

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**“Evaluación de los criterios de diseño para garantizar la estabilidad
física para el cierre del depósito de relave Huaybillo de la Unidad
Minera el Cofre ”**

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO DE MINAS

PRESENTADO POR:

Bach. Jose Luis TOMATEO VARGAS

Asesor:

Msc. Ing. José Agustín ESPARTA SÁNCHEZ

AYACUCHO - PERÚ

2023

RESUMEN

La presente tesis titulada “**EVALUACION DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO PARA GARANTIZAR LA ESTABILIDAD FISICA PARA EL CIERRE DEL DEPÓSITO DE RELAVE HUAYBILLO DE LA UNIDAD MINERA EL COFRE**”, tiene por objetivo Realizar la evaluación de los criterios de diseño para garantizar la estabilidad física para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023, la metodología para el desarrollo de esta investigación consiste en un tipo de investigación aplicada, para la realización de esta investigación, se abordará la importancia de la evaluación de los criterios de diseño en el contexto específico del depósito de relave Huaybillo. Se analizarán los aspectos teóricos, prácticos y metodológicos relacionados con la evaluación de la estabilidad física, teniendo en cuenta la mecánica de suelos, la hidrogeología, la geología estructural y otros factores relevantes. Los resultados muestran que la evaluación de la estabilidad física para el cierre del depósito de relave Huaybillo en sus condiciones estáticas de 1.8 y pseudoestáticas es de 1.2, considerando estable el depósito de relave Huaybillo para su etapa de cierre.

Palabras clave: Factor de seguridad , Analisis estatico, Analisis pseudoestatico

INTRODUCCIÓN

La evaluación de los criterios de diseño para garantizar la estabilidad física en el cierre del depósito de relave Huaybillo de la Unidad Minera El Cofre es un tema de vital importancia en la industria minera y ambiental. El cierre adecuado de un depósito de relaves es fundamental para prevenir riesgos ambientales, proteger la seguridad de las comunidades urbanas y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la operación minera.

El depósito de relaves Huaybillo, ubicado en la Unidad Minera El Cofre, representa un desafío particular debido a su tamaño, complejidad geotécnica y ubicación cercana a áreas sensibles. Es esencial evaluar y analizar exhaustivamente los criterios de diseño para garantizar su estabilidad física y minimizar los riesgos asociados, tanto durante la operación minera como en el período de cierre y post-cierre.

En esta investigación, se abordará la importancia de la evaluación de los criterios de diseño en el contexto específico del depósito de relave Huaybillo. Se analizarán los aspectos teóricos, prácticos y metodológicos relacionados con la evaluación de la estabilidad física, teniendo en cuenta la mecánica de suelos, la hidrogeología, la geología estructural y otros factores relevantes.

El objetivo principal es identificar y evaluar los criterios de diseño necesarios para garantizar la estabilidad física del depósito de relaves Huaybillo, considerando los desafíos geotécnicos y ambientales específicos de la Unidad Minera El Cofre. Se busca proporcionar recomendaciones y directrices que permitan a la empresa minera tomar decisiones informadas y aplicar medidas adecuadas para garantizar un cierre seguro y ambientalmente responsable del depósito.

A través de la investigación y el análisis detallado, se espera contribuir al avance del conocimiento en el campo de la gestión de depósitos de relaves y proporcionar información valiosa para los profesionales y las autoridades responsables de la supervisión y regulación minera.

En conclusión, la evaluación de los criterios de diseño para garantizar la estabilidad física en el cierre del depósito de relave Huaybillo es un tema crucial en el ámbito de la ingeniería geotécnica y ambiental. Esta investigación se centra en abordar esta temática específica, buscando soluciones técnicas y prácticas que contribuyan a la seguridad, sostenibilidad y responsabilidad en la gestión de los depósitos de relaves mineros.

DEDICATORIA

A mi madre, que aunque ahora estás en el cielo, tu amor y cuidado siempre estarán presentes en mi corazón. Gracias por protegerme y acompañarme en cada paso de mi vida.

A mi abuela, ejemplo de valentía, entrega y compromiso con toda la familia. Tus enseñanzas y cariño han dejado una huella imborrable en mi ser.

Las amo profundamente a ambas y siempre las llevaré conmigo, como una luz que ilumina mi camino y me da fuerzas para seguir adelante.

Con todo mi amor y gratitud.

AGRADECIMIENTO

Agradezco de corazón a todas las personas que han sido parte fundamental de mi vida profesional y que han contribuido de manera significativa para que este paso en mi carrera se haga realidad. Su apoyo, orientación y compañía han sido fundamentales en este camino hacia el éxito.

En especial, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, por su amor incondicional y por estar siempre presente en cada etapa de mi desarrollo profesional. Su apoyo inquebrantable ha sido mi mayor fortaleza en los momentos difíciles y mi mayor alegría en los días más felices.

También quiero agradecer a mis colegas, mentores y amigos que han compartido conocimientos, experiencias y motivación, ayudándome a crecer y aprender cada día en el ámbito profesional.

Gracias a todos por ser parte de mi vida y por creer en mí. Su apoyo ha sido fundamental para alcanzar este logro y seguiré esforzándome para honrar su confianza y seguir creciendo en mi carrera.

¡Con gratitud y afecto sincero!

ÍNDICE GENERAL

ASESOR	ii
RESUMEN	iii
INTRODUCCIÓN.....	1
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO	4
Índice general.....	5
Índice figuras.....	8
Índice de cuadros o tablas	9
Glosario.....	10
CAPÍTULO I.....	11
Planteamiento del problema.....	11
1.1. Descripción del problema	11
1.1.1. Realidad problemática.....	11
1.2. Delimitación del problema.....	12
1.2.1. Espacial (geográfica).	12
1.2.2. Temporal.	12
1.3. Formulación del problema	13
1.3.1. Formulación del problema general	13
1.3.2. Formulación del problema específico	13
1.4. Justificación e importancia	13
Justificación teórica	13
Justificación práctica.....	14
Justificación metodológica	14
Importancia.....	15
1.5. Limitaciones de la investigación.....	15
1.6. Objetivo	15
1.6.1. Objetivos generales.....	15
1.6.2. Objetivos específicos	15
CAPITULO II	17

Marco teórico	17
2.1. Antecedentes del problema	17
2.1.1 Antecedentes de investigación	17
2.2. Bases teóricas	22
2.2.1. Geomecánica	22
2.2.1.1. Macizo rocoso.....	22
2.2.1.2. Caracterización Geomecánica.....	22
2.2.1.3. Calidad del Macizo Rcoso.....	23
2.2.2. Talud	26
2.2.2.1. Estabilidad de taludes	26
2.2.3. Factor de seguridad	27
2.2.4. Mecanismo de rotura.....	28
2.2.5. Factores Condicionantes de Inestabilidad	31
2.2.6. Criterios de Rotura.....	32
2.2.6.1. Criterio de Rotura Lineal de Mohr-Coulomb	32
2.2.6.2. Criterio de Rotura no Lineal de Hoek y Brown-2002.....	34
2.2.6.3. Linealización del Criterio de Rotura de Hoek-Brown.....	40
2.2.7. Ensayos de laboratorio	44
2.2.7.1. Ensayo de Compresión Simple	44
2.2.7.2. Ensayo triaxial.....	44
2.2.8. Métodos de calculo	45
2.2.8.1. Método de equilibrio limite	47
2.2.8.2. Condiciones de análisis	48
2.3. Marco conceptual	50
CAPITULO III	52
Metodología	52
3.1. Tipo.....	52
3.2. Enfoque.....	53
3.3. Alcance	54
3.4. Diseño de la investigación	55
3.5. Población y muestra	56
3.6. Hipotesis	56
3.6.1. Hipotesis general	56

3.6.2. Hipotesis específica	56
3.7. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional.....	58
3.8. Técnicas e instrumentos.....	59
3.9. Metodos de análisis de datos.....	60
3.10. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.	61
3.11. Desarrollo del trabajo de tesis	61
CAPITULO IV	62
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
4.1. Generalidades de la mina	62
4.1.1. Ubicación.	62
4.1.2. Accesibilidad.	63
4.2. Geología.....	63
4.3. Características geotecnicas del depósito de relave Huaybillo	67
4.4. Evaluación de estabilidad física para el cierre del depósito de relave Huaybillo	76
4.5. Estabilidad física del depósito de relave Huaybillo	77
CONCLUSIONES.....	83
RECOMENDACIONES.....	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS	87
Anexo 1: Matriz de consistencia	87
Anexo 2: Ensayos de campo	88
Anexo 3: Modelamiento en condiciones estáticas	92
Anexo 4: Modelamiento en condiciones pseudoestáticas	96

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Ubicación geográfica.....	12
Figura 2: Deslizamiento traslacional.....	28
Figura 3: Deslizamiento rotacional en material rocoso y suelo.....	29
Figura 4: Partes de un deslizamiento.....	30
Figura 5: Envolvente de rotura del criterio de Mohr-Coulomb.....	33
Figura 6: Envolvente de rotura del criterio de Hoek-Brown.....	34
Figura 7: Linealización por el método de equivalencia de áreas.....	41
Figura 8: Relación de esfuerzos σ_1 y σ_3 para Mohr Coulomb y Hoek-Brown.....	43
Figura 9: Envolvente de rotura del criterio de Hoek-Brown.....	45
Figura 10: Métodos de cálculo de la estabilidad en taludes.....	47
Figura 11: Ubicación, Imagen Satelital del depósito de relaves Huaybillo.....	62
Figura 12: Sección A-A en condiciones Actuales.....	79
Figura 13: Sección B-B en condiciones Actuales.....	79
Figura 14: Sección C-C en condiciones Actuales.....	80
Figura 15: Sección D-D en condiciones Actuales.....	81

ÍNDICE DE CUADROS O TABLAS

Tabla 1: Clasificación geomecánica RQD	24
Tabla 2: Clasificación geomecánica RQD	24
Tabla 3: Calidad del macizo rocoso según clasificación Q de Barton	25
Tabla 4: Factores de seguridad en minería	27
Tabla 5: Guías para la estimación del factor de alteración “D” del criterio de rotura de Hoek-Brown	37
Tabla 6: Valores de “mi” para la roca intacta	38
Tabla 7: Estimaciones de la resistencia a la compresión uniaxial	39
Tabla 8: Métodos de cálculo de estabilidad de taludes	46
Tabla 9: Matriz de operacionalización	58
Tabla 10: Rutas de acceso	63
Tabla 11: Resumen de calicatas	67

GLOSARIO

Evaluación: Proceso de análisis y estudio detallado para determinar la viabilidad, eficacia y seguridad de un sistema o diseño particular.

Criterios de diseño: Conjunto de estándares, normas y pautas utilizadas para desarrollar un plan o diseño que garantice el cumplimiento de los objetivos establecidos.

Estabilidad física: Capacidad del depósito de relaves para mantener su integridad estructural y evitar movimientos o colapsos no deseados durante y después de su cierre.

Cierre del depósito de relave: Fase final en la vida útil de un depósito de relaves, que incluye la implementación de medidas para asegurar la estabilidad y evitar la generación de lixiviados y contaminación ambiental.

Depósito de relave: Área donde se almacenan los desechos y residuos mineros, producidos durante el proceso de extracción y procesamiento de minerales.

Unidad Minera El Cofre: Nombre específico de la mina o empresa minera donde se encuentra ubicado el depósito de relaves Huaybillo.

Macizo rocoso: Masa de roca intacta que rodea y soporta la infraestructura minera, incluyendo el depósito de relaves.

Geomecánica: Rama de la geología y la ingeniería que estudia el comportamiento mecánico de las rocas y su interacción con estructuras y excavaciones.

Sostenimiento: Conjunto de técnicas y medidas utilizadas para reforzar y estabilizar las excavaciones subterráneas y superficiales.

Geotecnia: Disciplina que estudia la aplicación de principios geológicos e ingenieros en el diseño y construcción de estructuras en terrenos y rocas.

CAPÍTULO I

Planteamiento del problema

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Realidad problemática

Los depósitos de relaves son áreas utilizadas para almacenar los residuos de los procesos mineros, y su cierre adecuado es fundamental para prevenir impactos ambientales negativos a largo plazo. Sin embargo, en muchos casos, los criterios de diseño y evaluación para garantizar la estabilidad física durante el cierre del depósito de relaves presentan deficiencias significativas.

En ocasiones, los criterios de diseño para el cierre de los depósitos de relaves no tienen en cuenta adecuadamente los aspectos geotécnicos. Esto implica que no se realicen estudios exhaustivos de las características del terreno, suelos y rocas circundantes, lo que puede resultar en un diseño deficiente que no garantice la estabilidad a largo plazo del depósito. Esto aumenta el riesgo de fallas geotécnicas, como deslizamientos de tierra o colapsos estructurales.

La evaluación de los criterios de diseño a menudo adolece de una insuficiente consideración de los riesgos asociados al cierre del depósito de relaves. Esto implica que no se realiza una evaluación exhaustiva de los posibles escenarios de falla y los impactos potenciales en el medio ambiente y las comunidades vecinas. Como resultado, los diseños pueden subestimar los riesgos y no implementar medidas de mitigación adecuadas.

En la unidad minera el cofre, se requiere realizar los diseños para garantizar que los procesos de construcción y operativos del Cierre del Depósito de Relaves Huaybillo sea seguro como factible técnica y económicamente; Apoyados sobre la base de los estudios básicos desarrollados y criterios de diseño que han sido calculados y establecidos por los estándares internacionales de la Ingeniería Geotécnica, Hidráulica, Civil e industria minera. Mismos que

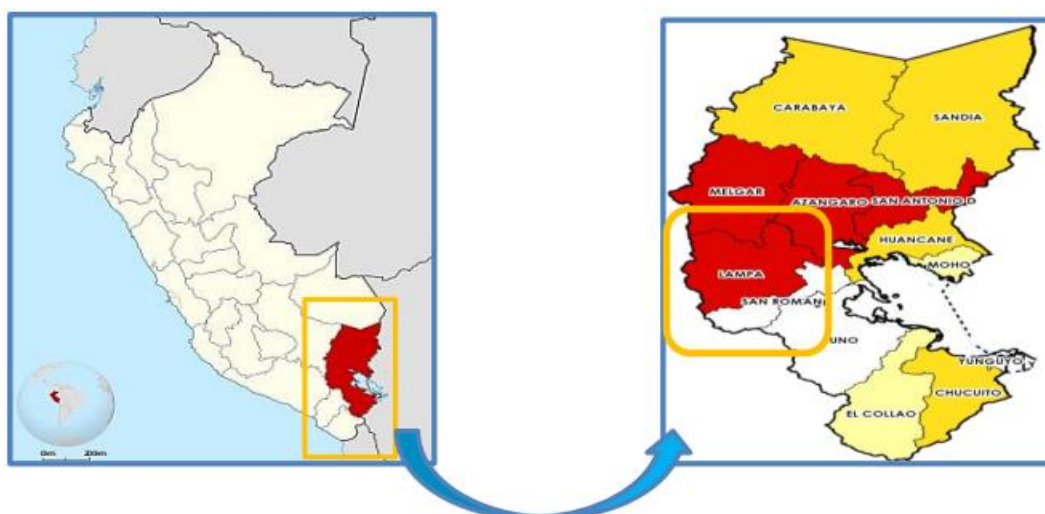
pueden ir actualizándose durante el desarrollo del proyecto, procurando siempre garantizar la seguridad de los diseños elaborados.

1.2. Delimitación del problema

1.2.1. Espacial (geográfica).

El área de estudio está localizada en el paraje Amayane, distrito de Paratia, provincia de Lampa, departamento de Puno; a una altitud promedio de 4,400 msnm.

Figura 1: Ubicación geográfica



1.2.2. Temporal.

“Los datos que serán considerados para la realización del trabajo de investigación propuesto serán enmarcados dentro del periodo 2023 considerando únicamente la temática de trabajo asociadas con la evaluación de estabilidad física a taludes para mejorar los estándares de estabilidad de la unidad minera el cofre”.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Formulación del problema general

¿Será posible realizar la evaluación de los criterios de diseño para garantizar la estabilidad física para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023?

1.3.2. Formulación del problema específico

- ❖ ¿Cuáles son las características geotécnicas del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023?
- ❖ ¿Cuáles son los criterios que inciden en la evaluación de estabilidad física para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023?
- ❖ ¿Cómo determinar la estabilidad física del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023?

1.4. Justificación e importancia

Justificación teórica

La evaluación de los criterios de diseño para garantizar la estabilidad física en el cierre de un depósito de relaves es de suma importancia en la industria minera. El depósito de relaves Huaybillo de la Unidad Minera El Cofre representa un desafío particular debido a la necesidad de garantizar la estabilidad física a largo plazo y minimizar los riesgos ambientales asociados.

Existen diversas teorías, principios y conceptos en la ingeniería geotécnica y de cierres de depósitos de relaves que respaldan la importancia de evaluar los criterios de diseño. Estos incluyen aspectos relacionados con la mecánica de suelos, hidrogeología, geología estructural, comportamiento de los materiales de relave y factores externos que pueden afectar la estabilidad del depósito. Una base teórica sólida respalda la necesidad de llevar a cabo una evaluación exhaustiva para garantizar la estabilidad física y minimizar los impactos ambientales.

Justificación práctica

La evaluación de los criterios de diseño para la estabilidad física del depósito de relaves Huaybillo es una necesidad práctica para la Unidad Minera El Cofre. El depósito de relaves es una instalación crítica en la operación minera, y su cierre adecuado es esencial para garantizar la protección del medio ambiente y la seguridad de la comunidad circundante.

La evaluación práctica de los criterios de diseño implica el análisis detallado de los aspectos geotécnicos, hidrológicos y estructurales del depósito de relaves. Esto implica la recolección y análisis de datos geotécnicos, detección de niveles de agua, evaluación de las características de los materiales de relave, inspección de las estructuras existentes y la aplicación de modelos y software especializado para simular el comportamiento del depósito a lo largo del tiempo .

La justificación práctica radica en la necesidad de cumplir con los estándares y condiciones ambientales, así como en la responsabilidad social de la empresa minera. Además, una evaluación rigurosa de los criterios de diseño contribuye a prevenir posibles desastres relacionados con el colapso o la inestabilidad del depósito de relaves.

Justificación metodológica

La metodología para la evaluación de los criterios de diseño se basará en una combinación de enfoques teóricos y prácticos. Comenzará con la revisión de la literatura existente sobre diseño y cierre de depósitos de relaves, así como las normas y estándares nacionales e internacionales aplicables.

A continuación, se llevará a cabo un mapeo detallado de la geología del área y se recolectarán datos geotécnicos e hidrológicos relevantes. Estos datos se utilizarán para realizar

análisis geotécnicos, modelado hidráulico y análisis de estabilidad, utilizando software especializado y técnicas de simulación.

La metodología también resultó de campo para evaluar la condición actual del depósito de relaves y sus estructuras asociadas. Además, se llevarán a cabo pruebas de laboratorio en muestras de materiales de relave para determinar sus propiedades físicas y mecánicas.

La combinación de enfoques teóricos y prácticos en la metodología permitirá una evaluación integral de los criterios de diseño y garantizará la estabilidad física del depósito de relaves Huaybillo de la Unidad Minera El Cofre.

Importancia

Un enfoque adecuado en la evaluación de los criterios de diseño garantiza la estabilidad física del depósito de relaves no solo durante la operación minera, sino también a largo plazo, incluso después del cierre de la mina. Esto es fundamental para prevenir problemas futuros relacionados con la estabilidad del depósito y los riesgos asociados.

1.5. Limitaciones de la investigación

Esta investigación se limita a establecer los efectos asociados con los criterios de diseño para garantizar la estabilidad física para el cierre del depósito de relave.

1.6. Objetivo

1.6.1. Objetivos generales

Realizar la evaluación de los criterios de diseño para garantizar la estabilidad física para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023.

1.6.2. Objetivos específicos

- ❖ Conocer las características geotécnicas del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023.

- ❖ Determinar los criterios que inciden en la evaluación de estabilidad física para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023.
- ❖ Determinar la estabilidad física del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023

CAPITULO II

Marco teórico

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1 Antecedentes de investigación

(Vilca, (2019)En su tesis “ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA LA ESTABILIDAD DEL TALUD DEL DEPÓSITO DE DESMONTE SANTA ROSA DEL PROYECTO SANTA ROSA-AREQUIPA”, tiene por objetivo realizar un análisis exhaustivo tanto desde una perspectiva física, considerando los factores de seguridad mínimos permitidos según la legislación vigente, como desde una perspectiva química, evaluando la posibilidad de drenaje ácido de minas proveniente del material almacenado. El propósito de esta evaluación es determinar si el área de fundación es adecuada para la construcción del depósito y si los parámetros geométricos permiten la construcción de una estructura que cumpla con los requisitos del plan de mina, garantizando así la operación minera a lo largo de la vida útil de la mina y posteriormente. Realiza un análisis detallado de los parámetros geotécnicos para obtener conclusiones precisas sobre la estabilidad del depósito desde diferentes aspectos. El estudio abarca tanto aspectos físicos como químicos, asegurando así un análisis integral de la estabilidad del depósito de desmonte. Los resultados obtenidos proporcionan información crucial para la toma de decisiones y garantizarán una construcción segura y funcional del depósito, permitiendo la continuidad de la operación minera de manera sostenible en el tiempo.

Arenas, (2019)En su tesis “EVALUACIÓN GEOMECAÁNICA DEL MACIZO ROCOSO CON FINES DE ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN LA CANTERA MUCRA, JULIACA” aborda esta problemática, proponiendo una metodología técnica para evaluar la estabilidad de los

taludes y establecer criterios de excavación en roca. Para llevar a cabo la investigación en la cantera y resolver los problemas de estabilidad de los taludes, se siguieron métodos establecidos que se han desarrollado y aplicado en el ámbito minero y en obras civiles. El estudio se centró en la aplicación práctica de los métodos más reconocidos para el análisis de estabilidad en taludes de roca, incluyendo métodos estereográficos y de equilibrio límite. En el área de investigación, se realizó la caracterización geológica y geotécnica, seguida del análisis de estabilidad de los taludes y su interacción utilizando métodos empíricos, cinemáticos, analíticos y de equilibrio límite. Se consideraron parámetros típicos para cada tipo de discontinuidad presentes en la zona mapeada. La evaluación geotécnica basada en los valores de $RQD = 72$, $RMR = 55$, $GSI = 54$, $JCS = 122$ y $JRC = 10$ indica que el macizo rocoso pertenece a la categoría de buena calidad del tipo III. Estos valores indican condiciones estables, respaldados por factores de seguridad de 1.3.

Molina, (2019) En su tesis “EVALUACION GEOMECANICA Y DETERMINACIÓN DE ANGULOS DE TALUD EN LOS PROYECTOS MINEROS” tiene como objetivo principal llevar a cabo una evaluación geomecánica y estimar los ángulos de los taludes para el futuro tajo abierto Jéssica. Para lograrlo, realizó trabajos de campo, laboratorio y análisis de gabinete. Llevó a cabo una caracterización detallada de la masa rocosa, basada en el mapeo geotécnico de afloramientos rocosos y en muestras obtenidas de perforaciones diamantinas. Además, se determinó las propiedades físicas de la roca, los parámetros de resistencia de la roca intacta, así como de las discontinuidades y la masa rocosa, a través de ensayos realizados tanto in situ como en laboratorio. Realizó varios análisis para evaluar el grado de estabilidad de los taludes, teniendo en cuenta los ángulos propuestos en el diseño realizado por el área de planeamiento de Arasi S.A.C. Como resultado de estos análisis, determinó que los ángulos de taludes de los bancos (65°), las interrampas y los finales globales (44°) presentan un factor de seguridad estático no drenado promedio de 2.53 y un factor de seguridad pseudoestático de 1.9. En conclusión, los ángulos de

taludes propuestos por Arasi S.A.C. para el diseño del tajo Jessica garantizan condiciones de estabilidad satisfactorias, ya que los factores de seguridad superan ampliamente los valores mínimos requeridos.

Teran, (2020) En su tesis “EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD FÍSICA DE LOS TALUDES DE UN TAJO ABIERTO EN FUNCIÓN A LA ALTERACIÓN HIDROTERMAL DEL MACIZO ROCOSO” “se centra en el estudio y aplicación de la filosofía de diseño de taludes en un tajo abierto minero, considerando el impacto de las alteraciones hidrotermales en las propiedades de resistencia del macizo rocoso y, por lo tanto, en la estabilidad física de las paredes del tajo abierto. Se analizó la estabilidad de las paredes de un tajo abierto ubicado en el sur de Perú, que se caracteriza por una amplia zona de mineralización de tipo hidrotermal. Para evaluar la estabilidad de los taludes en la etapa final del tajo, se realizó una nueva caracterización geotécnica de los diferentes tipos de alteraciones hidrotermales, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y de resistencia. Estas propiedades se incorporaron en un nuevo modelo geotécnico y se realizaron análisis de sensibilidad para cada tipo de alteración, considerando la altura máxima y el ángulo de talud. Llevó a cabo análisis de estabilidad de taludes inter rampa y globales utilizando el modelo de resistencia de Hoek y Brown para los métodos de equilibrio límite, así como análisis numéricos de esfuerzo-deformación mediante el método de elementos finitos para las diferentes secciones del tajo. Como resultado, se obtuvieron nuevos ángulos inter rampa y globales para las distintas secciones del tajo, lo cual permitió establecer nuevos criterios de diseño. Además, se presenta un análisis del impacto de los diferentes tipos de alteración en la caracterización geotécnica y la estabilidad de los taludes del tajo”.

Flechas, et al., (2021) En su artículo de investigación “ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES MORFOLOGÍA Y ACELERACIÓN SÍSMICA, EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES COHESIVOS Y FRICCIONANTES A PARTIR DE

MODELOS DE EQUILIBRIO LÍMITE”. Presentaron los resultados de 280 modelos de equilibrio límite de diferentes tipos de taludes, considerando variables morfológicas y aceleración sísmica horizontal en condiciones secas y saturadas. Realizaron un análisis de los datos utilizando el software Slide®, y excluyeron algunos datos que no tuvieron influencia en la estabilidad de los taludes mediante métodos estadísticos. Obtuvieron cartas de estabilidad para taludes cohesivos y friccionantes, considerando diferentes valores de coeficiente sísmico. Encontraron que la geometría del talud, en términos de altura e inclinación, influye en la estabilidad geotécnica, disminuyendo los factores de seguridad a medida que estas aumentan. Además, observaron que el aumento de la aceleración sísmica horizontal reduce los factores de seguridad, lo cual concuerda con la literatura existente sobre el tema. Obteniendo resultados relevantes, ya que contribuyen a la práctica de la ingeniería al proporcionar ábacos de estabilidad que permiten estimaciones rápidas para taludes regulares, especialmente útiles para determinar alturas críticas en taludes constructivos.

Santander, (2019) En su tesis “METODOLOGÍA ROCK ENGINEERING SYSTEM PARA DETERMINAR ESTABILIDAD GEOMECAÁNICA EN TALUDES MINEROS” presenta la metodología y aplicación del método Rock Engineering System (RES) para evaluar el diseño y construcción de bancos bermas en una mina a cielo abierto en Chile. El índice de estabilidad geomecánica a nivel de banco se desarrolla mediante la matriz de interacción del sistema RES, que considera diez parámetros. Evaluó 5,993 metros de paredes construidas con geometría banco berma en cinco unidades litológicas diferentes para implementar y validar el índice de estabilidad RES. Los resultados presentados de estabilidad obtenidos con el índice RES se compararon con la metodología de conciliación geotécnica, que considera el factor de condición y el factor de diseño de los bancos construidos, y también verificó con mediciones de geo radares.

La comparación de los resultados de ambas metodologías es consistente, con la mayor diferencia del 11% en la litología Intrusivo, evaluando 1,374 metros. En cuanto al monitoreo de

geo radares, los resultados indicaron que las paredes construidas se mantienen estables sin activaciones detectadas. Estos resultados validan el índice de estabilidad geomecánica propuesto a través de la metodología RES para su aplicación en diseños y planificación minera. Los valores del índice de estabilidad geomecánica permiten inferir la respuesta del macizo rocoso en el sistema banco berma y establecer medidas de mitigación para cumplir con los planes de producción.

Flores, (2019) En su tesis “PROPUESTA METODOLÓGICA DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO PARA EVALUAR LA ESTABILIDAD FÍSICA DE UN DEPÓSITO DE RELAVES ABANDONADO EN CHILE” tiene objetivo principal proponer una metodología para seleccionar la instrumentación adecuada para monitorear la estabilidad física de los depósitos de relaves abandonados en Chile. Realiza una revisión de los componentes y clasificaciones de los depósitos de relaves, así como de la estabilidad física, los mecanismos de falla y los eventos que provocan la pérdida de estabilidad física. Estudia el estado de los depósitos de relaves abandonados en Chile utilizando el Catastro de Depósitos de Relaves del SERNAGEOMIN y se complementa con información obtenida a través del programa ArcMap. Identifica la falta de información y la ausencia de sistemas de monitoreo para establecer el estado actual de los depósitos de relaves abandonados. Desarrolla una metodología propuesta consta de cinco etapas y tres categorizaciones, que conducen a propuestas de monitoreo. Recopila información disponible, establece el estado actual y obtiene tendencias de deformaciones del depósito. Dependiendo de los resultados, asignó un monitoreo básico o se realizó exploraciones geofísicas e instalación de monolitos para monitoreo remoto. Realizó exploraciones geotécnicas tradicionales según la categorización del depósito. Finalmente, efectuó un monitoreo intermedio o complejo, que incluyó revisiones frente a eventos naturales extremos. Aplicó la metodología propuesta a tres depósitos de relaves abandonados en Chile y sugirió su aplicación a todos los depósitos de relaves abandonados en el país.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Geomecánica

“El análisis geomecánico cubren los aspectos necesarios para la investigación y recopilación de datos in situ y laboratorio, permitiendo posteriormente clasificar al macizo rocoso, lo que sumado a las estructuras geológicas principales y al estado de esfuerzos previo al minado, permitirán establecer un modelo geomecánico”. (OSINERGMIN, 2017).

2.2.1.1. Macizo rocoso.

Los macizos rocosos son formaciones naturales presentes en entornos geológicos afectados por planos de discontinuidad o debilidad que separan los bloques de matriz rocosa. Tanto la matriz rocosa como las discontinuidades conforman el macizo rocoso. Se trata de un medio discontinuo, anisótropo y heterogéneo compuesto por bloques de matriz rocosa y diversos tipos de discontinuidades que afectan mecánicamente al medio rocoso. En términos de resistencia a la tracción, se considera que los macizos rocosos presentan una resistencia nula. El comportamiento mecánico global del macizo rocoso está gobernado por el conjunto de discontinuidades y bloques de matriz, por lo que para estudiar su comportamiento es necesario analizar las propiedades tanto de la matriz rocosa como de las discontinuidades.

2.2.1.2. Caracterización Geomecánica.

“La caracterización de un suelo rocoso requiere una comprensión de los parámetros fundamentales de la roca, las discontinuidades y la estructura, que incluye información sobre la cantidad de familias de discontinuidades existentes, el espacio medio de los planos de discontinuidad y las características geomecánicas fundamentales de las discontinuidades. Además, es esencial determinar el estado de la tensión en el lugar y, si es necesario, los cambios causados por las excavaciones” (Ramírez et al., 2013). “De esta manera, la caracterización geomecánica

contempla el análisis detallado de los resultados provenientes de laboratorio y de campo in situ de afloramientos del macizo rocoso, los cuales se procesan estadísticamente de forma sencilla a fin de establecer modelos constitutivos apropiados al tipo de roca, que incluyen el conocimiento de sus parámetros resistentes y de deformación. Como se describe a continuación, la caracterización se realiza utilizando métodos de clasificación que combinan los parámetros de la matriz rocosa en un valor único representando así la calidad general de la roca”. (Belandria & Bongiorno, 2016).

2.2.1.3. Calidad del Macizo Rocos.

Es un parámetro que permite la clasificación a gran escala basado en las propiedades de la roca. Los sistemas de clasificación geomecánica intentan cuantificar los parámetros de resistencia asignando un solo valor; útil para identificación del dominio geomecánico al interior mina (OSINERGMIN, 2017). “Las clasificaciones Bieniawski RMR (Rock Mass Rating), Barton, Lien y Lunde (Q), y Hoek - Brown son actualmente las más utilizadas para identificar el estado del macizo rocoso (GSI). Las dos primeras hacen uso del parámetro RQD (Designation of Rock Quality), utilizado como base para la clasificación de Deere. Los siguientes son los métodos más utilizados”.

- El índice de la calidad de roca RQD cuantifica el grado de fracturamiento del macizo, de las rocas de prueba de diámetro superior a 10 cm, determinado por el muestreo in situ (ecuación 1) o por la cantidad de uniones por metro cúbico (J_v) observadas durante una erupción (ecuación 2). Utilizando la definición de 1964 de Deere de RQD, se plantea la clasificación sencilla de la calidad de la roca en cinco clases en la Tabla 1 (Belandria & Bongiorno, 2016).

$$RQD = \frac{\sum \text{Trozos mayores a 10 cm}}{\text{Longitud de perforación}} \dots (\text{ecuacion 1})$$

$$RDQ = 115 - 3.3J_v \dots (\text{ecuacion 2})$$

Tabla 1: Clasificación geomecánica RQD

<i>Índice de calidad RQD (%)</i>	<i>Calidad</i>
0 – 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Regular
75 – 90	Buena
90 - 100	Excelente

Fuente: (Belandria & Bongiorno, 2016)

- La clasificación RMR de Bieniawski, desarrollada en 1989, es un sistema de clasificación que correlaciona el grado de calidad del macizo rocoso con los criterios de diseño y mantenimiento de los túneles. El parámetro RMR indica la calidad de la capa de roca en cada dominio estructural en una escala de 0 a 100 sumando la calificación de los siguientes parámetros: la resistencia de la roca intacta a partir de la valoración de la resistencia a la compresión simple (UCS) o a las pruebas de carga puntual, el RQD, mediante el espaciamiento de discontinuidades, condiciones de discontinuidades y presencia de agua subterránea de acuerdo con el sistema RMR (Belandria & Bongiorno, 2016). ,que se detalla en la tabla 2.

Tabla 2: Clasificación geomecánica RQD

<i>Clase</i>	<i>Calidad</i>	<i>Valoración RMR</i>	<i>Cohesión</i>	<i>Angulo de rozamiento</i>
I	Muy bueno	100 – 81	4 kg/cm ²	> 45°
II	Bueno	80 – 61	3 – 4 kg/cm ²	35° - 45°
III	Medio	60 – 41	2 – 3 kg/cm ²	25° - 35°
IV	Malo	40 – 21	1 – 2 kg/cm ²	15 – 25°
V	Muy Malo	< 20	< 1 kg/cm ²	< 15°

Fuente: (Belandria & Bongiorno, 2016)

“Desde su publicación, estos sistemas RMR y Q se han aplicado a una variedad de proyectos con patologías variadas como el tamaño de excavación, la calidad de roca, la profundidad, entre otros, y sus autores resguardan su validez y generalidad en una serie de artículos. Numerosos autores han propuesto correlaciones entre los índices Q y RMR basándose en las siguientes ecuaciones” (Belandria & Bongiorno, 2016):

$$RMR = 13.5 \log(Q) + 43 \dots (\text{ecuacion 3})$$

$$RMR = 12.5 \log(Q) + 55.2 \dots (\text{ecuacion 4})$$

- La clasificación Q de Barton fue desarrollada por Barton, Lien y Lunde en 1974 como resultado de su estudio de múltiples túneles. Es un sistema que clasifica el macizo rocoso (tabla 3) permitiendo la estimación de los parámetros geotécnicos y el diseño de refugios para túneles y cuevas subterráneas a través del análisis de seis parámetros según la ecuación 5 (Belandria & Bongiorno, 2016).

Tabla 3: Calidad del macizo rocoso según clasificación Q de Barton

<i>Tipo de roca</i>	<i>Valor de Q</i>
Excepcionalmente mala	0.001 – 0.01
Extremadamente mala	0.01 – 0.1
Muy mala	0.1 – 1
Mala	1 – 4
Media	4 – 10
Buena	10 – 40
Muy buena	40 – 100
Extremadamente buena	100 – 400
Excepcionalmente buena	400 – 1000

Fuente: (Belandria & Bongiorno, 2016)

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_a}{J_n} * \frac{J_w}{SRF} \dots (\text{ecuacion 5})$$

Donde:

J_n : Numero de familias de diaclasas.

J_r : Rugosidad de las superficies de discontinuidades.

J_a : Alteracion de las diaclasas.

J_v : Coeficiente reductor de presencia de agua.

SRF : Factor de reduccion de esfuerzo.

El principal cociente denota la dimensión de bloques, el segundo denota su resistencia al corte y el tercero denota el estado tensional del macizo rocoso.

2.2.2. Talud

Un talud es una superficie inclinada en relación a una línea horizontal de referencia. Estos aludes pueden ser naturales, como las laderas formadas de manera natural, o artificiales, como los taludes creados por la intervención humana.

2.2.2.1. Estabilidad de taludes

La estabilidad se refiere a la seguridad de una masa de suelo o bloque rocoso frente a un posible deslizamiento, y el factor de seguridad al deslizamiento es un criterio de análisis matemático que nos ayuda a evaluar la relación entre las fuerzas que causan el movimiento y las fuerzas que lo previenen. Según lo expuesto por Barrera y Campaña (2003), podemos concluir que un talud se considera seguro y libre de deslizamientos cuando las fuerzas de resistencia superan a las fuerzas que provocan el deslizamiento.

De acuerdo con Da Costa García (2004), si existe una superficie de deslizamiento con un factor de seguridad bajo, significa que en las condiciones analizadas del talud se han generado deformaciones que incrementan las fuerzas impulsoras. Estas fuerzas, sin embargo, están sujetas a incertidumbre en el cálculo, ya que las teorías clásicas de Rankine o Coulomb para la presión del

suelo generalmente no representan adecuadamente el valor de las fuerzas impulsoras, las cuales pueden ser considerablemente mayores a las calculadas mediante las teorías tradicionales.

2.2.3. Factor de seguridad

Según lo señalado por Suarez J.comp s.f., Fellenius (1922) introdujo el concepto del factor de seguridad como la relación entre el esfuerzo de corte del material en el talud y los esfuerzos críticos de corte que intentan causar una falla a lo largo de una supuesta superficie de falla. De acuerdo con Suarez (1998), se concluye que el factor de seguridad en una superficie potencial de deslizamiento implica dividirla en bloques y verificar las condiciones de equilibrio individual, para luego analizar el equilibrio de las sumatorias de fuerzas o momentos.

En la norma CE.020 del Reglamento Nacional de Edificaciones, denominada "Estabilización de suelos y taludes", se establece que el factor de seguridad mínimo para un talud debe ser de 1.5 para condiciones estáticas y de 1.25 para condiciones pseudo-estáticas.

Por último, el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN) de Perú ha publicado una guía titulada "Criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores mineras subterráneas", donde se incluye la Tabla 1 con los factores de seguridad en la minería.

Tabla 4: Factores de seguridad en minería

Plazo	Factor de seguridad	Observación
Estabilidad a largo plazo	Mayor igual a 1.5	Periodo mayor a 1 año
Estabilidad a mediano plazo	Rango de 1.3 hasta 1.5	Periodo menor a 1 año
Estabilidad a corto plazo	Rango de 1.1 hasta 1.3	Periodo menor a 3 meses

Fuente: Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores mineras (2017)

2.2.4. Mecanismo de rotura

Los mecanismos de falla corresponden a las interacciones físicas que ocurren en los masivos de estudio, donde las fuerzas actuantes aumentan y provocan una disminución en la resistencia hasta que se inicia y se propaga completamente el movimiento. En los taludes rocosos, pueden ocurrir diversos mecanismos de falla, pero en este trabajo académico se abordará específicamente el deslizamiento circular en un masivo rocoso homogéneo e isotrópico.

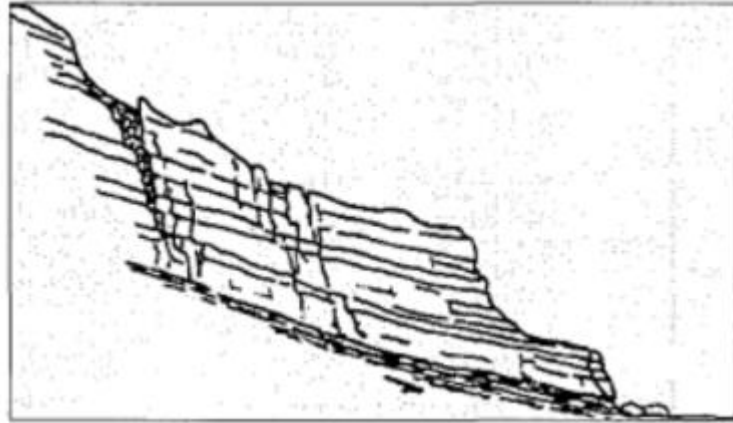
a) Deslizamientos

Los deslizamientos son desplazamientos que ocurren cuando se excede la resistencia al corte del material, manifestándose a lo largo de una o varias superficies o a través de una franja relativamente estrecha del material (Ibérico, 2015).

- **Deslizamientos traslacionales**

El desplazamiento de traslación ocurre cuando la masa se desliza hacia el exterior o hacia abajo a lo largo de una superficie que puede ser relativamente plana o ligeramente ondulada, debido a discontinuidades claramente marcadas que presentan una menor resistencia al corte. En este tipo de desplazamiento, hay muy poco o ningún movimiento de rotación o volteo (Suarez, s.f).

Figura 2: Deslizamiento traslacional

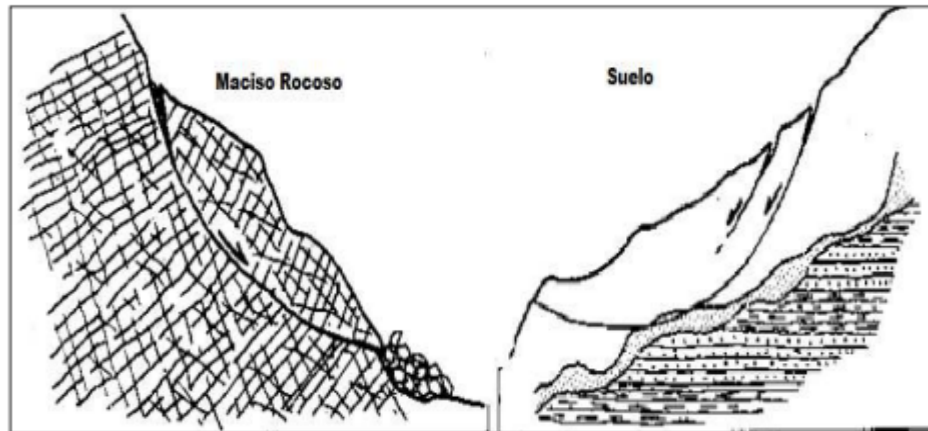


Fuente: IGME, 1985

- **Deslizamientos rotacionales**

Son aquellos deslizamientos que ocurren a lo largo de una superficie interna de rozamiento, con forma aproximadamente circular y cóncava, y que exhiben un movimiento rotacional alrededor de un eje paralelo al rumbo del talud. Según Melentijevic (2005), en medios rocosos, la disminución de la resistencia al corte a lo largo de las discontinuidades es la principal causa de este tipo de rotura. Por lo tanto, las superficies de deslizamiento se forman a lo largo de las juntas en masas rocosas altamente diaclasadas, donde los bloques son de tamaño reducido en comparación con el talud. Este tipo de deslizamiento es común en rocas blandas, meteorizadas o ricas en partículas arcillosas, lo cual permite aplicar métodos de cálculo similares a los utilizados para suelos en estos casos (Melentijevic, 2005).

Figura 3: Deslizamiento rotacional en material rocoso y suelo

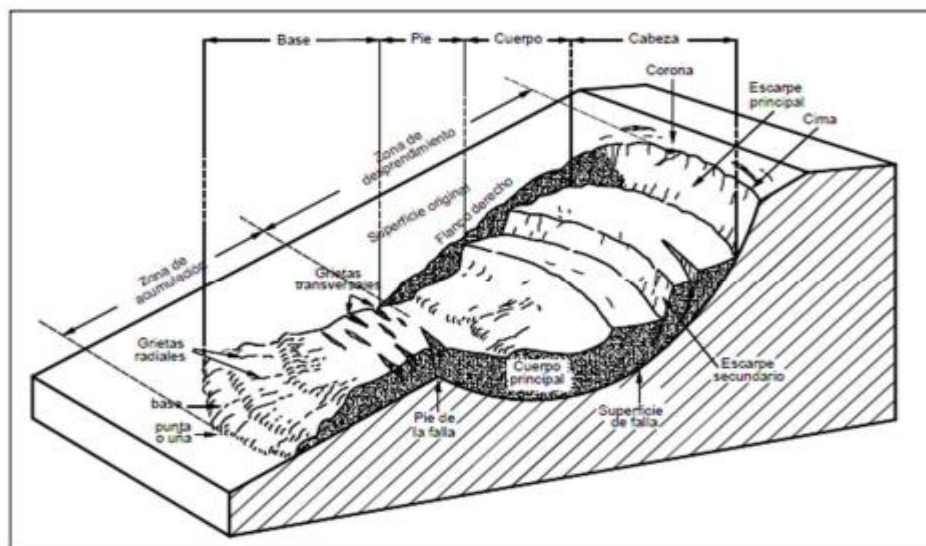


Fuente: Deslizamientos análisis geotécnico -Suarez, J. (2002).

- **Partes de un deslizamiento.**

Un deslizamiento consta de varias componentes, y en la figura xx se ilustran las diferentes partes de un deslizamiento. Se pueden identificar dos elementos fundamentales: la zona de desprendimiento y la zona de acumulación. Estas partes desempeñan un papel crucial en el proceso de deslizamiento.

Figura 4: Partes de un deslizamiento



Fuente: Deslizamientos análisis geotécnico- Suarez, J. (2002)

2.2.5. Factores Condicionantes de Inestabilidad

El análisis de los movimientos es de suma importancia para identificar los factores que influyen en la estabilidad de los taludes y los desencadenantes de los movimientos. Ayala et al. (1985) destacan la importancia de reconocer ambos factores para evaluar el riesgo existente.

Según Ayala et al. (1985), algunos de los factores más relevantes que afectan la estabilidad son los siguientes:

- El agua proveniente de ríos, aguas subterráneas y lluvia es un agente fundamental que condiciona e desencadena la inestabilidad de los taludes.
- El hielo, al transformar el agua intersticial y presente en las discontinuidades, puede causar la desagregación mecánica de la estructura, reduciendo la cohesión. La nieve, en algunos puntos del talud, puede generar sobrecargas y ejercer fuerzas adicionales.
- Los sismos pueden desencadenar deslizamientos al provocar fluctuaciones en el estado de esfuerzos dentro del terreno, alterando la trabazón intergranular de los materiales y disminuyendo su cohesión.
- La actividad biológica, a través de la vegetación, contribuye a mantener la estabilidad de los taludes mediante las raíces, que mejoran la unión de los componentes del suelo y ayudan en el drenaje al absorber agua. Sin embargo, las raíces también pueden tener un efecto negativo al desagregar el terreno y desplazar bloques debido a su acción mecánica en grietas y fisuras.
- La subsidencia regional condiciona la estabilidad y puede desencadenar movimientos, especialmente cuando está relacionada con fenómenos tectónicos.

- Las excavaciones alteran el equilibrio del terreno, generando descargos en las superficies de deslizamiento y desequilibrios de masas.
- Las voladuras actúan como desencadenantes, ya que las ondas de compresión generan grietas radiales que amplían la red de fracturas preexistentes en el terreno, creando nuevas superficies potenciales de deslizamiento.

2.2.6. Criterios de Rotura

2.2.6.1. Criterio de Rotura Lineal de Mohr-Coulomb

“La Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (ETSECCPB, s.f.) señala que el criterio de rotura de Mohr-Coulomb fue introducido por primera vez por Coulomb en 1773, inicialmente concebido para el estudio de suelos. Este criterio de rotura es lineal, lo que implica que la ecuación que define la superficie de fluencia es una ecuación lineal. En este criterio, la rotura se define en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano, donde la superficie de fluencia se expresa mediante la siguiente ecuación matemática”:

$$\tau = c + \sigma_n * \tan \phi$$

Donde:

"c" representa la cohesión, que es una constante que indica la resistencia cortante que puede soportar el material en ausencia de cualquier tensión normal aplicada.

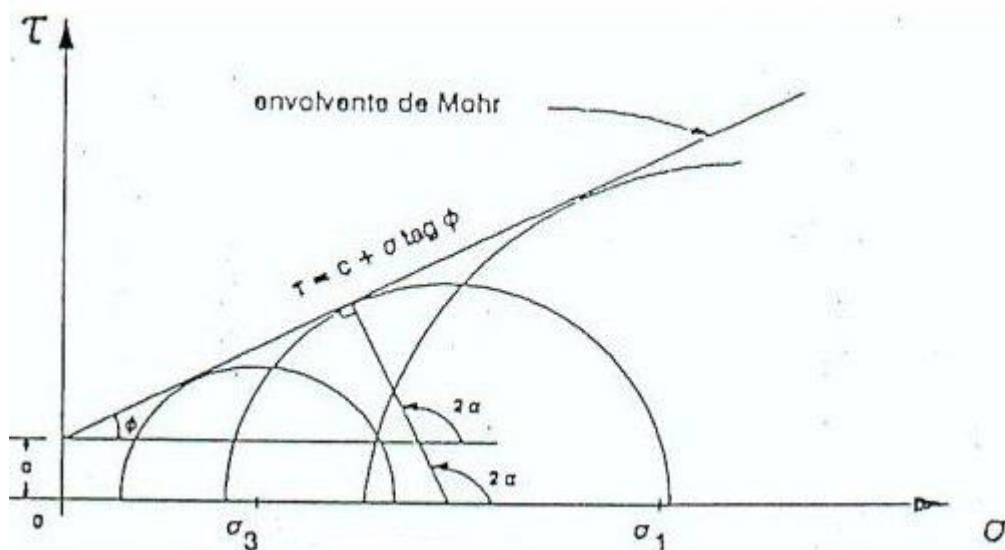
" ϕ " es el ángulo de fricción interna del material.

" τ " es la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura.

" σ_n " es la tensión normal que actúa en el plano de rotura.

“En la figura 5 se muestra el gráfico de la envolvente del criterio de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normales y tangenciales. Se puede observar que la ecuación de la superficie de rotura es una recta tangente a todos los círculos de falla. Además, se aprecia que el dominio elástico está representado por la envolvente de Mohr, lo que significa que los puntos en el macizo con un estado tensional por debajo de esta envolvente se encuentran en un estado elástico, mientras que aquellos situados por encima están en estado de rotura”. Por último, la zona de estados tensionales inaccesibles para este macizo corresponde a aquellos puntos que se encuentran por encima de la envolvente.

Figura 5: Envolvente de rotura del criterio de Mohr-Coulomb



Fuente: Deslizamientos análisis geotécnico- Suarez, J. (2002).

A partir de la figura 5, se pueden derivar las siguientes expresiones para calcular la tensión normal y la tensión cortante:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha$$

$$\alpha = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$$

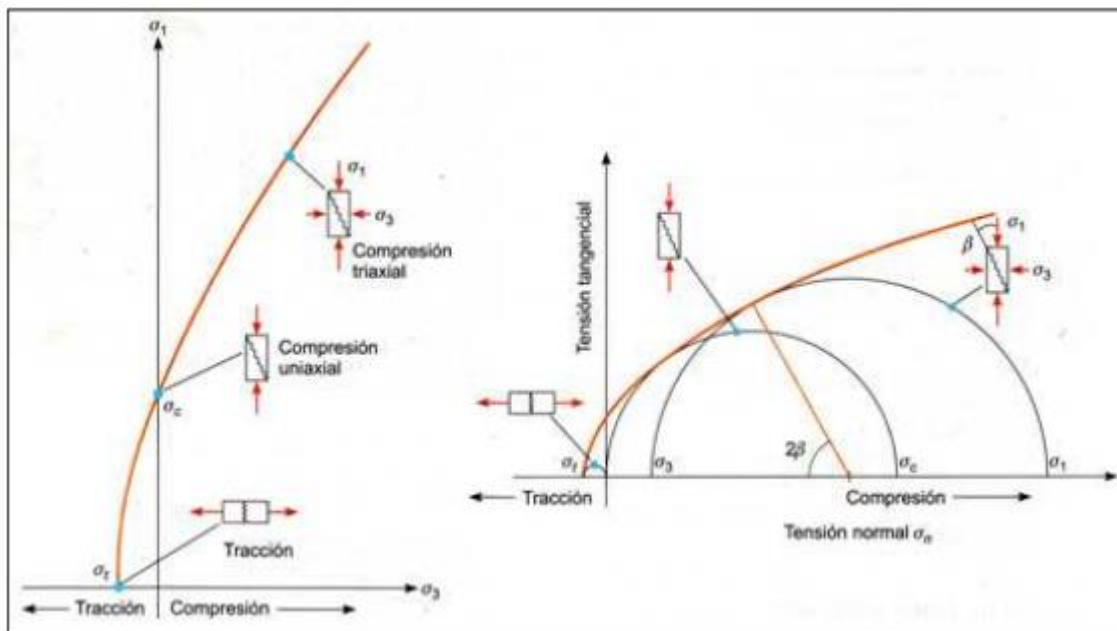
Donde:

- ϕ es el ángulo de fricción interna del material.

2.2.6.2. Criterio de Rotura no Lineal de Hoek y Brown-2002

La versión más reciente del criterio de rotura de Hoek y Brown presenta la misma expresión que la versión generalizada de 1997, pero incorpora un nuevo parámetro llamado factor de alteración (D). Esto da lugar a una formulación distinta para determinar los parámetros del criterio (Hoek et al., 2002).

Figura 6: Envolvente de rotura del criterio de Hoek-Brown



Fuente: Diplomado en mecánica de rocas- Barriaes (s.f)

La fórmula matemática propuesta por Hoek et al. (2002) para el criterio es la siguiente:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{Ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{Ci}} + s \right)^a$$

En cuanto a los parámetros mencionados, se tienen las siguientes expresiones para su cálculo:

σ_1' , σ_3' y σ_{Ci} representan las tensiones principales efectivas en rotura, correspondientes a la tensión principal mayor, la tensión principal menor y la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, respectivamente.

m_b es el valor reducido asociado al material intacto m_i en el macizo rocoso.

s y a son constantes cuyos valores dependen de las características del macizo rocoso.

Para determinar los valores de estos parámetros, se utilizan las siguientes fórmulas:

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)}$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\left(\frac{GSI}{15}\right)} - e^{-\left(\frac{20}{3}\right)} \right)$$

En relación a los términos mencionados:

- GSI se refiere al Índice de Resistencia Geológica, dado por Hoek en 1994.
- D es el factor de alteración del criterio de rotura de Hoek y Brown.

La resistencia a la compresión uniaxial y la resistencia a la tracción se calculan mediante la sustitución de los valores $\sigma_3' = 0$ y $\sigma_1' = \sigma_3' = \sigma_t'$ en la ecuación de Hoek-Brown. Esto da lugar a las siguientes expresiones matemáticas:





$$\sigma_c = \sigma_{Ci} S^a$$

$$\sigma_t = -\frac{S\sigma_{Ci}}{m_b}$$

a) Estimación del factor de alteración “D”

Hoek et al. (2002) “señalan que la experiencia en el diseño de grandes taludes de tajos a cielo abierto ha demostrado que el criterio generalizado de Hoek-Brown para macizos rocosos no alterados, con un factor de alteración D igual a cero, resulta en parámetros de resistencia del macizo rocoso considerados optimistas. Por otro lado, para macizos rocosos alterados debido a voladuras, es apropiado considerar un factor de alteración D igual a uno”. Según Hoek et al. (2002), “está claro que el grado de alteración en el macizo rocoso circundante a una excavación puede verse afectado por numerosos factores que no se pueden cuantificar con precisión. Sin embargo, a partir de diversas experiencias y del análisis de detalles recopilados en diferentes artículos, Hoek et al. han publicado una tabla que pretende brindar una guía para estimar el factor de alteración "D". La Tabla 5, publicada por Hoek et al. (2002), muestra los valores del factor de alteración para el criterio generalizado de rotura de Hoek-Brown, el cual depende del grado de alteración "D" del macizo rocoso como resultado de la relajación de esfuerzos causada por las excavaciones.

Tabla 5: Guías para la estimación del factor de alteración “D” del criterio de rotura de Hoek-Brown

Apariencia	Descripción del macizo rocoso	D sugerido
	Excelente calidad de voladura o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo confinado circundante al túnel.	D=0
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladura) con una alteración mínima en el macizo circundante. Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance la alteración puede ser severa a menos que se coloquen contra bóveda temporal, tal como se muestra e la figura.	D=0 D=0.5 (No invert)
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 metros en macizo rocoso circundante	D=0.8
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensión resulta en alguna alteración.	D=0.7 (Good Blasting) D=1.0 (Poor Blasting)
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.	D=1.0 (Production blasting) D=0.7 (Mechanical excavation)

Fuente: Hoek et al, 2002

b) Determinación del valor de mi para la roca intacta

En la Tabla 6 se presentan los valores utilizados para determinar el parámetro "mi" de la roca intacta.

Tabla 6: Valores de “mi” para la roca intacta

Roca	Clase	Grupo	Textura			
			Gruesa	Media	Fina	Muy Fina
Sedimentaria	Clástica		Conglomerado-19-a 24	Arenisca-13 a 21	Limolita-5 a 9	Argilita-2 a 6
			Brecha-14 a 24		Grauvaca-15 a 21	Esquisto-4 a 8
						Marga-5 a 9
	No Clástica	Orgánica				Tiza-5 a 9
		Carbonata da	Caliza Cristalina-9 a 15	Caliza esparítica-8 a 12	Caliza micrítica-7 a 11	Dolomitas-6 a 12
	Evaporitas		Yeso-16	Anhidrita-10 a 12		
Metamórfica	No foliada		Mármol-6 a 12	Hornblenda-15 a 23	Cuarcita-17 a 23	
	Ligeramente foliada		Migmatita-30	Anfibolita-25 a 31		
	Foliada		Gneis-23 a 33	Esquistos-9 a 15	Filita-4 a 10	Pizarra-3 a 11
Ígnea	Plutónica	Clara	Granito-29 a 35	Diorita-20 a 30		
			Granodiorita-26 a 32			
		Oscura	Gabro-24 a 30	Dolerita-11 a 21		
			Norita-15 a 25			
	Hipabisal		Porfido 15 a 25		Diabásica-10 a 20	Peridotitas-20 a 30
	Volcánico	Piroclastos	Agloramerado-16 a 22	Brecha-14 a 24	Toba-9 a 18	
Lava			Riolita-20 a 30	Dacita-22 a 28	Obsidiana-16 a 22	
			Andesita-20 a 30	Basalto-20 a 30		

Fuente: Serrano, 1999

c) Determinación del valor de la resistencia a la compresión uniaxial

En la Tabla 7 se encuentran los valores aproximados de resistencia a la compresión uniaxial.

Tabla 7: Estimaciones de la resistencia a la compresión uniaxial

Grado	Termino	FCU (MPa)	Carga índice (MPa)	Estimación de campo de fuerza	Ejemplos
R6	Extremadamente Fuerte	>250	>10	El espécimen solo puede ser astillado con un martillo geológico	Basalto fresco, chert, Diabas, gneis, granito, cuacita
R5	Muy Fuerte	100-250	4-10	El espécimen requiere muchos golpes de un martillo geológico para fracturarlo	Anfibolita, arenisca, Basalto, gabro, gneis, Granodiorita, piedra caliza, mármol, riolitas, toba.
R4	Fuerte	50-100	2-4	No se puede raspar o descortezar con un cuchillo de bolsillo, la muestra puede ser fracturada con un solo golpe de un martillo geológico.	Piedra caliza, mármol, phyllite, piedra arenisca, esquisto.
R3	Medio fuerte	25-50	1-2	No se puede raspar o descortezar con un cuchillo de bolsillo, la muestra puede ser fracturada con un solo golpe del martillo geológico.	Arcilla, carbón, hormigón, Esquisto
R2	Débiles	5-25	-	Se puede descortezar con dificultad con un cuchillo de bolsillo. La identificación se realiza con un golpe firme con la punta de un martillo geológico	Tiza, roca, potasa
R1	Muy débiles	15	-	Se desmorona bajo golpes firmes con la punta de un martillo geológico, pueden ser descortezados por un cuchillo de bolsillo	Altamente resistido o roca alterada.
R0	Extremadamente débiles	0.25-1	-	Indentado por la miniatura	Gubia de falla rígida

Fuente: ISRM, 1981

2.2.6.3. Linealización del Criterio de Rotura de Hoek-Brown

Puell et al. (2004) “mencionan que cuando se requiere utilizar los parámetros de cálculo según el modelo de Mohr-Coulomb, pero teniendo en cuenta el criterio de rotura de Hoek-Brown, es necesario realizar una simplificación que consiste en linealizar la envolvente de la curva de rotura del criterio generalizado de Hoek-Brown. Existen varios métodos para llevar a cabo esta operación, pero en este estudio se utilizará el método de equivalencia de áreas, el cual está integrado en el software Slide 6.0. La linealización mediante el método de equivalencia de áreas ofrece una mejor coherencia, aunque todavía presenta inconvenientes inherentes a la linealización, como la sobreestimación y la subestimación de la resistencia del macizo rocoso” (Puell et al., 2004).

a) Método de la equivalencia de áreas

Según Hoek et al. (2002) y Puell et al. (2004), “este método implica trazar una recta que equilibre las áreas entre la curva de envolvente de Hoek-Brown, como se ilustra en la figura 8, y resolver para un rango específico de tensiones que cumpla con la siguiente condición”:

$$\sigma_1' < \sigma_3' < \sigma_{3max}'$$

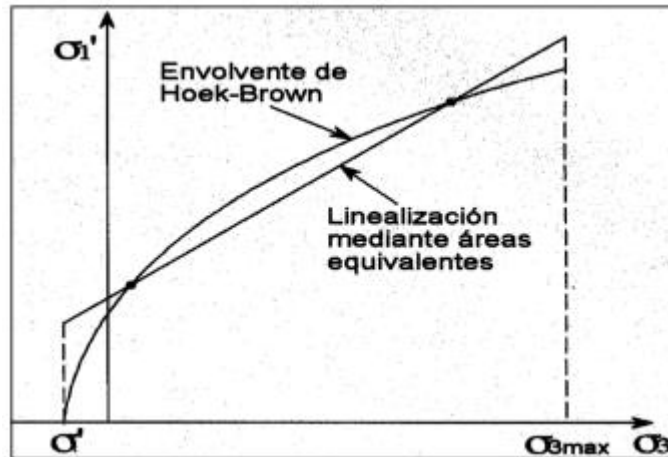
Donde:

σ_1' representa la resistencia a la tracción.

σ_3' representa el esfuerzo principal menor.

σ_{3max}' es la tensión de confinamiento máxima esperada, determinada para cada caso.

Figura 7: Linealización por el método de equivalencia de áreas



Fuente: Revista de Obras públicas N°3446 –Puell et al (2004)

La aplicación del método de linealización conduce a las siguientes expresiones matemáticas para el ángulo de fricción interna y la resistencia cohesiva, según Hoek et al. (2002):

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

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

Del mismo modo, se presentan las expresiones matemáticas para el cálculo de los parámetros en las relaciones matemáticas mencionadas anteriormente, según Hoek et al. (2002):

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}}$$

$$\frac{\sigma'_{3max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}$$

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)](m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

Donde:

- σ_{cm} es la resistencia global del macizo rocoso.
- σ_{3max} es la máxima tensión de confinamiento.
- H es la altura total del talud.
- γ es el peso específico del macizo rocoso.
- m_b es el valor reducido correspondiente al material intacto del macizo rocoso.
- s y a son valores de constantes que dependen de las características del macizo rocoso.
- σ_{ci} es la resistencia a la compresión simple de la roca intacta.

Por lo tanto, la resistencia al corte de acuerdo con el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, utilizando los parámetros calculados previamente, se expresa de la siguiente manera:

$$\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$$

En esta relación, de acuerdo con Balmer (1952), los esfuerzos normales y cortantes están relacionados con los esfuerzos principales mediante las siguientes expresiones matemáticas:

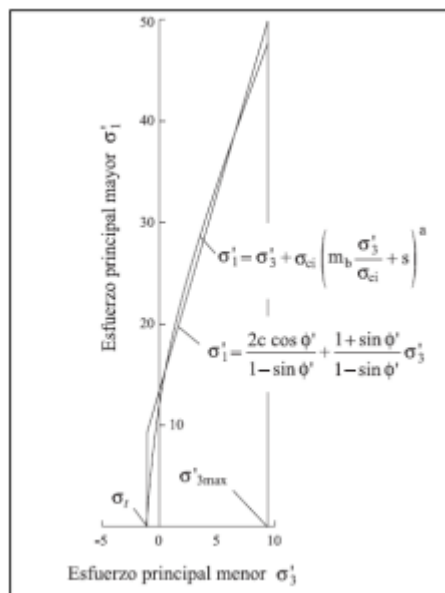
$$\sigma'_n = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \left[\frac{am_b (s + m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci})^{a-1}}{2 + am_b (s + m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci})^{a-1}} \right]$$

$$\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \left[\frac{\sqrt{am_b (s + m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci})^{a-1}}}{2 + am_b (s + m_b \sigma'_3 / \sigma_{ci})^{a-1}} \right]$$

“Estas relaciones entre los esfuerzos principales menores y mayores para los criterios de Hoek-Brown y su equivalente de Mohr-Coulomb se presentan en la figura xx, y se expresan mediante la siguiente ecuación” según Hoek et al (2002):

$$\sigma'_1 = \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma'_3$$

Figura 8: Relación de esfuerzos σ_1 y σ_3 para Mohr Coulomb y Hoek-Brown



Fuente: Hoek et al 2002

2.2.7. Ensayos de laboratorio

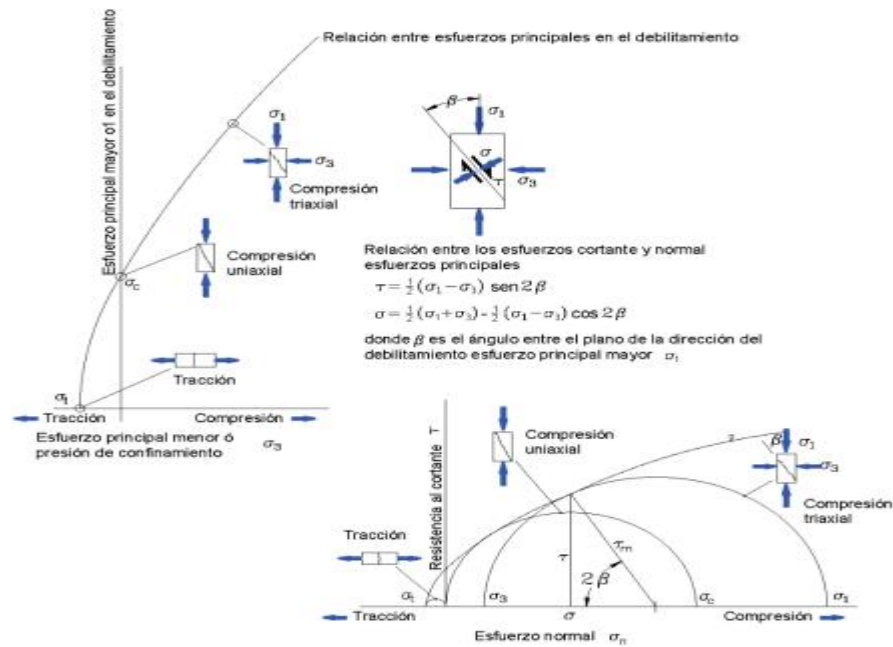
2.2.7.1. Ensayo de Compresión Simple

“El propósito del ensayo de compresión simple es determinar la resistencia máxima a la compresión de una muestra cilíndrica de testigo. En este ensayo, la muestra se somete a una carga axial sin ninguna carga de confinamiento, que se aplica de forma continua y se incrementa gradualmente hasta que la muestra falle. El esfuerzo normal vertical ejercido sobre la muestra cuando ocurre la falla se conoce como resistencia a la compresión simple o resistencia a la compresión no confinada,” según Huamán et al. (2017).

2.2.7.2. Ensayo triaxial

“El ensayo consiste en determinar la resistencia a la compresión de una muestra cilíndrica de roca. Durante el ensayo, la muestra se somete a una presión de confinamiento constante (σ_3) mientras se le aplica una carga axial (σ_1) de manera continua y gradual. A partir de cada par de valores de σ_1 y σ_3 obtenidos, se construye la envolvente de esfuerzos del criterio de falla generalizado de Hoek y Brown. Esta envolvente permite obtener la constante de roca intacta "mi" y otros parámetros relevantes” (Huamán et al., 2017).

Figura 9: Envolvente de rotura del criterio de Hoek-Brown



Fuente: Guía de criterios geomecánicos –OSINERGMIN (2017)

2.2.8. Métodos de calculo

“Los métodos de cálculo de estabilidad son utilizados para diseñar las secciones geométricas de un talud de manera que cumplan con las condiciones necesarias para garantizar su estabilidad. En la Tabla 8 se presentan dos de las metodologías más comúnmente utilizadas en los análisis convencionales de estabilidad de taludes”.

Tabla 8: Métodos de cálculo de estabilidad de taludes

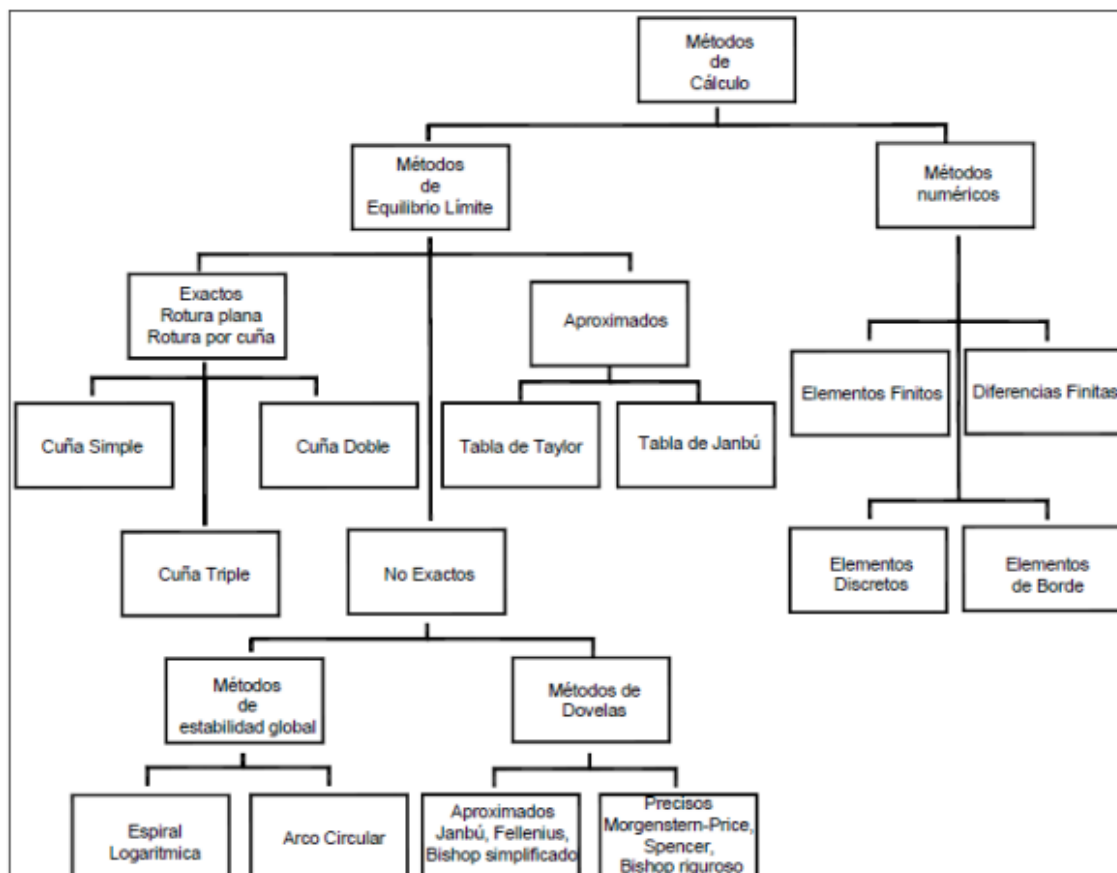
Método	Ventajas	Limitaciones
Equilibrio Límite	<ul style="list-style-type: none"> . Existe una gran cantidad de paquetes de software. . Se obtiene un número de factor de seguridad. . Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. . Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> . Genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. . El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. . No incluye análisis de las deformaciones.
Métodos numéricos	<ul style="list-style-type: none"> . Permite simular procesos de deformación. . Permite determinar la deformación del talud y el proceso de falla. . Existen programas para trabajar en dos y tres dimensiones. 	<ul style="list-style-type: none"> . Es complejo y no lineal. . Comúnmente no se tiene conocimiento de los valores reales a utilizar en la modelación. . Se presentan varios grados de libertad. . No permite modelar roca muy fracturada.

Fuente: Suarez (2002)

El método de equilibrio límite tiene la ventaja de ser simple y proporcionar el factor de seguridad como indicador de la estabilidad. Se utiliza normalmente cuando se conoce o se puede asumir el mecanismo de falla, y cuando el comportamiento de las superficies de falla es dúctil. (Melentijevic, 2005).

En la figura 10 se presenta una visión general de las diferentes formas en las que se puede abordar el análisis de estabilidad de un talud.

Figura 10: Métodos de cálculo de la estabilidad en taludes



Fuente: Análisis geotécnico, Capítulo 4- Jaime Suarez (s.f)

Los métodos de equilibrio límite son ampliamente utilizados debido a su simplicidad y, aunque presentan ciertas incertidumbres, el factor de seguridad que proporcionan se acerca al valor real. (Melentijevic, 2005).

2.2.8.1. Método de equilibrio límite

Según Suárez (2002), el análisis de estabilidad mediante este método consiste en evaluar si los suelos del talud poseen la resistencia adecuada para soportar los esfuerzos cortantes que podrían causar la falla o deslizamiento. Además, Suárez menciona que existen diversos métodos de análisis

basados en el equilibrio límite que comparten la comparación de las fuerzas o momentos resistentes y las fuerzas o momentos actuantes en una superficie de falla.

2.2.8.2. Condiciones de análisis

a) Condición estática

De acuerdo con la publicación de Viejo (2016), los modelos de equilibrio límite utilizados para determinar la estabilidad de un talud se basan en un enfoque físico-matemático que emplea las ecuaciones de la estática para lograr el equilibrio de una masa potencialmente inestable. Valiente et al (2015) enumera las fuerzas involucradas en el análisis estático de taludes mediante el método del equilibrio límite, las cuales se describen a continuación:

- Peso total de la rebanada o bloque de suelo.
- Fuerza normal en la base de la línea de falla.
- Fuerza cortante en la base de la línea de falla.
- Fuerzas horizontales entre las rebanadas.
- Fuerzas externas aplicadas.
- Fuerzas verticales entre las rebanadas.
- Empuje del agua.

Valiente et al (2015) nos indica que estas fuerzas se incorporan en las ecuaciones de la estática, específicamente en la suma de fuerzas y en la suma de momentos. Sin embargo, junto con el criterio de rotura seleccionado, estas ecuaciones no son suficientes para resolver el sistema de ecuaciones. Por lo tanto, algunos métodos de análisis como el método de Bishop, Spencer, entre otros, deben realizar ciertas suposiciones sobre las direcciones, magnitudes y puntos de aplicación de las fuerzas para poder resolver el sistema de ecuaciones que se plantea en el enfoque físico-matemático.

b) Condición pseudo-estática

De acuerdo con la investigación realizada por Martínez et al (2011), desde la década de 1920 se ha analizado la estabilidad sísmica de estructuras de tierra utilizando una condición en la cual los efectos de un terremoto se representan mediante aceleraciones constantes tanto horizontales como verticales. Este enfoque de análisis se conoce como pseudo-estático.

Según lo mencionado por Sepúlveda (2011), esta condición de análisis sigue el mismo procedimiento general que los métodos de equilibrio límite, con la diferencia de que se incorporan fuerzas pseudo-estáticas horizontales y verticales debido a las vibraciones generadas por un evento sísmico. Kramer (1996) establece que las magnitudes de estas fuerzas pseudo-estáticas se pueden determinar utilizando las siguientes fórmulas:

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h w$$

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v w$$

En las ecuaciones mencionadas, se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

- F_v y F_h representan las fuerzas inerciales que actúan en el centro de masa.
- a_v y a_h son las aceleraciones horizontales y verticales respectivamente.
- k_v y k_h son los coeficientes pseudo-estáticos horizontales y verticales.
- W corresponde al peso de la masa de falla.
- g representa la aceleración debido a la gravedad

2.3. Marco conceptual

ROCA: “Agregado natural de partículas de uno o más minerales, con fuerte unión cohesiva permanente, que constituyen masas geológicamente independientes y cartografiables” (Ferrer, 1999).

MATRIZ ROCOSA: Material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de “roca intacta” que quedan entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral (González de Vallejo, 2002).

MACIZO ROCOSO: “Conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. Presenta carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo, consecuencia de la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad, que condicionan su comportamiento geomecánico e hidráulico”. (Ramírez, 2004).

DEFORMACIÓN: Modificación que sufre una roca o material por acción de una o más esfuerzos. (Ramírez, 2004).

DESPLAZAMIENTO: “Es la distancia recorrida por un bloque rocoso a través de un plano de movimiento”. (Arango, 2014).

ESFUERZO: Fuerza aplicada sobre un área y/o superficie que tiende a cero. (Osinergmin, 2017).

ESTRATIFICACIÓN: Disposición paralela o subparalela que toman las capas de las rocas sedimentarias, durante su sedimentación. (Ramírez, 2004).

ESTRATO: Es la roca formada por la sedimentación de fragmentos o partículas provenientes de la desintegración de las rocas pre existentes. (Ramírez, 2004).

ESTRUCTURA: “Esta referido a la disposición, arreglo y cohesión de los materiales constituyentes de un determinado cuerpo rocoso”. (Solís, 2016).

FACTOR DE SEGURIDAD: El Factor de Seguridad se interpreta como el factor reductor de los parámetros resistentes para llegar a la rotura. (Gonzales de Vallejo, 2022).

SOSTENIMIENTO: Se refiere a los elementos de soporte y refuerzo que tienen como finalidad asegurar, controlar y mantener estable las excavaciones subterráneas. Pueden ser utilizados individualmente o en combinación con otros (Osinergim, 2017).

CONTROL DE CALIDAD DE SOSTENIMIENTO: El control de calidad de los elementos de sostenimiento es una estrategia de vital importancia que permitirá verificar las suposiciones iniciales adoptadas durante el diseño del sostenimiento, así como asegurar el rendimiento de los diversos elementos de soporte y refuerzo que se han instalado en el macizo rocoso (Osinergmin, 2017).

EVALUACIÓN GEOMECÁNICA: La descripción y medida de las características y propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades y de los parámetros del macizo rocoso, proporcionan los datos necesarios para la evaluación geomecánica del macizo. A partir de estos datos, la aplicación de las clasificaciones geomecánicas permite estimar la calidad del macizo rocoso (González de Vallejo, 2002).

CAPITULO III

Metodología

Para la realización de esta investigación, se abordará la importancia de la evaluación de los criterios de diseño en el contexto específico del depósito de relave Huaybillo. Se analizarán los aspectos teóricos, prácticos y metodológicos relacionados con la evaluación de la estabilidad física, teniendo en cuenta la mecánica de suelos, la hidrogeología, la geología estructural y otros factores relevantes.

El objetivo principal es identificar y evaluar los criterios de diseño necesarios para garantizar la estabilidad física del depósito de relaves Huaybillo, considerando los desafíos geotécnicos y ambientales específicos de la Unidad Minera El Cofre. Se busca proporcionar recomendaciones y directrices que permitan a la empresa minera tomar decisiones informadas y aplicar medidas adecuadas para garantizar un cierre seguro y ambientalmente responsable del depósito.

3.1. Tipo

(ÑAUPAS, VALDIVIA, PALACIOS, & ROMERO, 2018) afirman que “el tipo de investigación se limita a dos, tales como: la investigación básica, pura o fundamental y la investigación aplicada. La investigación aplicada busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo. Esta se basa fundamentalmente en los hallazgos tecnológicos de la investigación básica, ocupándose del proceso de enlace entre la teoría y el producto. Según el sustento la presente investigación corresponde a la investigación aplicada”.

En términos de investigación, este tema se enmarca dentro de la investigación aplicada, para lograr este objetivo, se emplearán enfoques teóricos y prácticos. Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre el diseño y cierre de depósitos de relaves, lo cual se considera una investigación de tipo documental. Además, se llevarán a cabo una inspección de campo, recolección de datos geotécnicos e hidrológicos, análisis de laboratorio y aplicación de modelos y software especializados, lo cual implica una investigación de tipo experimental.

La investigación aplicada busca generar recomendaciones prácticas y soluciones concretas para abordar los desafíos específicos del cierre del depósito de relaves Huaybillo. Los resultados de la investigación podrán ser utilizados por la Unidad Minera El Cofre y otros actores involucrados en la gestión de depósitos de relaves, para tomar decisiones informadas y aplicar medidas adecuadas que garanticen la estabilidad física y minimicen los riesgos asociados.

Es importante destacar que, aunque la investigación aplicada se enfoca en la solución de problemas prácticos, también puede generar nuevos conocimientos teóricos y contribuir al avance de la ciencia en el área de estudio.

3.2. Enfoque

El enfoque de investigación se refiere a la naturaleza del estudio y se clasifica como cuantitativo, cualitativa o mixta. Cada enfoque tiene características particulares con respecto a diversos aspectos de la investigación. Algunos aspectos clave para comprender la comparación de los enfoques cuantitativos y cualitativos de investigación científica incluyen el tipo de realidad que estudia, las metas de la investigación, entre otros (Mata, 2019).

Los enfoques, métodos generales y estrategias de investigación pueden clasificarse en dos modelos con diferentes características según su propósito: *modelos cualitativos y modelos cuantitativos*. (Thomas Kuhn 1962), cada uno de estos modelos se basa en un paradigma, es decir,

en el conjunto de supuestos, postulados, concepciones de la realidad y juicios de valor que sirven de referencia a la investigación y que determinan qué investigar, qué datos coleccionar, cómo coleccionarlos, cómo analizarlos y cómo interpretarlos.

Conforme a la naturaleza y propósitos de la investigación; el estudio posee un enfoque de investigación cuantitativo debido fundamentalmente a que es posible probar las hipótesis de investigación con la data recopilada en los sujetos de estudio y que posteriormente podrán ser generalizados en la población.

3.3. Alcance

Hernandez, (2014). Los alcances del estudio dependen de la estrategia de investigación. Así, el diseño, los procedimientos y otros componentes del proceso serán distintos en estudios con alcance exploratorio, descriptivo, correlacional o explicativo. Pero en la práctica, cualquier investigación puede incluir elementos de más de uno de estos cuatro alcances. Los estudios exploratorios sirven para preparar el terreno y, por lo común, anteceden a investigaciones con alcances descriptivos, correlacionales o explicativos. Por lo general, los estudios descriptivos son la base de las investigaciones correlacionales, las cuales a su vez proporcionan información para llevar a cabo estudios explicativos que generan un sentido de entendimiento y están muy estructurados.

La presente investigación tuvo un enfoque de investigación del tipo exploratorio, descriptivo y correlacional, debido a que para cumplir los objetivos se realizaron visitas a la zona de estudio, ya que la información geomecánica era escasa, posteriormente con los datos recopilados se realizaron caracterizaciones geomecánicas basadas en la descripción de las muestras obtenidas y finalmente se relacionaron los resultados de la investigación con las propuestas de estabilización

del macizo rocoso utilizando criterios de ingeniería para asegurar el funcionamiento de la propuesta.

3.4. Diseño de la investigación

El diseño de investigación es el plan y estructura del estudio de investigación. Responde al tipo de método que se ha seleccionado y conduce a una planeación cuidadosa de la obtención y procesamiento de los resultados de la investigación (Carrasco, 2005).

En esta investigación se utilizó un diseño cuasiexperimental, el cual se fundamenta en estudios que no asignan al azar los sujetos que forman parte del grupo control y experimental, sino son emparejados puesto que los grupos de trabajo ya están tomados, es decir ya existen previo al experimento. (Hernandez, 2014 pp. 70)

La metodología de esta actividad consistirá en la evaluación de la estabilidad física de la relavera

Su esquema es el siguiente.

GE: 01 X 02

Dónde:

G.E. Grupo Experimental.

01: Pre test.

02: Post test.

X: Manipulación o desarrollo de la variable independiente

3.5. Población y Muestra

Población

“Conjunto de todos los elementos que pertenecen al ámbito espacial donde se realizará la investigación” mencionada por (Carrasco, 2005, p. 236).

La población serán los taludes de las secciones transversales más delicadas de la relavera Huaybillo en la unidad minera el Cofre.

Muestra

“La muestra es un subconjunto que representa la población y es representativo porque refleja las características de la población al aplicarse las técnicas correctas de muestreo en la cual se determina la cantidad y/o forma de elección del mismo” (Valderrama, 2002, p. 184).

Las muestras se obtendrán realizando calicatas de profundidades promedio de dos metros o más hasta encontrar relave, de las cuales se recogerán muestras de suelo de cada calicata, la calicata C-1 se ubicará en la relavera.

3.6. Hipotesis

3.6.1. Hipotesis general

Es posible realizar la evaluación de los criterios de diseño para garantizar la estabilidad física para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023.

3.6.2. Hipotesis específica

- ❖ Las características geotecnicas son adecuadas en el depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023.
- ❖ Los criterios que inciden en la evaluación de estabilidad física son significativas para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023.

- ❖ Será posible determinar la estabilidad física del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023.

3.7. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional

Tabla 9: Matriz de operacionalización

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
<u>Variable Independiente:</u>	Los criterios de diseño geomecánico son principios y directrices fundamentales utilizados en ingeniería geomecánica para establecer parámetros y estándares que guían la planificación, el diseño y la implementación de medidas de sostenimiento y estabilidad en obras subterráneas y superficiales.	Aplicaremos las normas y procedimientos específicos aplicados por ingenieros y geólogos en la evaluación y selección de métodos de sostenimiento, dimensionamiento de elementos de refuerzo, consideración de cargas y condiciones de contorno, y estimación de Factores de seguridad.	Caracterización Geomecánica	* Índice RMR * Índice Q * Índice GSI
Criterios de diseño geomecánico				
<u>Variable Dependiente:</u>	La estabilidad física para el cierre del depósito de relaves se refiere a la capacidad del sistema de almacenamiento de relaves para mantener su integridad estructural y evitar fallas o colapsos durante la fase de cierre y abandono de la instalación minera o de procesamiento.	La estabilidad física para el cierre del depósito de relaves se logra mediante la implementación de un plan de cierre que incluye diversas medidas de ingeniería, monitoreo y mantenimiento.	Estabilidad física	* F.S.. * Análisis estatico/ pseudoestatico
Estabilidad física para el cierre del depósito de relave				

3.8. Técnicas e instrumentos

Técnicas de recolección de datos

Las técnicas de investigación representan el conjunto de pasos, cuyo objetivo es operativizar el proceso investigativo. (Hernández , Fernández, & Baptista, 2010).

Las técnicas utilizadas en la recopilación de datos del estudio, bajo el método de la estadística descriptiva, fueron:

- ❖ La observación (Campo)
- ❖ Apunte de datos (Campo)
- ❖ La clasificación de la información
- ❖ Análisis de los datos
- ❖ Medición (Gabinete)
- ❖ Evaluación de resultados
- ❖ Discusión e interpretación.

Instrumento

Se utilizaron los siguientes instrumentos de recolección de datos:

- ❖ Guías de observación

“Guía de Observación de la Clasificación Geomecánica Estas guías se utilizan para realizar la investigación sistemática del tipo de roca, estado de alteración y las discontinuidades que perjudican al macizo, tomando datos suficientes del buzamiento y dirección de buzamiento de ellas, para que se haga un análisis estadístico que pueda discriminar qué familias de discontinuidades afectan a la roca, y cuál es su orientación preferente”.

“Guía de Observación en Laboratorio. Esta guía de observación en laboratorio de métodos experimentales se hizo para determinar la resistencia y la deformabilidad de las rocas, con la finalidad de establecer las relaciones entre los esfuerzos y las deformaciones durante el proceso de carga y rotura, los esfuerzos a que está sometida la roca en el momento de la rotura y sus parámetros resistentes. Estos métodos son los ensayos de laboratorio de compresión uniaxial, cargar puntual y cálculo de densidades”.

3.9. Metodos de análisis de datos

Investigaciones Básicas

- Evaluación geológica (mapeo litológico – estructural en superficie)
- Investigaciones geomecánicas de campo y laboratorio orientados a:
- Determinar la distribución espacial de los sistemas de discontinuidades estructurales (fallas y diaclasas) en cada uno de los dominios estructurales.
- Clasificar la masa rocosa, utilizando formatos de registro geológico mecánico según normas sugeridas por la I.S.R.M (internacional SOCIETY FOR ROCK MECHANICS) mediante la aplicación del criterio de clasificación geomecánica RMR 89 de Bieniawski.
- Zonificar la masa rocosa en las áreas de interés, estableciendo dominios geomecánicos en base a información obtenida en las investigaciones de campo y los ensayos de laboratorio.
- Estimar los parámetros de resistencia en los distintos dominios geomecánicos que conforman el modelo geomecánico de la mina.
- Dimensionar las unidades de explotación mediante la utilización de técnicas gráficas y empíricas.

- Analizar la estabilidad de la presa de relave.

3.10. Técnicas estadísticas para el procesamiento de la información.

“Los datos acopiados, medidos y monitoreados se procesarán por medio de estadísticas, promedios y se calculará el promedio general de la medición del factor de seguridad en el sistema de pernos de sostenimiento empleado, cuadros comparativos de los resultados entre el diseño anterior y el diseño implementado como estándar de trabajo”.

“Después de confirmar la normalización de los datos, se realiza una prueba t de Student para evaluar la homogeneidad de la varianza entre los tratamientos estándar. Si es similar, se rechaza la hipótesis nula de que no hay diferencia en las varianzas de ambos grupos si el valor p de la prueba t es menor que 0.05”.

3.11. Desarrollo del trabajo de tesis

En el presente estudio, se han realizado investigaciones en campo, laboratorio y gabinete, las cuales se resumen en los siguientes párrafos.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Generalidades de la mina

La Unidad Minera El Cofre actualmente en etapa de cierre, misma que durante su etapa de producción disponía los relaves procedentes de su planta metalúrgica, en el depósito de relaves Huaybillo, a una razón de 450 TM/día, cuya cota de corona actualmente es 4,383.0 msnm, dicho depósito de relaves como se mencionó está en proceso de cierre por tal motivo, es necesario llevar a cabo la INGENIERÍA DE DETALLE DE CIERRE DEL DEPÓSITO DE RELAVES HUAYBILLO DE LA UNIDAD MINERA EL COFRE.

4.1.1. Ubicación.

El área de estudio está localizada en el paraje Amayane, distrito de Paratia, provincia de Lampa, departamento de Puno; a una altitud promedio de 4,400 msnm.

Figura 11: Ubicación, Imagen Satelital del depósito de relaves Huaybillo.



4.1.2. Accesibilidad.

Para llegar a la Unidad Minera, donde se desarrollarán las actividades, se dispone de la siguiente ruta de acceso:

Tabla 10: Rutas de acceso

TRAMO		DISTANCIA (Km)	CONDICIÓN DE CARRETERA	TIEMPO DE RECORRIDO
Lima	Juliaca	1300	ASFALTADA	20 h
Juliaca	Santa Lucía	65	ASFALTADA	55 min
Santa Lucía	Paratia	45	AFIRMADA	40 min

4.2. Geología

Geología Regional

Geomorfología

El Depósito de Relaves, se encuentra emplazada en la meseta del Collao o Altiplano, caracterizado por exhibir una superficie de relieve suave y uniforme, interrumpida por algunos valles como el Paratía, Río Verde, Cabanillas, etc. Este inmenso escenario se halla flanqueado, hacia el noreste, por la Cordillera Oriental, montaña de topografía muy escarpada, seccionada por valles profundos y encañonados que dan lugar, entre ellos, a alineamientos como la Cordillera de Carabaya y hacia el noroeste, por las cumbres nevadas de la Cordillera Occidental y la cadena volcánica de la que forman parte el Ubinas (5,672 msnm), el Tutupaca (5,815 msnm) y el Ticsani (5,408 msnm).

El altiplano forma una cuenca intramontañosa sin otro desagüe para esas corrientes que el de sus lagos Titicaca y Poopó. La parte sur del Collao alberga la depresión del Titicaca de origen tectónico, que corre del noroeste al sureste por más de 300 km, con un ancho de hasta 100 km; y

en el centro de la cual se encuentra el lago Titicaca. El altiplano es una zona de extensas llanuras aluviales cubiertas de pastos y matorrales, como las de Lampa, Juliaca y Ayaviri.

En el Titicaca desembocan los ríos del Altiplano, con excepción del Desaguadero, que más bien se origina en el gran lago y lleva sus aguas al Poopó, los más importantes son el Azángaro y el Cabanillas en cuya cuenca se encuentra el río Paratía con su tributario, el Huaybillo, escenario del presente estudio.

Estratigrafía y Geoestructuras

El área del Depósito de relaves se ubica en el tramo del río Paratía Huaybillo, el cual se encuentra modelado en rocas volcánico sedimentario de edad Mioceno (Terciario) representado por la Formación Palca (Nm pa/Tb), cuya litología está constituida por tobas de composición riolíticas a dacíticas, estratificadas en capas con orientación general NO SE y buzamientos del orden de 10° - 15° hasta 36° al SO. En algunos sectores del valle se observan afloramientos rocosos del grupo Tacaza (PN ta) del Paleógeno (Terciario) constituidos por lavas y brechas de naturaleza andesíticas, con vulcaneritas y aglomerados grises. El fondo del valle del río Paratía Huaybillo se encuentra tapizado por potentes depósitos aluviales, cubiertos superficialmente por suelos orgánicos de tipo bofedal. Los depósitos aluviales consisten en general de cantos, gravas y arenas en matriz arcillo limoso dentro de estos depósitos se incluyen las terrazas aluviales. Desde el punto de vista estructural los afloramientos rocosos de las unidades lito estratigráficas se encuentran poco disturbadas, encontrándose localmente afectadas por sistemas de fracturas y pliegues de tipo sinclinal. No se han observado indicios de actividad tectónica reciente (fallas activas).

Geodinámica Externa

El sector donde se emplaza el Depósito de Relaves y sus áreas circundantes presenta un relieve de topografía plana a ligeramente ondulada circundado por colinas de cerros bajos con taludes de poca pendiente y en posición estable, modelado en rocas volcánicas, cubiertas parcialmente por depósitos morrénicos. El río Huaybillo, afluente del Paratía constituye el drenaje principal y discurre con suave gradiente en el área de estudio, este río es de régimen permanente, tiene relativamente poco caudal, aguas abajo tributa sus aguas por la margen derecha del Paratía, integrante de la cuenca del río Cabanillas.

Los procesos geodinámicos que ocurren dentro del ámbito del estudio son muy limitados y en general se consideran de poca relevancia; estos fenómenos están relacionados con el régimen climático de las temporadas lluviosas. Las lluvias estacionales saturan y remueven la capa superficial de suelos (morrenas) originando pequeñas torrenteras con flujos de lodo que se desplazan pendiente abajo; estos fenómenos son de poca magnitud y no significan peligro alguno para la estabilidad y seguridad del depósito de relaves, así como de las obras complementarias.

Por otro lado, cabe resaltar que, el canal de desvío de las aguas del río Huaybillo, debe estar diseñado de tal manera que puede controlar las avenidas extraordinarias a fin de evitar desbordes laterales. Se concluye que los fenómenos geodinámicos que ocurren en el área del estudio están tipificados como flujos de lodo y son en general de poca magnitud y relevancia, y no afectarán el funcionamiento de las cunetas de coronación.

Geología Local

Localmente el Depósito de Relaves se encuentra ubicada en la cuenca del río Huaybillo a una altitud aproximada de 4,380 msnm, El río Huaybillo es un tributario de la margen derecha del

Paratía, que a su vez drena sus aguas al río Verde, todos pertenecientes a la cuenca endorreica del Lago Titicaca. Geológicamente el Depósito de Relaves, está emplazado casi en su totalidad sobre terrenos aluviales del río Huaybillo, conformados por gravas arcillosas, gravas limosas con lentes de arenas arcillosas con presencia de cantos y bloques; estos suelos se encuentran cubiertos por una capa orgánica (bofedales) de 0.30 a 0.50 m de espesor (Q al/bo), ocasionalmente esta capa orgánica llega a tener 1.00 a 1.20 m de espesor. En los alrededores del área prevista para el depósito de relaves, aflora en forma aislada la Formación Palca (Nm pa/Tb) constituida por rocas volcánico sedimentaria. A continuación, se describen cada una de estas unidades lito estratigráficas.

Estratigrafía

Las unidades presentes en el área de estudio comprenden depósitos aluviales con cobertura bofedal del Cuaternario y unidades de rocas volcánico sedimentarias del Terciario (Mioceno). A continuación, se describen cada una de estas unidades:

A.) Terciario

- Formación Palca (Nm pa/Tb): Esta unidad aflora en forma restringida en los alrededores del área de emplazamiento del depósito de relaves. Consiste de tobas volcánicas de composición riolítica a dacítica, estratificadas con orientación general NO SE y buzamientos de 10° a 20° SO. Estas rocas se encuentran moderadamente fracturadas y tienen resistencia media. Sus afloramientos se exponen en ambos márgenes del río Huaybillo y en el tramo inmediato aguas arriba del inicio del canal de desvío.

B.) Cuaternario

- Depósitos Aluviales con Cobertura Bofedal (Q al/bo): Estos depósitos se encuentran ampliamente desarrollados en el área prevista para el emplazamiento del depósito de relaves y dique de seguridad. Se encuentran distribuidos en el cauce y márgenes del río Huaybillo. Los depósitos aluviales consisten en general de gravas arcillosas y gravas limosas con algunos lentes de arenas arcillosas, contiene cantos redondeados a sub redondeados y algunos bloques angulosos; todo el conjunto se presenta semi compacto.
- Depósitos Morrénicos (Q mo): Son restos de materiales que fueron transportados y depositados por el glaciar. Este material, procedente de desprendimientos, meteorización, erosión glaciar, etc., va a parar sobre el glaciar o dentro de él y es transportado por este. Están conformados en general por gravas arcillosas con cantos y bloques angulosos a subangulosos. Se encuentran cubriendo las laderas de los cerros.

4.3. Características geotécnicas del depósito de relave Huaybillo

En el área de estudio se han realizado investigaciones geotécnicas, estas se han basado en calicatas, trincheras y perforaciones diamantinas, con las que se ha podido determinar las unidades geotécnicas predominantes en el Depósito de Relaves. Las ubicaciones de las mencionadas investigaciones se presentan a continuación:

Tabla 11: Resumen de calicatas

AÑO	SONDEO	COORDENADAS UTM WGS-84		PROF. (m)
		ESTE	NORTE	
2020	TP-01	328,418	8'291,369	1.00
	TP-02	328,273	8'291,744	1.00
	CT 01	328,489	8'291,459	2.30
2017	CT 02	328,254	8'291,390	2.50
	CT 03	328,466	8'291,699	3.30

	CT	04	328,275	8'291,712	3.40
	C	1	328,184	8'291,574	1.80
	C	2	328,212	8'291,631	1.60
	C	3	328,258	8'291,697	1.60
	C	4	328,314	8'291,756	1.70
2016	C	5	328,443	8'291,742	1.60
	C	6	328,513	8'291,606	1.60
	C	7	328,508	8'291,472	1.70
	C	8	328,403	8'291,385	1.90
	C	9	328,407	8'291,375	1.40
	C	10	328,192	8'291,681	0.50
	C	11	328,272	8'291,771	0.50
	C	12	328,396	8'291,762	0.50
	C	1	328,424	8'291,400	1.50
2014	C	2	328,506	8'291,477	2.20
	C	3	328,275	8'291,759	2.40
	C	4	328,324	8'291,369	3.80
	C	1	328,202	8'291,651	3.00
	C	2	328,548	8'291,710	3.00
	C	3	328,157	8'291,642	0.60
2009	C	4	328,194	8'291,674	2.70
	C	5	328,242	8'291,740	0.60
	C	6	328,364	8'291,787	1.20
	C	7	328,571	8'291,541	2.00
	C	8	328,507	8'291,511	2.70

Ensayos de campo

En la etapa de ejecución de las investigaciones geotécnicas se realizaron una serie de ensayos de campo tales como densidad de campo, humedad, ensayos SPT y permeabilidades. Los resúmenes de los ensayos realizados se presentan a continuación:

Densidad de Campo

Se realizó pruebas de densidad in situ mediante el método del cono de arena (ASTM D1556). El siguiente Cuadro muestra las densidades y el contenido de humedad obtenido como resultados de esta prueba de campo.

Tabla 12: Resumen de resultados del ensayo de densidad de campo

SECTOR	CALICATA	PROF. (m)	SUCS	DENSIDAD NATURAL (gr/cm ³)	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (gr/cm ³)
Estribo Izquierdo	C 1	1.80	SM	2.13	3.37	2.06
Sector Central	C 2	1.60	SM	2.00	4.37	1.92
Sector Central	C 3	1.60	SM	1.89	3.54	1.82
Sector Central	C 4	1.70	SP-SM	1.66	10.39	1.50
Estribo Derecho	C 5	1.60	SP-SM	1.45	1.33	1.43
Aguas Arriba	C 6	1.60	GC	1.44	4.52	1.38
Aguas Arriba	C 7	1.70	GC	1.67	2.96	1.63
Aguas Arriba	C 8	1.90	GC	1.47	4.61	1.40
Aguas Arriba	C 9	1.40	GC	2.02	1.43	1.99

Ensayos de Penetración Estándar (SPT) y Penetración Dinámica Ligera (DPL)

En los programas de ensayos de campo se programaron la ejecución de sondajes verticales, los cuales fueron convenientemente ubicadas en el área que comprende el Depósito de Relaves en estos sondajes se realizaron ensayos SPT, cuyas ubicaciones y resumen de resultados se presenta en los siguientes cuadros:

Tabla 13: Resumen de resultados del ensayo SPT

AÑO	SONDEO	COORDENADAS UTM WGS-84		PROF. (m)
		ESTE	NORTE	
2022	SPT-01	328,183	8'291,561	9.00
	SPT-02	328,225	8'291,648	7.00
	SPT-03	328,284	8'291,730	9.00
	SPT-04	328,338	8'291,755	9.00
2020	SPT-01	328,289	8'291,744	15.00
	SPT-02	328,248	8'291,674	12.00
	SPT-03	328,213	8'291,615	12.00
	SPT-04	328,403	8'291,727	8.45
2019	S - 2	328,419	8 291,514	14.45
	S - 3	328,346	8'291,506	14.45
	S - 4	328,282	8'291,534	13.20
	S - 5	328,223	8'291,626	13.30
	S - 6	328,251	8'291,670	14.45

Tabla 14: Resumen de resultados del ensayo DPL

AÑO	SONDEO	COORDENADAS UTM WGS-84		PROF. (m)
		ESTE	NORTE	
2022	DPL 1	328,189	8'291,571	5.00
	DPL 2	328,208	8'291,632	5.00
	DPL 3	328,252	8'291,699	4.90
	DPL 4	328,315	8'291,761	5.00
	DPL 5	328,443	8'291,745	5.50
	DPL 6	328,508	8'291,606	0.50
	DPL 7	328,510	8'291,470	0.50
	DPL 8	328,401	8'291,387	0.40
	DPL 9	328,160	8'291,618	5.50
	DPL 10	328,197	8'291,675	4.80
	DPL 11	328,276	8'291,768	4.80
	DPL 12	328,397	8'291,757	3.90
2018	DPL 1	328,426	8'291,401	0.80
	DPL 2	328,512	8'291,475	0.20
	DPL 3	328,510	8'291,497	0.50
	DPL 4	328,506	8'291,554	0.30
	DPL 5	328,276	8'291,759	9.60
	DPL 6	328,176	8'291,552	5.80
	DPL 7	328,468	8'291,414	2.80

Ensayos de Laboratorio

Luego de obtenidas las muestras de relaves y suelos extraídos de las calicatas y perforaciones, se realizaron ensayos de laboratorio, cuyos resultados permitieron determinar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales que se emplearán en los análisis geotécnicos. En el siguiente Cuadro se muestra la lista de los ensayos de laboratorio realizados:

Tabla 15: Resumen de ensayos de laboratorio

ENSAYO	NORMA	JMF (2022)	ACOMISA (2020)	HYGEOMIN (2019)	GEOSERVICE (2016)
Abrasión	ASTM-C-131				X
Análisis Granulométrico	ASTM D422 63	X	X	X	X
Análisis Químico					X
Clasificación SUCS	ASTM D2487 98	X	X	X	X
Compresión Triaxial CU	ASTM D2850		X		X
Compresión Triaxial UU	ASTM D2850		X		
Contenido de Humedad	ASTM D2216 98	X	X	X	
Corte Directo	ASTM D3080	X		X	

Densidad es Máxima s y Mínimas	ASTM D4253, D4254	X				
Durabilidad	ASTM-C-88					X
Peso Específico de Sólidos	ASTM D854					X
Gravedad Específica y Absorción	ASTM-C-27/ASTM-C- 128	X				X
Límites de Atterberg	ASTM D4318 98	X	X		X	X
Material más Fino que el Tamiz N°200	ASTM-C-117					X
Permeabilidad	ASTM-D-5084		X			X
Peso Volumétrico Suelto	ASTM-C-29					X
Peso Volumétrico Varillado Seco	ASTM-C-29					X
Proctor Estándar	ASTM D696				X	X
Proctor Modificado	ASTM D1557	X	X		X	

A continuación, se presenta de manera resumida los resultados de los ensayos obtenidos en laboratorio realizados a los diferentes materiales en las diferentes campañas de ensayos realizados presentes en el Depósito de Relaves Huaybillo.

Tabla 16: Resumen de resultados de ensayos de laboratorio

MUESTRA	CALICATA	PROF. (m)	SUCS	GRANULOMETRIA			LIMITES DE ATTERBERG			CONT. HUMEDAD (%)
				GRAVA (%)	ARENA (%)	FINOS (%)	LL(%)	LP (%)	IP(%)	
M-1	CT-01	2.30	GP-GC	58.50	25.50	11.40	19.50	14.40	5.10	10.30
M-1	CT-02	2.00	GC-GM	67.90	12.40	19.60	21.30	14.70	6.60	10.30
M-1	CT-04	2.00	SM	-	87.30	12.70	NP	NP	NP	24.00
M-2	TR-01	2.00	GP-GC	76.40	12.80	10.80	21.60	15.70	5.90	10.00
M-1	C-1	-	SM	-	85.00	15.00	-	-	-	12.90
M-1	C-2	0.00-1.60	SM	-	86.10	13.90	-	-	-	12.40
M-1	C-3	0.00-1.60	SM	-	85.80	14.20	-	-	-	11.40
M-1	C-4	0.00-1.70	SP-SM	-	90.30	9.70	-	-	-	7.93
M-1	C-5	-	SP-SM	-	90.30	9.70	-	-	-	6.30
M-1	C-6	0.00-1.60	GC	54.40	26.70	18.90	39.90	18.30	21.20	10.30
M-1	C-7	-	GC	54.70	27.70	17.60	40.00	18.00	22.00	7.80
M-1	C-8	0.00-1.60	GC	56.20	26.90	16.90	39.30	18.20	21.10	11.50
M-1	C-9	-	GC	45.40	34.50	20.10	33.00	20.00	13.00	10.50
M-1	C-10	0.00-1.90	SM	-	86.20	13.80	-	-	-	13.50
M-1	C-11	0.00-1.70	SP-SM	-	90.80	9.20	-	-	-	6.15
M-1	C-12	0.00-1.70	SP-SM	-	90.50	9.50	-	-	-	7.16
M-1	Relave Fino	-	ML	-	46.10	53.90	30.00	28.00	2.00	27.10
Talud	C-1	-	GC	58.60	27.00	14.40	34.30	17.70	16.70	10.80
Talud	C-2	-	SM	3.30	69.50	27.30	NP	NP	NP	12.00
Talud	C-3	-	SP-SM	-	92.70	7.30	NP	NP	NP	12.50
Base del dique	C-4	-	GC	50.50	34.90	14.60	29.40	26.40	3.00	13.00
M-4	C-5	1.60-3.40	GP-GM	57.80	32.40	9.68	23.50	-	NP	-
M-4	Cantera Cerro	-	GC	48.60	33.50	17.90	31.70	18.80	12.90	-
Relaves Gruesos	C-15	0.00-1.00	SM	-	58.50	41.40	26.90	-	NP	-
Relaves Finos	C-15	-	ML	-	1.10	98.80	45.20	23.60	21.50	-
Dren	C-13	1.40-3.30	SM	12.70	55.80	31.40	18.40	-	NP	-
M-1	Cantera Rio Paratia	-	GP	58.50	39.80	1.70	-	-	-	-

Caracterización Geotécnica de los Materiales

La caracterización geotécnica de los materiales que conforman el Depósito de Relaves Huaybillo, se ha definido a partir de las investigaciones geotécnicas realizadas.

Unidades Geotécnicas

De acuerdo al mapeo geológico geotécnico, registros de calicatas e información existente de los diferentes estudios realizados al Depósito de Relaves, han sido identificadas 03 unidades geotécnicas, las mismas que se describen a continuación:

A.) Unidad Geotécnica I: Depósito Aluvial (Q al)

El suelo de cimentación está conformado por un estrato de suelo aluvial cuya clasificación SUCS es definida como grava arcillosa (GC), grava limosa (GM), con lentes de gravas mal gradadas limosas (GP GM). Las propiedades de resistencia fueron definidas de acuerdo a los ensayos realizados por en el Estudio V, el material de cimentación presenta una cohesión de 0 kPa y un ángulo de fricción de 40^a.

B.) Unidad Geotécnica II: Depósito Antrópicos

Son denominados de esta manera los depósitos de suelos que han sufrido alteraciones debido a diversas actividades humanas, las mismas que modifican el grado de compacidad, humedad, granulometría, estado de reposo, etc.; para obtener algún propósito y/o beneficio de acuerdo de las características orogénicas; sin embargo una vez dispuestas en su ubicación final, adquieren características particularmente propias, a continuación se describen los tipos de depósitos antrópicos ubicados en la zona de estudio. Dique de Arranque: El dique de arranque está conformado por un relleno compactado de material clasificado como grava arcillosa (GC) con presencia de

fragmentos subangulosos procedente de la cantera Nivel Cero. Las propiedades de resistencia fueron definidas en base a los ensayos realizados en el Estudio III, el material del dique de arranque presenta una cohesión de 0 kPa y un ángulo de fricción de 31°. Relaves Gruesos Cicloneados: El relave grueso conforma el cuerpo de la presa y es obtenido por cicloneo de la pulpa de relaves. El material ha sido clasificado como arena limosa (SM), medianamente densa, las propiedades de resistencia fueron definidas en base a los resultados de los ensayos SPT realizados en el Estudio III, por lo que se determinó que el material de relave grueso presenta una cohesión de 0 kPa y un ángulo de fricción de 33°. Relaves Finos: El relave fino conforma el vaso del depósito y son obtenidos por cicloneo de la pulpa de relaves. El material ha sido clasificado como limo de baja plasticidad (ML). Las propiedades de resistencia fueron definidas de acuerdo a los ensayos efectuados en el Estudio V, el material de relave presenta un ángulo de fricción de 15° y cohesión 15 kPa. Dren: Las propiedades de resistencia fueron definidas de acuerdo a los ensayos efectuados en el Estudio IV, el material de drenaje presenta una cohesión de 0 kPa y un ángulo de fricción de 34°. Material de Préstamo: El dique perimetral está conformado por material de préstamo clasificado como grava arcillosa con arena (GC). Las propiedades de resistencia fueron definidas en base a los resultados de los ensayos realizados por ACOMISA (2016), el material de préstamos presenta una cohesión de 15 kPa y un ángulo de fricción de 35°.

C.) Unidad Geotécnica III: Formación Palca (Nm pa/Tb)

Está conformada por tobas volcánicas de composición riolítica a dacítica. Estas rocas se encuentran moderadamente fracturadas y tienen una resistencia media. Sus afloramientos se encuentran en formación restringida en los alrededores de la zona de estudio.

Nivel de Agua

De acuerdo al registro de los piezómetros generados por JMF en el estudio I (Ver Anexo 2) distribuidos en el depósito de relaves Huaybillo, existe presencia de nivel freático (flujo establecido), que se encuentra dentro de los parámetros normales. Se ha observado durante la inspección de campo afloramientos al pie de dique principal, estos afloramientos pueden ser generados por las aguas de infiltración provenientes de las laderas ubicadas al norte del depósito o por posibles infiltraciones desde el vaso de la relavera.

4.4. Evaluación de estabilidad física para el cierre del depósito de relave Huaybillo

De acuerdo con las unidades geotécnicas identificadas de los materiales obtenidos durante las investigaciones geotécnicas, se le realizaron ensayos de campo y laboratorio que permitió caracterizarlos y obtener los parámetros de resistencia necesarios para evaluar las condiciones de estabilidad de los taludes del Depósito de Relaves, el resumen de los parámetros se presenta en el siguiente cuadro:

Tabla 18: Resumen de los Parámetros Geotécnicos de los Materiales

MATERIAL	Peso Unitario kN/m ³	ESFUERZOS TOTALES	
		COHESIÓN (KPA)	FRICCIÓN (°)
Relave Fino	16.00	15.00	15.00
Material de Préstamo	21.00	15.00	35.00
Relave Grueso	16.00	0.00	33.00
Dique de Arranque	20.00	0.00	31.00
Dren	18.00	0.00	34.00
Cimentación	22.00	0.00	38.00

Condiciones de Análisis

Las condiciones de análisis de se basan en la definición del nivel freático en estas, considerar las secciones más críticas con mayor altura y mayor pendiente, mismas que deberán ser

evaluadas en condiciones estáticas y pseudoestáticas en condiciones actuales y condiciones de cierre proyectado, ambas en método de falla circular.

Metodología de Análisis

Para el análisis de estabilidad de taludes se utilizó el programa de cómputo SLIDE (Rocscience, 2003), versión 6. Se utilizó el método de equilibrio límite y el método de Spencer (1967), empleando dovelas para el cálculo de superficies de falla. La superficie de falla crítica es definida como aquella que proporciona el menor factor de seguridad y fue encontrada en forma interactiva modificando las condiciones de búsqueda en el programa.

El método de Spencer considera todas las fuerzas entre las dovelas; asimismo, supone que las fuerzas entre dovelas tienen una inclinación constante (θ) a lo largo de toda la recta, donde la relación entre fuerzas verticales (X) y horizontales (E) cumple la siguiente relación:

$$\frac{X}{E} = \tan\theta$$

Este método satisface todas las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos, y es comprendido como un caso particular del método Morgenstern y Price (1965). Éste último método resulta mucho más laborioso en su aplicación debido a que se debe especificar las fuerzas entre dovelas.

4.5. Estabilidad física del depósito de relave Huaybillo

Factores de Seguridad Mínimos

Los factores de seguridad mínimos se han basado en los requisitos mínimos establecidos por la norma del MEM (1997) y por el CDA (2014). En el que se establece que para largo plazo

en condiciones estáticas el factor de seguridad mínimo es de 1.50; mientras que, para el caso sísmico empleando el método pseudoestático, el factor de seguridad mínimo es de 1.0.

Tabla 19: Factores de Seguridad Mínimos para el Análisis de Estabilidad

CONDICIÓN DE CARGA	FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO	
	ESTÁTICA	SÍSMICA
Durante o al finalizar la construcción	1.3	1.0
Largo plazo (cierre)	1.5	1.0

En caso que el factor pseudo-estático y/o estático se encuentren por debajo de los valores permisibles, se realizará un análisis de deformaciones permanentes, para asegurar que los desplazamientos permanentes inducidos por sismo no superen los permisibles para este tipo de estructuras.

Secciones de Análisis

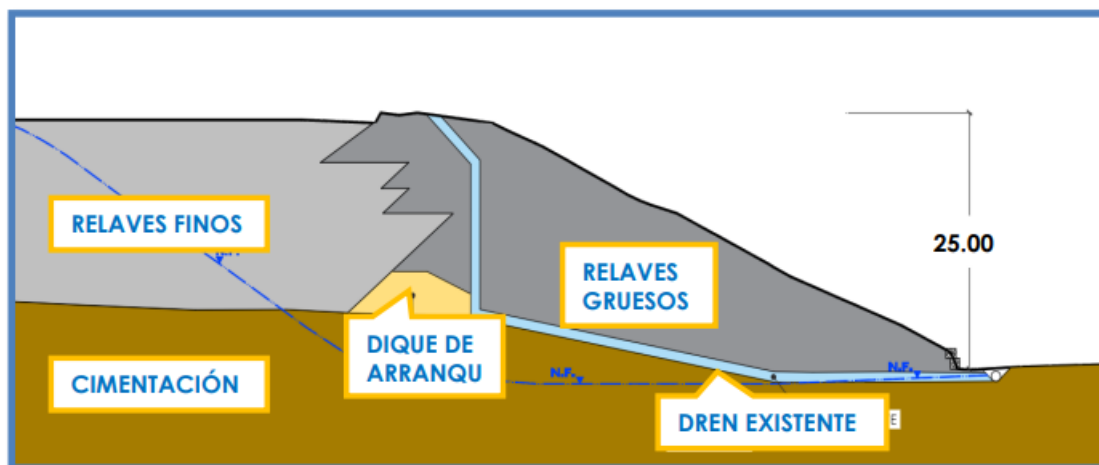
Se generaron un total de 4 secciones de análisis (A, B, C y D), mismas que representan las secciones más críticas encontradas en el depósito de relaves, en los planos SC-031-2020-100- GT-03 y SC-031-2020-100-GT-04, se puede apreciar la ubicación en planta de las secciones y los materiales que conforman las secciones. Mencionadas secciones fueron analizadas tanto en condiciones actuales como en condiciones proyectadas (perfilado y corte). A continuación, se describen las secciones analizadas.

Sección A-A

Esta sección se encuentra ubicada en el Dique Principal, este se encuentra compuesto por Relaves Gruesos; en la sección a su vez se muestra el dren chimenea existente en el cuerpo del dique, la disposición de los relaves finos, la línea freática tentativa, el dique de arranque y la

profundidad de la cimentación. Su altura de este es de aproximadamente 25.00m con talud general de 2.3H:1.0V.

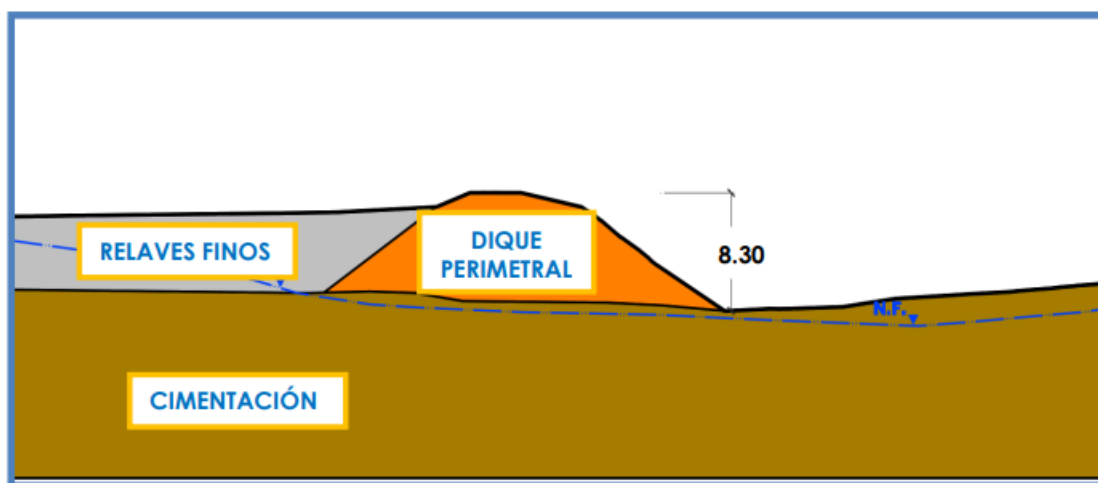
Figura 12: Sección A-A en condiciones Actuales



Sección B-B

Esta sección se encuentra al Noreste del Depósito de Relaves y presenta el Dique Perimetral conformado por material de préstamo, el relave fino del vaso, la línea freática tentativa y la profundidad de la cimentación. Su altura es de aproximadamente 8.30m y presenta un talud global de 1.5H:1.0V.

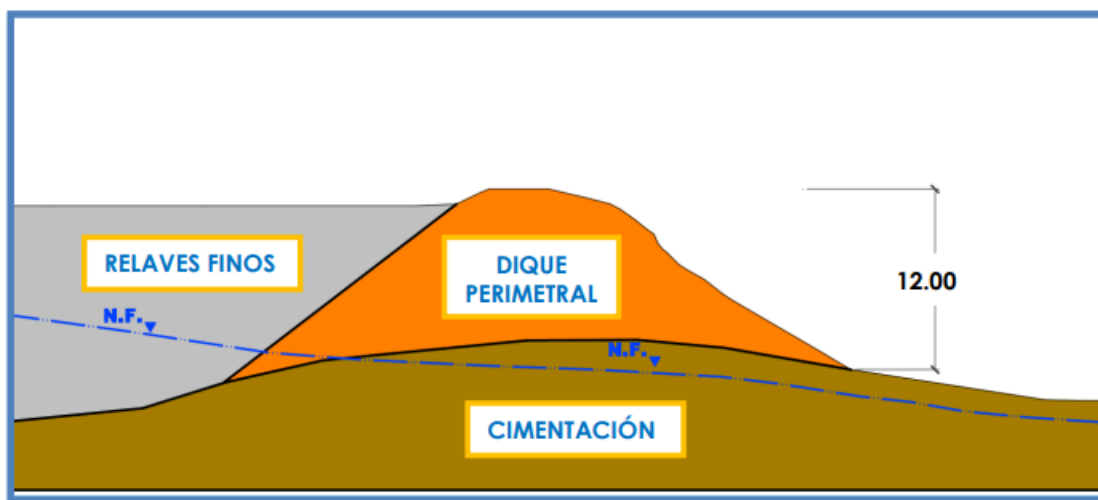
Figura 13: Sección B-B en condiciones Actuales



Sección C-C

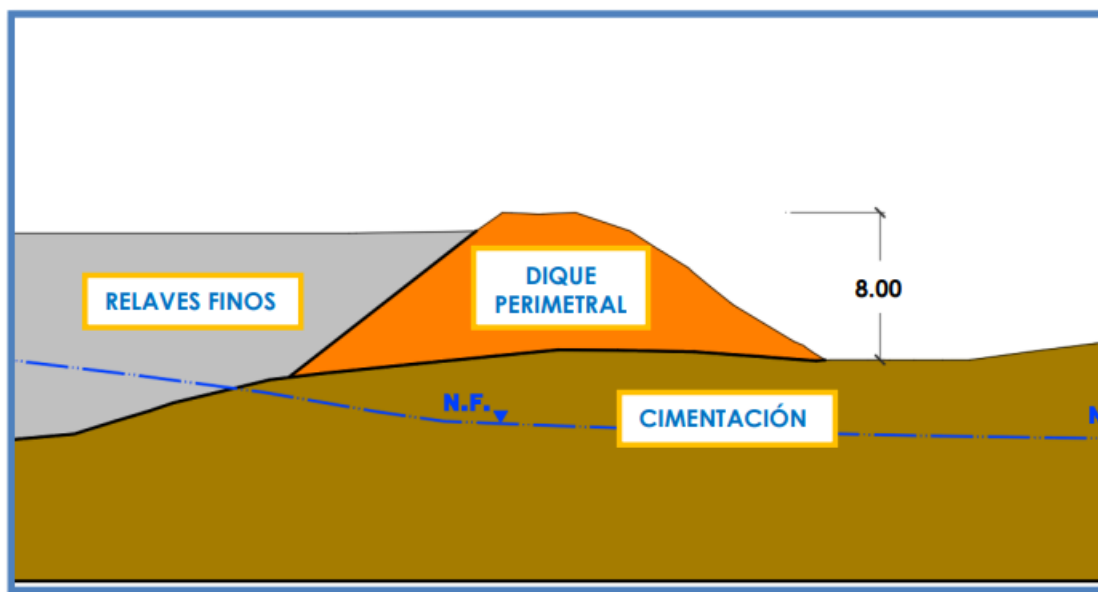
Esta sección se encuentra al Este del Depósito de Relaves y presenta el Dique Perimetral conformado por material de préstamo, el relave fino del vaso, la línea freática tentativa y la profundidad de la cimentación. Su altura es de aproximadamente 12.00m y presenta un talud global de 1.4H:1.0V.

Figura 14: Sección C-C en condiciones Actuales



Sección D-D

Esta sección se encuentra al Sur del Depósito de Relaves y presenta el Dique Perimetral conformado por material de préstamo, el relave fino del vaso, la línea freática tentativa y la profundidad de la cimentación. Su altura es de aproximadamente 8.00m y presenta un talud global de 1.5H:1.0V.

Figura 15: Sección D-D en condiciones Actuales

Resultados de Análisis

Los resultados de los análisis de estabilidad realizados tanto en condiciones estáticas como pseudoestáticas, en condiciones actuales y proyectadas son presentados en el Anexo 3 y 4, y a su vez se presentan en resumen en el siguiente cuadro:

Tabla 20: Resultados de Análisis de Estabilidad Física de taludes

SECTOR/SECCIÓN	TIPO DE FALLA	CONDICIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD	
			ESTÁTICO	PSEUDOESTÁTICO (kh=0.135)
Dique PrincipalSección A -A	Circular	Actual	1.509	1.091
		Proyectado	1.572	1.124
Dique PerimetralSección B -B	Circular	Actual	2.015	1.576
		Proyectado	2.027	1.596
Dique PerimetralSección C -C	Circular	Actual	1.675	1.321
		Proyectado	1.739	1.362
Dique Perimetral Sección D -D	Circular	Actual	1.963	1.539
		Proyectado	1.976	1.559

De los resultados obtenidos se puede indicar que las secciones analizadas y determinadas como las desfavorables se confirma que estos son estables tanto en condiciones actuales como proyectadas a largo plazo (condición de cierre), ya que los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos son mayores a los requeridos.

CONCLUSIONES

Con respecto al objetivo general, se ha llevado a cabo una exhaustiva evaluación de los criterios de diseño utilizados para asegurar la estabilidad física del depósito de relaves Huaybillo durante su fase de cierre. Se han identificado y analizado diferentes parámetros y variables que inciden en la estabilidad del depósito, lo que ha permitido proponer medidas y acciones para garantizar la integridad estructural y prevenir posibles colapsos.

En respuesta al objetivo específico primero, se ha obtenido un conocimiento detallado de las características geotécnicas del depósito de relaves Huaybillo, incluyendo su composición, permeabilidad, resistencia y comportamiento mecánico. Esto ha sido fundamental para entender el comportamiento del material depositado y realizar una evaluación precisa de su estabilidad física.

Por otro lado el objetivo específico 2, se han identificado y analizado los criterios clave que influyen en la evaluación de la estabilidad física del depósito de relaves Huaybillo durante el proceso de cierre. Estos criterios incluyen aspectos geotécnicos, hidrogeológicos, estructurales y de gestión del depósito, los cuales han sido considerados para proponer un diseño y plan de cierre que garantice su estabilidad.

Finalmente, con el el objetivo específico 3 mediante la aplicación de técnicas y análisis geotécnicos, se ha determinado que el depósito de relave Huaybillo en la unidad minera El Cofre 2023 presenta una adecuada estabilidad física. Se han realizado mediciones y monitoreo de variables clave, y los resultados indican que el depósito se encuentra dentro de los parámetros aceptables de seguridad para su cierre.

RECOMENDACIONES

Continuar con el monitoreo y evaluación periódica de las características geotécnicas del depósito de relaves Huaybillo durante su fase de cierre. Esto permitirá verificar la estabilidad física a lo largo del tiempo y tomar acciones preventivas en caso de detectar cambios significativos en el comportamiento del depósito.

Implementar un plan de gestión y mantenimiento adecuado para el cierre del depósito de relaves. Esto incluye la implementación de medidas de control de erosión, revegetación y manejo de aguas superficiales e infiltradas para minimizar la generación de lixiviados y prevenir la liberación de contaminantes al ambiente.

Realizar una revisión y actualización periódica de los criterios de diseño utilizados para la estabilidad física del depósito de relaves. Los avances en tecnología y conocimiento geotécnico pueden brindar nuevas perspectivas para mejorar la seguridad del cierre y evitar posibles problemas a futuro.

Garantizar una adecuada capacitación y entrenamiento del personal involucrado en el cierre del depósito de relaves. Es importante que el personal cuente con la formación necesaria para implementar las medidas de sostenimiento y estabilidad de manera efectiva y segura.

Realizar simulaciones y análisis de escenarios para evaluar la respuesta del depósito de relaves frente a posibles eventos geotécnicos, como sismo o movimientos del terreno. Esto permitirá identificar áreas de riesgo y tomar acciones preventivas para aumentar impactos potenciales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta Medina, I., & Barón Condr, H. (2019). *Análisis geomecánico para la estabilidad en las labores de desarrollo y producción de la mina Santa Clotilde 7-Chongoyape-Lambayeque*. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/38854/Acosta_MIE-Bar%C3%B3n_CHE.pdf?sequence=1
- Barton Hoek Brown Romana, B. Y., & Norly Belandria Dra Profesor Francisco Bongiorno, P. (2016). *CLASIFICACIONES GEOMECÁNICA DE DE LOS MACIZOS ROCOSOS SEGÚN: GEOTECNIA APLICADA*.
- Belizario Calsin, M., & Condori Cardenas, R. (2021). *Aplicación del método gráfico de estabilidad demathews en vetas angostas para determinarla dimensión geométrica óptima del tajeo n°1 y controlar su inestabilidad en la U.M. Debra Luz*. <http://hdl.handle.net/10757/659079>
- Castresana González, L. (2016). *Análisis comparativo de metodología de sostenimiento*. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/38203>
- Cotrado Laura, M., & Amado Romero, D. (2021). *Caracterización geomecánica del macizo rocoso para el diseño de un sostenimiento adecuado en mina Chaparra, Caravelí, Arequipa - 2021*. 1–90. https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/5732/M.Cotrado_D.Amado_Tesis_Titulo_Profesional_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Jordá-Bordehore, L., Jordá-Bordehore, R., Durán Valsero, J. J., & Romero-Crespo, P. L. (2017). Evaluación de la estabilidad de las labores y pilar corona en las minas abandonadas de S'Argentera (Ibiza, España) combinando clasificaciones geomecánicas, métodos empíricos y análisis numérico-enfocado a su posible aprovechamiento turístico. *Boletín Geológico y Minero*, 128(1), 3–24. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.128.1.001>
- Loarte Trujillo, O. (2018). *GEOMECANICA PARA EL DISEÑO DEL SOSTENIMIENTO DE LAS LABORES MINERAS EN LA CORPORACIÓN MINERA TOMA LA MANO – CORMITOMA S.A. – AÑO 2018*.

http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/2383/T033_45462469_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Madariaga, J. M. (2015). *CONVENIO DE COLABORACIÓN ENTRE LA SECRETARÍA DE ESTADO DE ENERGÍA DEL MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO Y LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (LABORATORIO OFICIAL J.M. MADARIAGA – LOM)*.
- OSINERGMIN. (2017). *GUÍA DE CRITERIOS GEOMECÁNICOS PARA DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, SUPERVISIÓN Y CIERRE DE LABORES SUBTERRÁNEAS* Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas Gerencia de Supervisión Minera.
- Pantaleón Junco, J., & Carbajal Isidro, H. (2017). “*EVALUACIÓN GEOMECÁNICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO, SECUENCIA DE MINADO Y RELLENO DE TAJEOS DE UNA MINA SUBTERRÁNEA.*” <http://hdl.handle.net/20.500.12404/8689>
- Ramírez, P., Leandro, O., & Monge, A. (2013). *Mecánica d Fundamentos e Ing de Rocas: eniería de Taludes.*
- Suasnabar Ortega, P. (2019). *Análisis técnico para la optimización del sostenimiento en los frentes de la compañía Minera Casapalca S.A.*
http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1564/1/T026_47344236_T.pdf
- Zorrilla Altuna, L. (2015). *La seguridad en el sostenimiento con criterios geomecánicos en la excavación subterránea de la central hidroeléctrica cerro del Águila.*

ANEXOS
Anexo 1: Matriz de consistencia
MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO: “EVALUACION DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO PARA GARANTIZAR LA ESTABILIDAD FISICA PARA EL CIERRE DEL DEPÓSITO DE RELAVE HUAYBILLO DE LA UNIDAD MINERA EL COFRE”

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA
<p>Problema general ¿Sera posible realizar la evaluación de los criterios de diseño para garantizar la estabilidad fisica para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023?</p>	<p>Objetivo general Realizar la evaluación de los criterios de diseño para garantizar la estabilidad fisica para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023.</p>	<p>Hipótesis general Es posible realizar la evaluación de los criterios de diseño para garantizar la estabilidad fisica para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023.</p>	<p>Ámbito: – Temporal : 2023 Espacial : Unidad Minera el cofre Tipo de investigación Aplicada</p> <p>Nivel de investigación Explicativo</p> <p>Método de investigación General: Científico Específico: Inductivo–deductivo</p> <p>Diseño de estudio Cuasi Experimental</p> <p>Instrumento y técnica ficha de mapeo geomecanico Observación</p> <p>Procesamiento Presentación descriptiva con tablas de frecuencia, gráficos y estadística inferencial.</p>
<p>Problemas específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> – ¿Cuáles son las características geotecnicas del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023? – ¿Cuáles son los criterios que inciden en la evaluación de estabilidad fisica para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023? – ¿Cómo determinar la estabilidad fisica del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023? 	<p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> – Conocer las características geotecnicas del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023. – Determinar los criterios que inciden en la evaluación de estabilidad fisica para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023. – Determinar la estabilidad fisica del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre, 2023 	<p>Hipótesis específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> – Las características geotecnicas son adecuadas en el depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023. – Los criterios que inciden en la evaluación de estabilidad fisica son significativas para el cierre del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023. – Será posible determinar la estabilidad física del depósito de relave Huaybillo en la unidad minera el cofre 2023. 	

Anexo 2: Ensayos de campo

ENSAYO DE DENSIDAD DE CAMPO

METODO DEL CONO DE ARENA

ASTM D1556

PROYECTO : ESTUDIO DE RECRECIMIENTO DEL DEPÓSITO DE RELAVES HUAYBILLO
 OBRA : CONSTRUCCIÓN
 UBICACIÓN : Distrito de Paratia, Provincia de Lampa, Dpto de Puno
 HECHO POR : JCHR/AZ

FECHA: JUNIO 2016

DENSIDAD DE CAMPO

CALICATA		C - 1	C - 2	C - 3	C - 4
MUESTRA N°		D - 1	D - 1	D - 1	D - 1
PROFUNDIDAD (m.)		1,80	1,60	1,60	1,70
1. Peso del frasco + arena	grs	7090,00	7610,00	7490,00	7670,00
2. Peso del frasco + arena que queda	grs	3650,00	4480,00	3840,00	4890,00
3. Peso de arena empleada	(1) - (2) grs	3440,00	3130,00	3650,00	2780,00
4. Peso de arena en el cono	grs	1355,00	1355,00	1355,00	1355,00
5. Peso de arena en excavación	(3) - (4) grs	2085,00	1775,00	2295,00	1425,00
6. Densidad de la arena	gr/cc	1,34	1,34	1,34	1,34
7. Volumen de material extraído	(5)/(6) cc	1555,97	1324,63	1712,69	1063,43
8. Peso de la muestra	grs	3320,00	2650,00	3230,00	1760,00
9. Densidad húmeda	(8)/(7) grs/cc	2,13	2,00	1,89	1,66
10. Humedad	%	3,37	4,37	3,54	10,39
11. Densidad seca	(9)/(1+(10/100)) grs/cc	2,06	1,92	1,82	1,50

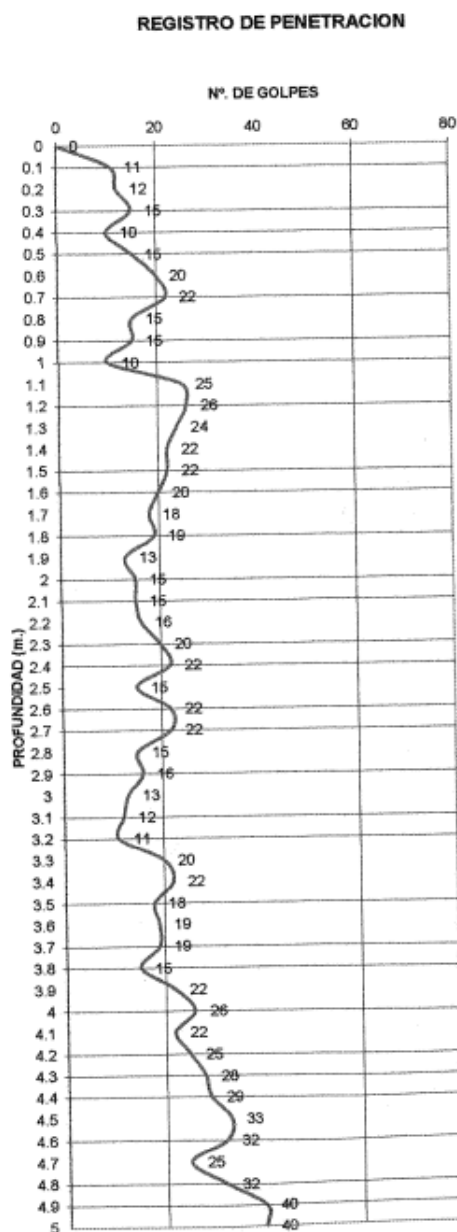
CONTENIDO DE HUMEDAD

TARA N°		50	121	84	92
1. Peso recipiente + suelo húmedo	grs	102,03	100,54	105,54	81,31
2. Peso recipiente + suelo seco	grs	98,90	96,56	102,13	74,19
3. Peso de agua	(1) - (2) grs	3,13	3,98	3,41	7,12
4. Peso de recipiente	grs	5,94	5,39	5,76	5,67
5. Peso de suelo seco	(2) - (4) grs	92,96	91,17	96,37	68,52
6. Contenido de humedad	(3)/(5)*100 %	3,37	4,37	3,54	10,39

ENSAYO DE PENETRACION DINAMICA LIGERA MODIFICADA

PROYECTO : ESTUDIO DE RECRECIMIENTO DEL DEPÓSITO DE RELAVES HUAYBILLO
UBICACIÓN : Distrito de Paratia, Provincia de Lampa, Dpto de Puno
DPL N° : DP - 1 **NIVEL(m):** --
FECHA : JUNIO 2016 **N.F.(m) :** --

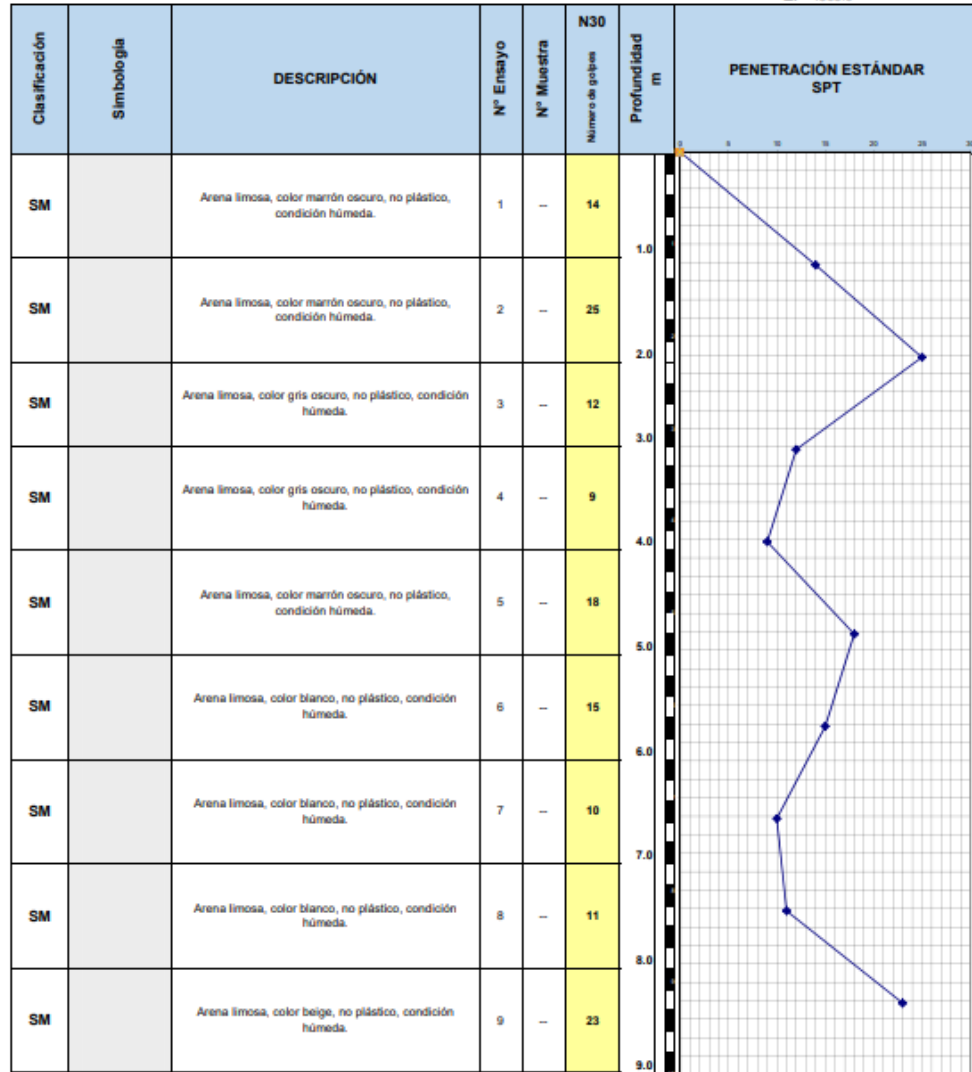
Prof.	N
0	0
0.1	11
0.2	12
0.3	15
0.4	10
0.5	15
0.6	20
0.7	22
0.8	15
0.9	15
1	10
1.1	25
1.2	26
1.3	24
1.4	22
1.5	22
1.6	20
1.7	18
1.8	19
1.9	13
2	15
2.1	15
2.2	16
2.3	20
2.4	22
2.5	15
2.6	22
2.7	22
2.8	15
2.9	16
3	13
3.1	12
3.2	11
3.3	20
3.4	22
3.5	18
3.6	19
3.7	19
3.8	15
3.9	22
4	26
4.1	22
4.2	25
4.3	28
4.4	29
4.5	33
4.6	32
4.7	25
4.8	32
4.9	40
5	40



REGISTRO DE PERFORACION SPT



Proyecto : MODIFICACIÓN DEL DISEÑO DE RECRECIMIENTO DEL DEPÓSITO DE RELAVES HUAYBILLO
N° Proyecto : P200-145-19-04
Cliente : CIEMSA S.A.
Ubicación : U.P. EL COFRE
Sondaje : SPT-01
Operador : L.M.O.
Supervisor : R.G.P.
Fecha : 01/03/2020
E : 328183.0
Coordenadas N : 8291561.0
Z : 4565.0





CORRELACIÓN ENTRE EL NSPT Y EL ÁNGULO DE FRICCIÓN (Φ)

SPT-01																					
Ensayo	Profundidad			Golpeo			NSPT	Factores de Corrección					N60	Correlación entre N60 y el Ángulo de Fricción (Φ)					Ángulo de Fricción PROMEDIO (Φ)	SUCS	Compacidad / Consistencia
				0-15	15-30	30-45		Cn	Ce	Cs	Cr	Cb		Terzaghi & Peck (1948) (*)	Peck et al (1953) (*)	Dunham (1954) (*)	Kishida (1969) (*)	Montenegro & Gonzalez (2014) (*)			
1	1.00	-	1.45	10	7	7	14	1.55	0.90	1	0.75	1	15	32.2	31.8	33.3	32.1	32.3	32.3	SM	Compacidad Medianamente Densa
2	2.00	-	2.45	6	8	17	25	1.35	0.90	1	0.75	1	23	34.2	34.3	36.5	36.3	37.1	35.7	SM	Compacidad Medianamente Densa
3	3.00	-	3.45	5	6	6	12	1.19	0.90	1	0.8	1	10	31.1	30.3	31.1	29.3	29.1	30.2	SM	Compacidad Medianamente Densa
4	4.00	-	4.45	3	4	5	9	1.06	0.90	1	0.85	1	7	30.3	29.2	29.4	27.1	26.5	28.5	SM	Compacidad Suelta
5	5.00	-	5.45	12	7	11	18	0.96	0.90	1	0.85	1	13	31.8	31.3	32.6	31.3	31.3	31.6	SM	Compacidad Medianamente Densa
6	6.00	-	6.45	10	8	7	15	0.88	0.90	1	0.95	1	11	31.3	30.6	31.6	30.0	29.9	30.7	SM	Compacidad Medianamente Densa
7	7.00	-	7.45	7	5	5	10	0.81	0.90	1	0.95	1	7	30.2	29.0	29.1	26.8	26.2	28.3	SM	Compacidad Suelta
8	8.00	-	8.45	7	5	6	11	0.75	0.90	1	0.95	1	7	30.3	29.1	29.2	26.9	26.3	28.3	SM	Compacidad Suelta
9	9.00	-	9.45	13	12	11	23	0.70	0.90	1	0.95	1	14	31.9	31.5	32.9	31.6	31.7	31.9	SM	Compacidad Medianamente Densa

Donde:

NSPT : Valor de N obtenido en campo.

Cn : Factor de corrección por confinamiento de acuerdo a Skempton (1986) de acuerdo a la fórmula $Cn = 2/(1+R_s)$.

Ce : Factor de corrección por energía (ver Tabla 1).

Cs : Factor de corrección por método de muestreo (ver Tabla 1).

Cr : Factor de corrección por longitud de varilla (Ver Tabla 1).

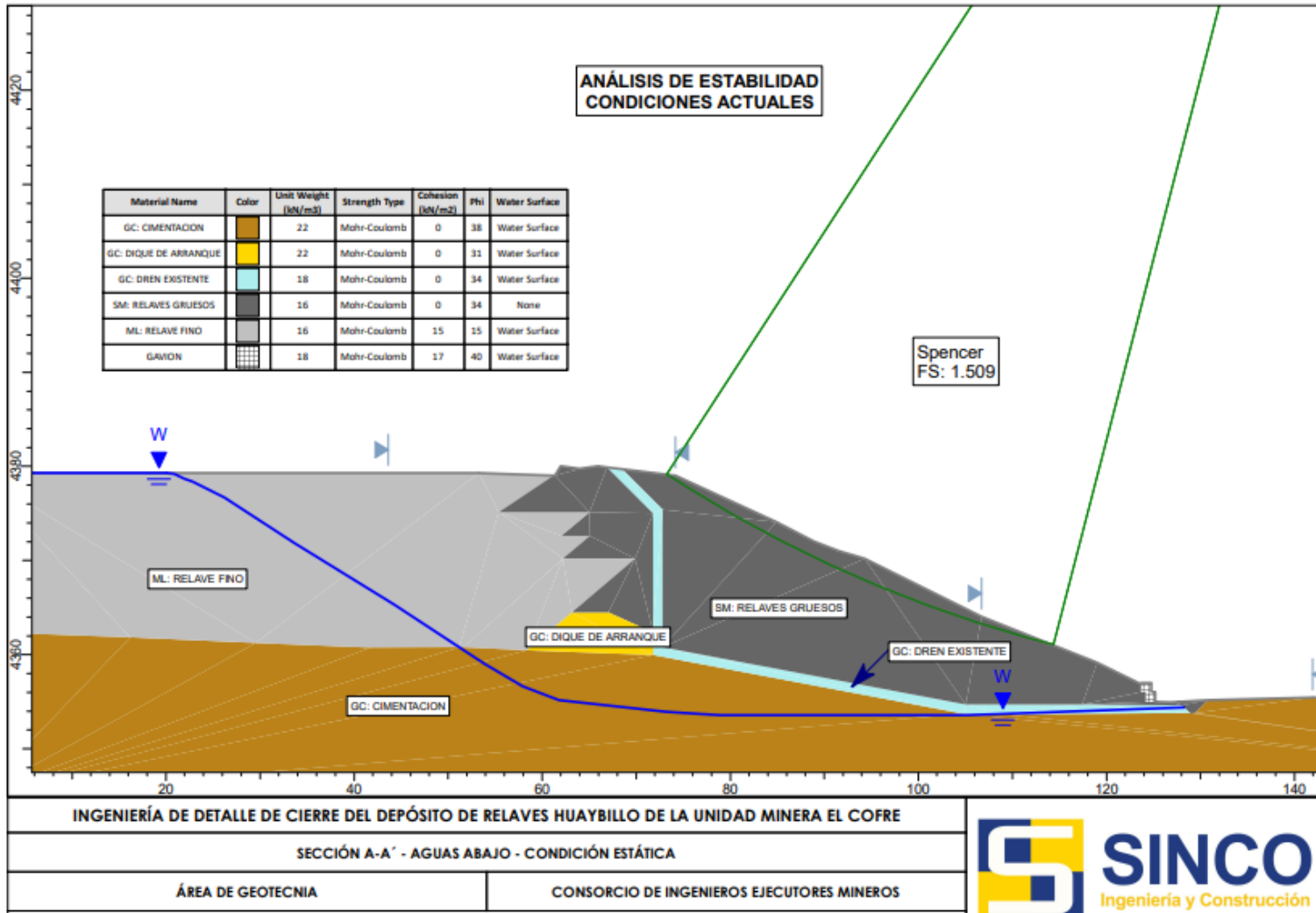
Cb : Factor de corrección por diámetro de la perforación (ver Tabla 1).

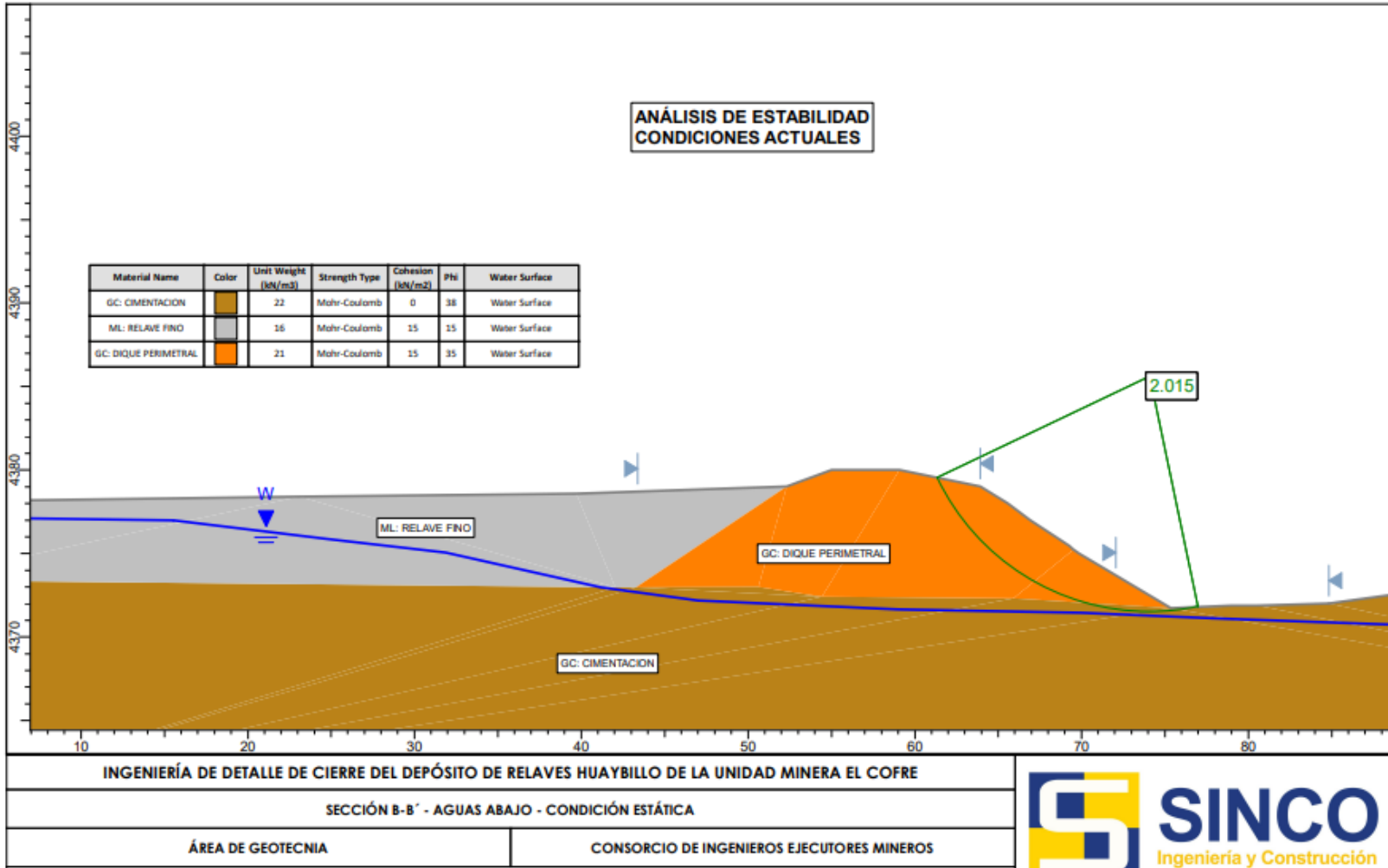
N60 : Valor de N corregido de acuerdo a la fórmula $N60 = NSPT \times Cn \times Ce \times Cs \times Cr \times Cb$

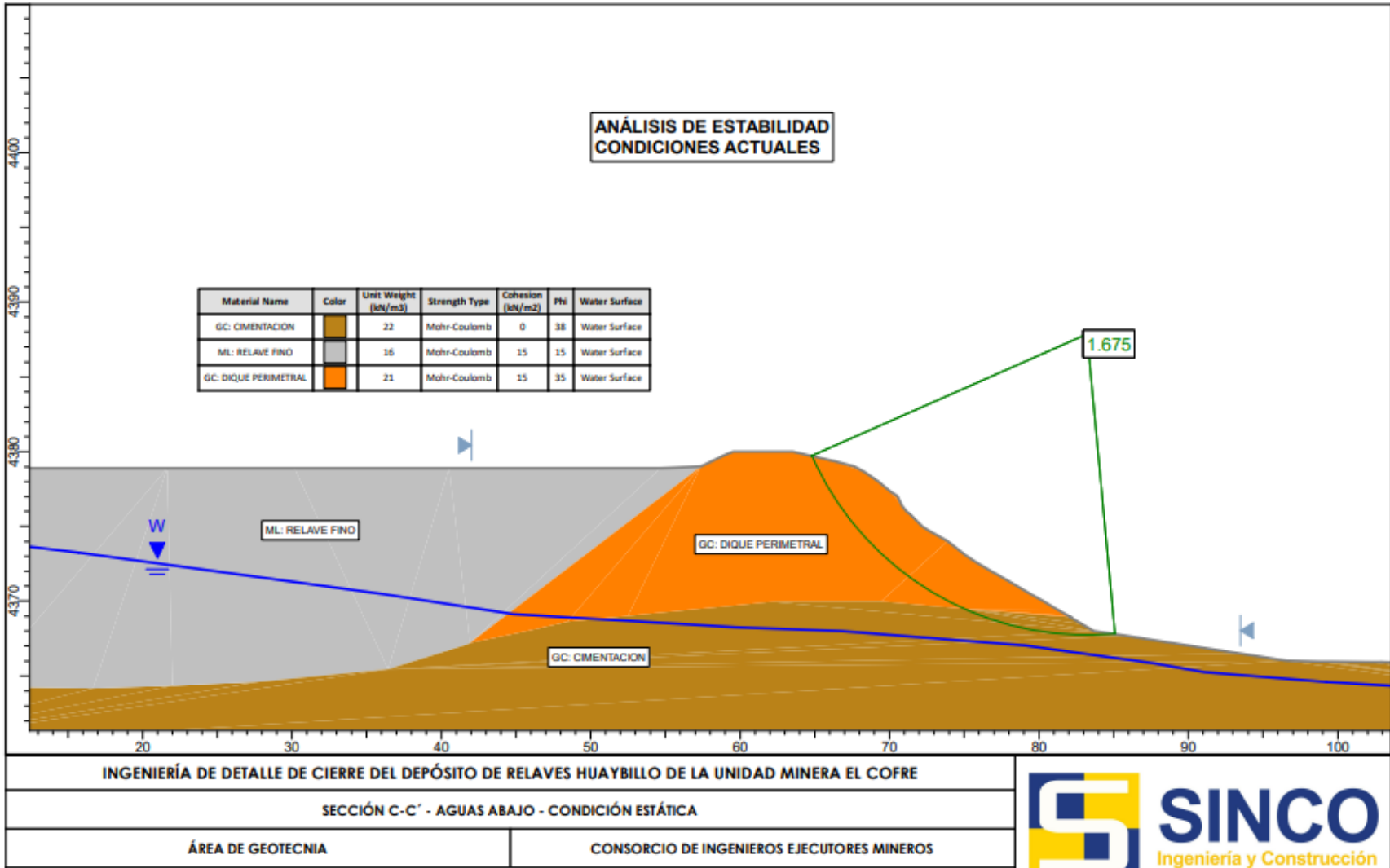
TABLA 2	
Correlaciones entre el N60 y en el ángulo de fricción efectiva de los suelos	
Terzaghi & Peck (1948)	$\Phi = 28.5 + (0.25 * N60)$
Peck et al (1953)	$\Phi = 26.25 \times (2 - \text{EXP}[-N60/62])$
Dunham (1954)	$\Phi = \sqrt{12 \times N60} + 20$
Kishida (1969)	$\Phi = 15 + \sqrt{20 * N60}$
Montenegro & Gonzalez (2014)	$\Phi = 12.79 + \sqrt{25.86 * N60}$

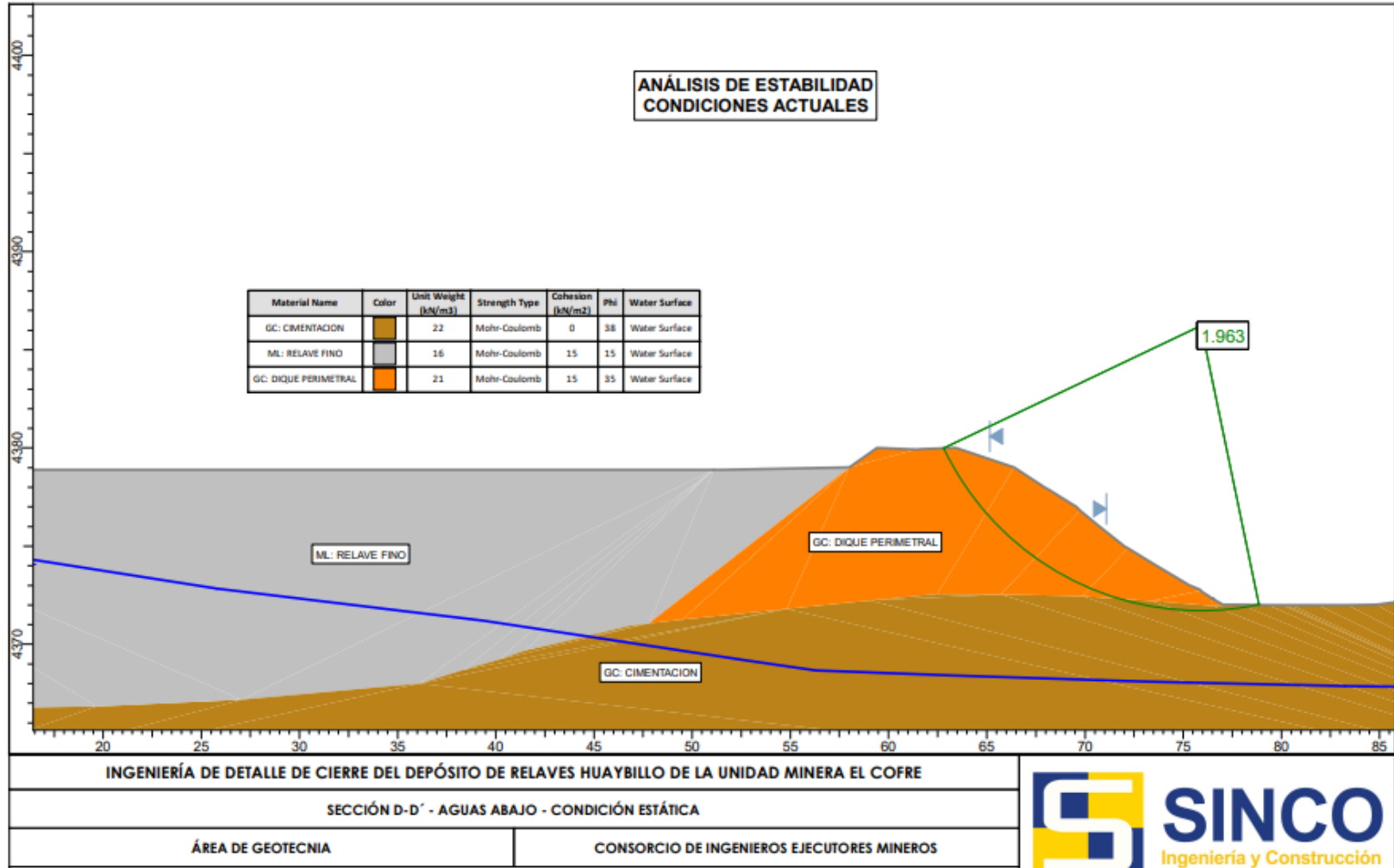
TABLA 1		
Correcciones al SPT (Según Robertson y Wride (1998) y Modificado por Skempton (1986))		
Factor	Variable del Equipo	Término
Relación de Energía	Martillo donut	0.5 - 1.0
	Martillo de seguridad	0.7 - 1.2
	Martillo donut automático	0.8 - 1.3
Diámetro de Perforación	65 - 115 mm	1
	150 mm	1.05
	200 mm	1.15
Longitud de Varilla	< 3 m	0.75
	3 - 4 m	0.8
	4 - 6 m	0.85
	6 - 10 m	0.95
	3 - 4 m	1
Método de Muestreo	Muestreador estándar	1
	Muestreador sin revestimiento	1.1 - 1.3

Anexo 3: Modelamiento en condiciones estáticas

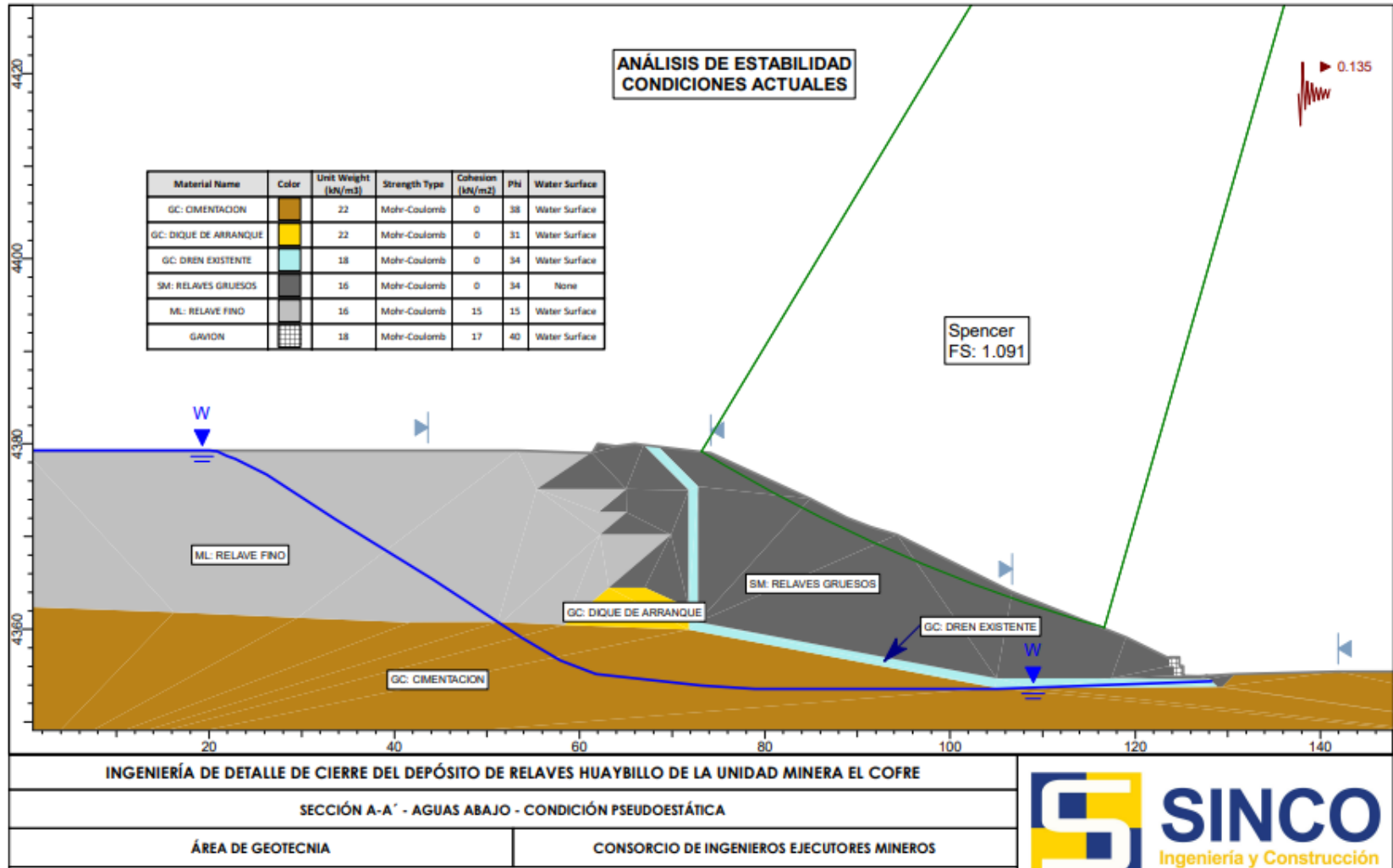


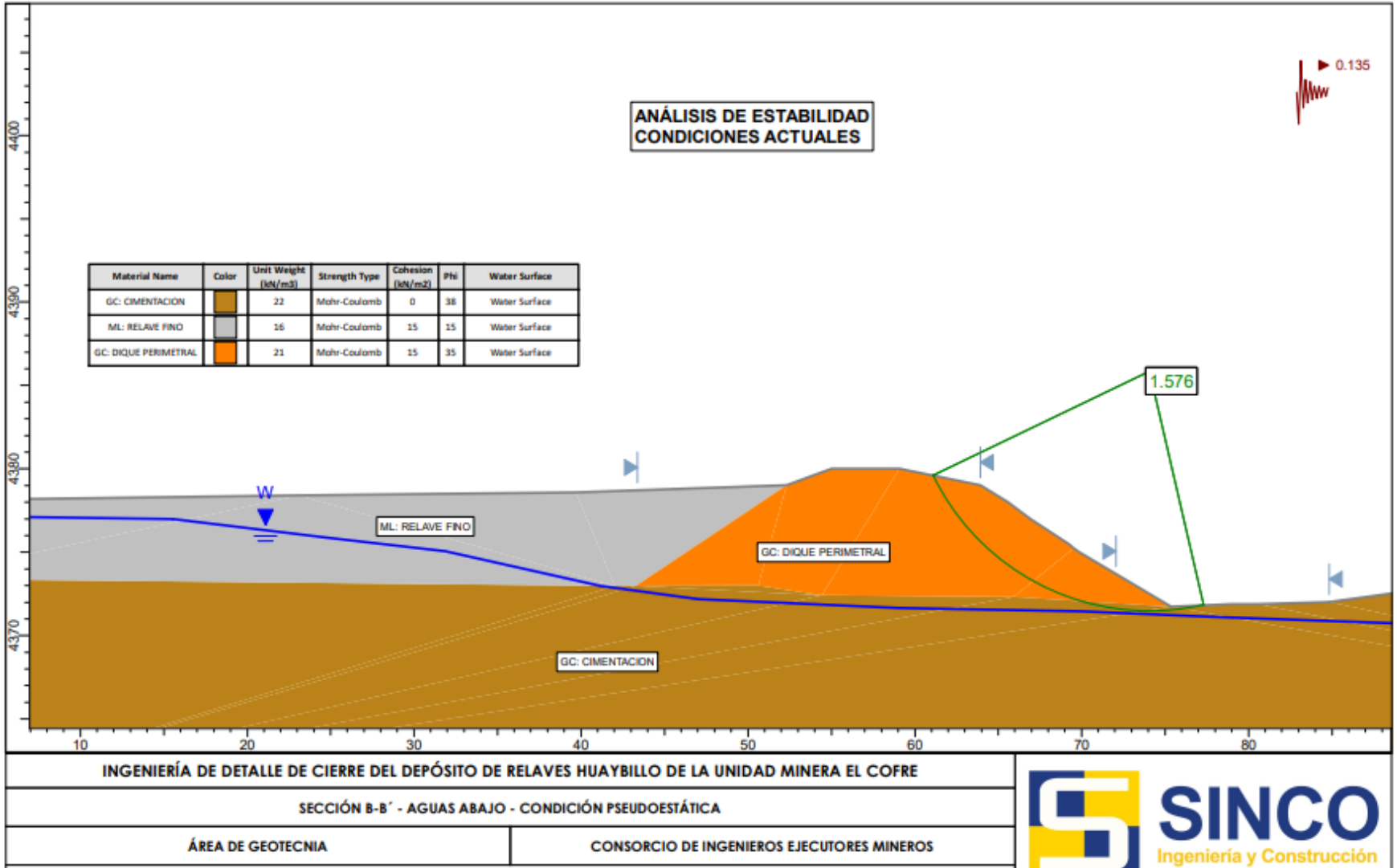


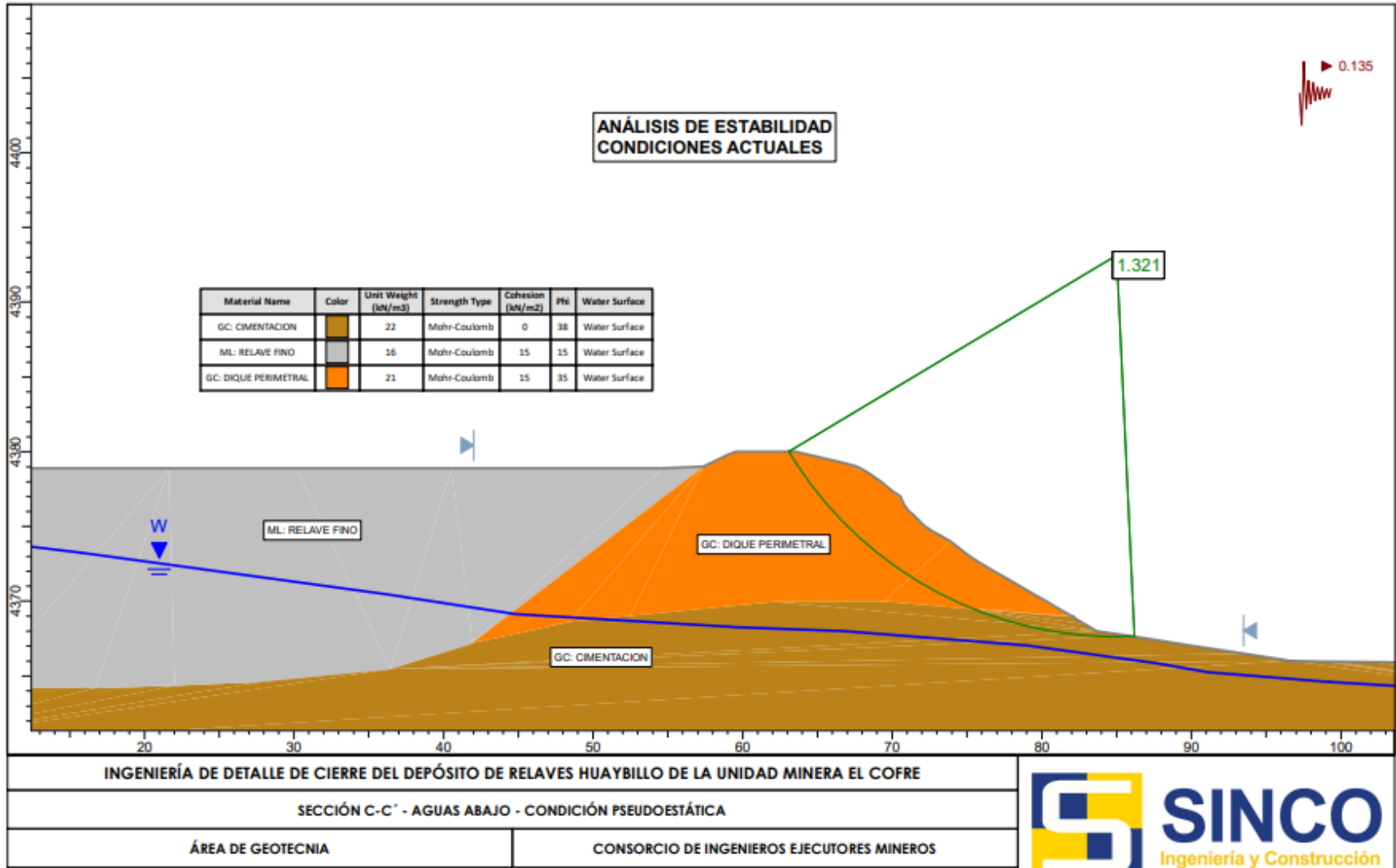


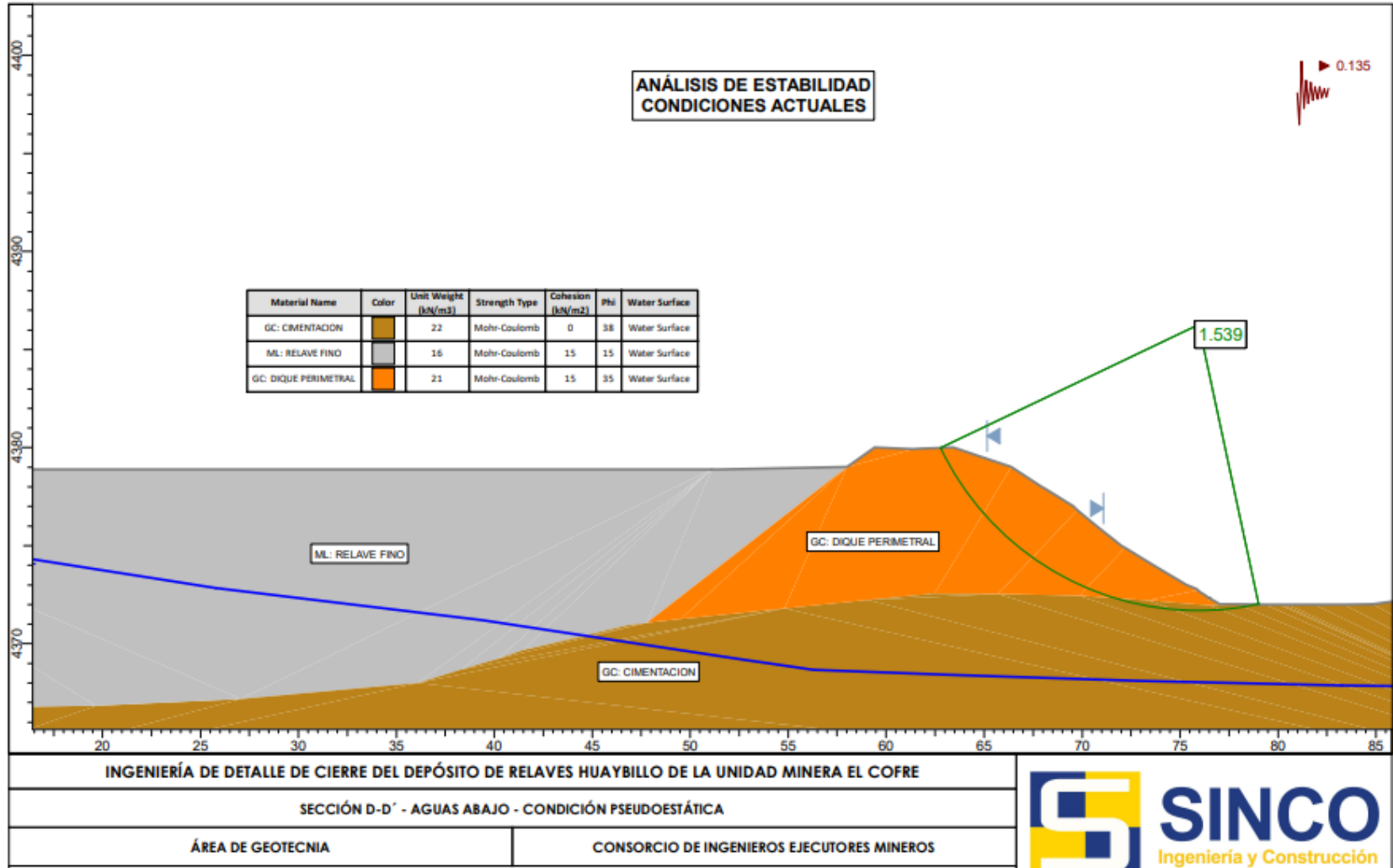


Anexo 4: Modelamiento en condiciones pseudoestáticas











UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL

“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 057-2023-FIMGC

En la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **RESOLUCIÓN DECANAL N° 310-2023-FIMGC-D**, siendo los quince días del mes de agosto del 2023, a horas 8:00 am.; se reunieron los jurados del acto de sustentación, en el Auditorium virtual google meet del Campus Universitario de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Siendo el Jurado de la sustentación de tesis compuesto por el presidente el **Dr. Ing. Efraín Elías PORRAS FLORES**, Jurado el **Dr. Ing. Johnny Henry CCATAMAYO BARRIOS**, Jurado el **MSc. Ing. Jaime PALOMINO CLAUDIO**, Jurado - Asesor el **MSc. Ing. José Agustín ESPARTA SANCHEZ** y secretario del proceso el **Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR**, con el objetivo de recepcionar la sustentación de la tesis denominada titulada: “**EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO PARA GARANTIZAR LA ESTABILIDAD FÍSICA PARA EL CIERRE DEL DEPÓSITO DE RELAVE HUAYBILLO DE LA UNIDAD MINERA EL COFRE**”, presentado por el/la Sr./Srta., **JOSE LUIS TOMATEO VARGAS**, Bachiller en **Ciencias de la Ingeniería Minas**.

El Jurado luego de haber recepcionado la sustentación de la tesis y realizado las preguntas, el sustentante al haber dado respuesta a las preguntas, y el Jurado haber deliberado; califica con la nota aprobatoria de **16 (dieciséis)**.

En fe de lo cual, se firma la presente acta, por los miembros integrantes del proceso de sustentación.



Firmado digitalmente por Dr.
Ing. Efraín Elías Porras Flores
Fecha: 2023.08.21 10:27:39
-05'00'

Dr. Ing. Efraín Elías PORRAS FLORES
Presidente



Firmado digitalmente
por Dr. Johnny Henry
Ccatamayo Barrios
Fecha: 2023.08.15
10:22:21 -05'00'

Dr. Ing. Johnny Henry CCATAMAYO BARRIOS
Jurado



Firmado digitalmente por Mg. Ing.
José Agustín Esparta Sánchez
Fecha: 2023.08.15 20:24:10 -05'00'

MSc. Ing. José Agustín ESPARTA SANCHEZ
Jurado Asesor



Firmado digitalmente
por JAIME PALOMINO
CLAUDIO
Fecha: 2023.08.23
08:29:00 -05'00'

MSc. Ing. Jaime PALOMINO CLAUDIO
Jurado

Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR
Secretario del Proceso
Departamento Académico de Matemática y Física



FACULTAD DE INGENIERIA DE
MINAS, GEOLOGIA Y CIVIL
Av. Independencia S/N
Ciudad Universitaria
Central Tel. 066 312510
Anexo 151

C.c.:
Bach. JOSE LUIS TOMATEO VARGAS
Jurados (4)
Archivo



UNSCH

FACULTAD DE
INGENIERÍA
DE MINAS, GEOLOGÍA Y CIVIL



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 053-2023-FIMGC

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, en segunda instancia para las **Escuelas Profesionales** de la **Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil**; en cumplimiento a la **Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU**, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y **Resolución Decanal N° 281-2022-FIMGC- UNSCH-D**, deja constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : TOMATEO VARGAS, JOSE LUIS
Escuela Profesional : INGENIERÍA DE MINAS
Título de la Tesis : “EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO PARA GARANTIZAR LA ESTABILIDAD FÍSICA PARA EL CIERRE DEL DEPÓSITO DE RELAVE HUAYBILLO DE LA UNIDAD MINERA EL COFRE”
Evaluación de la Originalidad : 29 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2145793516

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 14 de agosto del 2023



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil

Mg. Ing. Christian LEZAMA CUELLAR
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Departamento Académicos de Matemática y Física



Con depósito para Sustentación y Tramites
Cc. Archivo

“EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO PARA GARANTIZAR LA ESTABILIDAD FÍSICA PARA EL CIERRE DEL DEPÓSITO DE RELAVE HUAYBILLO DE LA UNIDAD MINERA EL COFRE”

por Jose Luis Tomateo Vargas

Fecha de entrega: 14-ago-2023 10:41a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2145793516

Nombre del archivo: Tesis_JOSE_LUIS_TOMATEO_VARGAS_EPIM.pdf (3M)

Total de palabras: 16159

Total de caracteres: 97290

“EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO PARA GARANTIZAR LA ESTABILIDAD FÍSICA PARA EL CIERRE DEL DEPÓSITO DE RELAVE HUAYBILLO DE LA UNIDAD MINERA EL COFRE”

INFORME DE ORIGINALIDAD

29%

INDICE DE SIMILITUD

29%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	11%
2	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	2%
3	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	2%
4	repositorio.uchile.cl Fuente de Internet	2%
5	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
6	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	www.punoperu.org Fuente de Internet	1%

repositorio.unasam.edu.pe

8	Fuente de Internet	1 %
9	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	1 %
10	pt.scribd.com Fuente de Internet	1 %
11	Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD,UNAD Trabajo del estudiante	1 %
12	repository.usta.edu.co Fuente de Internet	1 %
13	repositorio.unjfsc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
15	repositorio.uap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
16	Submitted to Universidad Abierta para Adultos Trabajo del estudiante	<1 %
17	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	YAKU CONSULTORES S.A.C.. "Décimo Informe Técnico Sustentatorio de la Unidad Minera Nueva Acumulación Quenamari - San Rafael-	<1 %

IGA0012980", R.D. N° 00021-2021-SENACE-
PE/DEAR, 2021

Publicación

19

www.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

20

repositorio.unsaac.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

21

cybertesis.uni.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

22

SNC LAVALIN PERU S.A.. "Modificación del
Plan de Cierre de Minas de la Unidad Minera
Pozo Rico-IGA0005184", R.D. N° 199-
2019/MINEM-DGAAM, 2020

Publicación

<1 %

23

issuu.com

Fuente de Internet

<1 %

24

SCHLUMBERGER DEL PERU S.A..
"Actualización del Plan de Cierre de Minas de
la Unidad Minera Cuajone-IGA0000334", R.D.
N° 444-2012-MEM-AAM, 2020

Publicación

<1 %

25

repositorio.uncp.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

26

www.voithturbo.com

Fuente de Internet

<1 %

xdoc.es

27

Fuente de Internet

<1 %

28

ECOANDINA PERU S.A.. "ITS del Proyecto
Pallancata-IGA0008941", R.D. N° 229-2014-
MEM-DGAAM, 2020

Publicación

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo