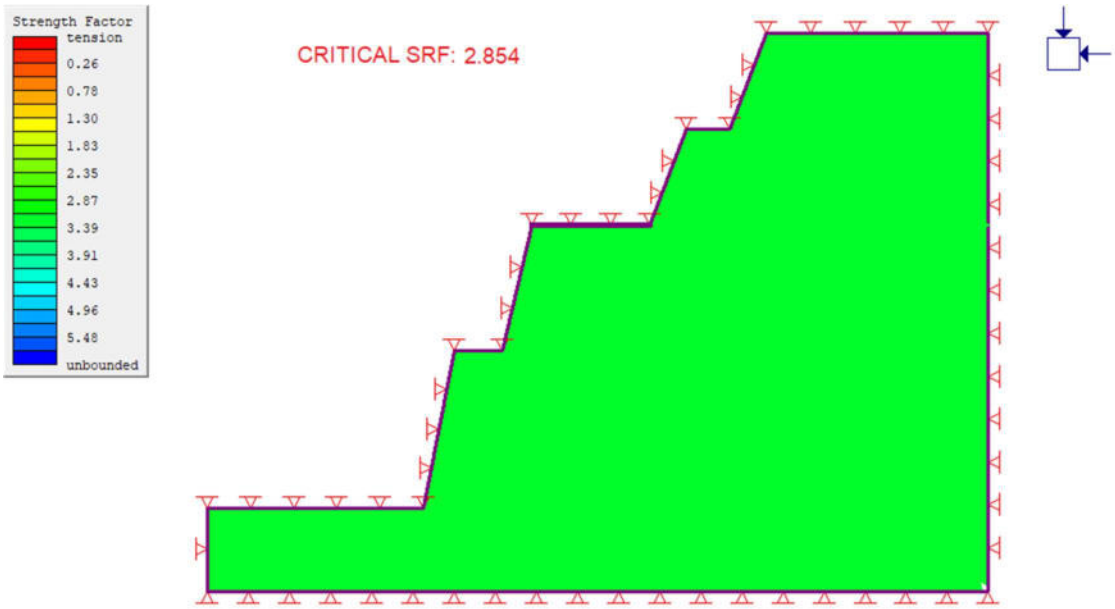
PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN - RMR BÁSICO									
1	RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA	INDICE DE LA CARGA PUNTUAL	> 10 Mpa	4-10 Mpa	2 - 4 Mpa	1 - 2 Mpa	Para Rangos bajos se prefiere compresión uniaxial.		
		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL	> 250 Mpa	100 - 250 Mpa	50 - 100 Mpa	25 - 50 Mpa	5-25 Mpa	1-5 Mpa	<1 Mpa
	Valoración		15	12	7 (9)	4	2	1	0
2	INDICE DE CALIDAD DE ROCA RQD		90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50 %	<25%		
	Valoración		20	17 (15)	13	8	3		
3	ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES		> 2 m.	0,6 - 2 m.	0.2 - 0.6 m.	0,06 - 0,2 m.	< 0,06 m.		
	Valoración		20	15	10 (9)	8	5		
4	CONDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES		Superf. Muy rugosas. Sin continuidad. Sin separaciones. Sin paredes alteradas.	Superf. Ligeramente rugosas. Abertura < 1 mm. Paredes ligeramente alteradas	Superf. Ligeramente rugosas Abertura <1 mm. Paredes fuertemente alteradas.	Espejos de falla o Relleno falla< 5 mm. o Aberturas 1-5 mm continuas.	Relleno Blando > 5 mm. o Aberturas > 5 mm Continuas.		
	Valoración		30	25	20 (14)	10	0		
5	AGUA FREATICA	Cantidad de infriltración por 10 m de Afloramiento	Nulo	< 10 litros/min.	10 - 25 litros/min.	25 - 125 litros/min.	>125 litros/min.		
		(Presión de agua en la junta) / (Esfuerzo principal o mayor)	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 -0.5	> 0.5		
		CONDICIÓN GENERAL	Totalmente Seco	Lig. Humedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	Valoración		15	10	7	4	0		

Valores de RQD para cálculo del RMR en la estación EG-04

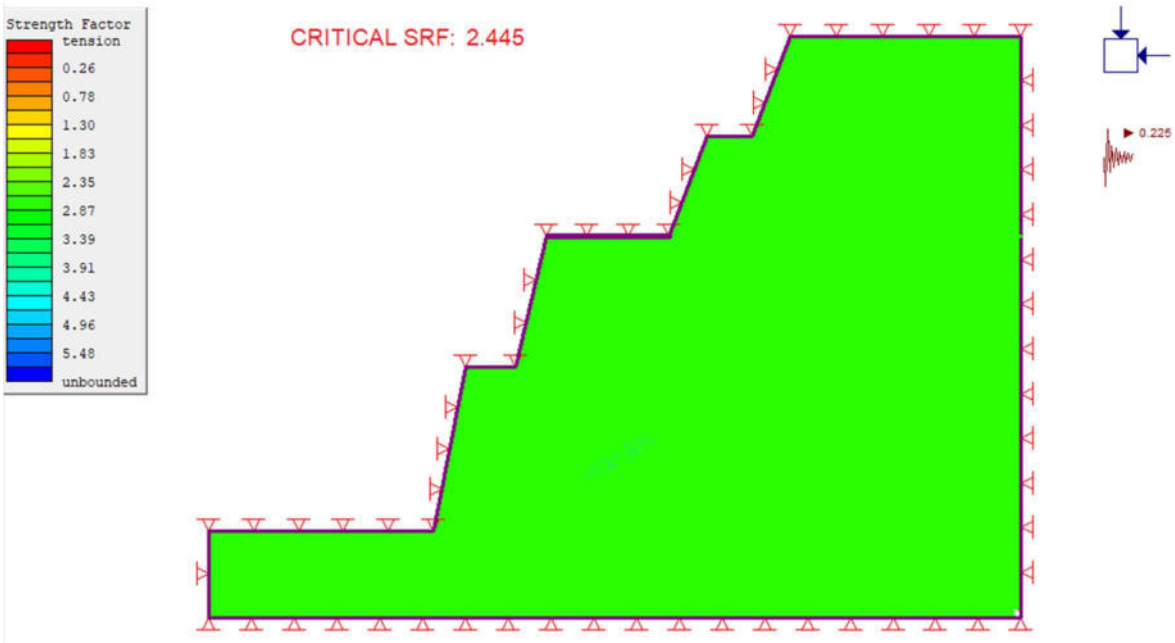
PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN - RMR BÁSICO									
1	RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA	INDICE DE LA CARGA PUNTUAL	> 10 Mpa	4-10 Mpa	2 - 4 Mpa	1 - 2 Mpa	Para Rangos bajos se prefiere compresión uniaxial.		
		RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL	> 250 Mpa	100 - 250 Mpa	50 - 100 Mpa	25 - 50 Mpa	5-25 Mpa	1-5 Mpa	<1 Mpa
	Valoración		15	12	7 (9)	4	2	1	0
2	INDICE DE CALIDAD DE ROCA RQD		90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50 %	<25%		
	Valoración		20	17 (15)	13	8	3		
3	ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES		> 2 m.	0,6 - 2 m.	0.2 - 0.6 m.	0,06 - 0,2 m.	< 0,06 m.		
	Valoración		20	15	10 (9)	8	5		
4	CONDICIONES DE LAS DISCONTINUIDADES		Superf. Muy rugosas. Sin continuidad. Sin separaciones. Sin paredes alteradas.	Superf. Ligeramente rugosas. Abertura < 1 mm. Paredes ligeramente alteradas	Superf. Ligeramente rugosas Abertura <1 mm. Paredes fuertemente alteradas.	Espejos de falla o Relleno falla< 5 mm. o Aberturas 1-5 mm continuas.	Relleno Blando > 5 mm. o Aberturas > 5 mm Continuas.		
	Valoración		30	25	20 (14)	10	0		
5	AGUA FREATICA	Cantidad de infriltración por 10 m de Afloramiento	Nulo	< 10 litros/min.	10 - 25 litros/min.	25 - 125 litros/min.	>125 litros/min.		
		(Presión de agua en la junta) / (Esfuerzo principal o mayor)	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 -0.5	> 0.5		
		CONDICIÓN GENERAL	Totalmente Seco	Lig. Humedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo		
	Valoración		15	10	7	4	0		

ANEXO 05

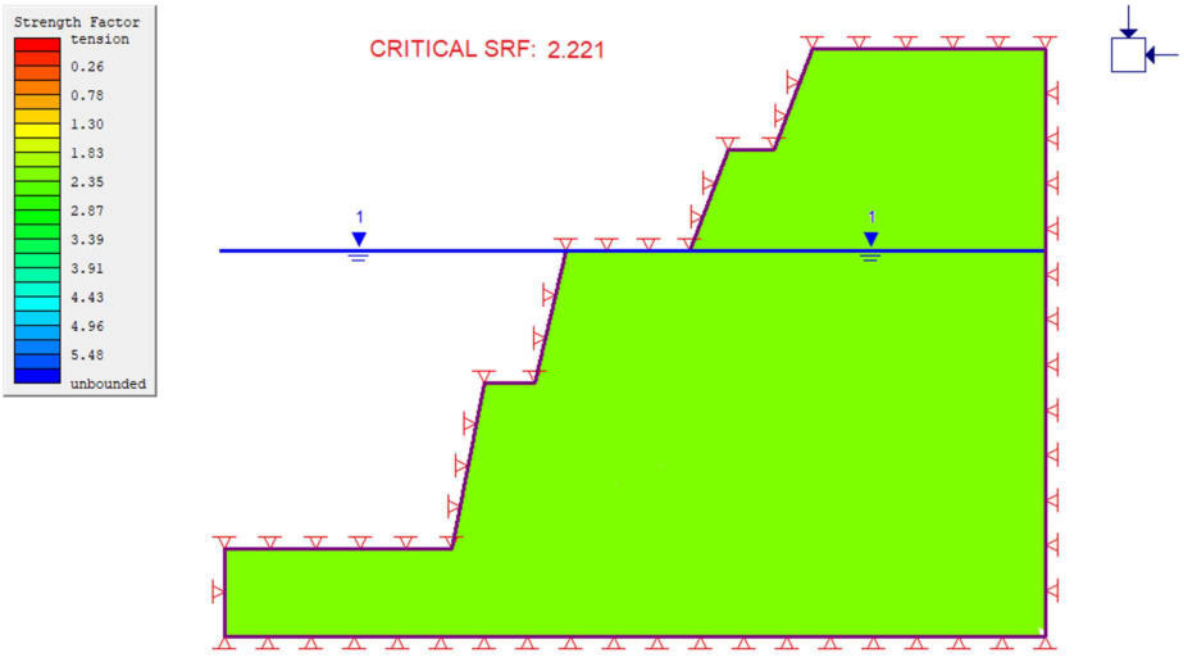
Cálculo del Factor de Seguridad con Elementos finitos para condiciones estáticas



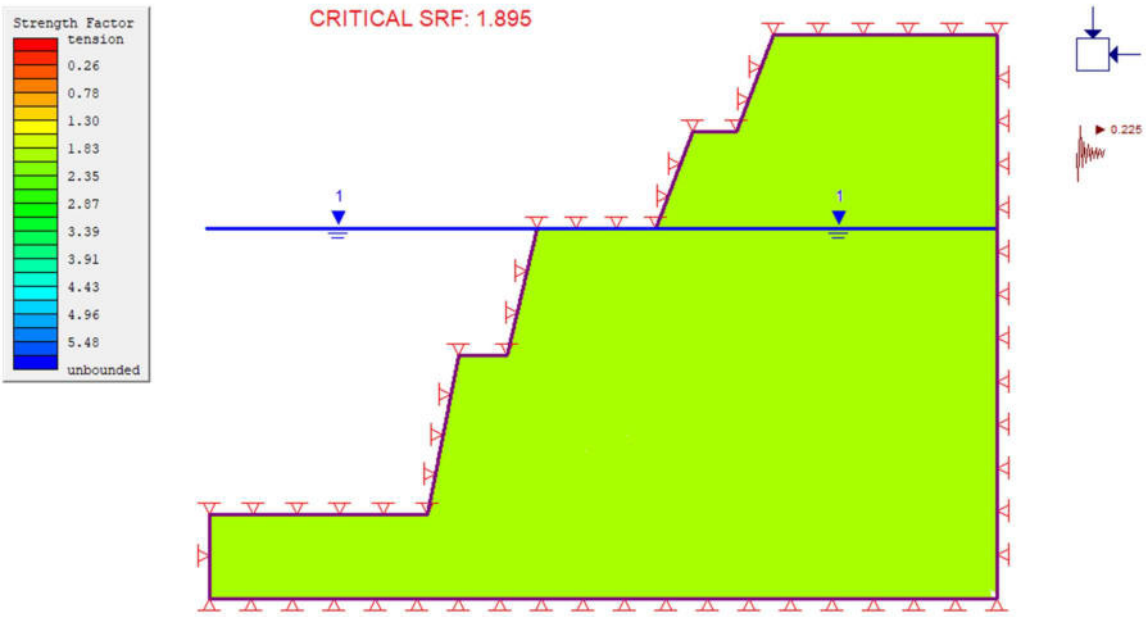
Cálculo del Factor de Seguridad con Elementos finitos para condiciones pseudoestáticas



Cálculo del Factor de Seguridad con Elementos finitos para condiciones estáticas saturado

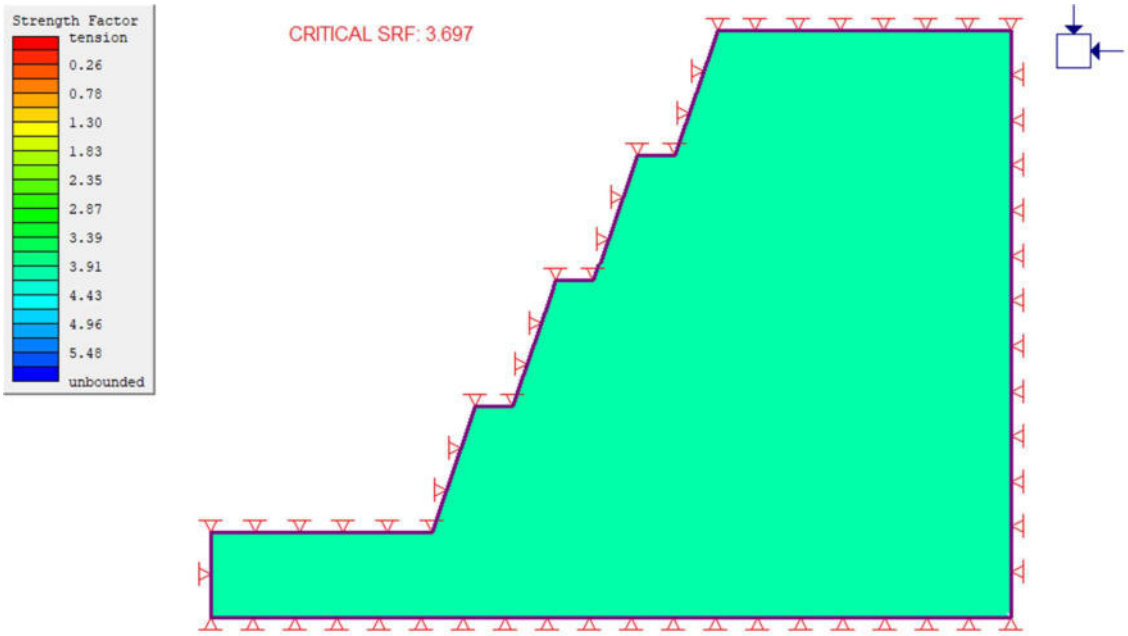


Cálculo del Factor de Seguridad con Elementos finitos para condiciones pseudoestáticas saturado

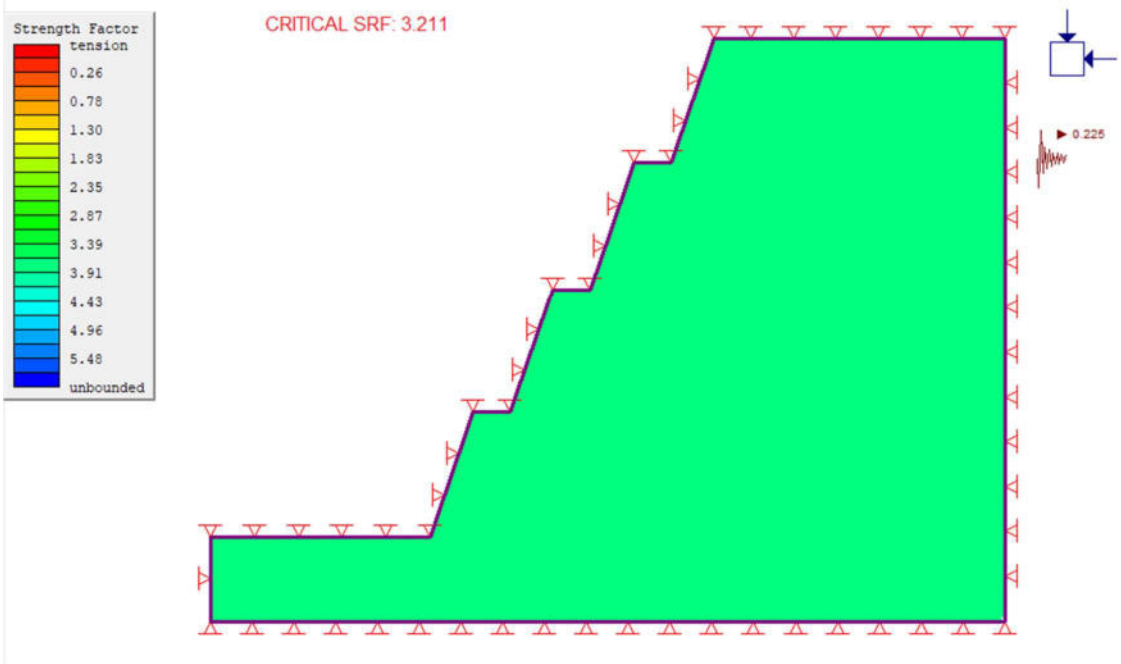


ANEXO 06

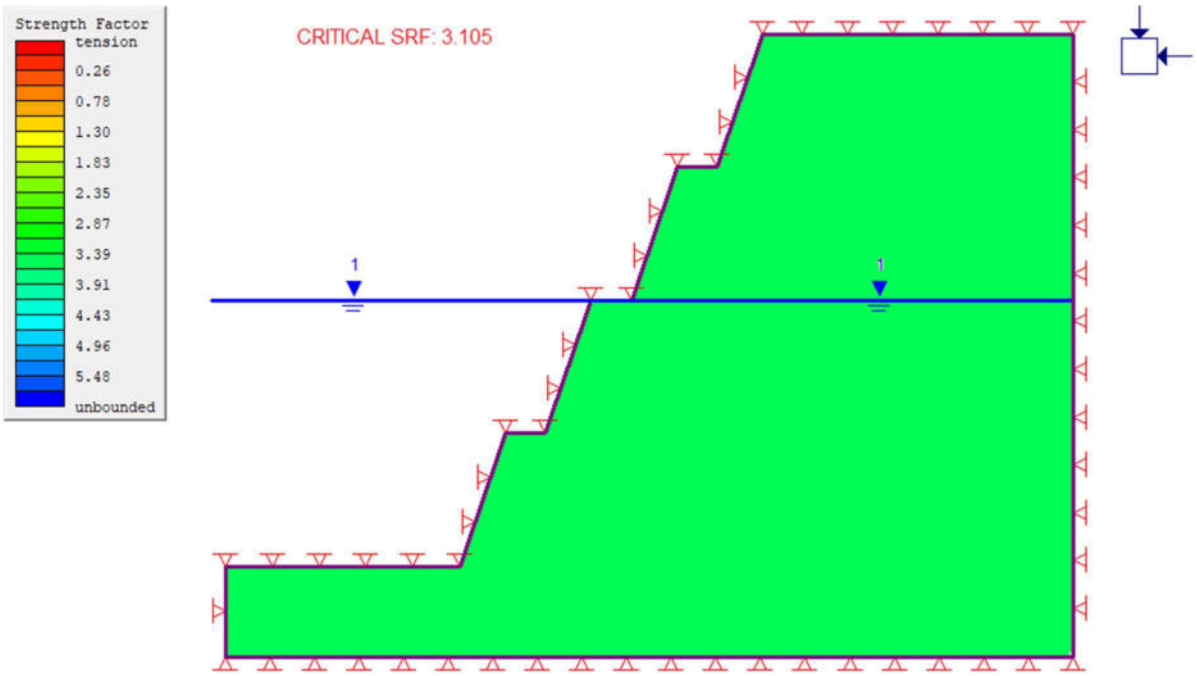
Cálculo del Factor de Seguridad con Elementos finitos para condiciones estáticas



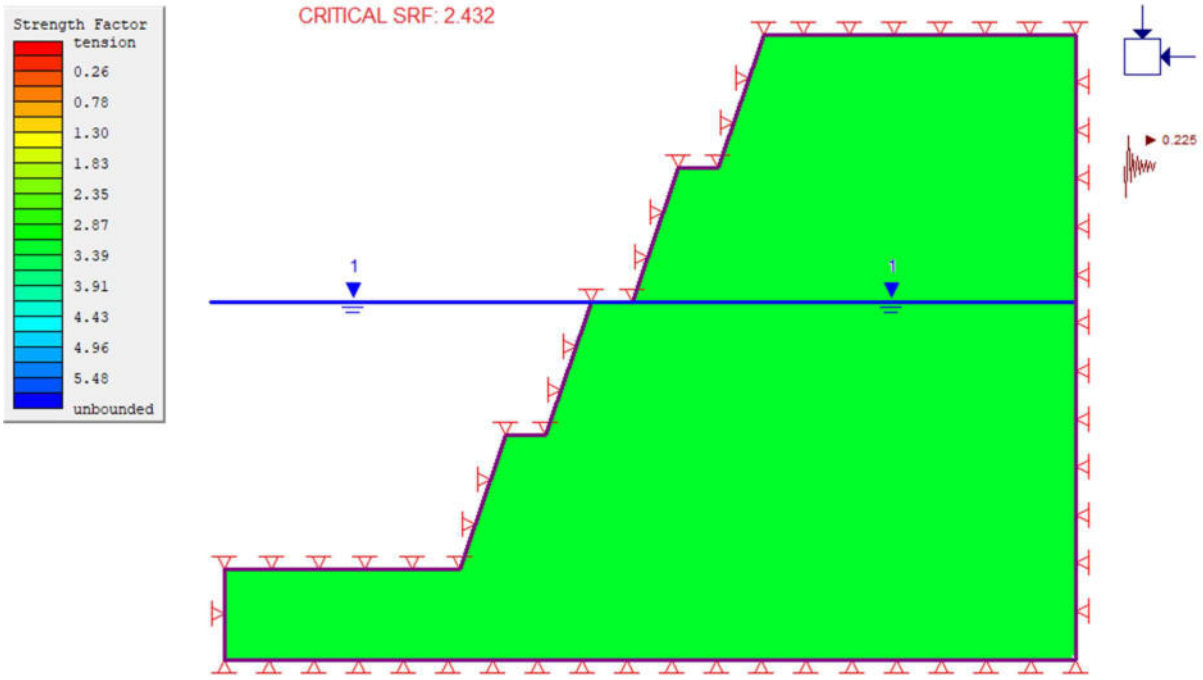
Cálculo del Factor de Seguridad con Elementos finitos para condiciones pseudoestáticas



Cálculo del Factor de Seguridad con Elementos finitos para condiciones estáticas saturado



Cálculo del Factor de Seguridad con Elementos finitos para condiciones pseudoestáticas saturado



FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UNAM

Formulario de autorización para la publicación electrónica en la página web del Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua, de conformidad con la Ley N° 30035 Ley que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto y Resolución de Comisión Organizadora N° 041-2022-UNAM que aprueba el Reglamento que regula el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

1. DATOS DEL AUTOR

Nombres y Apellidos	: Victor Hugo Quispe Flores
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N°	: 72479689
Correo electrónico	: victorhqf98@gmail.com
Teléfono/Celular	: 969825625

2. GRADO, TITULO O ESPECIALIZACIÓN (Marque con una X)

Bachiller	Título Profesional	Magister	Doctor	Segunda Especialidad
	X			

3. TIPO DE PUBLICACIÓN (Marque con una X)

a) Articulo ( )
b) Tesis de pregrado (**X**)
c) Tesis de Maestría ( )
d) Tesis de Doctorado ( )
e) Monografía ( )
f) Reporte de caso científico o hallazgos ( )
g) Libro ( )
h) Parte de un libro ( )
i) Revisión ( )
j) Conferencia ( )
k) Presentación ( )
l) Artículo preliminar ( )
m) Articulo antes de ser publicado ( )
n) Artículo de prensa ( )
o) Documentos internos ( )
p) Imagen ( )
q) Documentos técnicos ( )
r) Ponencias presentadas en eventos científicos (Jornada, Congreso, Simposio Conferencias, etc.) ( )
s) Informes de suficiencia profesional ( )
t) Patentes producidas por académicos/as ( )

4. TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (Marque con una X)

a) Tesis **(X)**
b) Trabajo de Investigación **( )**
c) Trabajo de suficiencia profesional **( )**
d) Trabajo académico **( )**

5. DATOS DE LA PUBLICACION

a) Título: MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD ESTÁTICA Y SÍSMICA DE UNA PRESA DE RELAVES MINEROS MEDIANTE MODELACIÓN GEOTÉCNICA EN PHASE²
b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra : https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html) : **2.07.05**
c) Fecha de publicación : 13/05/2026

6. DATOS DEL ASESOR:

a) Nombres y Apellidos : Christ Jesus Barriga Paria
b) DNI/Pasaporte/Cédula : 44331713
c) ORCID : 0000-0002-7130-9297

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 72479689
NOMBRES Y APELLIDOS : Victor Hugo Quispe Flores

LICENCIAS

Licencia Estándar

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

Con la autorización de depósito da mi trabajo de investigación, otorgo a la Universidad Nacional de Moquegua, una Licencia No Exclusiva para reproducir. distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi trabajo de investigación (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios provistos por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Institucional Digital de la UNAM, Colección de Tesis, entre otros, en el Perú y en el extranjero, por el tiempo y veces que considere necesarias, y libre de remuneraciones.

En virtud de dicha Licencia, la UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA, podrá reproducir mi trabajo de investigación en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con los propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que el trabajo de investigación es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, o coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicho trabajo de investigación no infringe derechos de autor de terceras personas.

La UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA consignara el nombre del/los autor/es del trabajo de investigación, y no le hará ninguna modificación más de la permitida en la presente licencia.

Autorizo el depósito (marque con una X).

(X) **SI autorizo que se deposite inmediatamente.**

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 72479689
NOMBRES Y APELLIDOS : Victor Hugo Quispe Flores
FECHA : 13/05/2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN / TESIS / TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Yo, Victor Hugo Quispe Flores, bachiller de la Escuela Profesional de: Ingeniería de Minas, de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado (a) con DNI: Nº72479689, autor(a) de la Tesis / Trabajo de suficiencia profesional titulado: "MEJORAMIENTO DE LA ESTABILIDAD ESTÁTICA Y SÍSMICA DE UNA PRESA DE RELAVES MINEROS MEDIANTE MODELACIÓN GEOTÉCNICA EN PHASE2"
Declaro bajo juramento que:

1. El trabajo de investigación es auténtico, siendo resultado de mi trabajo personal, que no se ha copiado, que no se ha utilizado ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones diversas, sacadas de cualquier tesis, obra, artículo, memoria, etc., (en versión digital o impresa), sin mencionar de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derechos de autor. Por tanto, el trabajo de investigación no ha sido plagiado total ni parcialmente.
2. El trabajo de investigación no ha sido autoplagiada, es decir, no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
3. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados y por tanto los resultados que se presentan en el trabajo de investigación constituirán aporte a la realidad investigada.

Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el trabajo de investigación, así como de los derechos sobre la obra presentada.

Moquegua, 13 de Mayo del 2026



Huella digital

Victor Hugo Quispe Flores
DNI: 72479689

Base legal: RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 194-2020-SUNEDU-02-15

VÍCTOR HUGO QUISPE FLORES

TESIS FINAL

TESIS

CONFORMIDAD DE TESIS FINAL

Universidad Nacional de Moquegua

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3515998791

Fecha de entrega
24 mar 2026, 9:29 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
24 mar 2026, 9:37 a.m. GMT-5

Nombre del archivo
TESIS_FINAL_VICTOR_QUISPE.pdf

Tamaño del archivo
5.2 MB

117 páginas

28.984 palabras

186.329 caracteres

UNAM

Firmado digitalmente por BARRIGA PARIA Christ Jesus FAU 20449347448 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 24.03.2026 09:38:25 -05:00

13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 9 palabras)

Exclusiones

- N.º de fuente excluida

Fuentes principales

10% Fuentes de Internet
3% Publicaciones
6% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

10% Fuentes de Internet
3% Publicaciones
6% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Moquegua 3%

2 Internet
documents.mx <1%

3 Internet
cybertesis.uni.edu.pe <1%

4 Internet
alicia.concytec.gob.pe <1%

5 Internet
hdl.handle.net <1%

6 Internet
repositorio.urp.edu.pe <1%

7 Internet
repositorio.uni.edu.pe <1%

8 Internet
www.slideshare.net <1%

9 Internet
www.coursehero.com <1%

10 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Colombia <1%

11 Internet
repositorio.upla.edu.pe <1%

12 Internet
1library.co <1%

13 Trabajos del estudiante
Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC <1%

14 Internet
repositorio.continental.edu.pe <1%

15 Internet
repositorio.unc.edu.pe <1%

16 Trabajos del estudiante
uni <1%

17 Internet
repositorio.uchile.cl <1%

18 Internet
repositorio.unsaac.edu.pe <1%

19 Internet
repositorioacademico.upc.edu.pe <1%

20 Internet
www.dspace.uce.edu.ec <1%

21 Internet
futur.upc.edu <1%

22 Internet
repositorio.unam.edu.pe <1%

23 Trabajos del estudiante
Universidad Autónoma de Nuevo León <1%

24 Trabajos del estudiante
Universidad Ricardo Palma <1%

25 Internet
fdocuments.es <1%

26 Publicación
KNIGHT PIESOLD CONSULTORES S.A.. "MEIA del Proyecto Desarrollo Tajo Cerro N... <1%

27 Internet
qdoc.tips <1%

28 Internet
repositorio.unap.edu.pe <1%

29 Internet
repositorio.unasam.edu.pe <1%

30 Publicación
KNIGHT PIESOLD CONSULTORES S.A.. "EIA del Proyecto Plataforma de Lixiviación ... <1%

31 Trabajos del estudiante
Universidad Internacional de la Rioja <1%

32 Internet
radioondaazul.com <1%

33 Internet
repositorio.unsa.edu.pe <1%

34 Internet
www.minem.gob.pe <1%

35 Internet
www.researchgate.net <1%

36 Publicación
Silva Castro, Jhonny Alexander | Pinzón Lizcano, Wilson. "El Enfoque Ciencia Tecn... <1%

37 Trabajos del estudiante
Universidad Privada del Norte <1%

38 Internet
es.slideshare.net <1%

39 Internet
renati.sunedu.gob.pe <1%

40	Internet	
kupdf.net		<1%
41	Publicación	
JCI INGENIERIA & SERVICIOS AMBIENTALES S.A.C.. "Tercer ITS de la Unidad Miner...		<1%
42	Publicación	
KNIGHT PIESOLD CONSULTORES S.A.. "EIA del Proyecto Constancia-IGA0000697", ...		<1%
43	Internet	
idoc.pub		<1%
44	Internet	
issuu.com		<1%
45	Internet	
repositorio.uancv.edu.pe		<1%
46	Internet	
repositorio.ujcm.edu.pe		<1%
47	Internet	
repositorio.unjbg.edu.pe		<1%
48	Internet	
www.osinergmin.gob.pe		<1%
49	Internet	
www.scribd.com		<1%
50	Trabajos del estudiante	
Universidad Europea de Madrid		<1%
51	Trabajos del estudiante	
Universitat Oberta de Catalunya		<1%
52	Internet	
diariodepuebla.com.mx		<1%
53	Trabajos del estudiante	
Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga		<1%

54	Internet	
repositorio.unfv.edu.pe		<1%
55	Internet	
repositorio.unica.edu.pe		<1%
56	Trabajos del estudiante	
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurimac		<1%
57	Trabajos del estudiante	
Universidad de Caldas		<1%
58	Internet	
arquitectura.uasnet.mx		<1%
59	Internet	
www.fiscalweb.net		<1%
60	Internet	
www.grafiati.com		<1%
61	Internet	
www.pscm-psoe.com		<1%
62	Publicación	
Miranda Miranda, Denis Alex. "Caracterización geomecánica para el sostenimient...		<1%
63	Publicación	
Moreno Rondoy, Rita Clara. "Evaluación de riesgos en la estabilidad de taludes de...		<1%
64	Trabajos del estudiante	
Submitted on 1689670815184		<1%
65	Internet	
bdtd.ibict.br		<1%
66	Internet	
repositorio.unprg.edu.pe:8080		<1%
67	Internet	
www.ministeriodesalud.go.cr		<1%

68 Internet
www.siia.ugto.mx <1%

69 Internet
www.termpaperwarehouse.com <1%

70 Publicación
Carlos Farfan, Miguel angel|Chavez Balbuena, Ursula|Horna Ruiz, Ruben|Saco M... <1%

71 Publicación
Gabriel Alejandro Castillo Mendoza, José Marcelo Ortiz Jiménez. "Diagnosis of ane... <1%

72 Publicación
Gurcan, H. M, and A R. Ahmed. "Frequency of Adverse Events Associated with Intr... <1%

73 Publicación
Gómez, Fausto Andrés Molina. "Liquefaction Resistance Assessment of the TP-Lis... <1%

74 Publicación
Jahuira Cusi, Nilton. "El control interno y su relación con la gestión de tesorería e... <1%

75 Publicación
Libia María Arrieta Uribe, Anderson Gañán Moreno. "Impact of Stress on Job Perf... <1%

76 Publicación
Macedo Atamari, Jhonatan Thonny. "Aplicación de los juegos recreativos en la pre... <1%

77 Publicación
SNC LAVALIN PERU S.A.. "Modificación del Plan de Cierre de Minas de la Unidad M... <1%

78 Publicación
UMBRELLA ECOCONSULTING S.A.C.. "EIA-SD del Proyecto Central Hidroeléctrica H... <1%

79 Internet
dspace.unl.edu.ec <1%

80 Internet
grad.uprm.edu <1%

81 Internet
pt.scribd.com <1%

82 Internet
pt.slideshare.net <1%

83 Internet
repositorio.udh.edu.pe <1%

84 Internet
repositorio.uladech.edu.pe <1%

85 Internet
repositorio.ulc.edu.pe <1%

86 Internet
repositorio.undac.edu.pe <1%

87 Internet
tesis.pucp.edu.pe <1%

88 Trabajos del estudiante
uncedu <1%

89 Internet
upcommons.upc.edu <1%

90 Internet
www.geoconsult.es <1%

91 Internet
www.oalib.com <1%

92 Internet
www.semr.es <1%

93 Publicación
D. Roca Romalde, D. Lacroix, V.L. Caja López, I. Proubasta Renart, J.A. Planell Esta... <1%

94 Trabajos del estudiante
Facultad de Psicología <1%

95 Publicación
Fernando Mendoza Maldonado. "Shear strength variation of tailings material due... <1%

96 Publicación

García, . "Long term performance", Dam Maintenance and Rehabilitation II, 2010. <1%

97 Publicación

HORIZONTE CONSULTORES S.R.L.. "EIA del Proyecto Relleno Sanitario y Planta de ... <1%

98 Publicación

Ordonez Rojas, Gerardo Manuel. "Elaboracion de un sistema para analisis de falla... <1%

99 Publicación

THE ANDEAN SUSTAINABLE GROUP S.A.C. - THE ANDEAN SG S.A.C.. "EIA del Proyec... <1%

100 Publicación

WALSH PERU S.A. INGENIEROS Y CIENTIFICOS CONSULTORES. "PAMA de la UP Toq... <1%

101 Internet

apirepositorio.unh.edu.pe <1%

102 Internet

de.slideshare.net <1%

103 Internet

docplayer.es <1%

104 Internet

doku.pub <1%

105 Internet

fdocuments.ec <1%

106 Internet

oa.upm.es <1%

107 Internet

repositorio.upt.edu.pe <1%

108 Internet

vbook.pub <1%

109 Internet

www.egu-media.net <1%

110 Internet

www.ptolomeo.unam.mx:8080 <1%

111 Internet

www.scielo.br <1%

112 Internet

www.yumpu.com <1%

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 442-2026-CU

Moquegua, 30 de junio de 2026

VISTOS:

La Resolución de Consejo de Facultad N° 234-2026-CF-FAIN-UNAM, emitida por la Decana de la Facultad de Ingenierías; el Informe N° D0341-2026-UNAM-R-FAIN, emitida por la Decana de la Facultad de Ingenierías, el Informe Técnico N° D0079-2026-SG-GT, emitido por la Especialista Administrativo II de Grados y Títulos; el Informe N° D0304-2026-UNAM-R-SG, emitido por el Secretario General de la UNAM; el Proveído N° 3052-2026-R, emitido por el señor Rector; el Acuerdo del Pleno del Consejo Universitario de Sesión Extraordinaria N° 28-2026-SE-CU-UNAM, de fecha 24 de junio de 2026; y,

CONSIDERANDO:

Que, conforme al 4to párrafo del artículo 18, de la Constitución Política del Perú, dispone que cada Universidad es autónoma en su régimen normativo, de gobierno, académico, administrativo y económico. Y el artículo 8° de la Ley N° 30220-Ley Universitaria, establece que la referida autonomía inherente a las Universidades, se ejerce de conformidad con la Constitución y demás normativa aplicable. Concordante con el artículo 1, de la Ley N° 31520, Ley que restablece la autonomía y la institucionalidad de las universidades peruanas, así como la Ley N° 32141, Ley que modifica la Ley N° 30220-Ley Universitaria, a fin de fortalecer la institucionalidad de las Universidades Públicas licenciadas;

Que, el Artículo 58, de la Ley N° 30220-Ley Universitaria, establece que el Consejo Universitario es el máximo órgano de gestión, dirección y ejecución académica y administrativa de la Universidad. Concordante con el artículo 18° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, aprobado bajo Resolución de Asamblea Universitaria N° 015-2025-AU-UNAM;

Que, el artículo 59 de la Ley Universitaria-Ley N° 30220, establece las atribuciones del Consejo Universitario, y específicamente el numeral 59.9, establece; Conferir los grados académicos y los títulos profesionales aprobados por las Facultades y Escuela de Posgrado, así como otorgar distinciones honoríficas y reconocer y revalidar los estudios, grados y títulos de universidades extranjeras, cuando la universidad está autorizada por la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria. Concordante con el numeral 14, del artículo 20° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua;

Que, mediante Resolución de Asamblea Universitaria N° 006-2026-AU, de fecha 20 de abril de 2026, se aprobó la incorporación de la Disposición Transitoria N° 22 al Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, referido a la excepción para la emisión de los grados académicos de bachiller y títulos profesionales consignando la denominación de "Facultad de Ingeniería y Arquitectura";

Que, mediante la Resolución de Consejo de Facultad N° 234-2026-CF-FAIN-UNAM, de fecha 04 de junio de 2026, el Consejo de Facultad de Ingenierías aprobó el otorgamiento del Título Profesional de Ingeniero de Minas, por la modalidad de Tesis, a dos (02) Bachilleres de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua, de acuerdo al siguiente detalle: MANUEL JESUS CABAÑAS LOPEZ y VICTOR HUGO QUISPE FLORES;

Que, mediante Informe N° D0341-2026-UNAM-R-FAIN, de fecha 10 de junio de 2026, la Decana de la Facultad de Ingenierías, remite a Secretaría General la Resolución de Consejo de Facultad N° 234-2026-CF-FAIN-UNAM, de fecha 04 de junio de 2026;

Que, mediante Informe Técnico N° D0079-2026-SG-GT de fecha 16 de junio de 2026, e Informe N° D0304-2026-UNAM-R-SG de fecha 16 de junio de 2026, el Secretario General de la UNAM, remite al Rectorado los expedientes para el trámite de Título Profesional de Ingeniero de Minas a los Bachilleres: MANUEL JESUS CABAÑAS LOPEZ y VICTOR HUGO QUISPE FLORES de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quienes se encuentran aptos para la expedición del Título Profesional de Ingeniero de Minas, al haber cumplido satisfactoriamente con los requisitos legales y reglamentarios, exigidos en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, razón por la cual, el señor Secretario General incluye dichos expedientes como punto de agenda para ser tratado en Sesión Extraordinaria de Consejo Universitario de fecha 24 de junio de 2026;

Que, el artículo 44° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria señala que las universidades otorgan los grados académicos de Bachiller, Maestro, Doctor y los Títulos Profesionales que correspondan, a nombre de la Nación (...). Asimismo, la Ley N° 31803, modifica el artículo en mención adicionando; La Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria (SUNEDU) determina los criterios, así como establece y supervisa el procedimiento administrativo para el reconocimiento de grados y títulos otorgados en el extranjero, en el marco de la normativa vigente;

Que, el numeral 45.2 del artículo 45° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, precisa los requisitos mínimos para la obtención del título profesional, como son: el grado de Bachiller y la aprobación de una tesis o trabajo de suficiencia profesional. Asimismo, establece que el título profesional solo se puede obtener en la universidad en la cual se haya obtenido el grado de bachiller;

Domicilio Legal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe

Universidad Nacional de Moquegua

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO

N° 442-2026-CU

Moquegua, 30 de junio de 2026

Que, mediante Resolución de Comisión Organizadora N° 1153-2021-UNAM, se aprobó el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, el mismo que fue modificado a través de las Resoluciones de Comisión Organizadora N° 410; 453 y 890-2022, N° 880-2023-UNAM y N° 081, 484-2024-UNAM el cual establece los requisitos y norma los procedimientos para la obtención de los grados académicos y títulos profesionales conferidos por esta Casa Superior de Estudios;

Que, bajo el amparo de los considerandos precedentes, el Pleno del Consejo Universitario en Sesión Extraordinaria N° 28-2026-SE-CU-UNAM, de fecha 24 de junio de 2026, emitió, el siguiente, Acuerdo, POR UNANIMIDAD: CONFERIR, a nombre de la Nación el Título Profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de Tesis a los Bachilleres: MANUEL JESUS CABAÑAS LOPEZ y VICTOR HUGO QUISPE FLORES, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua;

En uso de las facultades y atribuciones conferidas por el Art. 18, de la Constitución Política del Perú, la Ley N° 30220 Ley Universitaria, el Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, y a lo acordado por el pleno del Consejo Universitario;

SE RESUELVE:

ARTÍCULO 1°: CONFERIR, A NOMBRE DE LA NACIÓN a los Bachilleres

- **MANUEL JESUS CABAÑAS LOPEZ**
- **VICTOR HUGO QUISPE FLORES**

El **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS.**

Por la modalidad de TESIS, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 2°: ENCARGAR, al Secretario General de la UNAM, para que realice las acciones pertinentes relacionadas con la inscripción correspondiente en el Registro de Grados y Títulos de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria - SUNEDU.

ARTÍCULO 3°: DISPONER, el cumplimiento de la presente Resolución a todas las dependencias de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 4°: DISPONER la publicación de la presente resolución en el Portal Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua www.unam.edu.pe

REGÍSTRESE, PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE;

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA SECRETARIA GENERAL

MTRO. JOSE LUIS PACHECO CACERES
SECRETARIO GENERAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA CONSEJO UNIVERSITARIO

DR. HUGO RUBEN MARCA MAQUERA
RECTOR
PRESIDENTE DEL CONSEJO UNIVERSITARIO

DISTRIBUCION:
VRA,
VRI,
FAIN,
EPIM,
GyT
DASA,
OTI
Interesado,
C.c. Arch.

Domicilio Legal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe