UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

MODELAMIENTO GEOTÉCNICO DE TALUDES OPERATIVOS EN CONDICIONES NO AXISIMÉTRICAS CON LA METODOLOGÍA FEM EN LA CANTERA DE ARIDOS SOLANGE AR

PRESENTADO POR:

BACH. MANUEL JESUS CABAÑAS LOPEZ

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA – PERÚ

2026

UNAM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

INGENIERÍA DE MINAS

Folio N° 086

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : [X]

Trabajo de Suficiencia Profesional : [ ]

Otro: ..... : [ ]

II. Documento de aprobación para la sustentación:
RESOLUCION DE CONSEJO DE FACULTAD N° 075-2026-CF-FPIN-UNAM
Fecha: 07-04-2026

III. El Jurado ha dictaminado la (el) TESIS, TITULADO:
MODELAMIENTO GEOTÉCNICO DE TALUDES OPERATIVOS EN CONDICIONES NO AXISIMÉTRICAS CON LA METODOLOGÍA FEM EN LA CANTERA DE ÁRIDOS SOLANGE AR.

Bachiller: MANUEL JESUS CABAÑAS LOPEZ

Asesor Principal: DR. CHRIST JESUS BARRIGA PORTA

Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:

Como: APROBADO por UNANIMIDAD la sustentación de manera:

Presencial [X] Virtual [ ]

Con nota: QUINCE (15) por lo que; Sí [X] No [ ]

Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las 11:50 horas, del 09 de ABRIL del año 2026 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
DR. JORGE LUIS FLORES SOLIS
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
DR. ARQUIMEDES LEON VARGAS LUQUE
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
MSC. AGAPITO FLORES JUSTO
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
Manuel Jesus Cabañas Lopez
(Nombres y Apellidos)

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios por darme la vida, la salud y la fortaleza necesaria para poder culminar este trabajo de manera satisfactoria.

Asimismo, agradezco a la Universidad Nacional de Moquegua, por haberme brindado la formación académica y profesional necesaria, así como los conocimientos y herramientas que me permitirán desarrollarme en la carrera de Ingeniería de Minas.

De igual manera, agradezco a mis docentes, quienes con su experiencia, dedicación y exigencia han contribuido de manera importante en mi formación. En especial, al Dr. Christ Jesus Barriga Paria, por su orientación, apoyo constante y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo.

También quiero agradecer a mi familia, por su apoyo incondicional, su comprensión y la motivación constante que me han brindado a lo largo de este proceso, siendo un pilar fundamental para alcanzar mis objetivos.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de alguna manera, aportaron y me apoyaron para hacer posible la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo, en primer lugar, a mi madre, Edina Susana López Jorge, por su amor incondicional, su sacrificio constante y por ser el pilar fundamental en cada paso de mi vida. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por enseñarme a no rendirme jamás.

A mi abuela, Carmen Jorge Flores, por su inmenso cariño, sus sabios consejos y por ser un ejemplo de fortaleza y ternura. Su presencia y enseñanzas han dejado una huella imborrable en mi vida.

A mi padre, Manuel Cabañas Pineda, por su apoyo, sus palabras de aliento y por confiar en mis capacidades, motivándome a seguir adelante y alcanzar mis metas.

A mi familia, por acompañarme en este camino, por su comprensión en los momentos de dificultad y por ser mi mayor motivación para superarme cada día.

Y finalmente, a mí mismo, por no rendirme, por mantener la perseverancia y la disciplina necesarias para hacer realidad este logro que representa el esfuerzo de muchos años.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la estabilidad de los taludes operativos de la cantera de áridos Solange AR, ubicada en la región Moquegua, mediante la aplicación del modelamiento geotécnico utilizando el Método de los Elementos Finitos (FEM) bajo condiciones no axisimétricas. El estudio surge ante la necesidad de emplear herramientas de análisis avanzadas que permitan representar de manera más realista el comportamiento geotécnico de taludes desarrollados en geometrías irregulares propias de explotaciones a cielo abierto. Para ello, se realizó una caracterización geotécnica de los materiales del talud, determinando sus principales propiedades físicas y mecánicas, las cuales fueron empleadas en el software Phase2 de Rocscience para el desarrollo del modelamiento numérico. Se analizaron cuatro progresivas representativas del talud operativo (000+100, 000+140, 000+180 y 000+220), considerando análisis estático y pseudoestático, con el fin de evaluar la influencia de la geometría no axisimétrica y de la acción sísmica en la estabilidad del talud. Los resultados obtenidos evidencian que, en la condición actual, el talud presenta factores de seguridad marginales en análisis estático e inestables bajo condiciones pseudoestáticas. En contraste, el nuevo diseño geométrico propuesto muestra una mejora significativa del factor de seguridad, cumpliendo con los criterios geotécnicos de estabilidad aceptados para taludes operativos. Asimismo, el análisis de sensibilidad y la validación estadística mediante la prueba t de Student confirmaron que las mejoras obtenidas son significativas y no atribuibles al azar. Se concluye que la aplicación del modelamiento geotécnico FEM en condiciones no axisimétricas constituye una herramienta eficaz para la evaluación y optimización del diseño de taludes operativos, contribuyendo a la reducción de riesgos geotécnicos y al fortalecimiento de la seguridad y sostenibilidad de la operación minera en la cantera de áridos Solange AR.

Palabras clave: Estabilidad de taludes; Método de los Elementos Finitos; Riesgo geotécnico.

ABSTRACT

This research aims to evaluate the stability of operational slopes at the Solange AR aggregate quarry, located in the Moquegua region, through geotechnical modeling using the Finite Element Method (FEM) under non-axisymmetric conditions. The study arises from the need to apply advanced analysis tools capable of realistically representing the geotechnical behavior of slopes developed under irregular geometries typical of open-pit mining operations. A detailed geotechnical characterization of the slope materials was carried out to determine their main physical and mechanical properties, which were subsequently incorporated into the Phase2 software by Rocscience for numerical modeling. Four representative slope sections (stations 000+100, 000+140, 000+180, and 000+220) were analyzed considering both static and pseudo-static conditions to assess the influence of non-axisymmetric geometry and seismic loading on slope stability. The results indicate that the current slope configuration presents marginal stability under static conditions and unstable behavior under pseudo-static conditions. In contrast, the proposed new slope design significantly improves the safety factors, meeting the geotechnical stability criteria commonly accepted for operational slopes. In addition, sensitivity analysis and statistical validation using the Student's t-test confirmed that the observed improvements are statistically significant and not due to random variability. It is concluded that the application of FEM-based geotechnical modeling under non-axisymmetric conditions is an effective and reliable tool for slope stability assessment and design optimization, contributing to geotechnical risk reduction and enhancing operational safety and sustainability at the Solange AR aggregate quarry.

Keywords: Slope stability; Finite Element Method; Operational slopes; Geotechnical risk.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I 2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 2

1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 2

1.1.1 Descripción de la realidad problemática 2

1.1.2 Formulación del problema de investigación 3

Interrogante general 4

Interrogantes especificas 4

1.2 OBJETIVOS 4

1.2.1 Objetivo general 5

1.2.2 Objetivos específicos 5

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 5

1.3.1 Justificación Teórica 6

1.3.2 Justificación Práctica 7

1.3.3 Justificación Metodológica 8

1.3.4 Importancia 9

1.4 HIPÓTESIS 10

1.4.1 Hipótesis general 10

1.4.2 Hipótesis especificas 11

1.5 VARIABLES 11

1.5.1 Variable independiente 12

1.5.2 Variable dependiente 12

CAPÍTULO II 14

MARCO TEÓRICO 14

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA 14

2.1.1 Antecedentes Internacionales 15

2.1.2 Antecedentes Nacionales 26

2.1.3 Antecedentes Locales 30

2.2 BASES TEÓRICAS 31

2.2.1 Formulación mixta para medios continuos en problemas axisimétricos 31

2.2.2 Formulación para elementos finitos en problemas axisimétricos 32

2.2.3 Factores que provocan problemas de axisimétricos en taludes 36

2.2.4 Indicadores de inestabilidad por la axisimetría 36

2.2.5 Restauración de la estabilidad por problemas de axisimetría *36*

CAPÍTULO III 37

METODOLOGÍA 37

3.1 TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN 37

3.1.1 Tipo de investigación *37*

3.1.2 Nivel de investigación *37*

3.1.3 Diseño de investigación *38*

3.2 ÁMBITO TEMPORAL Y ESPACIAL 39

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA 41

3.3.1 Población *41*

3.3.2 Muestra *42*

3.4 INSTRUMENTOS 43

3.5 PROCEDIMIENTO 44

3.5.1 Validación y confiabilidad de los instrumentos *44*

3.5.2 Validez de los instrumentos *45*

3.5.3 Confiabilidad de los instrumentos *46*

3.6 ANÁLISIS DE DATOS 47

3.6.1 Métodos y técnicas para la presentación y análisis de datos *47*

3.6.2 Métodos de análisis de datos *48*

3.6.3 Técnicas de procesamiento y presentación de datos *49*

CAPÍTULO IV 51

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 51

4.1 RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y MATERIALES DEL TALUD 51

4.1.1 Propiedades físicas y mecánicas de los materiales *51*

4.1.2 Parámetros geotécnicos utilizados en el modelamiento FEM *53*

4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS GEOMÉTRICO Y CONDICIONES NO AXISIMÉTRICAS DEL TALUD OPERATIVO 54

4.2.1 Configuración geométrica real del talud *55*

4.2.2 Influencia de la geometría no axisimétrica en la estabilidad *56*

4.3 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO GEOTÉCNICO MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (FEM) 57

4.3.1 Evaluación del factor de seguridad del talud operativo *58*

4.3.2 Factor de seguridad obtenido mediante FEM *59*

4.3.3 Comparación con criterios geotécnicos de estabilidad *61*

4.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS GEOTÉCNICOS 62

4.4.1 Influencia de la cohesión y el ángulo de fricción *63*
4.4.2 Efecto de variaciones en las condiciones del material *64*
4.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS 64
4.5.1 Contraste de resultados con el marco teórico *65*
4.5.2 Comparación con estudios previos y literatura técnica *66*
4.5.3 Implicancias geotécnicas para la operación de la cantera *68*
4.6 IMPLICANCIAS PRÁCTICAS DEL MODELAMIENTO FEM EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES OPERATIVOS 69
4.7 VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS 70
4.7.1 Validez de la hipótesis general *70*
4.7.2 Validez de la primera hipótesis específica *70*
4.7.3 Validez de la segunda hipótesis específica *71*
4.7.4 Aplicación de t student *71*
Planteamiento del contraste de hipótesis 71
Selección del estadístico t 72
Resultados e interpretación 72
Comentarios finales 76
CAPÍTULO V 77
CONCLUSIONES 77
CAPÍTULO VI 79
RECOMENDACIONES 79
REFERENCIAS 80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 32

Elemento de tierra en condición axisimétrica 32

Figura 02 33

Proceso de analizar un problema de equilibrio mecánico utilizando el FEM 33

Figura 03 34

Tipos de elementos finitos 34

Figura 04 41

Mapa de Ubicación de la Cantera “Solange Ar” 41

Figura 05 59

Factor de Seguridad – Análisis Estático 59

Figura 06 61

Factor de Seguridad – Análisis Pseudostático 61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01 13

Operacionalización de las Variables 13

Tabla 02 52

Propiedades operativas del material de la cantera 52

Tabla 03 58

Valores del análisis por el la metodología FEM.....58

Tabla 04 72

Valores de incremento en el factor de seguridad.....72

Tabla 05 73

Valores de incremento en el factor de seguridadcondiciones estaticas.....73

Tabla 06 73

Valores de incremento en el factor de seguridadcondiciones pseudoestaticas.....73

Tabla 07 75

Comparacion de los resultado aplicando FEM y Equilibrio Límite para condiciones estáticas 75

Tabla 08 76

Comparacion de los resultado aplicando FEM y Equilibrio Límite para condiciones pseudoestáticas.....76

INTRODUCCIÓN

La estabilidad de taludes constituye uno de los aspectos más críticos en las explotaciones mineras a cielo abierto, debido a su influencia directa en la seguridad del personal, la protección de los equipos y la continuidad de las operaciones. En canteras de áridos, donde los taludes se desarrollan de manera progresiva y presentan geometrías irregulares, la evaluación geotécnica requiere enfoques de análisis que permitan representar de forma realista el comportamiento mecánico de los taludes bajo condiciones operativas reales.

Tradicionalmente, el análisis de estabilidad de taludes se ha basado en métodos de equilibrio límite, los cuales, si bien son útiles para evaluaciones preliminares, presentan limitaciones importantes al asumir geometrías simplificadas y no considerar la deformabilidad del material ni la redistribución de esfuerzos. Estas limitaciones se acentúan cuando los taludes presentan condiciones no axisimétricas, propias de explotaciones mineras reales, lo que puede conducir a una subestimación de los riesgos geotécnicos.

En este contexto, el Método de los Elementos Finitos (FEM) se presenta como una herramienta avanzada que permite analizar el comportamiento esfuerzo–deformación del talud, incorporando la geometría real, las propiedades geomecánicas del material y diferentes condiciones de carga, incluyendo efectos sísmicos. El uso de software especializado, como Phase2 de Rocscience, posibilita una evaluación más detallada y confiable de la estabilidad de taludes operativos.

Por ello, la presente investigación tiene como objetivo aplicar el modelamiento geotécnico mediante FEM bajo condiciones no axisimétricas para evaluar la estabilidad de los taludes operativos de la cantera Solange AR. A través de la caracterización geotécnica de los taludes operativos, el análisis numérico y la validación de resultados, se busca optimizar el diseño del talud y contribuir a la reducción de los riesgos geotécnicos, aportando criterios técnicos aplicables a canteras de áridos y operaciones mineras similares.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción de la realidad problemática

La explotación de áridos en la región Moquegua constituye una actividad minera no metálica de gran importancia para el desarrollo urbano y de infraestructura regional. Sin embargo, las operaciones en canteras suelen realizarse en zonas con topografía irregular, suelos heterogéneos y presencia de fracturas en las formaciones rocosas, lo que incrementa la susceptibilidad a fallas en taludes. A ello se suma la recurrencia de eventos sísmicos en el sur del Perú, que generan esfuerzos adicionales y pueden comprometer la estabilidad de las estructuras geotécnicas. Estas condiciones exigen un análisis más riguroso del comportamiento de los taludes bajo escenarios reales de carga y deformación.

En muchas canteras de la región, los estudios de estabilidad de taludes se realizan empleando métodos tradicionales o simplificados que asumen condiciones bidimensionales o axisimétricas. Dichas aproximaciones no reflejan adecuadamente la geometría real del terreno ni las variaciones de los taludes operativos, especialmente cuando los taludes presentan irregularidades, bermas asimétricas o zonas de sobreexcavación. Esta simplificación puede conducir a estimaciones imprecisas del factor de seguridad, lo que incrementa el riesgo de deslizamientos, interrupciones operativas y accidentes laborales.

Por otro lado, la falta de monitoreo geotécnico continuo y el uso limitado de herramientas numéricas avanzadas dificultan la comprensión del comportamiento real del terreno ante diferentes condiciones de carga. En muchos casos, las decisiones sobre diseño o estabilización se basan en criterios empíricos, sin una validación numérica detallada que considere la interacción entre las propiedades del material, las condiciones de frontera y los efectos tridimensionales. Esto genera incertidumbre técnica en la evaluación de la estabilidad global del talud y en la planificación de medidas de mitigación.

Ante esta situación, el modelamiento geotécnico mediante el método de los elementos finitos (FEM) representa una alternativa eficiente para analizar taludes en condiciones no axisimétricas. Su aplicación permite reproducir de manera más realista el comportamiento de los taludes operativos, identificar zonas críticas de esfuerzo y deformación, y proponer soluciones de ingeniería que optimicen la seguridad y sostenibilidad de las operaciones mineras. En el contexto de las canteras de áridos de Moquegua, la implementación de este enfoque contribuiría a mejorar la gestión geotécnica, reducir los riesgos operativos y garantizar la continuidad de la producción bajo condiciones geológicas y sísmicas complejas.

1.1.2 Formulación del problema de investigación

La estabilidad de los taludes operativos en canteras de áridos de la región Moquegua constituye una preocupación constante debido a las condiciones geológicas irregulares y a la influencia de la sismicidad regional. En la mayoría de operaciones, los análisis de estabilidad se desarrollan bajo supuestos axisimétricos o bidimensionales que no representan fielmente las características geométricas reales del terreno ni la variabilidad de los materiales. Esta limitación metodológica impide obtener resultados precisos sobre los factores de seguridad, zonas críticas de deformación y mecanismos potenciales de falla, especialmente en taludes con geometrías complejas y condiciones de borde irregulares.

En este contexto, surge la necesidad de aplicar modelos numéricos más avanzados que permitan reproducir las condiciones reales de trabajo de los taludes, considerando los efectos tridimensionales y las interacciones entre las propiedades geomecánicas de los materiales y las cargas externas. El método de los elementos finitos (FEM) se presenta como una herramienta eficaz para abordar estos desafíos, ya que permite simular el comportamiento de los taludes operativos bajo distintas configuraciones y escenarios sísmicos, proporcionando resultados más confiables para la toma de decisiones técnicas y operativas.

El estudio se desarrollará en una cantera de áridos ubicada en la región Moquegua, en la zona sur del Perú. El área de análisis comprende los taludes operativos

activos y sectores adyacentes que presentan geometrías irregulares, donde se evidencia la necesidad de un modelamiento geotécnico, el estudio abarcará un periodo comprendido entre la etapa actual de explotación. La delimitación temporal garantiza que el análisis responda a las condiciones reales de operación y a la proyección de estabilidad durante la vida útil restante del talud.

Interrogante general

¿De qué manera el modelamiento geotécnico mediante el método de los elementos finitos en condiciones no axisimétricas contribuye a mejorar la estabilidad de los taludes operativos en una cantera de áridos en la región Moquegua?

Interrogantes especificas

- ¿Cuáles son las características geotécnicas y geométricas de los taludes operativos que determinan el comportamiento de los taludes operativos en la cantera de áridos de la región Moquegua?
- ¿Cómo afecta la consideración de condiciones no axisimétricas en el modelamiento numérico de la estabilidad de taludes mediante el FEM, y qué variaciones se observan en los factores de seguridad y deformaciones al comparar estos resultados con los obtenidos mediante los métodos tradicionales de equilibrio límite?

1.2 Objetivos

El presente estudio tiene como propósito fundamental analizar y mejorar la estabilidad de los taludes operativos en una cantera de áridos ubicada en la región Moquegua, mediante la aplicación del método de los elementos finitos bajo condiciones no axisimétricas. La investigación busca integrar el conocimiento geotécnico con herramientas de modelamiento numérico avanzado, con el fin de representar de manera más precisa el comportamiento del terreno y evaluar su respuesta ante distintos escenarios de carga y sismicidad.

En este contexto, los objetivos de la investigación se orientan a establecer una metodología técnica que permita determinar los factores de seguridad, identificar zonas críticas de deformación y validar los resultados obtenidos a través de la comparación

con métodos convencionales de análisis. De esta manera, el estudio no solo pretende aportar soluciones específicas para la cantera en estudio, sino también generar un marco de referencia aplicable a otras operaciones mineras de características similares.

Asimismo, el cumplimiento de los objetivos permitirá disponer de información geotécnica confiable para el diseño y manejo seguro de los taludes, contribuyendo a la prevención de fallas estructurales, la reducción de riesgos operativos y la optimización de la explotación minera.

1.2.1 Objetivo general

- Mejorar la estabilidad de los taludes operativos en condiciones no axisimétricas mediante el modelamiento geotécnico utilizando el método de los elementos finitos en una cantera de áridos de la región Moquegua.

1.2.2 Objetivos específicos

- Definir las propiedades geotécnicas de los taludes operativos que conforma los taludes operativos de la cantera de áridos en la región Moquegua.
- Evaluar mediante modelos numéricos el comportamiento del talud en condiciones no axisimétricas, considerando las características del área de estudio y las cargas estáticas y sísmicas, utilizando el método de los elementos finitos.

1.3 Justificación e importancia

La presente investigación se justifica por la necesidad de mejorar la seguridad y eficiencia en las operaciones mineras no metálicas de la región Moquegua, donde la extracción de áridos constituye una actividad económica estratégica. En estas canteras, los taludes operativos están expuestos a condiciones geológicas complejas, variaciones litológicas y frecuentes eventos sísmicos que pueden comprometer su estabilidad. El análisis tradicional de taludes, basado en métodos bidimensionales o simplificados, no siempre refleja la realidad estructural ni geométrica del terreno, lo que genera incertidumbre en la evaluación de los factores de seguridad y en la toma de decisiones de ingeniería.

Desde un punto de vista técnico, el uso del método de los elementos finitos permite simular con mayor precisión el comportamiento de los taludes operativos ante diferentes condiciones de carga, geometrías irregulares y propiedades del material. Este enfoque numérico avanzado posibilita analizar escenarios no axisimétricos, donde los taludes presentan variaciones espaciales y discontinuidades que influyen significativamente en su estabilidad. Su aplicación en el contexto de una cantera de áridos en Moquegua representa una contribución valiosa al fortalecimiento del diseño geotécnico y al desarrollo de prácticas mineras más seguras y sostenibles.

En el ámbito científico, esta investigación aporta conocimiento aplicado sobre el comportamiento de los taludes bajo condiciones no convencionales, integrando herramientas numéricas con criterios de ingeniería geotécnica moderna. Los resultados podrán servir de referencia para futuras investigaciones o para el desarrollo de normativas técnicas en el ámbito de la minería no metálica. Asimismo, el estudio promueve el uso de la simulación computacional como soporte para la toma de decisiones, optimizando la relación entre estabilidad, productividad y gestión ambiental.

Finalmente, desde una perspectiva social y ambiental, el proyecto contribuye a la reducción del riesgo de deslizamientos o fallas geotécnicas que podrían afectar al personal, las infraestructuras y el entorno natural de la zona. Al mejorar la estabilidad de los taludes operativos, se garantiza la continuidad de las actividades extractivas con un enfoque responsable y sostenible. De esta manera, la investigación no solo genera un impacto técnico, sino también un beneficio directo para la comunidad local y el desarrollo minero seguro en la región Moquegua.

1.3.1 Justificación Teórica

El estudio se fundamenta en los principios de la mecánica de suelos y de rocas, los cuales permiten comprender el comportamiento de los taludes operativos ante esfuerzos inducidos por excavación, peso propio y sismos. Tradicionalmente, la estabilidad de taludes se evalúa mediante métodos de equilibrio límite, que, si bien permiten estimar factores de seguridad, presentan limitaciones al asumir condiciones simplificadas, como la homogeneidad del terreno o la simetría geométrica. En

contraste, los métodos numéricos, particularmente el Método de los Elementos Finitos (FEM), ofrecen una representación más realista del comportamiento del terreno, al considerar la interacción entre esfuerzos, deformaciones y condiciones de contorno bajo configuraciones complejas.

Desde el punto de vista teórico, el método de los elementos finitos se basa en la discretización del dominio en elementos finitos interconectados, permitiendo resolver ecuaciones diferenciales que describen el equilibrio estático y dinámico del terreno. Este enfoque es especialmente útil para analizar taludes en condiciones no axisimétricas, donde la geometría irregular, las discontinuidades estructurales y la variabilidad de las propiedades geotécnicas influyen de forma significativa en la estabilidad global. Así, la aplicación de este método permite evaluar zonas críticas de esfuerzo, desplazamiento y deformación, proporcionando una base cuantitativa sólida para el diseño y la optimización de soluciones de estabilización.

Teóricamente, el presente estudio contribuye a integrar los conceptos de la geotecnia clásica con las herramientas computacionales modernas, fortaleciendo el vínculo entre el análisis empírico y el modelamiento numérico avanzado. La validación de los resultados obtenidos mediante FEM frente a métodos convencionales permitirá comprobar su efectividad y precisión en el análisis de taludes operativos. De esta forma, la investigación amplía el marco teórico existente sobre la estabilidad de taludes en medios no axisimétricos, aportando un enfoque actualizado y aplicable a las condiciones geológicas y sísmicas de la región Moquegua.

1.3.2 Justificación Práctica

La presente investigación tiene una relevancia práctica directa, ya que busca proporcionar una herramienta confiable y precisa para el análisis y control de la estabilidad de taludes operativos en canteras de áridos. Mediante la aplicación del método de los elementos finitos (FEM), se podrán identificar con mayor exactitud las zonas críticas de tensión, desplazamiento y deformación del terreno, permitiendo anticipar posibles fallas antes de que estas se produzcan. Este enfoque contribuirá a mejorar la seguridad de las operaciones, optimizar los diseños de taludes y reducir los costos asociados a intervenciones correctivas o paralizaciones imprevistas.

Además, la utilización del modelamiento numérico bajo condiciones no axisimétricas permitirá reproducir la geometría real de los taludes, considerando la influencia de bermas y ángulos variables de los taludes operativos. Esto representa un avance frente a los métodos tradicionales de evaluación, ya que las simulaciones FEM ofrecerán una visión más completa del comportamiento geotécnico del talud ante diferentes escenarios, incluidos los eventos sísmicos característicos de la región Moquegua. De esta forma, los resultados obtenidos podrán ser aplicados de manera inmediata para mejorar la gestión operativa y la planificación minera.

Finalmente, el desarrollo de esta investigación aportará criterios técnicos aplicables a proyectos reales, que podrán ser utilizados por ingenieros de minas, geotecnistas y responsables de seguridad en canteras y explotaciones similares. Al generar un modelo de análisis reproducible, la tesis contribuirá a establecer procedimientos estandarizados para la evaluación geotécnica de taludes en la minería no metálica, fomentando la adopción de tecnologías numéricas en el sector. En consecuencia, los beneficios prácticos se reflejarán en una mayor estabilidad estructural, continuidad operacional y reducción de riesgos para el personal y el entorno.

1.3.3 Justificación Metodológica

Metodológicamente, la investigación se sustenta en la aplicación del método de los elementos finitos como herramienta de análisis numérico para evaluar el comportamiento geotécnico de los taludes operativos en condiciones no axisimétricas. Este enfoque permite representar de manera realista las características geométricas del terreno, las propiedades de los taludes operativos y las condiciones de carga que actúan sobre la estructura. A diferencia de los métodos tradicionales de equilibrio límite, el análisis posibilita estudiar la distribución de esfuerzos y deformaciones dentro del talud, proporcionando una visión integral del fenómeno y permitiendo validar la estabilidad mediante la obtención de factores de seguridad más precisos.

El diseño metodológico de la investigación incluye la caracterización geotécnica del terreno, la recopilación de datos topográficos y geológicos, y la construcción de modelos numéricos tridimensionales. A través de simulaciones computacionales, se

analizarán diferentes escenarios operativos y sísmicos, evaluando cómo las variaciones en la geometría y en las propiedades del material afectan la estabilidad del talud. Este procedimiento metodológico garantiza la reproducibilidad del estudio, permitiendo establecer comparaciones con métodos analíticos convencionales y validar los resultados obtenidos mediante criterios de ingeniería geotécnica reconocidos.

Asimismo, la investigación adopta un enfoque aplicado y experimental, orientado a generar resultados útiles y verificables para la práctica profesional. La metodología propuesta combina el rigor científico con la utilidad técnica, permitiendo no solo explicar el comportamiento del talud, sino también proponer soluciones de diseño y medidas de mitigación basadas en evidencia numérica. De esta manera, el estudio metodológicamente se justifica por su capacidad de integrar teoría, análisis computacional y aplicación práctica, contribuyendo a la mejora de la gestión geotécnica y la seguridad en las canteras de áridos de la región Moquegua.

1.3.4 Importancia

La importancia de la tesis “Modelamiento geotécnico de taludes operativos en condiciones no axisimétricas con la metodología FEM en la cantera de áridos Solange AR” radica en que aborda el análisis de la estabilidad de taludes bajo condiciones reales de operación minera, donde la geometría irregular, la heterogeneidad de los taludes operativos y las condiciones geomecánicas no axisimétricas influyen de manera significativa en el comportamiento del talud. La aplicación del Método de los Elementos Finitos (FEM) permite una representación más precisa de la distribución de esfuerzos, deformaciones y zonas críticas de falla, superando las limitaciones de los enfoques tradicionales bidimensionales y proporcionando una evaluación más confiable de la estabilidad geotécnica.

Esta investigación tiene un impacto directo en la seguridad y optimización operativa de la cantera de áridos Solange AR, ya que los resultados obtenidos constituyen una base técnica para el diseño y control de taludes operativos, contribuyendo a la reducción de riesgos geotécnicos, prevención de inestabilidades y mejora en la toma de decisiones durante la explotación. Desde el punto de vista académico y profesional, la tesis aporta un referente metodológico para la aplicación

del modelamiento numérico FEM en escenarios no axisimétricos, fortaleciendo el enfoque moderno de la ingeniería de minas y la geotecnia aplicada a explotaciones a cielo abierto.

1.4 Hipótesis

El desarrollo de la presente investigación parte del supuesto de que el comportamiento geotécnico de los taludes operativos puede ser representado con mayor precisión mediante la aplicación de herramientas numéricas avanzadas, particularmente el método de los elementos finitos. A diferencia de los enfoques tradicionales, que simplifican las condiciones geométricas y materiales del terreno, el modelamiento permite incorporar la complejidad de los taludes reales, incluyendo su geometría irregular, las variaciones litológicas y los efectos dinámicos ocasionados por la sismicidad propia de la región Moquegua.

En este sentido, se plantea que el uso del modelamiento geotécnico bajo condiciones no axisimétricas constituye una estrategia más adecuada para la evaluación de la estabilidad de taludes, ya que posibilita analizar la distribución de esfuerzos y deformaciones de manera tridimensional. Este enfoque teórico y metodológico permitirá obtener factores de seguridad más representativos, identificar zonas críticas con potencial de falla y proponer medidas de estabilización basadas en resultados cuantificables.

De esta forma, la hipótesis de la investigación busca comprobar que el modelamiento mediante el método de los elementos finitos (FEM) mejora significativamente la precisión del análisis geotécnico y la confiabilidad en la toma de decisiones respecto al diseño y control de taludes operativos en canteras de áridos. La verificación de esta hipótesis contribuirá a consolidar el uso del FEM como herramienta estándar para la gestión de la estabilidad geotécnica en la minería no metálica de la región Moquegua.

1.4.1 Hipótesis general

La aplicación del modelamiento geotécnico mediante el método de los elementos finitos en condiciones no axisimétricas permite mejorar la estabilidad de los

taludes operativos en una cantera de áridos de la región Moquegua, contribuyendo a la optimización de su diseño y a la reducción de riesgos geotécnicos.

1.4.2 Hipótesis especificas

- La caracterización adecuada de las propiedades geotécnicas y geométricas de los taludes operativos influye significativamente en la confiabilidad de los resultados del modelamiento numérico.
- El modelamiento geotécnico bajo condiciones no axisimétricas permite identificar con mayor precisión las zonas críticas de esfuerzo y deformación en taludes operativos, y genera factores de seguridad que difieren significativamente de los obtenidos mediante métodos tradicionales de equilibrio límite.

1.5 Variables

La operacionalización de las variables constituye una etapa fundamental dentro del proceso metodológico, ya que permite traducir los conceptos teóricos de la investigación en indicadores observables y medibles. A través de este procedimiento, se definen las dimensiones, los indicadores y las unidades de medida de cada variable, con el propósito de facilitar su análisis, interpretación y contraste con los resultados obtenidos.

En esta investigación, las variables se relacionan directamente con el comportamiento geotécnico del talud y los parámetros que intervienen en su estabilidad estructural. La variable independiente corresponde al modelamiento geotécnico mediante el método de los elementos finitos (FEM), mientras que la variable dependiente se asocia con la estabilidad de los taludes operativos en condiciones no axisimétricas.

La definición operacional de cada variable permitirá establecer de manera precisa los parámetros que serán evaluados, tales como las propiedades físico-mecánicas de los taludes operativos, las condiciones geométricas del talud, los esfuerzos internos, las deformaciones y el factor de seguridad obtenido en los modelos

numéricos. De esta forma, la operacionalización garantiza la coherencia entre el marco teórico, los objetivos de la investigación y el análisis de resultados.

En síntesis, este apartado busca describir de manera estructurada las variables involucradas en el estudio, estableciendo la base para la recolección, procesamiento y evaluación de los datos que permitirán comprobar la hipótesis planteada y alcanzar los objetivos de la investigación (Ver la Tabla 01).

1.5.1 Variable independiente

Modelamiento geotécnico mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM), dimensiones:

- Caracterización geotécnica de los taludes operativos
- Modelamiento numérico
- Condiciones no axisimétricas

1.5.2 Variable dependiente

Estabilidad de taludes operativos en condiciones no axisimétricas

- Comportamiento tensional y deformacional
- Factor de seguridad del talud y Condiciones de estabilidad global

Tabla 01

Operacionalización de las Variables

Variable	Dimensión	Indicadores	Instrumento
Variable Independiente: Modelamiento geotécnico mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM)	a) Caracterización geotécnica de los taludes operativos	Cohesión (c) en Kpa	Ensayos corte directo y compresión simple
		Ángulo de fricción interna (φ) en grados	
		Densidad aparente (γ) en kN/m3	
		Módulo de elasticidad E en MPa	Fichas de muestreo y registro geotécnico
	b) Modelamiento numérico	Tipo de malla y refinamiento	Software de análisis FEM (Phase2)
		Condiciones de contorno	
		Cargas estáticas y sísmicas aplicadas	
		Propiedades asignadas al modelo	Reportes de simulación
	c) Condiciones no axisimétricas	Geometría tridimensional del talud	Levantamiento topográfico
Variable Dependiente: Estabilidad de taludes operativos en condiciones no axisimétricas	a) Comportamiento tensional y deformacional	Distribución de esfuerzos principales	Mapas de esfuerzos y deformaciones Reportes del software FEM
	b) Factor de seguridad del talud y Condiciones de estabilidad global	Factor de seguridad estático, adimensional	Gráficos de estabilidad Tablas comparativas de factores de seguridad
		Factor de seguridad pseudoestático (sísmico), adimensional	
		Variación del FS con respecto a método tradicional, adimensional	

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del Problema

El análisis de la estabilidad de taludes constituye un aspecto fundamental dentro de la ingeniería geotécnica, especialmente en actividades extractivas a cielo abierto como las canteras de áridos. La estabilidad de los taludes está influenciada por factores geológicos, geométricos, hidrogeológicos y sísmicos que pueden generar condiciones críticas de falla si no se evalúan de manera adecuada. A lo largo del tiempo, el desarrollo de nuevas herramientas de análisis ha permitido pasar de métodos empíricos y de equilibrio límite hacia técnicas numéricas más avanzadas, capaces de representar con mayor precisión el comportamiento real de los taludes operativos.

En el ámbito internacional, el método de los elementos finitos se ha consolidado como una herramienta eficaz para analizar la respuesta estructural de los taludes frente a diversas condiciones de carga y geometría. Este método permite simular con detalle el comportamiento geotécnico de los materiales, incluyendo zonas de falla potencial y deformaciones progresivas. Además, su aplicación en modelos tridimensionales ha demostrado ser especialmente útil para representar configuraciones irregulares o condiciones no axisimétricas que son difíciles de abordar mediante métodos convencionales.

A nivel nacional, la utilización del modelamiento numérico para el análisis de taludes ha cobrado relevancia en proyectos mineros y de infraestructura, debido a la necesidad de mejorar la seguridad y reducir los riesgos asociados a la inestabilidad de laderas. En muchas operaciones mineras, los modelos bidimensionales aún son los más empleados; sin embargo, se reconoce que no logran representar adecuadamente la complejidad del terreno ni las interacciones tridimensionales que pueden presentarse en taludes operativos. La incorporación de modelos tridimensionales basados en el método de los elementos finitos representa un avance importante en la evaluación y el diseño geotécnico.

En la región de Moquegua, donde predominan actividades extractivas de áridos en zonas con alta sismicidad y topografía accidentada, el estudio de la estabilidad de taludes cobra especial relevancia. Las condiciones geológicas heterogéneas y la presencia de discontinuidades estructurales requieren un enfoque analítico más preciso que permita estimar el comportamiento real de los taludes bajo condiciones operativas. En este contexto, la aplicación del método de los elementos finitos en condiciones no axisimétricas se presenta como una alternativa innovadora para optimizar el diseño geotécnico, mejorar la seguridad y garantizar la sostenibilidad de las operaciones en canteras de la región.

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Según Korada y Kumar (2023) realizaron una investigación empleando un criterio de fluencia de tipo potencia que considera la dependencia de los parámetros de resistencia al corte, a saber, cohesión y fricción interna, con respecto al nivel de tensión. Los autores afirman que este criterio resulta muy eficaz para obtener con gran precisión soluciones a diversos problemas de estabilidad en geotécnica que involucran suelos y parte de rocas. El manuscrito introduce formulaciones de deformación plana y axisimétricas que abordan el criterio de fluencia de tipo potencia y se basan en el análisis límite de elementos finitos de cota inferior y superior, junto con la programación del cono de potencia (PCP). Para demostrar la eficacia de las formulaciones propuestas, se ha abordado la determinación de la capacidad portante de zapatas corridas y circulares en un suelo cohesivo-friccional. Se ha empleó un patrón de malla adaptativo para mejorar la precisión de la solución con un mínimo esfuerzo computacional. Los resultados se fueron validados exhaustivamente mediante la comparación de las soluciones obtenidas con las reportadas en la literatura. Se espera que las formulaciones propuestas sean de gran utilidad para resolver diversos problemas de estabilidad en geomecánica.

Asadi, y Khoshghalb, (2024) indican que en la mayoría de los modelos numéricos de subsidencia del terreno existentes presentan limitaciones significativas, como la suposición de movimiento unidimensional, el desacoplamiento entre el flujo y la deformación, o la consideración de un comportamiento elástico lineal. Algunos

incluso no cumplen con la conservación de masa, lo que reduce su capacidad para representar de manera precisa el comportamiento real de los medios porosos sometidos a cargas hidráulicas. En este estudio se desarrolla una técnica numérica localmente conservativa para analizar la subsidencia en medios porosos saturados, bajo condiciones de deformación plana y axisimétrica. La ecuación de flujo se discretiza mediante el método de volúmenes finitos discretos duales y se acopla iterativamente con un modelo de deformación elastoplástica resuelto mediante el método de elementos finitos. El modelo propuesto fue verificado y comparado con formulaciones estándar, demostrando ventajas en la precisión y conservación local del flujo. Su aplicación en un sistema multiacuífero conceptual, con diferentes programas de bombeo estacionales, evidenció que las deformaciones horizontales del suelo pueden ser tan relevantes como las verticales, y que el régimen de bombeo influye significativamente en la magnitud y distribución de la subsidencia.

Carbonell et al. (2022) indican que las capacidades del método de elementos finitos de partículas (PFEM) para modelar problemas geotécnicos se han vuelto cada vez más notorias. Este método numérico permite analizar medios continuos que experimentan grandes desplazamientos y deformaciones, superando las limitaciones del método de elementos finitos (FEM) clásico. En el PFEM, el dominio computacional se actualiza constantemente mediante remallado y redefinición de límites, garantizando soluciones precisas y estables. El PFEM mantiene principios del FEM geomecánico tradicional, como la formulación lagrangiana, lo que facilita su comprensión y aplicación. En esta investigación se presenta G-PFEM, un código diseñado específicamente para abordar problemas geotécnicos complejos mediante esta metodología. El trabajo persigue dos objetivos principales: ofrecer una visión general de las capacidades y características actuales de G-PFEM, e ilustrar sus desarrollos más recientes. El código permite resolver problemas hidromecánicos acoplados, tanto estáticos como dinámicos, que incluyen la interacción entre cuerpos sólidos y deformables. Incorpora modelos constitutivos avanzados para geomateriales, considerando fenómenos de estructuración y desestructuración que producen comportamientos frágiles. Su solidez numérica se basa en formulaciones mixtas,

integración elastoplástica independiente de la malla y un tratamiento flexible de las interacciones de contacto.

Rezaei y Mousavi (2024) indican que los procesos de temperatura extrema pueden influir significativamente en la estabilidad de los taludes de minas a cielo abierto ubicadas en regiones frías, incrementando los costos operativos y comprometiendo la seguridad del personal y la maquinaria. Por ello, resulta fundamental evaluar la degradación de las propiedades geomecánicas de la roca bajo la acción de agentes meteorizantes para un análisis confiable de la estabilidad en zonas montañosas. En el caso de la mina a cielo abierto de Angouran, se evaluaron las variaciones en las propiedades físico-mecánicas de la roca esquistosa que conforma las paredes del tajo, incluyendo la densidad seca y las resistencias a compresión uniaxial y triaxial, a lo largo de distintos ciclos de congelación-descongelación. Los resultados de la simulación mostraron desplazamientos de la masa rocosa entre 0 y 14,6 m, principalmente en zonas de esquisto altamente meteorizado, lo que sugiere una baja probabilidad de deslizamientos de gran magnitud. Para validar los resultados numéricos, se instalaron 30 prismas de control en la pared noroeste de la mina y se realizaron mediciones in situ tres veces por semana durante un año. Los desplazamientos registrados coincidieron de manera satisfactoria con los obtenidos en el modelo numérico, alcanzando un coeficiente de determinación (R^2) de 0,80, lo que confirma la fiabilidad del análisis realizado.

Prassetyo y Gutierrez (2018) indican que las técnicas de solución explícita se han aplicado ampliamente en ingeniería geotécnica para simular la interacción de la deformación del suelo en estructuras. Sin embargo, estos métodos son condicionalmente estables y requieren pequeños pasos de tiempo, lo que los hace ineficientes para analizar problemas de gran escala. Para mejorar su rendimiento, puede emplearse el esquema explícito de dirección alternada (ADE), que es incondicionalmente estable. No obstante, el ADE convencional presenta limitaciones en precisión y solo se aplica a mallas uniformes y condiciones planas de deformación. Este estudio propone un nuevo esquema ADE de alto orden, diseñado para resolver problemas de flujo en mallas no uniformes y bajo condiciones axisimétricas. El método

se basa en una aproximación de diferencias finitas (FD) de cuarto orden aplicada a la ecuación de difusión de fluidos axisimétrica, combinada con la técnica implícita de Crank-Nicolson y un proceso de barrido alternado que genera el nuevo esquema ADE axisimétrico. Las soluciones de presión de poros obtenidas con este esquema se integran de forma secuencial en el simulador geomecánico del software FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), dando origen a la técnica denominada SEA-4-AXI (Sequential Explicit coupling based on 4th-order Axisymmetric ADE).

Durán et al. (2022) indican que, debido a la disminución sostenida en la ley de mineral de los yacimientos, es necesario reformular la geometría de los taludes en la explotación minera a cielo abierto. Esto implica la adopción de ángulos de talud más pronunciados, lo que incrementa el riesgo de inestabilidades geotécnicas. Para evaluar la estabilidad de las excavaciones, se utilizan habitualmente modelos matemáticos y simulaciones numéricas que permiten calcular el estado de esfuerzos en la masa rocosa, al cual se le aplica un criterio de estabilidad. Un desafío de este enfoque radica en que el volumen que rodea la excavación carece de límites definidos, siendo en la práctica una región no acotada. Por ello, se requieren métodos avanzados que puedan manejar de forma eficiente dominios semi-infinitos. En este estudio se aplica el método DtN-FEM (Dirichlet-to-Neumann Finite Element Method) para calcular los desplazamientos y esfuerzos en taludes de minas a cielo abierto bajo condiciones de esfuerzo geostático. Este procedimiento, desarrollado previamente por los autores, permite abordar de manera precisa este tipo de problemas, caracterizados por su extensión semi-infinita. La eficiencia computacional del método posibilita la simulación rápida de múltiples configuraciones de taludes, lo que lo convierte en una herramienta útil para el diseño de taludes en minas a cielo abierto. En este trabajo, se considera una geometría regular de talud, parametrizada mediante los ángulos generales de talud y de banco. Se analizan diversas configuraciones geométricamente admisibles y se evalúa su estabilidad aplicando el campo de esfuerzos obtenido y el criterio de falla de Mohr–Coulomb.

Oliveira et al. (2012) los autores indican que los problemas axisimétricos en un semiplano elástico constituyen un tema fundamental en la mecánica computacional y,

en particular, en la ingeniería geotécnica y estructural, debido a su aplicación en el análisis de cimentaciones circulares, túneles, pilotes y estructuras enterradas. Tradicionalmente, estos problemas se abordan mediante el método de los elementos de contorno (MEC), utilizando la solución fundamental axisimétrica correspondiente al espacio completo. Sin embargo, esta aproximación exige la discretización de la superficie libre del medio, la cual debe truncarse a una distancia suficiente del eje de simetría para minimizar los efectos de borde y garantizar la precisión del modelo numérico. En este trabajo se presenta una implementación avanzada del MEC basada en la solución fundamental axisimétrica para un semiplano elástico, formulada en términos de integrales de tipo Lipschitz-Hankel. Esta solución posee la ventaja de satisfacer de manera inherente la condición de tracción nula sobre la superficie libre, así como la atenuación natural de los desplazamientos en el campo lejano, eliminando la necesidad de discretizar artificialmente dichas zonas. La metodología propuesta incluye el desarrollo de ecuaciones explícitas para el postprocesamiento de los resultados en puntos internos del dominio, permitiendo obtener con precisión los campos de desplazamiento y esfuerzo a partir de las variables de contorno. Además, se presentan esquemas numéricos eficientes y estables para la evaluación de las integrales de contorno singulares y cuasi-singulares que aparecen en la formulación del MEC, garantizando la robustez del procedimiento.

González-Cao et al. (2013) los autores indican que es posible desarrollar métodos rápidos y eficientes para resolver el problema de descarga de una excavación con comportamiento elasto-perfectamente plástico, elasto-frágil o con ablandamiento por deformación. Estos métodos tradicionales se basan en la autosimilitud de la solución, lo que simplifica el análisis, pero restringe su aplicabilidad a masas rocosas homogéneas, limitando su uso en muchos casos reales donde las propiedades de los taludes operativos varían con la posición. La metodología propuesta se basa en un enfoque de continuación, asociado a la formulación incremental del comportamiento elastoplástico, combinando la discretización espacial mediante el método de los elementos finitos (FEM) con una integración mixta de la ley constitutiva, que combina subpasos explícitos y técnicas implícitas. Este esquema híbrido permite manejar con precisión los fenómenos de ablandamiento pronunciado y de fragilidad elástica,

evitando inestabilidades numéricas y garantizando la convergencia del modelo. El algoritmo desarrollado fue aplicado a dos casos prácticos representativos para ilustrar su eficacia.

Patel et al. (2025) desarrollaron un algoritmo numérico eficiente en Python, basado en el Método de los Elementos de Contorno (MEC), diseñado para resolver problemas de contacto axisimétrico elástico lineal sin fricción en sólidos recubiertos. El objetivo principal de este trabajo es analizar la respuesta mecánica de sistemas multicapa sometidos a procesos de indentación, considerando distintas configuraciones de indentadores planos, cónicos, esféricos y cilíndricos, así como el caso particular de indentación mediante punzón plano sobre un sustrato rígido con recubrimiento blando. El algoritmo implementado utiliza formulaciones integrales basadas en la solución fundamental axisimétrica, lo que permite una descripción precisa del campo de desplazamientos y tensiones en medios elásticos con geometría rotacional. Este enfoque evita la necesidad de discretizar el dominio completo —como en el Método de Elementos Finitos (FEM)—, reduciendo de manera significativa el costo computacional y el número de grados de libertad del sistema. Para validar la precisión y estabilidad del MEC, se desarrolló una serie de simulaciones comparativas mediante el FEM, abarcando una amplia gama de condiciones mecánicas y geométricas. En particular, se estudiaron capas blandas con coeficientes de Poisson de 0.25, 0.4 y 0.49, relaciones de aspecto (espesor/diámetro del área de contacto) entre 0.25 y 10, y diferencias de módulo elástico entre sustrato y recubrimiento de 10 y 100 veces. Los resultados muestran una alta concordancia entre el MEC y el FEM para materiales moderadamente compresibles, donde el confinamiento del material blando no produce efectos dominantes. Sin embargo, a medida que el material se aproxima a la incompresibilidad ($\nu \rightarrow 0.5$), surgen divergencias notables: para un coeficiente de Poisson de 0.4999, el MEC pierde estabilidad numérica debido al incremento de la presión hidrostática y al confinamiento extremo del material, condiciones que dificultan la satisfacción de las ecuaciones de equilibrio con precisión.

Tran y Geniaut (2012) indican que el Método de los Elementos Finitos Extendido (X-FEM) constituye una evolución del método tradicional de elementos finitos, en el cual las funciones de forma se enriquecen con soluciones especiales utilizando el marco de la partición de la unidad. Esta metodología permite representar de manera más precisa los campos de desplazamiento y tensiones en estructuras agrietadas, sin necesidad de modificar la malla cada vez que la grieta cambia de posición o geometría, lo que representa una ventaja significativa frente al enfoque clásico del FEM. En mecánica de fractura, el X-FEM ha demostrado una alta eficacia para calcular los factores de intensidad de tensiones (SIF) y simular la propagación de grietas en distintos tipos de materiales. La localización de la grieta se realiza comúnmente mediante el método de conjuntos de nivel (level set), que permite definir de forma implícita la posición y evolución de la grieta dentro del dominio. De esta manera, la introducción de funciones discontinuas enriquecidas en las funciones de interpolación del FEM elimina la necesidad del remallado constante, un proceso que suele ser tedioso y costoso computacionalmente en problemas con fracturas complejas o propagación múltiple de grietas. Diversos autores, han realizado revisiones exhaustivas sobre las aplicaciones y ventajas del X-FEM en la mecánica de fractura computacional, destacando su superioridad frente al FEM convencional en términos de precisión, estabilidad numérica y flexibilidad geométrica. El X-FEM ha sido ampliamente desarrollado para modelos bidimensionales en deformación y tensión plana, así como para modelos tridimensionales, logrando excelentes resultados en la predicción del crecimiento de grietas bajo diferentes condiciones de carga y material.

Mackerle (2005) El presente artículo ofrece una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con la aplicación del Método de los Elementos Finitos (FEM) al análisis estructural de recipientes a presión y sistemas de tuberías, abordando tanto los fundamentos teóricos como las experiencias prácticas reportadas en la última década. Este trabajo amplía y complementa la serie de publicaciones titulada “Elementos finitos en el análisis de recipientes a presión y tuberías: una bibliografía”, incorporando los avances más relevantes desarrollados entre los años 2001 y 2004. En total, se recopilan 856 referencias provenientes de artículos científicos, actas de congresos y estudios técnicos especializados, que reflejan la evolución del FEM en el ámbito del análisis,

diseño y evaluación estructural de componentes sometidos a condiciones de presión interna y externa. Las referencias están clasificadas sistemáticamente para facilitar su consulta y abarcan las principales áreas de investigación en el campo: Análisis lineal y no lineal, tanto estático como dinámico, enfocado en la determinación de tensiones, deformaciones y modos de vibración. Estudios de estabilidad estructural, orientados a problemas de pandeo y colapso bajo cargas combinadas. Análisis térmico y termo-mecánico, incluyendo los efectos de gradientes de temperatura y ciclos térmicos. Mecánica de fractura, con énfasis en la predicción del crecimiento de grietas y evaluación de la vida útil. Problemas de contacto y acoplamiento fluido-estructura, esenciales para el modelado realista de juntas, uniones y transporte de fluidos. Procesos de fabricación y soldadura, abordando el comportamiento residual y las tensiones inducidas por calor. Desarrollo de elementos finitos especializados para geometrías curvas y componentes cilíndricos típicos de recipientes a presión y conducciones.

Liu et al. (2020) indican que el método de elementos finitos (FELEM del inglés Finite Element Limit Equilibrium Method) se utiliza cada vez más en análisis de estabilidad de taludes. Su principal ventaja radica en la rapidez de su proceso de análisis, que no requiere el proceso iterativo de reducción de resistencia empleado en el método de reducción de resistencia de elementos finitos. El FELEM convencional calcula las tensiones mediante el método de elementos finitos con el modelo elástico-plástico perfecto de Mohr-Coulomb y busca la superficie de deslizamiento crítica con el factor de seguridad mínimo. Para ampliar y mejorar aún más la aplicabilidad del MELE, se propone un MELE de estabilidad de taludes en 2D y 3D que utiliza campos de tensiones de elementos finitos elásticos. Se adoptan cinco problemas típicos de taludes de suelo, un problema de talud rocoso en 2D con un modelo de falla no lineal y un problema de talud poco profundo en 3D para validar el FELEM propuesto. Los resultados indican que este método puede aplicarse a la resolución de diversos problemas de taludes. El método de estabilidad de taludes por equilibrio límite, basado en campos de tensiones de elementos finitos, se utiliza cada vez más en el análisis de estabilidad de taludes. La aplicación del concepto de equilibrio límite al análisis de estabilidad de taludes por elementos finitos ha dado lugar al método de equilibrio límite por elementos finitos (FELEM). La principal ventaja del FELEM radica en su proceso

de análisis, que ahorra tiempo, ya que no requiere el proceso iterativo de reducción de resistencia empleado en el método de reducción de resistencia por elementos finitos (SRFEM). Generalmente, se adopta el modelo elástico-plástico perfecto de Mohr-Coulomb (MC) para calcular el campo de tensiones en el FELEM.

Wang et al. (2019) indican que las investigaciones realizadas tras diversos deslizamientos evidencian un notable desplazamiento de las masas de suelo afectadas, especialmente en aquellos inducidos por eventos sísmicos. En este estudio se desarrolla un modelo de elementos finitos (FEM) basado en el enfoque euleriano, orientado a representar grandes deformaciones del suelo bajo cargas pseudoestáticas y dinámicas. El desempeño del FEM euleriano se compara con los enfoques explícitos e implícitos del método lagrangiano. El modelado dinámico mediante FEM de dos taludes hipotéticos, utilizando ocho registros sísmicos de aceleración-tiempo, revela que las superficies de falla se desarrollan de manera progresiva, fenómeno que el método tradicional de equilibrio límite (MEL) no puede reproducir adecuadamente. Asimismo, se observa una marcada concentración de deformación plástica por corte (bandas de corte) al considerar el comportamiento de ablandamiento por deformación del suelo. El estudio analiza las similitudes y diferencias entre los resultados obtenidos mediante análisis dinámicos y pseudoestáticos por FEM, con base en el coeficiente pseudoestático estimado a partir de los registros de aceleración-tiempo. Se determina que la duración del sismo influye significativamente en el proceso de falla y en el desplazamiento de la masa de suelo. Además, el desplazamiento del pie del talud obtenido con el FEM se compara con el estimado mediante el enfoque simplificado de Newmark. Finalmente, la técnica de modelado de elementos finitos basada en el método euleriano desarrollada en este trabajo se ha aplicado exitosamente a la simulación de deslizamientos de gran magnitud en arcillas sensibles sometidas a cargas sísmicas.

Troncone et al. (2016) presentan los resultados de un análisis tridimensional (3D) del deslizamiento de tierra ocurrido en Senise, desencadenado por excavaciones profundas realizadas al pie de la ladera. Los suelos involucrados mostraron un pronunciado comportamiento de ablandamiento por deformación. El estudio se llevó a

cabo mediante el Método de Elementos Finitos, incorporando un modelo constitutivo elastoviscoplástico. El fenómeno de ablandamiento por deformación se representó reduciendo progresivamente los parámetros de resistencia, desde su valor máximo hasta el residual, en función de la deformación plástica desviadora acumulada. Los resultados obtenidos permiten explicar la ocurrencia de un proceso de falla progresiva tridimensional en la ladera analizada.

Bhandari et al. (2016) mencionan que el Método de los Elementos Finitos (FEM) es ampliamente utilizado en la simulación de problemas geotécnicos. Sin embargo, sus limitaciones para representar grandes deformaciones han motivado el desarrollo de métodos alternativos libres de distorsión de malla. Uno de estos enfoques es el Método de Puntos Materiales (MPM), que modela el material como un conjunto de partículas lagrangianas que se desplazan a través de una malla computacional de fondo con formulación euleriana. Aunque el MPM representa el continuo mediante puntos materiales, la solución numérica se lleva a cabo sobre la malla computacional, lo que genera dificultades para imponer condiciones de contorno coherentes con la representación del material. En este estudio se propone una condición cinemática distinta de cero, incorporando un conjunto adicional de partículas destinadas a seguir el contorno móvil. Este enfoque se aplica a la simulación del movimiento sísmico que induce la falla de taludes. Para validar el procedimiento, se modelan dos casos geotécnicos mediante el MPM: el primero reproduce un experimento de mesa vibratoria con resultados previamente obtenidos por otro método numérico; una vez validado el esquema para deformaciones de magnitud considerable, se emplea para simular la evolución de un deslizamiento de tierra a gran escala ocurrido durante el terremoto de Chi-Chi (Taiwán), caracterizado por una intensa deformación y un notable transporte de material.

Vardon et al. (2017) indican que la simulación de deslizamientos de taludes, abarcando tanto su etapa inicial como su evolución completa, se ha desarrollado empleando el Método de Puntos Materiales (MPM), una necesidad a partir del FEM una técnica numérica avanzada capaz de representar grandes deformaciones del terreno y movimientos continuos del material. En este estudio se presentan diversos casos de

simulación numérica que consideran variaciones en el ángulo de la pendiente, el grado de heterogeneidad del suelo y los efectos de la infiltración de agua de lluvia, factores que influyen significativamente en la estabilidad y el comportamiento de los taludes. El modelo implementado incorpora un comportamiento constitutivo simplificado, capaz de reproducir tanto la respuesta previa al deslizamiento (etapa de deformación elástica y plástica inicial) como la fase posterior al fallo (flujo o movimiento del material desprendido). Los resultados muestran que el MPM permite representar con precisión los mecanismos de falla más comunes, como los deslizamientos rotacionales, traslacionales y los flujos de detritos, además de capturar la transición continua entre estos modos de deformación. Este enfoque constituye un avance significativo en la modelación geotécnica, al ofrecer una herramienta robusta para la evaluación cuantitativa de las consecuencias y del riesgo asociado a los deslizamientos de taludes, proporcionando así una base más sólida para el diseño de medidas de prevención y mitigación ante eventos de inestabilidad del terreno.

Liu et al. (2017) los flujos de detritos granulares son fenómenos frecuentes en las regiones montañosas del suroeste de China, donde las pendientes pronunciadas y la inestabilidad del terreno favorecen su ocurrencia. Estos procesos se caracterizan por presentar grandes deformaciones y transiciones complejas entre estados sólidos y fluidos, lo que dificulta el desarrollo de un modelo constitutivo fenomenológico unificado que describa adecuadamente su comportamiento. En este estudio se propone un esquema de modelado jerárquico multiescala, diseñado para simular el colapso de un apilamiento granular. A nivel macroscópico, el comportamiento global del flujo se representa mediante el Método de Puntos Materiales (MPM), particularmente adecuado para el análisis de problemas con grandes deformaciones y desplazamientos. Paralelamente, la relación constitutiva local de cada punto material se obtiene a partir del Método de Elementos Discretos (DEM), el cual modela explícitamente las interacciones entre partículas individuales. Esta estrategia multiescalar MPM/DEM elimina la necesidad de asumir relaciones constitutivas empíricas en el MPM, permitiendo en su lugar una descripción directa basada en el comportamiento microscópico del material granular. Gracias a ello, se logra una comprensión más profunda y coherente del comportamiento de los flujos granulares a diferentes escalas,

constituyendo un enfoque innovador y prometedor para simular grandes deformaciones en materiales granulares cuando sus propiedades constitutivas resultan difíciles de definir de forma explícita.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Cuentas (2024) a extracción continua de material en el cerro Quellorco, ubicado sobre el barrio de la Asociación Poblacional Vecinal (APV) Chejoña III Etapa – Puno, ha sido realizada durante más de cinco décadas sin una adecuada planificación técnica ni medidas de control geotécnico. Esta actividad prolongada ha generado una situación crítica de inestabilidad, elevando significativamente el riesgo de deslizamientos en la zona. El peligro se intensifica por la presencia de viviendas y urbanizaciones asentadas al pie del talud, lo que incrementa la posibilidad de daños materiales, pérdidas humanas y altos costos económicos ante un eventual colapso. El objetivo principal de la investigación es evaluar la estabilidad del cerro Quellorco y proponer alternativas de estabilización que garanticen el cumplimiento del factor de seguridad mínimo exigido por la normativa geotécnica. Para ello, se desarrolló un estudio con enfoque cuantitativo, de tipo no experimental y nivel descriptivo–correlacional, estructurado en tres fases: campo, laboratorio y gabinete. Como medidas de mitigación, se propone reducir la carga en la cabecera del talud y añadir material de refuerzo en el pie de los taludes críticos (5, 6, 7 y 8). Asimismo, se recomienda la implementación de un sistema integral de drenaje superficial en todo de los taludes operativos y la construcción de bancos o bermas escalonadas en el Talud 2, con el fin de mejorar la estabilidad general del conjunto y reducir el riesgo de deslizamientos futuros.

Castro (2022) cuando el terreno está conformado por suelos problemáticos susceptibles a fenómenos como licuación, asentamientos excesivos o expansión volumétrica, las cimentaciones profundas suelen considerarse una solución viable para garantizar la estabilidad estructural. No obstante, este tipo de cimentaciones puede resultar económicamente inviable, debido al elevado consumo de materiales, los altos costos de ejecución y los bajos rendimientos constructivos asociados. Ante ello, los tratamientos y métodos de mejoramiento del terreno surgen como alternativas técnicas y económicas más eficientes. Entre estos, las Columnas de Módulo Controlado (CMC)

representan una técnica de refuerzo del suelo ampliamente utilizada. Este método consiste en la instalación de una malla de columnas semirrígidas, formadas por mortero o concreto fluido, sobre las cuales se dispone un colchón de reparto de cargas. Su función principal es incrementar la capacidad portante del terreno y reducir los asentamientos diferenciales, mediante la interacción sinérgica entre el colchón de reparto, las columnas y el suelo circundante, que conforman el sistema de transmisión de cargas. El presente trabajo de investigación desarrolla una revisión del estado del arte sobre los métodos analíticos empleados en el diseño de las CMC y sobre los modelos numéricos utilizados para evaluar su comportamiento. Asimismo, se plantea su aplicación práctica en un caso de estudio, variando parámetros clave como el espesor del colchón de reparto y el espaciamiento entre inclusiones, con el propósito de analizar las deformaciones y esfuerzos generados a lo largo de las columnas y del terreno adyacente.

Asencios (2020) analiza la influencia del arreglo estructural de las discontinuidades en la estabilidad global de los taludes de un tajo abierto, utilizando la metodología de los elementos finitos (FEM) con el propósito de lograr un diseño más realista y representativo de las condiciones geotécnicas de los taludes operativos. Para el desarrollo de la investigación se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva del estado del arte, con el fin de establecer una base teórica sólida sobre los enfoques y resultados previamente obtenidos en estudios similares, así como para seleccionar el modelo más adecuado para el representar las discontinuidades y definir la metodología de cálculo a emplear. Los datos de entrada de los taludes operativos se obtuvieron a partir de la caracterización geomecánica de una mina a tajo abierto en Canadá, mientras que la caracterización de las discontinuidades se estableció con valores teóricos basados en la literatura especializada. Para el análisis de estabilidad, se utilizó el software RS2 de Rocscience, el cual permitió modelar las discontinuidades de forma discreta y variar parámetros como la orientación, el espaciamiento, la longitud y la persistencia de estas, a fin de evaluar su impacto sobre la estabilidad del talud. Esta investigación analizó la respuesta sísmica del Cerro Antenas del Morro Solar, ubicado en Chorrillos (Lima), ante la alta peligrosidad sísmica del Perú, país que registra en

promedio 800 sismos anuales debido a la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana.

Soto y Cardenas (2025) indican que la investigación analizó la respuesta sísmica del Cerro Antenas del Morro Solar, ubicado en Chorrillos (Lima), ante la alta peligrosidad sísmica del Perú, país que registra en promedio 800 sismos anuales debido a la subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. El estudio se centró en evaluar la amplificación topográfica y los espectros de aceleración en un área de 1.86 km², empleando el Método de los Elementos Finitos (FEM) mediante el software ANSYS en un modelo 3D calibrado. Para ello, se generaron modelos 2D y 3D con Blender, QGIS y SpaceClaim, logrando una representación precisa de la topografía y los estratos geotécnicos. Se realizaron 23 simulaciones 2D para la calibración, considerando las propiedades del suelo según el criterio de Mohr-Coulomb, registros sísmicos reales de las estaciones MSOL (cima) y CHOR (base), y condiciones dinámicas ajustadas. Los resultados mostraron que la topografía y las propiedades del terreno influyen directamente en la amplificación sísmica. Las aceleraciones máximas aumentaron con la altitud: 2.162 cm/s² en la base rocosa (punto "pref"), 4.94 cm/s² en suelo suelto (punto "p1") y 6.365 cm/s² en la cima (punto "p18"). El Coeficiente de Amplificación Topográfica (CAT) varió entre 1.0 y 2.944, mientras que el Espectro Promedio de Amplificación Topográfica (EPAT) osciló entre 0.277 y 65.327, con una frecuencia de resonancia de 0.272 Hz.

Urrutia (2008) indica que debido a la alta actividad sísmica de la costa peruana y a la magnitud significativa de los eventos registrados, los análisis dinámicos han adquirido una relevancia creciente en el diseño y evaluación de estructuras geotécnicas. En este contexto, la presente tesis realiza una evaluación dinámica de la estabilidad de los taludes de la Costa Verde, ubicados en el distrito de Miraflores, mediante el método de los elementos finitos (FEM). Para ello, se modelaron secciones críticas de los taludes utilizando el software GeoStudio 2004, a través de sus módulos QUAKE/W y SLOPE/W, y se sometieron a la acción de cuatro registros sísmicos representativos correspondientes a los eventos más significativos ocurridos en los años 1966, 1970, 1974 y 2006, cercanos a la zona de estudio. Los registros de aceleración fueron

aplicados directamente al modelo numérico, permitiendo analizar las resistencias post-sísmicas, las deformaciones permanentes y la variación del factor de seguridad en las secciones evaluadas. Los resultados obtenidos proporcionaron una visión integral del comportamiento dinámico de los taludes, tanto durante como después de los eventos sísmicos, evidenciando la influencia de las aceleraciones en la disminución de la estabilidad global. Como complemento, se elaboró un manual técnico sobre el análisis dinámico de estabilidad de taludes mediante el método de los elementos finitos en GeoStudio 2004, incluido en los anexos de la tesis, con el objetivo de servir como guía práctica para futuros estudios y aplicaciones en ingeniería geotécnica sísmica.

Moreno (2022) los taludes de la Costa Verde, ubicados entre los distritos de San Miguel y Chorrillos en la ciudad de Lima, constituyen una zona de gran afluencia de personas, con edificaciones en la parte superior y el circuito de playas en su base. Sin embargo, estos taludes presentan deslizamientos frecuentes, lo que representa un riesgo potencial de accidentes, agravado por el hecho de que Lima se encuentra en una región altamente sísmica. Tradicionalmente, la estabilidad de taludes se evalúa mediante métodos determinísticos, los cuales proporcionan un factor de seguridad. No obstante, el enfoque probabilístico permite incorporar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos, determinando así la probabilidad de falla y una evaluación más completa del riesgo geotécnico. En este contexto, la presente tesis tiene como objetivo principal analizar el riesgo asociado a la estabilidad de los taludes de la Costa Verde, considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia del suelo. El estudio abarca 23 secciones distribuidas a lo largo de los taludes, analizadas bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. El factor de seguridad se obtuvo mediante el método de equilibrio límite de Spencer, mientras que la probabilidad de falla fue determinada a través del análisis de Monte Carlo. Los resultados indican que 10 secciones presentan un riesgo bajo, 6 un riesgo medio, 6 un riesgo alto y 1 un riesgo muy alto. Asimismo, se propone el banqueteo como una medida convencional de estabilización. Finalmente, al comparar los costos de mitigación con los costos asociados al riesgo, se concluye que la estabilización preventiva resulta más económica y segura que enfrentar las consecuencias de un eventual colapso.

2.1.3 Antecedentes Locales

Valderrama (2025) desarrolló un estudio motivado por la necesidad de caracterizar geotécnicamente de los taludes mediante sistemas de clasificación empírica, empleando específicamente el método Slope Mass Rating (SMR). El propósito principal fue analizar las condiciones actuales de los taludes y determinar sus niveles de estabilidad. Esta metodología permite establecer correlaciones entre los parámetros estructurales —como la orientación de las discontinuidades, la calidad del área de estudio y las condiciones geométricas del talud— con un índice cuantitativo que refleja el grado de estabilidad del terreno. Sin embargo, debido a que el comportamiento geotécnico de taludes es inherentemente no lineal, anisotrópico y dependiente del estado de esfuerzos, el análisis empírico se complementa con la modelación numérica a través del Método de los Elementos Finitos (FEM). Esta herramienta posibilita simular con mayor realismo la respuesta del terreno frente a cargas estáticas y pseudoestáticas, evaluando las deformaciones, los esfuerzos internos y los posibles mecanismos de falla.

Por su parte, Turpo (2018) señala que en la industria minera la geotecnia ha adquirido una relevancia creciente, especialmente en el diseño y la estabilidad de taludes. Esto se debe a que las operaciones a cielo abierto demandan excavaciones de grandes dimensiones, lo que incrementa los riesgos asociados a la estabilidad de los taludes constituidos por rocas, suelos o materiales fuertemente alterados cuyo comportamiento geomecánico se asemeja al de un suelo. En este contexto, la geometría final del tajo debe optimizar el equilibrio entre la seguridad operacional y la rentabilidad económica. Por ello, el análisis de estabilidad en minas a cielo abierto busca definir la geometría de excavación que permita acceder al material de interés con el máximo nivel de seguridad, considerando parámetros como el ángulo de los taludes individuales, el ángulo global, las dimensiones de las bermas y las alturas de banco. La investigación tuvo como objetivo determinar los parámetros geométricos óptimos del talud que aseguren la estabilidad del tajo superficial en el área de explotación de la unidad minera “Moises Randy 2010”, aplicando una metodología geotécnica rigurosa.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Formulación mixta para medios continuos en problemas axisimétricos

Según Ribeiro (2005) la formulación mixta constituye un enfoque fundamental en el análisis de medios continuos mediante el método de los elementos finitos (FEM), especialmente cuando se abordan problemas axisimétricos en geotecnia. Este tipo de formulación combina simultáneamente las ecuaciones de equilibrio, las leyes constitutivas del material y las condiciones de compatibilidad de deformaciones, permitiendo obtener una solución más estable y precisa que las formulaciones exclusivamente primales o duales.

En los problemas axisimétricos, donde las condiciones geométricas y de carga presentan simetría alrededor de un eje (por ejemplo, taludes cónicos, pilotes o cavidades circulares), la formulación mixta resulta particularmente útil, ya que permite describir de manera precisa la distribución de tensiones y deformaciones a lo largo del radio y la altura del elemento. Al incluir simultáneamente variables primales (desplazamientos) y duales (esfuerzos o presiones), se logra una representación más realista del comportamiento del material, minimizando errores numéricos como el bloqueo volumétrico o la sobreestimación de rigidez en suelos y rocas.

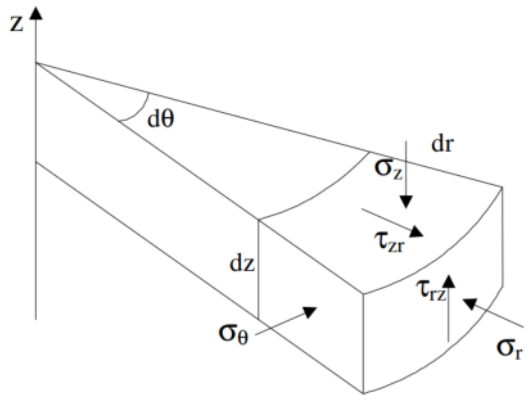
Matemáticamente, la formulación mixta se basa en un principio variacional combinado, donde se buscan funciones que satisfagan tanto las ecuaciones de equilibrio como las relaciones constitutivas, utilizando funciones de forma adecuadas para desplazamientos y tensiones. Esto permite que los elementos finitos capturen correctamente los gradientes de esfuerzo y deformación, incluso en regiones con concentraciones de tensiones o discontinuidades geométricas típicas en problemas axisimétricos.

En aplicaciones geotécnicas, como el estudio de taludes, excavaciones circulares o cimentaciones profundas, la formulación mixta proporciona ventajas significativas: mejora la precisión del cálculo de factores de seguridad, facilita la modelación de materiales elasto-plásticos y no lineales, y permite una mejor interpretación de los resultados en términos de desplazamientos, tensiones principales y distribuciones de esfuerzo radial y tangencial. Por estas razones, constituye una

herramienta esencial en la simulación numérica de problemas axisimétricos en medios continuos, integrando de manera coherente la teoría mecánica con la práctica computacional del FEM, La Figura 01 muestra un elemento de suelo en condición axisimétrica y los componentes de tensión σ_r, σ_z, σ_θ y τ_{rz} que actúan sobre el elemento (Ribeiro, 2005).

Figura 01

Elemento de tierra en condición axisimétrica



Nota: Obtenido de Ribeiro (2005)

2.2.2 Formulación para elementos finitos en problemas axisimétricos

Según Prahatheswaran & Ashika (2020) un análisis experimental y mediante el método de elementos finitos da la respuesta de taludes de suelo bajo una sobrecarga creciente (axisimétricos), los taludes se construyeron con suelo de tamaño de granos como arena, con dos ángulos de inclinación diferentes: 45° y 60° con respecto a la horizontal, los taludes con patrón de falla y las curvas carga-asentamiento para los taludes se deben analizar utilizando un software de elementos finitos, y se realizar un estudio comparativo con los datos experimentales. El análisis debe revelar el mecanismo de falla de los taludes si es similar al patrón de falla obtenido en los ensayos con modelos. Sin embargo, la capacidad de carga máxima de los taludes y el asentamiento de la cresta bajo la sobrecarga pueden resultar ser diferentes a los obtenidos mediante el método de elementos finitos y los ensayos con modelos.

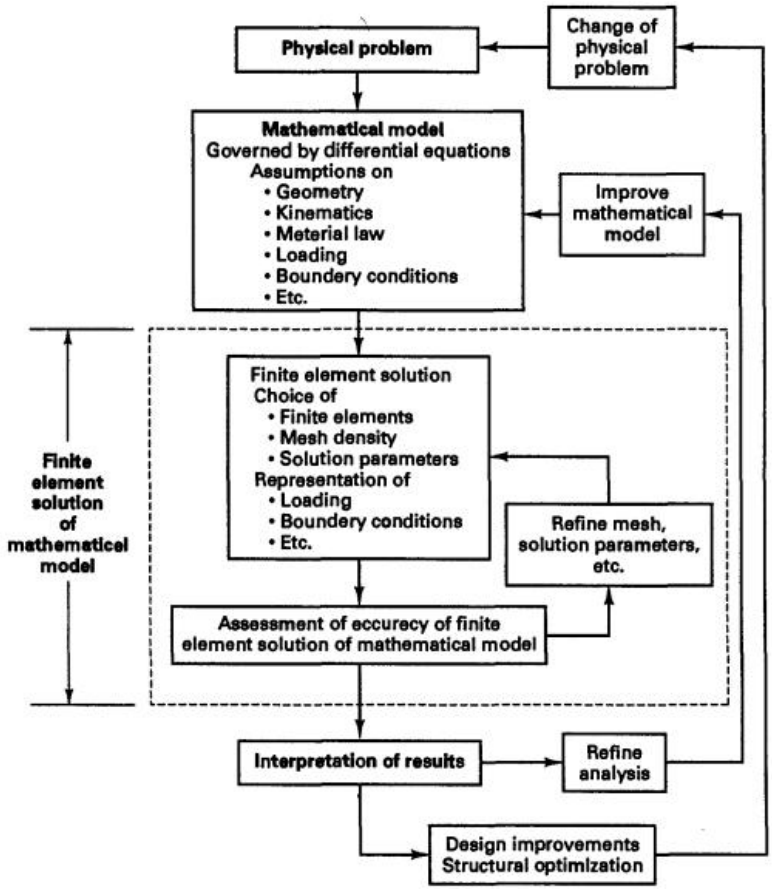
De acuerdo con Zorzal (2019) la aplicación del FEM a la resolución de problemas prácticos de ingeniería cobró impulso con el desarrollo de la computación

digital a principios de la década de 1960. Mediante la programación informática, es posible desarrollar una herramienta capaz de proporcionar, de forma automatizada, la solución a un problema físico formulado adecuadamente como un sistema de ecuaciones algebraicas (o un modelo discreto). El continuo y significativo aumento de la capacidad informática, tanto de almacenamiento como de procesamiento, ha permitido crear modelos discretos cada vez más detallados y representativos.

La Figura 02 ilustra el proceso paso a paso que generalmente se debe adoptar para el análisis de elementos finitos de un problema de equilibrio mecánico. En el FEM, como se mencionó anteriormente, el dominio del problema a analizar se divide en un número discreto de subdominios o elementos de dimensión finita, denominados elementos finitos. Estos elementos están interconectados mediante puntos llamados nodos, formando una malla de elementos finitos.

Figura 02

Proceso de analizar un problema de equilibrio mecánico utilizando el FEM

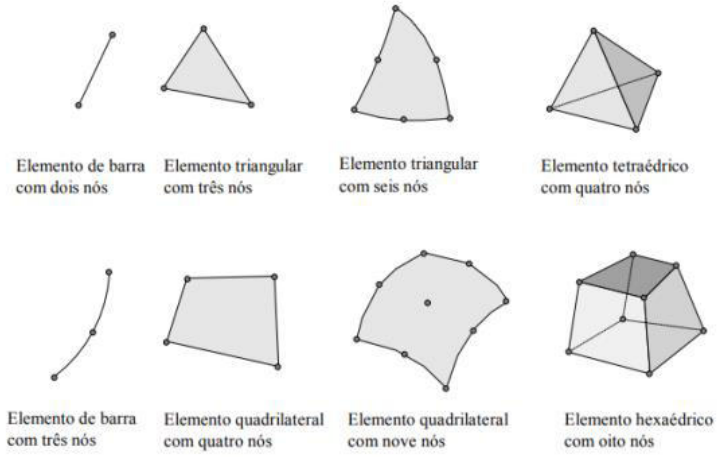


Nota: Obtenido de Bathe (1996)

Se han propuesto varios tipos de elementos finitos, cuyas formulaciones se pueden encontrar fácilmente en la literatura especializada (Bathe, 1996; Zienkievicz y Taylor, 2000; Cook et al., 2001). Los elementos finitos difieren en su forma geométrica y número de nodos (n_{no}), como se observa en la Figura 03. Es importante destacar que la elección del tipo de elemento también depende de la dimensión del problema a analizar: unidimensional, bidimensional o tridimensional.

Figura 03

Tipos de elementos finitos



Nota: Obtenido de Souza (2003)

Dado que el Método de Elementos Finitos (FEM) es un método aproximado, es necesario evaluar la convergencia de la solución. La convergencia de la solución aproximada se verifica refinando la malla hasta observar una convergencia monótona hacia una solución única. Sin embargo, la precisión de la solución aproximada depende de la calidad del modelo matemático generado para reproducir el problema físico dado con la mayor fidelidad posible (Zienkievicz y Taylor, 2000).

Como se mencionó anteriormente, la idea del FEM es dividir el dominio del problema en análisis en un conjunto de elementos finitos y aproximar la forma y la variable de estado del problema en el dominio de los elementos mediante funciones de forma e interpolación, respectivamente. En este contexto, es importante destacar las diferentes formulaciones: isoparamétrica, superparamétrica y subparamétrica.

De acuerdo con Cook et al. (2001) en una formulación isoparamétrica, las funciones de forma e interpolación son iguales. En la formulación superparamétrica, las funciones de forma tienen un orden mayor que las funciones de interpolación. En la formulación subparamétrica, las funciones de forma tienen un orden menor que las funciones de interpolación. Según el Método de Elementos Finitos (FEM), las coordenadas de cualquier punto dentro de un elemento finito se pueden escribir en función de las coordenadas de cada nodo i, de la Ecuación 01:

$$x = Nx \tag{1}$$

Donde x es el vector de coordenadas cartesianas; $\hat{x}$ es el vector de coordenadas cartesianas de los nodos; N es la matriz de funciones de forma Ni, definidas en el sistema de coordenadas natural del elemento y que dependen de su geometría y número de nodos.

Según Bathe (1996) los procedimientos de elementos finitos se utilizan actualmente de forma muy extendida en el análisis de ingeniería, y se prevé que su uso aumente significativamente en los próximos años. Estos procedimientos se emplean extensamente en el análisis de sólidos y estructuras, así como en la transferencia de calor y fluidos; de hecho, los métodos de elementos finitos son útiles en prácticamente todos los campos del análisis de ingeniería. El desarrollo de los métodos de elementos finitos para la solución de problemas prácticos de ingeniería comenzó con la llegada de la computadora digital.

Es decir, la esencia de una solución de elementos finitos de un problema de ingeniería reside en el establecimiento y la resolución de un conjunto de ecuaciones algebraicas que lo rigen, y solo mediante el uso de la computadora digital este proceso pudo hacerse efectivo y adquirir una aplicabilidad general. Estas dos propiedades — efectividad y aplicabilidad general en el análisis de ingeniería— son inherentes a la teoría utilizada y se han desarrollado en gran medida para los cálculos prácticos, de modo que los métodos de elementos finitos han encontrado una amplia aceptación en la práctica de la ingeniería.

2.2.3 Factores que provocan problemas de axisimétricos en taludes

Según Ribeiro (2005) la sobrecarga o excavación puede deberse a la acumulación de peso en la cresta del talud o la remoción de material en la base pueden desestabilizarlo. Además de otros factores como:

- Erosión que es la pérdida de material superficial debido a la lluvia o el agua corriente puede alterar la geometría y la resistencia del talud.
- Cambio del nivel del agua, como el aumento del nivel piezométrico o el descenso rápido del agua, especialmente en presas, puede reducir la tensión efectiva del suelo y provocar rupturas.
- Vibraciones que se ven reflejados por los terremotos, las explosiones o el tráfico pesado pueden desestabilizar la estructura del talud.
- Degradación del suelo o la roca, la meteorización (química, física y biológica) puede reducir la resistencia del suelo y la roca con el tiempo.

2.2.4 Indicadores de inestabilidad por la axisimetría

El autor recalca que las grietas de acción y superficiales que indican la formación de rupturas. La erosión en cárcavas como pequeños agujeros o canales que se forman en la superficie debido al flujo de agua, que pueden evolucionar hacia la erosión. Y finalmente la desintegración superficial como la fragmentación y pérdida de material superficial, a menudo causada por ciclos de humectación y secado (Ribeiro, 2005).

2.2.5 Restauración de la estabilidad por problemas de axisimetría

También Ribeiro (2005) indica que la remodelación de taludes: Ajuste de la geometría del talud mediante cortes y rellenos para mejorar la estabilidad. La protección superficial con la cobertura con vegetación, suelo-cemento o geosintéticos para proteger la superficie de la erosión. Contención: Construcción de estructuras como muros de contención, pilotes o anclajes al suelo. Drenaje con la implementación de sistemas de drenaje para reducir la presión del agua y aumentar la resistencia del suelo.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Tipo y nivel de investigación

3.1.1 Tipo de investigación

El presente estudio corresponde a una investigación aplicada, ya que busca resolver un problema práctico relacionado con la estabilidad de taludes operativos en una cantera de áridos, utilizando herramientas científicas y tecnológicas para optimizar el diseño geotécnico. Su propósito es generar conocimiento útil y directamente aplicable a la ingeniería geotécnica y minera, con el fin de mejorar la seguridad y eficiencia de las operaciones en condiciones reales de campo.

Asimismo, el trabajo tiene un enfoque cuantitativo, dado que se fundamenta en la recopilación y análisis de datos numéricos provenientes de ensayos geotécnicos, mediciones topográficas y modelamientos computacionales. Estos datos permiten evaluar la estabilidad del talud mediante indicadores medibles, como factores de seguridad, esfuerzos y deformaciones obtenidos a través del método de los elementos finitos (FEM).

Se realizará una modelación numérica bajo distintas condiciones geométricas y geomecánicas, modificando parámetros de entrada para observar su influencia en la respuesta estructural del talud. De esta forma, los resultados se obtendrán a partir de simulaciones controladas que reproducen las condiciones reales del terreno, lo cual permite contrastar hipótesis y validar comportamientos esperados.

Finalmente, el estudio se enmarca en el ámbito tecnológico-ingenieril, pues integra conceptos de la mecánica de rocas, geotecnia computacional y estabilidad de taludes con el uso de software especializado, aportando soluciones técnicas que contribuyen al desarrollo sostenible y seguro de las operaciones extractivas en la región Moquegua.

3.1.2 Nivel de investigación

El nivel de la presente investigación es explicativo, ya que busca determinar las causas y relaciones existentes entre las variables que intervienen en la estabilidad de

taludes operativos, considerando su comportamiento bajo condiciones no axisimétricas. A través del modelamiento numérico mediante el método de los elementos finitos (FEM), se pretende explicar cómo influyen las propiedades geotécnicas, las condiciones geométricas y los esfuerzos internos en la estabilidad global del talud.

El estudio presenta componentes descriptivos y analíticos, puesto que inicialmente se realizará una caracterización detallada de los taludes operativos, describiendo sus propiedades físicas y mecánicas, su estructura geológica, y las condiciones geomorfológicas del área de estudio. Posteriormente, se efectuará un análisis comparativo entre los resultados obtenidos mediante modelamiento FEM y los métodos tradicionales de equilibrio límite, con el fin de interpretar los factores que inciden en el comportamiento del talud.

El nivel explicativo se evidencia también en la intención de establecer relaciones causales entre las variables analizadas, permitiendo comprender el impacto que generan los diferentes parámetros geotécnicos y condiciones de carga sobre el factor de seguridad y la deformación del talud. Esto contribuirá a formular criterios técnicos que sustenten el rediseño o la optimización de la geometría operativa del talud, mejorando su estabilidad y reduciendo riesgos asociados a fallas.

En síntesis, el nivel de investigación se orienta a explicar el fenómeno de estabilidad de taludes mediante simulación numérica, con el propósito de generar conocimiento técnico aplicable al diseño y control geotécnico de canteras de áridos en la región Moquegua, integrando teoría, análisis computacional y validación ingenieril.

3.1.3 Diseño de investigación

El diseño de la presente investigación es de tipo experimental, debido a que no se manipulan directamente las variables del entorno físico real, sino que se analizan y simulan sus comportamientos a partir de datos observados y parámetros obtenidos en campo y laboratorio. El estudio se basa en la observación, recopilación y análisis de información geotécnica para posteriormente representar el comportamiento del talud mediante modelos numéricos utilizando el método de los elementos finitos (FEM).

Se considera un diseño transversal, ya que la información será recolectada en un momento determinado del tiempo, correspondiente al estado actual de los taludes operativos de la cantera. A partir de estos datos, se construirá un modelo geotécnico que permita evaluar la estabilidad y el desempeño estructural del talud en condiciones estáticas y pseudoestáticas (sísmicas), sin requerir un seguimiento temporal prolongado.

El diseño también presenta un enfoque correlacional-explicativo, pues busca identificar la relación existente entre las variables geotécnicas (cohesión, ángulo de fricción, densidad, módulo de elasticidad, entre otras) y el comportamiento global del talud (esfuerzos, desplazamientos y factor de seguridad). A través del modelamiento computacional se pretende explicar cómo las variaciones en dichos parámetros afectan la estabilidad estructural del talud y la respuesta de los taludes operativos ante condiciones no axisimétricas.

Finalmente, el diseño metodológico se apoya en el uso de herramientas numéricas y analíticas, integrando datos de campo, resultados de laboratorio y simulaciones computacionales. Este enfoque permite validar los resultados obtenidos y garantizar la confiabilidad del análisis, brindando una base técnica sólida para la toma de decisiones en el diseño y operación de taludes en canteras de áridos de la región Moquegua.

3.2 Ámbito temporal y espacial

La presente investigación se desarrolló durante el período comprendido entre el segundo semestre y final del 2025, tiempo en el cual se realizó la recopilación de información de campo y gabinete, la caracterización geotécnica de los materiales de la cantera de áridos Solange AR, así como el procesamiento y análisis de datos mediante el modelamiento numérico con la metodología del Método de los Elementos Finitos (FEM). Este intervalo permitió evaluar las condiciones operativas del talud en el estado en que se encontraba durante el desarrollo del estudio.

El ámbito temporal del estudio corresponde a un análisis estático y pseudoestático y representativo de las condiciones geotécnicas vigentes en el período

de investigación, considerando parámetros obtenidos de ensayos y observaciones realizadas en dicho lapso. Los resultados y conclusiones son válidos para las condiciones geométricas, geomecánicas y operativas existentes durante ese tiempo, constituyendo una referencia técnica para la evaluación y gestión de la estabilidad de taludes en etapas similares de explotación.

La presente investigación se desarrollará en el ámbito geográfico de la región Moquegua, ubicada en el sur del Perú, caracterizada por una topografía accidentada y una notable actividad sísmica debido a su proximidad con la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Estas condiciones geodinámicas y morfológicas influyen directamente en el comportamiento geotécnico de los taludes operativos.

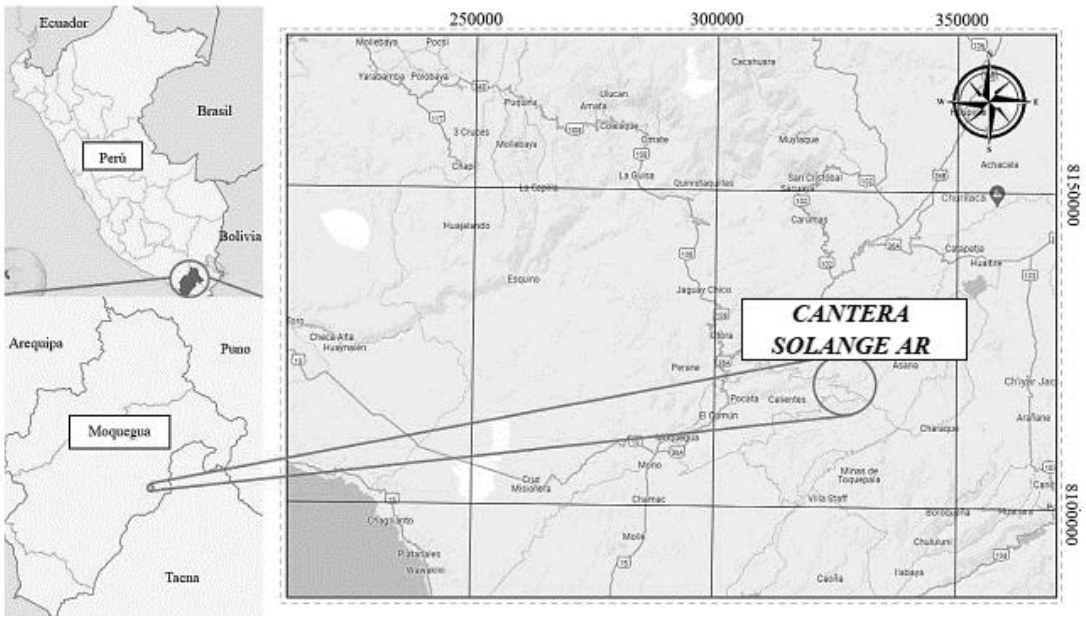
El estudio se centrará específicamente en la cantera de áridos denominada Solange Ar, ubicada en la provincia Mariscal Nieto, donde se desarrollan actividades extractivas a cielo abierto destinadas a la producción de agregados para la construcción. El área presenta taludes con geometrías irregulares y variaciones litológicas que requieren una evaluación detallada mediante modelamiento geotécnico avanzado.

El ámbito espacial también abarca el laboratorio de mecánica de suelos y rocas, donde se realizarán los ensayos geotécnicos correspondientes a las muestras extraídas del área de estudio (Anexo 02). Estos resultados permitirán definir las propiedades físicas y mecánicas del material, las cuales serán empleadas como parámetros de entrada en el modelamiento numérico basado en el método de los elementos finitos (FEM).

El procesamiento y análisis de los datos se llevará a cabo mediante software especializado de análisis geotécnico, en un entorno de simulación computacional que permitirá representar las condiciones reales del terreno. De esta manera, el ámbito espacial integra tanto el entorno natural-operativo (cantera) como el técnico-científico (laboratorio y modelamiento), asegurando un enfoque integral para el estudio de la estabilidad de taludes en la región Moquegua (Figura 04).

Figura 04

Mapa de Ubicación de la Cantera “Solange Ar”



Nota: Elaboración propia en base a Google Maps, Sistema de coordenadas UTM.4.5 Población y muestra

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población de la presente investigación está conformada por el conjunto de taludes operativos existentes en la Cantera de Áridos “Solange Ar” de áridos ubicada en la región Moquegua, que presentan diferentes características geométricas, litológicas y geotécnicas. Estos taludes representan las unidades de análisis principales, ya que en ellos se concentra el fenómeno objeto de estudio: la estabilidad estructural bajo condiciones no axisimétricas.

Cada talud constituye un sistema geotécnico complejo compuesto por materiales de diversa naturaleza, presencia de discontinuidades, variaciones de pendiente y condiciones de humedad que influyen directamente en su comportamiento. Por ello, la población también incluye las propiedades físicas y mecánicas de los taludes operativos y del material granular que conforma los taludes, las cuales serán determinadas mediante ensayos de laboratorio y mediciones de campo.

Asimismo, forman parte de la población los datos técnicos obtenidos a partir de los levantamientos topográficos, los registros de campo y los resultados de modelamiento numérico, los cuales representan la información cuantitativa sobre la respuesta estructural de los taludes frente a cargas estáticas y sísmicas. Estos datos permitirán identificar los parámetros críticos que determinan la estabilidad del terreno y validar el comportamiento del modelo geotécnico propuesto.

En síntesis, la población de estudio abarca tanto los elementos físicos (taludes, materiales, estructuras geológicas) como los datos técnicos asociados (parámetros geotécnicos, factores de seguridad, esfuerzos y deformaciones). Este enfoque integral garantiza una representación completa del entorno geotécnico de la cantera y permite realizar un análisis riguroso mediante el método de los elementos finitos (FEM), orientado a la mejora de la estabilidad de los taludes operativos en la región Moquegua.

3.3.2 Muestra

La muestra de la presente investigación estuvo conformada por un conjunto representativo de progresivas de los taludes operativos seleccionados dentro de la cantera de áridos ubicada en la región Moquegua para ello se estima 4 progresivas representativas, 000+100, 000+140, 000+180 y 000+220. Los cuales presentan características geológicas, geométricas y geotécnicas relevantes para el análisis de estabilidad. La selección se realizó considerando criterios técnicos como la altura, el ángulo de inclinación, las condiciones estructurales de los taludes operativos y la accesibilidad para la toma de datos de campo.

En total, se consideraron cuatro taludes principales que reflejan las condiciones típicas de explotación y las variaciones más significativas dentro del área de estudio, de las cuales se realizaran las progresivas en estudio. Estos taludes fueron analizados de forma detallada mediante levantamientos topográficos, ensayos geotécnicos de laboratorio y modelamiento numérico utilizando el método de los elementos finitos (FEM). La elección de estos sectores permitirá comparar comportamientos estructurales bajo diferentes escenarios y validar la influencia de la geometría no axisimétrica en la estabilidad global.

Los criterios de muestreo aplicados fueron de tipo intencional o no probabilístico, ya que la selección se basa en el juicio técnico del investigador y en la representatividad geotécnica de los sectores elegidos. Este enfoque es adecuado debido a que no se pretende realizar inferencias estadísticas sobre una población amplia, sino analizar en profundidad casos específicos que permitan comprender el comportamiento del sistema geotécnico bajo estudio.

La muestra incluyó tanto los componentes físicos del talud (materiales, estructuras y discontinuidades) como los parámetros cuantitativos derivados de los ensayos y del modelamiento numérico (cohesión, fricción, deformaciones, esfuerzos y factores de seguridad). Esta información permitió realizar un análisis integral, validando la hipótesis planteada y proponiendo mejoras técnicas aplicables a la gestión y estabilidad de taludes operativos en canteras de áridos de la región Moquegua.

3.4 Instrumentos

Para el desarrollo de la presente investigación, se aplicó diversas técnicas e instrumentos de recolección de datos que permitieron obtener información precisa y confiable sobre las condiciones geotécnicas y estructurales de los taludes operativos analizados en la cantera de áridos de la región Moquegua.

En primer lugar, se utilizó la observación directa de campo, mediante la cual se identificarán los taludes de la cantera, el estado de los taludes, así como las condiciones de drenaje y estabilidad aparente (que no se encontró). Para esta técnica se emplearon instrumentos como clinómetros, GPS y cámaras fotográficas de alta resolución, que facilitaron la caracterización geotécnica y la elaboración de croquis de campo.

En segundo lugar, se aplicaron ensayos geotécnicos de laboratorio y gabinete, orientados a determinar los parámetros físicos y mecánicos de los materiales que conforman los taludes. Entre los Ensayos Geotécnicos más relevantes se incluyen la determinación de la densidad natural, contenido de humedad, límites de Atterberg, resistencia al corte directo residual y la determinación de la capacidad portante del suelo. Los resultados de estos ensayos proporcionaron los parámetros de resistencia

necesarios para el modelamiento numérico mediante el método de los elementos finitos (FEM).

Finalmente, se utilizará la modelación numérica computacional, empleando software especializado (Slide y Phase2 del Rocscience) para simular el comportamiento de los taludes bajo condiciones estáticas y sísmicas. Esta técnica permitirá analizar la distribución de esfuerzos, deformaciones y el factor de seguridad en diferentes escenarios geométricos y geotécnicos. Los instrumentos digitales utilizados incluyen estaciones de trabajo con software de análisis FEM, hojas de cálculo y programas de procesamiento de datos geotécnicos.

En conjunto, las técnicas e instrumentos seleccionados garantizan la validez, confiabilidad y precisión de los datos obtenidos, permitiendo una adecuada correlación entre los resultados de campo, laboratorio y simulación numérica. Esto contribuye directamente al cumplimiento de los objetivos planteados y a la verificación de la hipótesis de investigación.

3.5 Procedimiento

3.5.1 Validación y confiabilidad de los instrumentos

La validación y confiabilidad de los instrumentos constituyeron un aspecto fundamental en toda investigación científica, ya que garantizan que los datos obtenidos sean precisos, consistentes y representativos de la realidad estudiada. En el presente estudio, orientado al modelamiento geotécnico de taludes operativos mediante el método de los elementos finitos (FEM), se aplicaron procedimientos rigurosos para asegurar la calidad de la información recolectada tanto en campo como en laboratorio y gabinete.

El plan de validación consistió en comparar los resultados obtenidos del modelo numérico (FEM) con la información real que se recopilará en el talud mediante mediciones de campo y ensayos de laboratorio. Se obtuvo datos como la geometría actualizada del talud y parámetros geotécnicos derivados de pruebas de corte directo residual y carga portante. Con esta información se verificó si el modelo reprodujo adecuadamente la distribución de esfuerzos, desplazamientos y factores de seguridad.

Se validaron los resultados mediante la comparación con los métodos tradicionales de equilibrio límite, lo que permitirá confirmar si el modelamiento con FEM no axisimétrico representará de manera más precisa los modos de falla y factores de seguridad. Con ello, se asegurará la confiabilidad del modelo para la toma de decisiones sobre la estabilidad de los taludes en la cantera. De igual forma, la confiabilidad se garantizará mediante la certificación del laboratorio donde se desarrollarán los ensayos y la aplicación de métodos de análisis comparativo entre resultados de campo, laboratorio y modelamiento numérico. Este enfoque integral permitirá minimizar los márgenes de error y asegurar la coherencia interna de los datos procesados.

En conjunto, estas acciones aseguran que los instrumentos empleados en la investigación sean válidos, confiables y técnicamente apropiados para evaluar la estabilidad de taludes en condiciones no axisimétricas, fortaleciendo así la solidez metodológica y la credibilidad de los resultados obtenidos.

3.5.2 Validez de los instrumentos

La validez de los instrumentos en la presente investigación se estableció considerando tanto enfoques paramétricos como no paramétricos, debido a la naturaleza mixta de las variables que se analizaron. En el estudio propuesto sobre la estabilidad de taludes mediante el método de los elementos finitos (FEM), se contemplará el uso de variables cuantitativas, como la cohesión, el ángulo de fricción, el peso unitario y el módulo de elasticidad; y cualitativas, relacionadas con las características estructurales de los taludes operativos, tipo de discontinuidades y condiciones geológicas observadas en campo.

Desde el enfoque paramétrico, la validez se garantizó mediante la precisión y representatividad de los parámetros numéricos que se obtendrán en los ensayos de laboratorio y mediciones de campo. Los datos serán procesados estadísticamente a través del cálculo de promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación, con el fin de identificar valores atípicos y asegurar su consistencia. Además, los procedimientos experimentales se ejecutaron conforme a las normas ASTM y NTP,

asegurando que las mediciones sean válidas, comparables y ajustadas a los estándares internacionales de la ingeniería geotécnica.

En el caso del enfoque no paramétrico, la validez se verificó mediante la consistencia y pertinencia de los instrumentos cualitativos que se aplicarán durante las observaciones de campo. Las fichas de caracterización geotécnica, registros fotográficos y croquis estructurales serán sometidas a revisión por parte de especialistas en geotecnia y mecánica de rocas, con el propósito de confirmar que las descripciones realizadas correspondan fielmente a las condiciones geológicas reales. Este proceso de validación por juicio de expertos permitirá fortalecer la confiabilidad de los instrumentos cualitativos empleados.

En conjunto, la aplicación de ambos enfoques permitió asegurar una validez integral de los instrumentos, de modo que los resultados numéricos obtenidos mediante el modelamiento FEM se relacionen adecuadamente con las observaciones empíricas de campo. De esta manera, se garantizará que los datos recopilados y procesados reflejen con fidelidad el comportamiento geotécnico real de los taludes operativos en la cantera de áridos de la región Moquegua.

3.5.3 Confiabilidad de los instrumentos

La confiabilidad de los instrumentos en la presente investigación se estableció mediante procedimientos que aseguren la precisión, estabilidad y reproducibilidad de los datos obtenidos en campo, laboratorio y modelamiento numérico. Dado que el estudio contempla variables tanto paramétricas como no paramétricas, se aplicarán métodos diferenciados para garantizar la consistencia de los resultados en cada caso.

Desde el enfoque paramétrico, la confiabilidad se evaluó a través de la repetición controlada de mediciones y ensayos geotécnicos, con el fin de verificar que los resultados presenten variaciones mínimas entre cada repetición. Los datos obtenidos en laboratorio, como la cohesión, el ángulo de fricción, la densidad y el módulo de elasticidad, fueron sometidos a análisis estadísticos de dispersión, calculando el error relativo, la desviación estándar y el coeficiente de variación. De esta forma, se garantizará que los instrumentos de medición y los procedimientos de

ensayo generen resultados consistentes, precisos y comparables en diferentes condiciones experimentales.

En cuanto al enfoque no paramétrico, la confiabilidad se aseguró mediante la revisión cruzada y la validación por juicio de expertos. Las observaciones de campo, registros fotográficos, fichas geotécnicas y mapas estructurales fueron revisadas por profesionales con experiencia en mecánica de rocas y geotecnia, quienes evaluarán la coherencia y uniformidad de los datos registrados. Además, se realizaron verificaciones entre observadores para reducir la subjetividad y confirmar que las interpretaciones cualitativas sean consistentes a lo largo del proceso de recolección de información.

De manera complementaria, el modelo numérico mediante el método de los elementos finitos (FEM) fueron contrastados mediante simulaciones repetidas y análisis comparativos, utilizando parámetros de entrada obtenidos en diferentes etapas de la investigación. Esta triangulación entre datos de campo, laboratorio y modelamiento permitirá comprobar la confiabilidad global de los resultados y minimizar los márgenes de error.

En síntesis, la aplicación de procedimientos de verificación estadística, control de repetitividad y revisión técnica especializada permitió garantizar que los instrumentos utilizados en la investigación sean altamente confiables, asegurando que los resultados obtenidos reflejen de forma consistente el comportamiento real de los taludes operativos analizados en la cantera de áridos de la región Moquegua.

3.6 Análisis de datos

3.6.1 Métodos y técnicas para la presentación y análisis de datos

En la presente investigación, los métodos y técnicas para la presentación y análisis de datos se establecieron con el propósito de interpretar de manera objetiva, sistemática y precisa la información obtenida en las etapas de campo, laboratorio y modelamiento numérico. Dado que el estudio busca evaluar la estabilidad de taludes operativos mediante el método de los elementos finitos (FEM) en una cantera de áridos de la región Moquegua, será fundamental organizar y procesar los datos geotécnicos

de forma que permitan identificar patrones, relaciones y comportamientos relevantes de los taludes operativos.

El análisis de los resultados se desarrolló aplicando métodos estadísticos y gráficos, tanto paramétricos (para los datos numéricos obtenidos de ensayos de laboratorio y simulaciones FEM) como no paramétricos (para la interpretación de observaciones estructurales y descriptivas). De esta manera, se podrá garantizar una comprensión integral del fenómeno estudiado, combinando la evidencia cuantitativa con la cualitativa.

La presentación de los datos se realizó mediante tablas, figuras, gráficos, curvas de comportamiento y modelos numéricos, que permitirán visualizar los resultados de manera clara y comparativa. Estos elementos facilitarán la evaluación del desempeño de los taludes bajo distintas condiciones geométricas y sísmicas, además de servir como base para la validación de la hipótesis y el cumplimiento de los objetivos planteados.

En conjunto, la aplicación adecuada de los métodos y técnicas de análisis permitió transformar los datos recolectados en información útil y técnicamente sustentada, contribuyendo a la generación de conclusiones confiables y aplicables en el ámbito de la ingeniería geotécnica y la gestión segura de taludes en operaciones mineras y canteras.

3.6.2 Métodos de análisis de datos

El análisis de los datos en la presente investigación se realizó empleando métodos cuantitativos y cualitativos, con el fin de interpretar de manera integral la información obtenida en las etapas de campo, laboratorio y modelamiento numérico. Estos métodos permitirán evaluar el comportamiento geotécnico de los taludes operativos en condiciones no axisimétricas, así como determinar los factores que influyen en su estabilidad bajo escenarios estáticos y sísmicos.

Desde el enfoque cuantitativo, se aplicó métodos estadísticos paramétricos, orientados al tratamiento de los resultados numéricos derivados de los ensayos de laboratorio y de las simulaciones realizadas mediante el método de los elementos finitos (FEM). Los datos fueron organizados en tablas y procesados mediante cálculos

de tendencia central (media, mediana), dispersión (desviación estándar, varianza) y correlación, con el propósito de identificar la consistencia y variabilidad de los parámetros geotécnicos. Asimismo, se analizaron los valores obtenidos del factor de seguridad y de las deformaciones máximas de los modelos, a fin de determinar el desempeño estructural de los taludes en las diferentes condiciones simuladas.

Por otro lado, desde el enfoque cualitativo o no paramétrico, se empleó el análisis descriptivo e interpretativo de las observaciones realizadas en campo. Este incluirá la evaluación de las características geomorfológicas, tipos de discontinuidades, estructuras geológicas y condiciones de drenaje. La información será procesada mediante la comparación entre observaciones empíricas, croquis estructurales y resultados del modelamiento numérico, permitiendo establecer relaciones entre la configuración física del terreno y la respuesta mecánica simulada.

Finalmente, se aplicó un análisis comparativo integral entre los resultados obtenidos de campo, laboratorio y simulación numérica. Este procedimiento permitió contrastar los valores calculados de estabilidad con los parámetros reales de los taludes operativos, validando el modelo geotécnico propuesto. De esta manera, los métodos de análisis seleccionados facilitarán la verificación de la hipótesis y el cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación, contribuyendo a la formulación de recomendaciones técnicas para la estabilidad de taludes en canteras de áridos de la región Moquegua.

3.6.3 Técnicas de procesamiento y presentación de datos

El procesamiento y la presentación de los datos en la presente investigación se realizaron de forma sistemática, con el objetivo de ordenar, analizar y representar la información obtenida en las etapas de campo, laboratorio y modelamiento numérico. Estas técnicas permitirán transformar los datos brutos en resultados claros, verificables y comparables, que sirvan de base para la interpretación del comportamiento geotécnico de los taludes operativos analizados.

El procesamiento de los datos se llevó a cabo mediante la organización, clasificación y codificación de la información recolectada, utilizando herramientas informáticas como hojas de cálculo (Microsoft Excel), software estadístico básico y

programas especializados de modelamiento geotécnico, como Phase2 del Rocscience. Los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio se ingresarán en matrices de datos, sobre las cuales se aplicarán operaciones estadísticas descriptivas —como promedios, desviaciones estándar, coeficientes de variación y análisis de correlación— con el fin de determinar la consistencia y representatividad de los parámetros geotécnicos.

Los resultados del modelamiento numérico fueron procesados mediante herramientas de análisis gráfico y comparativo, con el propósito de identificar la distribución de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y factores de seguridad en los taludes bajo diferentes condiciones geométricas y sísmicas. Este procesamiento permitió validar la respuesta del modelo frente a las condiciones reales observadas en campo, garantizando coherencia entre la simulación y el comportamiento físico de los taludes operativos.

En conjunto, estas técnicas de procesamiento y presentación de datos permitieron garantizar la claridad, precisión y objetividad de los resultados, facilitando su análisis, discusión e interpretación dentro del marco metodológico del estudio. De esta manera, se asegurará que la información generada sea útil para la validación de la hipótesis y el cumplimiento de los objetivos propuestos en el modelamiento geotécnico de los taludes operativos de la cantera de áridos en la región Moquegua.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de la caracterización geotécnica y materiales del talud

La caracterización geotécnica y de los materiales que conforman el talud operativo constituye una etapa fundamental para la evaluación de su estabilidad, ya que permite conocer el comportamiento físico y mecánico de los materiales bajo condiciones reales de explotación. En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de los trabajos de campo, muestreo y ensayos de laboratorio realizados en la cantera de áridos Solange AR, los cuales sirven como base para el análisis y modelamiento numérico posterior.

Los resultados de la caracterización incluyen la determinación de las propiedades físicas, como peso específico, contenido de humedad y granulometría, así como de los parámetros mecánicos relevantes, tales como cohesión, ángulo de fricción interna y módulo de deformación. Estos parámetros reflejan la heterogeneidad y el grado de variabilidad del material del talud, aspectos que adquieren especial importancia en un contexto de condiciones no axisimétricas, donde el comportamiento de los taludes operativos no puede asumirse uniforme ni simplificado.

4.1.1 Propiedades físicas y mecánicas de los materiales

El peso específico del material, con un valor de 16.67 kN/m³, representa la relación entre el peso total del suelo y su volumen, incluyendo la fase sólida y los vacíos. Este valor es característico de materiales granulares con presencia de finos, típicos de canteras de áridos, y tiene una influencia directa en las fuerzas actuantes sobre el talud, particularmente en la generación de esfuerzos normales y cortantes que condicionan su estabilidad global.

La cohesión, determinada en 0.039 ton/m², indica una resistencia aparente baja, propia de materiales poco cementados o con escasa unión entre partículas. Este comportamiento sugiere que la estabilidad del talud depende principalmente del componente friccional del material, lo que hace al sistema más sensible a cambios geométricos, vibraciones operativas o variaciones en las condiciones de humedad.

El ángulo de fricción interna, con un valor de 32.58°, refleja una capacidad resistente moderada del material frente al deslizamiento, asociada al rozamiento entre partículas. Este parámetro resulta fundamental en el análisis de estabilidad, ya que gobierna la resistencia al corte en condiciones de bajo aporte cohesivo, siendo coherente con el comportamiento esperado para materiales de origen aluvial o triturado presentes en canteras de áridos.

El coeficiente de Poisson, con un valor adimensional de 0.25, describe la relación entre la deformación lateral y la deformación axial del material bajo carga. Este valor es típico de suelos y materiales granulares parcialmente consolidados, y su correcta definición es esencial en el modelamiento mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM), ya que influye en la distribución de deformaciones y esfuerzos dentro del talud.

Para terminar, el módulo de elasticidad, estimado en 1500 MPa, representa la rigidez del material frente a la deformación elástica. Este valor indica un comportamiento relativamente rígido, compatible con materiales compactados o parcialmente cementados, y resulta determinante para la evaluación de desplazamientos y deformaciones en el modelamiento numérico. En conjunto, las propiedades físicas y mecánicas determinadas proporcionan una base geotécnica confiable para el análisis de estabilidad del talud operativo en condiciones no axisimétricas. La Tabla 02 hace un resumen de los valores obtenidos en laboratorio.

Tabla 02

Propiedades operativas del material de la cantera

Propiedades	Unidad	Valor
Peso especifico	kN/m^3	16.67
Cohesión	kN/m^2	0.3825
Angulo de fricción	grados	32.58
Coeficiente de Poison	-	0.25
Módulo de Elasticidad	MPa	1500

Nota: Datos obtenidos de ensayos de laboratorio certificado

4.1.2 Parámetros geotécnicos utilizados en el modelamiento FEM

El modelamiento geotécnico del talud operativo de la cantera de áridos Solange AR se realizó mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) utilizando el software Phase2 de Rocscience, el cual permite simular de manera detallada el comportamiento esfuerzo–deformación de los taludes operativos bajo condiciones reales de carga y geometría no axisimétrica. Para ello, fue fundamental la correcta selección y definición de los parámetros geotécnicos que describen el comportamiento constitutivo de los materiales analizados.

Los parámetros incorporados al modelo FEM fueron obtenidos a partir de los resultados de los ensayos de laboratorio, observaciones de campo y criterios técnicos de la literatura especializada. Se adoptó un modelo constitutivo elasto–plástico tipo Mohr–Coulomb, ampliamente utilizado en análisis de estabilidad de taludes, considerando el peso específico ($\gamma = 16.67$ kN/m³), la cohesión ($c = 0.039$ ton/m²) y el ángulo de fricción interna ($\varphi = 32.58°$) como parámetros resistentes principales. Estos valores permiten representar adecuadamente el comportamiento al corte del material, caracterizado por una baja cohesión y una resistencia dominada por el componente friccional.

Para definir la respuesta deformacional del material se incorporaron el módulo de elasticidad ($E = 1500$ MPa) y el coeficiente de Poisson ($\nu = 0.25$), parámetros esenciales para la correcta simulación de desplazamientos y redistribución de esfuerzos dentro del talud. La elección de estos valores resulta coherente con el tipo de material presente en la cantera y permite al software Phase2 calcular de manera realista las deformaciones elásticas previas a la plastificación de los taludes operativos.

En el modelo se consideraron condiciones de frontera adecuadas, restringiendo los desplazamientos en la base y en los laterales del dominio de análisis, de acuerdo con las recomendaciones técnicas del software, con el fin de evitar efectos de borde que alteren los resultados. La discretización del dominio se realizó mediante una malla de elementos finitos refinada en las zonas críticas del talud, permitiendo una mejor captura de los gradientes de esfuerzo y deformación.

Los parámetros geotécnicos definidos fueron utilizados para la evaluación del comportamiento global del talud y la identificación de zonas potenciales de falla, desplazamientos máximos y niveles de plastificación. De este modo, el uso del software Phase2, junto con una adecuada selección de parámetros geotécnicos, permitió desarrollar un análisis FEM consistente y representativo de las condiciones reales de estabilidad del talud operativo en la cantera de áridos Solange AR.

4.2 Resultados del análisis geométrico y condiciones no axisimétricas del talud operativo

El análisis geométrico del talud operativo de la cantera de áridos Solange AR evidenció una configuración irregular, producto de la dinámica propia del proceso de explotación, la secuencia de avance de los frentes de trabajo y las características naturales del terreno. Los resultados muestran que el talud no presenta una geometría uniforme ni simétrica, observándose variaciones significativas en la altura de bancos, ángulos de inclinación y longitudes de talud a lo largo del frente operativo, lo cual condiciona el comportamiento geotécnico global del sistema (Anexo 03).

Desde el punto de vista no axisimétrico, se identificaron cambios geométricos laterales que influyen directamente en la redistribución de esfuerzos y deformaciones dentro de los taludes operativos. Estas variaciones generan concentraciones locales de esfuerzos, especialmente en zonas de transición entre bancos y en sectores donde el talud presenta cambios abruptos de pendiente. Dichas condiciones no pueden ser representadas adecuadamente mediante modelos simplificados bidimensionales, justificando la necesidad de un enfoque FEM que considere la complejidad geométrica real del talud.

Los resultados del análisis geométrico permitieron definir con mayor precisión los perfiles críticos del talud, los cuales fueron incorporados al modelamiento numérico en Phase2. Se determinó que los sectores con mayor altura efectiva de talud y ángulos más pronunciados presentan una mayor susceptibilidad a deformaciones y procesos de inestabilidad, particularmente cuando se combinan con materiales de baja cohesión y resistencia friccional dominante.

El estudio evidenció que la geometría no axisimétrica influye en el desarrollo de mecanismos de falla no uniformes, con superficies potenciales de deslizamiento que no siguen trayectorias circulares simples, sino que se adaptan a la morfología real del talud. Este comportamiento resalta la importancia de considerar la geometría tridimensional implícita del sistema, aun cuando el análisis se realice en secciones representativas mediante FEM bidimensional.

En conjunto, los resultados del análisis geométrico y de las condiciones no axisimétricas del talud operativo demuestran que la estabilidad del talud está fuertemente condicionada por su configuración real de explotación. La incorporación de estas características en el modelamiento geotécnico permite obtener evaluaciones más realistas y confiables, constituyendo una base técnica sólida para la interpretación de los resultados de estabilidad y la formulación de recomendaciones operativas para la cantera de áridos Solange AR.

4.2.1 Configuración geométrica real del talud

La configuración geométrica real del talud operativo en la cantera de áridos Solange AR fue definida a partir del análisis de las cuatro progresivas estudiadas: 000+100, 000+140, 000+180 y 000+220, las cuales se ubican a una altitud aproximada de 1800 m.s.n.m. Estas secciones representan tramos críticos del frente de explotación y fueron seleccionadas por su relevancia operativa y por presentar condiciones geométricas representativas del talud único desarrollado durante la actividad extractiva.

Los resultados muestran que en las progresivas analizadas el talud presenta una altura aproximada de 50 metros, configurándose como un talud único continuo, sin bermas intermedias significativas. Esta condición geométrica incrementa la demanda geotécnica sobre el talud de cantera, ya que la altura total del talud genera mayores esfuerzos gravitacionales, los cuales influyen directamente en la distribución de tensiones y en la magnitud de las deformaciones desarrolladas a lo largo del perfil del talud.

En cuanto a la inclinación, se determinó un ángulo promedio de 33°, valor que refleja una configuración relativamente empinada para materiales de baja cohesión,

como los presentes en la cantera. Si bien este ángulo puede considerarse operativamente eficiente, desde el punto de vista geotécnico representa una condición que requiere una evaluación detallada de estabilidad, especialmente considerando la variabilidad lateral de la geometría y las propiedades del material.

La comparación entre las progresivas evidencia ligeras variaciones geométricas en la longitud del talud y en la morfología del pie y la cresta, producto de la topografía natural y del avance no uniforme de la explotación. Estas diferencias, aunque aparentemente menores, generan condiciones no axisimétricas que influyen en el comportamiento mecánico del talud y en la localización de zonas críticas de deformación y potencial falla.

La definición de la configuración geométrica real del talud permitió establecer modelos representativos para el análisis mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM), incorporando las condiciones reales de altura, inclinación y altitud. Esta aproximación garantiza que los resultados del modelamiento reflejen de manera más fiel el comportamiento geotécnico del talud operativo en las diferentes progresivas evaluadas.

4.2.2 Influencia de la geometría no axisimétrica en la estabilidad

La geometría no axisimétrica del talud operativo de la cantera de áridos Solange AR ejerce una influencia determinante en su comportamiento geotécnico y en los mecanismos de estabilidad desarrollados. A diferencia de taludes ideales con geometría uniforme, las variaciones laterales de altura, inclinación y morfología del talud generan una distribución no homogénea de esfuerzos y deformaciones, condicionando la respuesta mecánica de los taludes operativos ante las cargas gravitacionales.

Los resultados del análisis muestran que las irregularidades geométricas entre las progresivas evaluadas producen concentraciones locales de esfuerzos, principalmente en zonas de transición entre la cresta, el cuerpo del talud y el pie. Estas concentraciones incrementan la probabilidad de desarrollo de deformaciones diferenciales y de procesos de plastificación localizada, lo cual reduce el margen de estabilidad en sectores específicos del talud, aun cuando el comportamiento global pueda aparentar ser estable.

Desde una perspectiva geotécnica, la geometría no axisimétrica influye también en la forma y trayectoria de las superficies potenciales de falla, las cuales no responden a mecanismos circulares o planos simples. En el modelamiento FEM se observa que las zonas críticas tienden a adaptarse a la configuración real del talud, desarrollando mecanismos de falla compuestos o progresivos, especialmente en taludes únicos de gran altura y con ángulos relativamente empinados, como los analizados en este estudio.

La falta de simetría geométrica afecta la redistribución de esfuerzos en los taludes operativos, generando diferencias significativas en los desplazamientos laterales a lo largo del talud. Estos desplazamientos no uniformes pueden inducir procesos de relajación tensional y pérdida gradual de resistencia, incrementando la susceptibilidad a inestabilidades locales, particularmente en condiciones operativas continuas.

En conclusión, la consideración de la geometría no axisimétrica resulta fundamental para una evaluación realista de la estabilidad del talud operativo. El análisis desarrollado evidencia que los modelos simplificados tienden a subestimar los efectos adversos de las irregularidades geométricas, mientras que el enfoque FEM permite identificar zonas críticas y comprender de manera integral la influencia de la geometría real en la estabilidad del talud, aportando criterios técnicos más confiables para su gestión y control geotécnico.

4.3 Resultados del modelamiento geotécnico mediante el método de los elementos finitos (FEM)

La evaluación de la estabilidad del talud operativo mediante modelamiento geotécnico numérico constituye una herramienta fundamental para comprender el comportamiento geotécnico de los taludes operativos bajo condiciones reales de geometría y carga. En este contexto, el Método de los Elementos Finitos (FEM) permite analizar de manera integral la respuesta mecánica del talud, superando las limitaciones de los métodos de equilibrio límite al incorporar la deformabilidad del material y la redistribución progresiva de esfuerzos.

Los resultados obtenidos mediante el uso del software Phase2 de Rocscience proporcionan una base técnica sólida para la interpretación del estado actual del talud y la identificación de sectores potencialmente críticos. En esta sección se presentan y analizan los principales resultados del modelamiento geotécnico FEM, destacando su aporte a la comprensión del comportamiento del talud y a la toma de decisiones geotécnicas en la cantera de áridos Solange AR. La Tabla 03 presenta los resultados obtenidos en el análisis por el método de elementos finitos.

Tabla 03

Valores del análisis por el la metodología FEM

Progresiva	CONDICIÓN ACTUAL		NUEVO DISEÑO	
	Análisis Estático	Análisis Pseudo Estático	Análisis Estático	Análisis Pseudo Estático
000+100	1.076	0.776	1.305	1.077
000+140	1.164	0.763	1.351	1.099
000+180	1.107	0.798	1.337	1.085
000+220	1.013	0.741	1.294	1.070

Nota: Elaboración propia

4.3.1 Evaluación del factor de seguridad del talud operativo

La evaluación del factor de seguridad (FS) del talud operativo se realizó con el objetivo de determinar el nivel de estabilidad bajo las condiciones geométricas y geomecánicas actuales, así como bajo una propuesta de nuevo diseño, considerando tanto el análisis estático como el análisis pseudoestático. El factor de seguridad representa la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes, siendo un indicador fundamental del comportamiento estable o inestable del talud.

En la condición actual, los resultados del análisis estático muestran factores de seguridad comprendidos entre 1.013 y 1.164, lo que evidencia una estabilidad marginal del talud, especialmente en las progresivas 000+220 y 000+100, donde los valores se aproximan al límite mínimo aceptable. Esta situación indica que el talud se encuentra operando en condiciones críticas, con una reducida capacidad de tolerancia frente a cambios geométricos o cargas adicionales.

Cuando se incorpora el efecto sísmico mediante el análisis pseudoestático, los factores de seguridad disminuyen significativamente, alcanzando valores entre 0.741 y 0.798 en la condición actual. Estos resultados indican una condición de inestabilidad, evidenciando que la geometría actual del talud no es adecuada para soportar solicitaciones sísmicas, lo que incrementa el riesgo de deslizamientos o fallas progresivas durante eventos dinámicos.

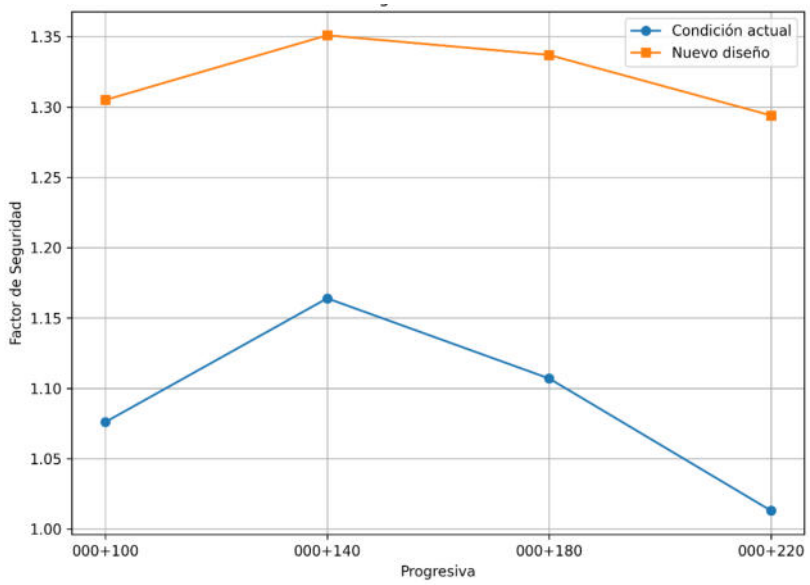
4.3.2 Factor de seguridad obtenido mediante FEM

El análisis del factor de seguridad mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) permitió una evaluación más realista del comportamiento del talud, al considerar la deformabilidad del material, la redistribución de esfuerzos y las condiciones no axisimétricas de la geometría. Los resultados obtenidos reflejan diferencias claras entre la condición actual y el nuevo diseño propuesto.

Bajo el nuevo diseño, los factores de seguridad en análisis estático aumentan de manera significativa, alcanzando valores entre 1.294 y 1.351 en todas las progresivas analizadas. Este incremento demuestra que la modificación geométrica mejora notablemente su estabilidad global, proporcionando un margen de seguridad adecuado frente a las cargas gravitacionales y condiciones operativas normales (Figura 05).

Figura 05

Factor de Seguridad – Análisis Estático



Nota: Elaboración propia

La Figura 05 correspondiente al análisis estático muestra la variación del factor de seguridad del talud operativo para las progresivas 000+100, 000+140, 000+180 y 000+220, comparando la condición actual con el nuevo diseño propuesto. En la condición actual, los factores de seguridad oscilan entre 1.013 y 1.164, evidenciando una estabilidad marginal del talud, particularmente en las progresivas 000+100 y 000+220, donde los valores se aproximan al límite mínimo aceptable para taludes operativos.

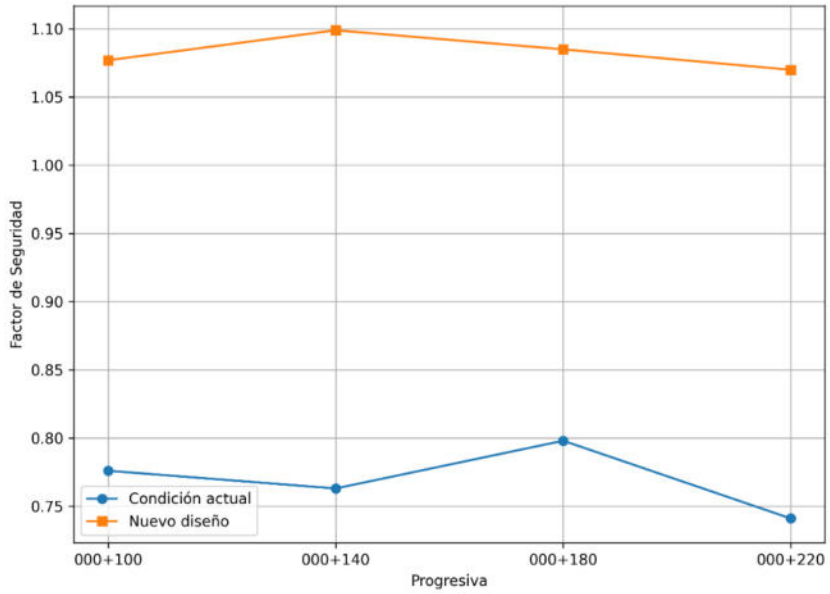
Por el contrario, el nuevo diseño presenta un incremento consistente del factor de seguridad en todas las progresivas analizadas, alcanzando valores comprendidos entre 1.294 y 1.351. Este comportamiento indica que la modificación geométrica del talud mejora significativamente su estabilidad frente a cargas gravitacionales, proporcionando un margen de seguridad adecuado de acuerdo con los criterios geotécnicos usualmente aceptados para explotaciones mineras a cielo abierto.

En términos geotécnicos, los resultados evidencian que el nuevo diseño reduce la susceptibilidad a fallas por deslizamiento en condiciones estáticas, optimizando el comportamiento mecánico del talud y contribuyendo a una operación más segura y confiable.

En el análisis pseudoestático del nuevo diseño, los factores de seguridad se sitúan entre 1.070 y 1.099, superando el umbral mínimo recomendado para condiciones sísmicas. Este comportamiento indica que el nuevo diseño no solo mejora la estabilidad estática, sino que también ofrece una respuesta geotécnica favorable frente a solicitaciones sísmicas, reduciendo la probabilidad de desarrollo de mecanismos de falla inducidos por aceleraciones sísmicas (Figura 06).

Figura 06

Factor de Seguridad – Análisis Pseudostático



Nota: Elaboración propia

La Figura 06 del análisis pseudoestático muestra el efecto de la incorporación de cargas sísmicas equivalentes sobre la estabilidad del talud. En la condición actual, los factores de seguridad presentan valores entre 0.741 y 0.798, todos menores que la unidad, lo que indica una condición de inestabilidad generalizada del talud frente a solicitaciones sísmicas. Este comportamiento refleja un riesgo geotécnico elevado durante eventos dinámicos, especialmente considerando la altura y configuración del talud único analizado.

En contraste, el nuevo diseño evidencia una mejora significativa en la respuesta sísmica del talud, con factores de seguridad comprendidos entre 1.070 y 1.099. Estos valores superan el umbral mínimo recomendado para análisis pseudoestáticos en taludes mineros, demostrando que la geometría propuesta proporciona una mayor capacidad resistente frente a las fuerzas sísmicas actuantes.

4.3.3 Comparación con criterios geotécnicos de estabilidad

La comparación de los factores de seguridad obtenidos mediante FEM con los criterios geotécnicos de estabilidad comúnmente aceptados permite validar técnicamente los resultados del análisis. En ingeniería de minas, se considera

generalmente que un talud es estable cuando presenta un FS ≥ 1.30 en condiciones estáticas y un FS ≥ 1.05 en condiciones pseudoestáticas, dependiendo del nivel de riesgo y la importancia de la obra.

De acuerdo con estos criterios, la condición actual del talud no cumple con los requisitos mínimos de estabilidad, especialmente en el análisis pseudoestático, donde todos los valores de FS son menores a la unidad. Incluso en condiciones estáticas, algunas progresivas presentan factores de seguridad cercanos al límite, lo que confirma una situación de estabilidad deficiente y un riesgo geotécnico elevado durante la operación.

Por el contrario, el nuevo diseño del talud cumple satisfactoriamente con los criterios geotécnicos de estabilidad, tanto en condiciones estáticas como pseudoestáticas, en todas las progresivas evaluadas. Esto demuestra que la propuesta geométrica optimiza el comportamiento mecánico del talud, incrementa el margen de seguridad y contribuye a una operación más segura y sostenible. En consecuencia, los resultados del modelamiento FEM respaldan técnicamente la implementación del nuevo diseño como una medida efectiva de mitigación del riesgo geotécnico en la cantera de áridos Solange AR.

4.4 Análisis de sensibilidad de los parámetros geotécnicos

El análisis de sensibilidad de los parámetros geotécnicos constituye una etapa clave en la evaluación de la estabilidad de taludes, ya que permite identificar la influencia relativa de las propiedades mecánicas del material sobre el comportamiento del talud y el factor de seguridad obtenido. Dada la variabilidad inherente de los materiales geológicos y las incertidumbres asociadas a la obtención de parámetros geotécnicos a partir de ensayos de campo y laboratorio, resulta fundamental analizar cómo pequeñas variaciones en dichos parámetros afectan la respuesta del sistema.

En el presente estudio, el análisis de sensibilidad se desarrolló mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) utilizando el software Phase2 de Rocscience, considerando variaciones controladas de los principales parámetros geotécnicos, tales como la cohesión, el ángulo de fricción interna, el módulo de elasticidad y el peso

específico. Este enfoque permitió evaluar su impacto sobre el factor de seguridad, la distribución de esfuerzos y los desplazamientos del talud operativo.

Los resultados del análisis de sensibilidad proporcionan una base técnica para identificar los parámetros más críticos en el control de la estabilidad del talud, así como para establecer rangos de diseño conservadores. De esta manera, esta sección contribuye a una mejor comprensión del comportamiento geotécnico del talud y fortalece la confiabilidad de las conclusiones y recomendaciones derivadas del modelamiento numérico.

4.4.1 Influencia de la cohesión y el ángulo de fricción

La cohesión y el ángulo de fricción interna constituyen los parámetros resistentes fundamentales en el análisis de estabilidad de taludes, especialmente en materiales granulares o poco cementados, como los presentes en la cantera de áridos Solange AR. El análisis de sensibilidad realizado mediante FEM permitió evaluar la influencia de variaciones razonables de estos parámetros sobre el comportamiento del talud y el factor de seguridad obtenido.

Los resultados evidencian que la cohesión, debido a su bajo valor inicial, presenta una influencia limitada pero significativa en el inicio de los mecanismos de falla. Pequeñas reducciones de la cohesión generan un aumento en las zonas de plastificación y una disminución del factor de seguridad, particularmente en sectores cercanos al pie del talud, donde se concentran los esfuerzos cortantes. Este comportamiento confirma que, aunque la cohesión no es el principal componente resistente del material, su pérdida progresiva puede favorecer la aparición de inestabilidades locales.

Por otro lado, el ángulo de fricción interna demostró ser el parámetro más influyente en la estabilidad global del talud. Variaciones moderadas en este parámetro producen cambios significativos en el factor de seguridad, evidenciando que la resistencia al corte del material está dominada por el componente friccional. Un incremento del ángulo de fricción mejora notablemente la estabilidad, mientras que su reducción conduce rápidamente a condiciones críticas, lo que resalta la necesidad de

una adecuada caracterización y control de este parámetro en el diseño y operación del talud.

4.4.2 Efecto de variaciones en las condiciones del material

El análisis de sensibilidad también consideró el efecto de variaciones en las condiciones del material, tales como cambios en el estado de compactación, grado de cementación y condiciones de humedad, las cuales pueden modificar las propiedades geomecánicas del talud durante la operación. Estas variaciones fueron representadas en el modelo FEM mediante ajustes en los parámetros elásticos y resistentes del material.

Los resultados indican que una degradación de las condiciones del material, asociada a una reducción del módulo de elasticidad y de los parámetros resistentes, conduce a un aumento de los desplazamientos y a una mayor extensión de las zonas plastificadas. Este comportamiento refleja una pérdida progresiva de rigidez y capacidad portante de los taludes operativos, incrementando la susceptibilidad del talud a deformaciones excesivas y fallas por deslizamiento.

Asimismo, se observó que mejoras en las condiciones del material, como un mayor grado de compactación o una mejor distribución granulométrica, contribuyen a una respuesta más favorable del talud, reduciendo desplazamientos y aumentando el factor de seguridad. Estos resultados resaltan la importancia del control operativo y del monitoreo geotécnico continuo, ya que las variaciones en las condiciones del material pueden modificar de manera significativa el comportamiento del talud y su estabilidad a lo largo del tiempo.

4.5 Discusión de resultados

La discusión de resultados tiene como finalidad interpretar y analizar de manera crítica los principales hallazgos obtenidos a partir del modelamiento geotécnico del talud operativo de la cantera de áridos Solange AR. En esta sección, los resultados del análisis mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) son evaluados no solo desde un punto de vista numérico, sino también considerando los fundamentos teóricos

de la geotecnia y su coherencia con el comportamiento esperado de los taludes operativos bajo condiciones reales de operación.

Esta discusión permite contrastar los factores de seguridad, los mecanismos de deformación y las zonas potenciales de falla identificadas en el modelamiento con los criterios geotécnicos establecidos en el marco teórico y en la literatura técnica especializada. De este modo, se evalúa la validez del enfoque metodológico adoptado y se analiza la influencia de la geometría no axisimétrica, las propiedades geomecánicas y las condiciones de carga sobre la estabilidad del talud.

La discusión de resultados integra los aspectos técnicos y operativos del estudio, destacando las implicancias geotécnicas para la gestión y diseño de taludes en la cantera. Esta sección constituye un vínculo entre los resultados obtenidos y las conclusiones del trabajo, proporcionando una base sólida para la formulación de recomendaciones orientadas a mejorar la seguridad y eficiencia de la operación minera.

4.5.1 Contraste de resultados con el marco teórico

Los resultados obtenidos en la presente investigación se encuentran en concordancia con los principios fundamentales del análisis de estabilidad de taludes establecidos en la mecánica de suelos y rocas. El marco teórico señala que la estabilidad de un talud depende de la interacción entre la geometría, las propiedades geomecánicas del material y las condiciones de carga actuantes. En este sentido, los factores de seguridad calculados mediante FEM reflejan de manera consistente el efecto combinado de estos factores en el comportamiento del talud operativo.

Desde el punto de vista teórico, taludes únicos de gran altura, como los analizados en este estudio (≈50 m), desarrollados en materiales de baja cohesión, presentan una estabilidad controlada principalmente por el componente friccional de la resistencia al corte. Esta condición queda claramente evidenciada en los resultados del análisis de sensibilidad, donde el ángulo de fricción interna mostró una influencia predominante sobre el factor de seguridad, mientras que la cohesión tuvo un efecto secundario, tal como lo establece el criterio de resistencia de Mohr–Coulomb.

Asimismo, el marco teórico establece que la incorporación de fuerzas sísmicas mediante un análisis pseudoestático genera un incremento de las fuerzas desestabilizantes, reduciendo el margen de estabilidad del talud. Los resultados obtenidos confirman este comportamiento, ya que en la condición actual los factores de seguridad disminuyen a valores menores que la unidad, indicando una condición inestable, lo cual es consistente con la teoría de equilibrio de fuerzas bajo cargas dinámicas equivalentes.

Por otro lado, la teoría del análisis esfuerzo–deformación indica que la estabilidad de un talud no debe evaluarse únicamente en términos de equilibrio límite, sino también considerando la redistribución progresiva de esfuerzos y deformaciones. En este contexto, el uso del Método de los Elementos Finitos permitió identificar zonas de plastificación y concentraciones de esfuerzos, confirmando que los mecanismos de falla se desarrollan de manera progresiva y controlada por la geometría no axisimétrica del talud, tal como lo plantea el marco conceptual del modelamiento numérico geotécnico.

4.5.2 Comparación con estudios previos y literatura técnica

La comparación de los resultados obtenidos con estudios previos realizados en canteras y explotaciones mineras a cielo abierto muestra una clara coherencia con la literatura técnica especializada. Diversos autores indican que factores de seguridad comprendidos entre 1.0 y 1.2 en condiciones estáticas representan estados de estabilidad marginal, especialmente en taludes operativos sujetos a modificaciones continuas, lo cual coincide con los resultados obtenidos para la condición actual del talud en la cantera Solange AR.

La geometría irregular del talud operativo de la cantera, característica de las operaciones de extracción de áridos, impide la aplicación directa de formulaciones axisimétricas convencionales. No obstante, los desarrollos de Oliveira et al. (2012) y Patel et al. (2025) demuestran que las soluciones fundamentales no axisimétricas constituyen una referencia teórica sólida para validar el comportamiento mecánico en condiciones de simetría rotacional, y que su extensión a geometrías más complejas mediante el FEM resulta metodológicamente justificada. En la misma línea, Prassetyo

y Gutierrez (2018) evidencian que las condiciones no axisimétricas y de deformación plana producen distribuciones de presión de poros diferenciadas que inciden directamente sobre la estabilidad, lo cual es consistente con las variaciones en los factores de seguridad observadas en los distintos perfiles analizados del talud de la cantera Solange AR.

Por su parte, Durán et al. (2022) destacan que los dominios semi-infinitos propios de excavaciones a cielo abierto representan un desafío numérico que el FEM convencional maneja mediante la definición de fronteras artificiales, siendo fundamental la correcta parametrización de los ángulos de talud y de banco para obtener campos de esfuerzos representativos, criterio que fue considerado en la definición de la geometría del modelo empleado en este estudio.

Los factores de seguridad obtenidos en el modelamiento FEM del talud operativo de la cantera Solange AR presentan coherencia con los rangos reportados en la literatura técnica para taludes en materiales cohesivo-friccionales. En este sentido, el trabajo de Korada y Kumar (2023) respalda la confiabilidad de los resultados numéricos obtenidos, dado que demostraron que los criterios de fluencia que consideran la dependencia de la cohesión y la fricción interna respecto al nivel de tensión permiten alcanzar soluciones de alta precisión en problemas de estabilidad geotécnica mediante análisis límite de elementos finitos con cota inferior y superior.

La convergencia entre ambos enfoques refuerza la validez del modelo FEM adoptado en el presente estudio, particularmente en la estimación del factor de seguridad y en la identificación de las zonas con mayor concentración de deformaciones plásticas.

Estudios previos basados en el uso de análisis pseudoestáticos señalan que, en zonas con actividad sísmica moderada, los factores de seguridad pueden reducirse entre un 20 % y 40 % respecto al análisis estático. Este comportamiento se observa claramente en los resultados de esta investigación, donde la inclusión del efecto sísmico genera una reducción significativa del factor de seguridad, validando la pertinencia de considerar escenarios sísmicos en el diseño geotécnico del talud.

La literatura técnica recomienda valores mínimos de FS ≥ 1.30 en condiciones estáticas y FS ≥ 1.05 en condiciones pseudoestáticas para taludes mineros, dependiendo del nivel de riesgo y de la importancia de la operación. Los resultados del nuevo diseño propuesto cumplen con estos rangos recomendados, lo que demuestra que las modificaciones geométricas planteadas se encuentran alineadas con las buenas prácticas internacionales de diseño geotécnico.

Finalmente, investigaciones recientes destacan que el uso de herramientas FEM, como Phase2, permite una mejor comprensión del comportamiento real de los taludes, al considerar la deformabilidad del material y las condiciones geométricas complejas. Los resultados de este estudio refuerzan estas conclusiones, evidenciando que el modelamiento numérico avanzado proporciona evaluaciones más confiables que los métodos tradicionales, especialmente en escenarios no axisimétricos.

4.5.3 Implicancias geotécnicas para la operación de la cantera

Los resultados obtenidos tienen implicancias geotécnicas directas y relevantes para la gestión operativa de la cantera de áridos Solange AR. La identificación de factores de seguridad bajos en la condición actual, particularmente bajo análisis pseudoestático, evidencia la existencia de un riesgo geotécnico significativo que podría comprometer la seguridad del personal, los equipos y la continuidad de la operación.

La implementación del nuevo diseño del talud, respaldada por factores de seguridad adecuados en todas las progresivas analizadas, representa una mejora sustancial en términos de estabilidad global. Desde el punto de vista operativo, esta condición permite trabajar con un mayor margen de seguridad, reduciendo la probabilidad de fallas repentinas y facilitando una planificación más eficiente de las actividades extractivas.

Los resultados destacan la importancia de establecer un sistema de control y monitoreo geotécnico continuo, especialmente en sectores críticos del talud. El seguimiento de deformaciones, cambios geométricos y condiciones del material permitirá validar en campo el comportamiento previsto por el modelo FEM y realizar ajustes oportunos en el diseño y operación.

El estudio demuestra que la aplicación sistemática del modelamiento geotécnico FEM constituye una herramienta estratégica para la toma de decisiones en la cantera. Su uso permite anticipar escenarios desfavorables, optimizar el diseño de taludes y gestionar de manera proactiva el riesgo geotécnico, contribuyendo a una operación más segura, sostenible y alineada con los estándares modernos de la ingeniería de minas.

4.6 Implicancias prácticas del modelamiento FEM en la estabilidad de taludes operativos

El uso del modelamiento geotécnico mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) tiene implicancias prácticas directas y significativas en la evaluación y gestión de la estabilidad de taludes operativos en minería a cielo abierto. A diferencia de los métodos tradicionales de equilibrio límite, el enfoque FEM permite analizar el comportamiento real de los taludes operativos considerando la deformabilidad del material, la redistribución progresiva de esfuerzos y las condiciones geométricas complejas propias de taludes en operación continua.

Una de las principales implicancias prácticas del modelamiento FEM es la identificación temprana de zonas críticas de inestabilidad, tales como sectores con altas concentraciones de esfuerzos, zonas plastificadas o áreas con desplazamientos excesivos. Esta información resulta clave para la toma de decisiones operativas, ya que permite priorizar acciones de control geotécnico, modificar secuencias de minado y ajustar la geometría del talud antes de que se desarrollen mecanismos de falla.

El modelamiento FEM constituye una herramienta fundamental para la optimización del diseño de taludes, ya que permite evaluar diferentes escenarios geométricos y condiciones de carga, tanto estáticas como pseudoestáticas. En el caso de la cantera de áridos Solange AR, el uso de FEM permitió demostrar que una modificación en la configuración geométrica del talud incrementa de manera significativa el factor de seguridad, validando técnicamente la implementación de un nuevo diseño más seguro y eficiente.

Desde el punto de vista de la gestión del riesgo geotécnico, el FEM facilita la evaluación del comportamiento del talud frente a eventos adversos, como sismos o

cambios en las condiciones del material. Esto contribuye a establecer criterios de diseño más conservadores, definir planes de contingencia y mejorar la seguridad del personal y de los equipos durante la operación.

4.7 Validación de la Hipótesis

4.7.1 Validez de la hipótesis general

La hipótesis general planteada en la presente investigación se considera válida y comprobada, ya que los resultados obtenidos mediante el modelamiento geotécnico con el Método de los Elementos Finitos (FEM) en condiciones no axisimétricas demostraron una mejora significativa en la estabilidad de los taludes operativos de la cantera de áridos en la región Moquegua. Los factores de seguridad obtenidos para el nuevo diseño superan de manera consistente a los correspondientes a la condición actual, tanto en análisis estático como pseudoestático, evidenciando una optimización efectiva del diseño del talud.

El modelamiento FEM permitió evaluar de manera integral el comportamiento esfuerzo–deformación del talud, identificando zonas potenciales de falla y reduciendo la incertidumbre asociada a los análisis simplificados. En consecuencia, se confirma que la aplicación de esta metodología contribuye directamente a la reducción del riesgo geotécnico, fortaleciendo la seguridad operativa y la confiabilidad del diseño del talud, tal como se plantea en la hipótesis general.

4.7.2 Validez de la primera hipótesis específica

La primera hipótesis específica se considera válida, dado que la adecuada caracterización de las propiedades geotécnicas y geométricas de los taludes operativos influyó de manera determinante en la confiabilidad de los resultados del modelamiento numérico. Los parámetros físicos y mecánicos obtenidos a partir de ensayos y observaciones de campo constituyeron la base para la definición del modelo constitutivo utilizado en el análisis FEM.

Los resultados del análisis de sensibilidad demostraron que variaciones en parámetros clave, como la cohesión y el ángulo de fricción interna, generan cambios significativos en el factor de seguridad y en la distribución de esfuerzos y

deformaciones. Esto confirma que una caracterización geotécnica adecuada es esencial para obtener resultados representativos del comportamiento real del talud, validando así la primera hipótesis específica.

4.7.3 Validez de la segunda hipótesis específica

La segunda hipótesis específica también se considera válida y comprobada, ya que el modelamiento geotécnico en condiciones no axisimétricas permitió identificar con mayor precisión las zonas críticas de esfuerzo y deformación a lo largo del talud operativo. El uso del FEM evidenció mecanismos de falla progresivos y distribuciones no uniformes de deformación, las cuales no pueden ser adecuadamente representadas mediante métodos tradicionales de equilibrio límite.

Los factores de seguridad obtenidos mediante FEM mostraron diferencias significativas respecto a los valores típicos esperados de análisis simplificados, especialmente bajo condiciones pseudoestáticas, proporcionando una representación más realista del comportamiento del talud. Estos resultados confirman que el enfoque FEM ofrece una herramienta más precisa y confiable para la evaluación de la estabilidad de taludes operativos, validando plenamente la segunda hipótesis específica planteada en la investigación.

4.7.4 Aplicación de t student

Planteamiento del contraste de hipótesis

Para la validación estadística se formularon las siguientes hipótesis:

- Hipótesis nula (H_0): No existe diferencia significativa entre los factores de seguridad de la condición actual y del nuevo diseño del talud operativo.
- Hipótesis alternativa (H_1): Existe una diferencia significativa entre los factores de seguridad de la condición actual y del nuevo diseño del talud operativo, atribuible a la aplicación del modelamiento geotécnico FEM.

El nivel de significancia adoptado fue $\alpha = 0.05$, valor comúnmente aceptado en estudios geotécnicos aplicados a la ingeniería de minas.

Selección del estadístico t

Dado que los factores de seguridad se obtuvieron para las mismas progresivas (000+100, 000+140, 000+180 y 000+220) bajo dos condiciones distintas, se aplicó una prueba ***t*** para muestras pareadas, lo cual permite evaluar la diferencia media entre ambos conjuntos de datos. El estadístico *t* se calculó mediante la Ecuación 01.

$$t = \frac{\bar{d}}{s/\sqrt{n}} \tag{01}$$

Resultados e interpretación

El valor calculado del estadístico t fue comparado con el valor crítico de t obtenido de la tabla de Student para $n-1$, grados de libertad. Alternativamente, se evaluó el valor p asociado al estadístico calculado. Los resultados mostraron que el valor p fue menor que 0.05, lo que indica que las diferencias observadas en los factores de seguridad entre la condición actual y el nuevo diseño son estadísticamente significativas. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1). Para ello realizaremos la media de las diferencias para los resultados mostrados en la Tabla 04

Tabla 04

Valores de incremento en el factor de seguridad

Progresiva	Análisis Estático			Análisis Pseudo Estático		
	Condición Actual	Nuevo Diseño	Diferencia	Condición Actual	Nuevo Diseño	Diferencia
000+100	1.076	1.305	0.229	0.776	1.077	0.301
000+140	1.164	1.351	0.187	0.763	1.099	0.336
000+180	1.107	1.337	0.230	0.798	1.085	0.287
000+220	1.013	1.294	0.281	0.741	1.070	0.329
Media			0.232			0.313

Nota: Elaboración propia

La desviación estándar de las diferencias resulta la Tabla 05 que muestra el promedio y la suma de los valores necesarios para obtener la varianza muestral para condicione estáticas.

Tabla 05

Valores de incremento en el factor de seguridadcondiciones estaticas

Progresiva	Diferencia estático	Desviación estándar	Desviación estandar^2
000+100	0.229	0.003	0.00001
000+140	0.187	0.045	0.00200
000+180	0.230	0.002	0.00000
000+220	0.281	-0.049	0.00243
PROMEDIO	0.2318	SUMA	0.00243

Nota: Elaboración propia

La desviación estándar de las diferencias resulta la Tabla 06 que muestra el promedio y la suma de los valores necesarios para obtener la varianza muestral para condicione pseudoestáticas.

Tabla 06

Valores de incremento en el factor de seguridadcondiciones pseudoestaticas

Progresiva	Diferencia pseudoestático	Desviación estándar	Desviación estandar^2
000+100	0.301	0.012	0.00015
000+140	0.336	-0.023	0.00052
000+180	0.287	0.026	0.00069
000+220	0.329	-0.016	0.00025
PROMEDIO	0.3133	Suma	0.00160

Nota: Elaboración propia

La varianza de la muestra (s^2) es una medida estadística usada para poder visualizar la dispersión de los datos dentro de un conjunto de datos muestral, calculando el promedio de las diferencias al cuadrado entre cada dato y la media de la muestra, y dividiendo por (n-1) en lugar de (N) para obtener un estimador no sesgado de la varianza poblacional (Ecuación 02).

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (02)$$

Aplicando la Ecuación 02 para obtener la varianza muestral obtenemos entonces para condiciones estáticas:

$$s^2 = \frac{0.02845}{4-1} = 0.0008045$$

$$s_{estática} = 0.02845$$

$$s_{pseudoestática} = 0.02313$$

El valor de prueba que se utiliza para determinar si existe una diferencia significativa entre las medias de dos grupos, y es fundamental en la prueba de hipótesis (Ecuación 01).

$$t_{estático} = \frac{0.2318}{0.02845/2} = 16.29$$

$$t_{pseudoestático} = \frac{0.3133}{0.02313/2} = 27.08$$

La cantidad de información independiente en un conjunto de datos o movimientos de un sistema se denomina Grado de Libertad, es el número de datos que pueden variar libremente (n-1) al estimar un parámetro, para esta validación su valor será 3. Para un nivel de confianza del 95% usando la Tabla t, obtendremos un valor de 3.182, entonces ese valor será nuestro $t_{crítico}$ y para un $t_{calculado}$ dio el valor de 16.23 Y 27.08 para condiciones estáticas y pseudoestáticas respectivamente. La diferencia entre el diseño inicial y el diseño propuesto es estadísticamente importante.

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

Por tanto, las hipótesis quedan validadas, Hipótesis general, la modelación numérica y la correcta aplicación de parámetros geotécnicos influyen positivamente en la estabilidad estática y pseudoestática en condiciones axisimétricas de la cantera. Ya la Hipótesis específica 1, la caracterización adecuada de las propiedades geotécnicas y geométricas de los taludes operativos si influye significativamente en la confiabilidad de los resultados del modelamiento numérico. La Hipótesis específica 2, el modelamiento geotécnico bajo condiciones no axisimétricas si permite identificar con mayor precisión las zonas críticas de esfuerzo y deformación en taludes operativos, generando factores de seguridad que difieren significativamente de los obtenidos mediante métodos tradicionales de equilibrio límite (Tabla 07 y Tabla 08), proporcionando así una representación más realista del comportamiento del talud. En el Anexo 04 y 05 se muestran los resultados obtenidos para las progresivas utilizando la metodología de equilibrio limite.

Tabla 07
Comparacion de los resultado aplicando FEM y Equilibrio Límite para condiciones estáticas

Progresiva	CONDICIÓN ACTUAL		NUEVO DISEÑO	
	FEM	Equilibrio Límite	FEM	Equilibrio Límite
000+100	1.076	1.220	1.305	1.317
000+140	1.164	1.259	1.351	1.362
000+180	1.107	1.252	1.337	1.349
000+220	1.013	1.195	1.294	1.304

Nota: Elaboración propia

La Tabla 08, al igual que la Tabla 07, muestra una comparación de resultados obtenidos partir de la simulación con la metodología FEM usando el Phase2 y la metodología de Equilibrio Limite aplicando el Slide, en este caso específicamente para condiciones pseudoestáticas.

Tabla 08
Comparacion de los resultado aplicando FEM y Equilibrio Límite para condiciones pseudoestáticas

Progresiva	CONDICIÓN ACTUAL		NUEVO DISEÑO	
	FEM	Equilibrio Límite	FEM	Equilibrio Límite
000+100	0.776	0.811	1.077	1.054
000+140	0.763	0.807	1.099	1.062
000+180	0.798	0.881	1.085	1.059
000+220	0.741	0.859	1.070	1.060

Nota: Elaboración propia

Comentarios finales

La validación estadística mediante la prueba t de Student confirmó que las diferencias entre los factores de seguridad obtenidos por FEM y los calculados mediante métodos de equilibrio límite son estadísticamente significativas, lo que respalda la hipótesis de que el modelamiento numérico bajo condiciones no axisimétricas proporciona una representación más realista y confiable del comportamiento geotécnico del talud.

Se comprobó la validez de la hipótesis general y de las hipótesis específicas planteadas en la investigación, demostrando que la aplicación del modelamiento geotécnico FEM contribuye efectivamente a mejorar la estabilidad de los taludes operativos, optimizar su diseño y reducir los riesgos geotécnicos asociados a la explotación de la cantera.

Desde el punto de vista operativo, el uso del FEM constituye una herramienta técnica eficaz para la toma de decisiones en la gestión geotécnica de la cantera, permitiendo definir geometrías de talud más seguras, identificar sectores críticos y planificar medidas preventivas de estabilización, contribuyendo así a la seguridad del personal, la continuidad operativa y la sostenibilidad de la explotación de áridos en la región Moquegua.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

El modelamiento geotécnico mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM), aplicado bajo condiciones no axisimétricas, permitió representar de manera más realista el comportamiento mecánico de los taludes operativos de la cantera de áridos Solange AR, al considerar la geometría irregular, la heterogeneidad del material y las condiciones reales de contorno. Esta aproximación superó las limitaciones de los métodos tradicionales bidimensionales, proporcionando una evaluación más precisa de la estabilidad global del talud.

La caracterización geotécnica adecuada de los taludes operativos influyó de manera significativa en la confiabilidad de los resultados del modelamiento numérico, evidenciándose que parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso específico y los módulos de deformación son determinantes en la distribución de esfuerzos, deformaciones y en el valor del factor de seguridad. Esto confirma que una correcta definición de las propiedades geomecánicas es fundamental para obtener resultados consistentes en el análisis FEM.

Los resultados del análisis de estabilidad obtenidos mediante FEM mostraron diferencias significativas respecto a los valores calculados mediante métodos tradicionales de equilibrio límite, tanto en condiciones estáticas como pseudoestáticas. En particular, el FEM permitió identificar zonas críticas de concentración de esfuerzos y deformaciones que no son detectadas por los enfoques convencionales, ofreciendo una interpretación más detallada de los mecanismos potenciales de falla.

El análisis de sensibilidad de los parámetros geotécnicos demostró que pequeñas variaciones en la cohesión y en el ángulo de fricción interna generan cambios relevantes en el factor de seguridad del talud, siendo el ángulo de fricción el parámetro con mayor influencia en la estabilidad global. Asimismo, las variaciones en las condiciones del material evidenciaron la importancia de considerar la heterogeneidad de los taludes operativos en los modelos numéricos.

La incorporación de condiciones pseudoestáticas en el modelamiento FEM evidenció una reducción del factor de seguridad respecto al análisis estático, reflejando el efecto desfavorable de la acción sísmica sobre la estabilidad del talud. Este resultado es coherente con el contexto sísmico de la región de acuerdo con la literatura nacional por el Instituto Geofísico del Perú, y resalta la necesidad de incluir cargas sísmicas en el diseño y evaluación de taludes operativos.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

Implementar de manera permanente el modelamiento geotécnico mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) como herramienta principal para el análisis, diseño y control de los taludes operativos de la cantera de áridos Solange AR, especialmente en zonas con geometría irregular o condiciones no axisimétricas.

Aplicar el nuevo diseño geométrico del talud propuesto en esta investigación, dado que cumple con los criterios geotécnicos de estabilidad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, incrementando el factor de seguridad y reduciendo significativamente el riesgo de inestabilidad durante la operación.

Actualizar periódicamente la caracterización geotécnica del talud, mediante ensayos de campo y laboratorio, con el fin de recalibrar los parámetros geotécnicos utilizados en el modelamiento FEM y garantizar que los análisis representen adecuadamente las condiciones reales del talud.

Establecer un programa de monitoreo y control geotécnico continuo, que permita identificar oportunamente deformaciones, cambios geométricos o condiciones desfavorables del material, validando los resultados del modelamiento numérico y fortaleciendo la seguridad y sostenibilidad de la operación minera.

REFERENCIAS

Asadi, R. y Khoshghalb, A. (2024). *Iteratively coupled elastoplastic simulation of pumping-induced land deformation using a finite volume-finite element method*. Computers and Geotechnics, Volume 176, 106726, ISSN 0266-352X. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106726.

Asencios, A. (2020). *Influencia del arreglo estructural de las discontinuidades en la estabilidad global de taludes a escala global de tajos abiertos mediante la metodología de elementos finitos (FEM).* Pontificia Universidad Católica del Perú. http://hdl.handle.net/20.500.12404/18318

Bathe, K. (1996). Finite Element Procedures. New Jersey: Prentice-Hall Inc.,

Bhandari, T., Hamad, F., Moormann, C., Sharma, K.G., Westrich, B. (2016). *Numerical modelling of seismic slope failure using MPM*. Computers and Geotechnics,Volume 75, Pages 126-134, ISSN 0266-352X. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.01.017

Carbonell, J., Monforte, L., Ciantia, M., Arroyo, M. y Gens A. (2022). *Geotechnical particle finite element method for modeling of soil-structure interaction under large deformation conditions*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 14, Issue 3, Pages 967-983, ISSN 1674-7755, https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.12.006.

Castro, A. (2022). *Comparación de métodos analítico y numéricos (FEM) aplicado al diseño de losas de cimentación sobre un terreno tratado con inclusiones rígidas*. Pontificia Universidad Católica del Perú. http://hdl.handle.net/20.500.12404/22194

Cook, R., Malkus, D., Plesha, M., Witt, R. (2001). *Concepts and Apllications of Finite Element Analysis*. 4th Ed. John Willeys & Sons Inc.

Cuentas, M. (2024). *Análisis de estabilidad de taludes en el macizo rocoso Quellorco mediante el método de elementos finitos, equilibrio limite, probabilístico y propuesta de estabilización*. Universidad Nacional Del Altiplano. Puno, Perú.

Durán, M., Godoy, E., Catafau, E. R. y Toledo, P. A. (2022). *Open-pit slope design using a DtN-FEM: Parameter space exploration.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 149, 104950, ISSN 1365-1609. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104950

González-Cao, J., Varas, F., Bastante, F.G. y Alejano, L.R. (2013). *Ground reaction curves for circular excavations in non-homogeneous, axisymmetric strain-softening rock masses*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 5, Issue 6, Pages 431-442, ISSN 1674-7755. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.08.001.

Korada, V. y Kumar, J. (2023). *Finite elements limit analysis formulation using the power type yield criterion for plane strain and axisymmetric stability problems*. Computers and Geotechnics, Volume 162, 105667. ISSN 0266-352X. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105667

Liu, C., Sun, Q. y Yang, Y. (2017) *Multi-scale Modelling of Granular Pile Collapse by Using Material Point Method and Discrete Element Method*. Procedia Engineering. Volume 175, Pages 29-35, ISSN 1877-7058. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.009.

Liu, S., Su, Z., Li, M., Shao, L. (2020). *Slope stability analysis using elastic finite element stress fields*. Engineering Geology, Volume 273, 105673, ISSN 0013-7952. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105673

Mackerle, J. (2005). *Finite elements in the analysis of pressure vessels and piping, an addendum: A bibliography (2001–2004).* International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 82, Issue 7, Pages 571-592, ISSN 0308-0161. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2004.12.004

Moreno, R. (2022). *Evaluación de riesgos en la estabilidad de taludes de la Costa Verde*. Pontificia Universidad Católica del Perú y la temporalidad.

Oliveira, M., Dumont, N. y Selvadurai, A. (2012). *Boundary element formulation of axisymmetric problems for an elastic halfspace*. Engineering Analysis with

Boundary Elements, Volume 36, Issue 10, Pages 1478-1492, ISSN 0955-7997, https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2012.03.015

Patel, K., Barthel, E. y Ciccotti, M. (2025). *Indentation of axisymmetric rigid punch: Model implementation by a Python Algorithm*. Engineering Analysis with Boundary Elements. Volume 177, 106259, ISSN 0955-7997. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2025.106259

Prahatheswaran V., Ashika P. (2020). *An experimental and analytical study of slope stability by soil nailing*. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). e-ISSN: 2395-0056

Prassetyo, S. y Gutierrez M. (2018). *Axisymmetric alternating direction explicit scheme for efficient coupled simulation of hydro-mechanical interaction in geotechnical engineering—Application to circular footing and deep tunnel in saturated ground.* Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 10, Issue 2, Pages 259-279, ISSN 1674-7755. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.09.010.

Rezaei, M., Mousavi, S. (2024). *Slope stability analysis of an open pit mine with considering the weathering agent: Field, laboratory and numerical studies*. Engineering Geology, Volume 333, 107503, ISSN 0013-7952. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107503.

Ribeiro, W. (2005). *Aplicações da análise limite numérica a problemas de Estabilidade Axissimétricos em geotecnia*. Universidade Federal de Ouro Preto – Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. https://www.repositorio.ufop.br/items/d4b26e9c-d628-42f7-9b76-3058dab6d834

Soto C., y Cardenas L. (2025). *Análisis de la Amplificación Topográfica y de los Espectros de Aceleración en Función de la Frecuencia y Periodo mediante la aplicación del Método de Elementos Finitos (FEM) en un Modelo 3D Calibrado de la Región de Mayor Respuesta Sísmica en el Cerro Antenas Morro Solar, Chorrillos*.

Souza, R. (2003). *Método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor*. Notas de Aula - Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia, Universidade Federal do Pará, Belém.

Tran, V. y Geniaut, S. (2012). *Development and industrial applications of X-FEM axisymmetric model for fracture mechanics*. Engineering Fracture Mechanics, Volume 82, Pages 135-157, ISSN 0013-7944, https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.12.002.

Troncone, A., Conte, E., Donato A. (2016). *Three-dimensional Finite Element Analysis of the Senise Landslide*. Procedia Engineering, Volume 158, Pages 212-217, ISSN 1877-7058. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.431

Turpo P. (2018). *Determinación de los parámetros geométricos del talud, para garantizar la estabilidad del tajo superficial del área de explotación en la unidad minera "Moises Randy 2010".* Universidad Nacional de Moquegua.

Valderrama, Ch. (2025). *Análisis de la clasificación del macizo rocoso del talud (SMR) y método de elementos finitos (FEM) para la optimización de estabilidad del macizo rocoso en la cantera Solange Ar*. Universidad Nacional de Moquegua.

Vardon, P., Wang, B., Hicks, M. (2017). *Slope failure simulations with MPM*. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, Volume 29, Issue 3, Pages 445-451, ISSN 1001-6058. https://doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60755-2

Wang, C., Hawlader, B., Islam, N., Soga, K. (2019). *Implementation of a large deformation finite element modelling technique for seismic slope stability analyses*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 127, 105824, ISSN 0267-7261. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105824

Zienkievicz, O. y Taylor, R. (2000). *The finit element method*. 5th Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.

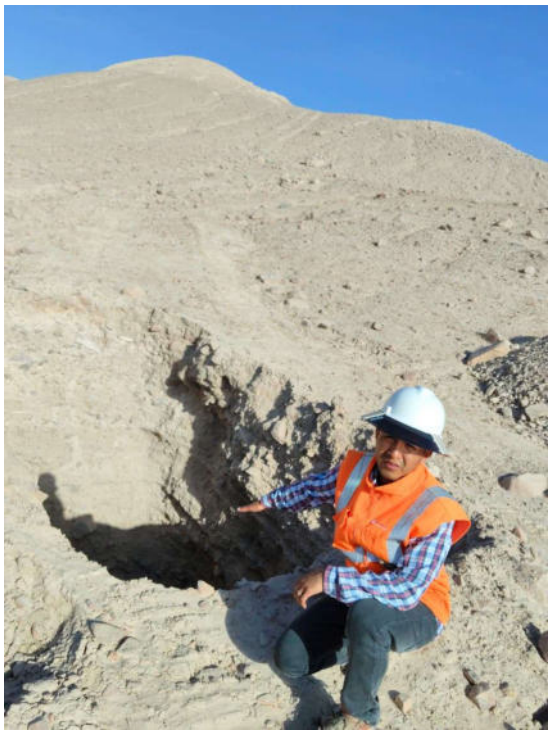
Zorzal, C. (2019). *Análise dinâmica via FEM das vibrações induzidas pelo desmonte de rochas*. https://www.repositorio.ufop.br/server/api/core/bitstreams/2fd79abe-4eb3-424b-bfba-7acf3b58c686/content

ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

	INTERROGANTES	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
GENERAL	¿De qué manera el modelamiento geotécnico mediante el método de los elementos finitos en condiciones no axisimétricas contribuye a mejorar la estabilidad de los taludes operativos en una cantera de áridos en la región Moquegua?	Mejorar la estabilidad de los taludes operativos en condiciones no axisimétricas mediante el modelamiento geotécnico utilizando el método de los elementos finitos en una cantera de áridos de la región Moquegua, con el fin de proponer soluciones técnicas que mejoren la seguridad y sostenibilidad de las operaciones mineras.	La aplicación del modelamiento geotécnico mediante el método de los elementos finitos en condiciones no axisimétricas permite mejorar la estabilidad de los taludes operativos en una cantera de áridos de la región Moquegua, contribuyendo a la optimización de su diseño y a la reducción de riesgos geotécnicos.	Modelamiento geotécnico mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM)	El presente estudio corresponde a una investigación aplicada, ya que busca resolver un problema práctico relacionado con la estabilidad de taludes operativos en una cantera de áridos, utilizando herramientas científicas y tecnológicas para optimizar el diseño geotécnico.
ESPECIFICA	¿Cuáles son las características geotécnicas y geométricas de los taludes operativos que determinan el comportamiento de los taludes operativos en la cantera de áridos de la región Moquegua?	Definir las propiedades geotécnicas de los taludes operativos que conforma los taludes operativos de la cantera de áridos en la región Moquegua.	La caracterización adecuada de las propiedades geotécnicas y geométricas de los taludes operativos influye significativamente en la confiabilidad de los resultados del modelamiento numérico.		El diseño de la presente investigación es de tipo experimental, debido a que no se manipulan directamente las variables del entorno físico real, sino que se analizan y simulan sus comportamientos a partir de datos observados y parámetros obtenidos en campo y laboratorio.
	¿Cómo afecta la consideración de condiciones no axisimétricas en el modelamiento numérico de la estabilidad de taludes mediante el FEM, y qué variaciones se observan en los factores de seguridad y deformaciones al comparar estos resultados con los obtenidos mediante los métodos tradicionales de equilibrio límite?	Evaluar mediante modelos numéricos el comportamiento del talud en condiciones no axisimétricas, considerando las características del área de estudio y las cargas estáticas y sísmicas, utilizando el método de los elementos finitos.	El modelamiento geotécnico bajo condiciones no axisimétricas permite identificar con mayor precisión las zonas críticas de esfuerzo y deformación en taludes operativos, y genera factores de seguridad que difieren significativamente de los obtenidos mediante métodos tradicionales de equilibrio límite, proporcionando así una representación más realista del comportamiento del talud.	Variable Dependiente: Estabilidad de taludes operativos en condiciones no axisimétricas	El nivel de la presente investigación es explicativo, ya que busca determinar las causas y relaciones existentes entre las variables que intervienen en la estabilidad de taludes operativos, considerando su comportamiento bajo condiciones no axisimétricas.

ANEXO 02

Abertura de la calicata para la toma de muestra para los ensayos en laboratorio



Material extraído para el traslado para los ensayos de laboratorio como muestra deformada



Muestra de los taludes de las progresivas a hacer analizadas mediante la metodología FEM



Imagen panorámica del área de estudio de la investigación



Análisis general de las observaciones in situ

En la imagen se observa una excavación a cielo abierto desarrollada en un material granular de origen probablemente aluvial o coluvial, con las siguientes características geotécnicas apreciables de manera visual:

Tipo de suelo

- Predomina un suelo granular grueso, compuesto por gravas y arenas con presencia de bloques y bolones de tamaño variable.
- El material aparenta ser pobremente graduado, con bajo contenido de finos cohesivos (limo/arcilla).
- No se evidencia cementación ni estructura geológica definida.

Condición del suelo

- El suelo se encuentra seco, sin indicios visibles de humedad o nivel freático superficial.
- La excavación presenta paredes irregulares, lo que sugiere baja cohesión y tendencia al desmoronamiento.

Estabilidad de taludes

- Los taludes son subverticales, condición inestable para este tipo de material granular.
- Se observan desprendimientos y material suelto, indicando riesgo de colapso local.

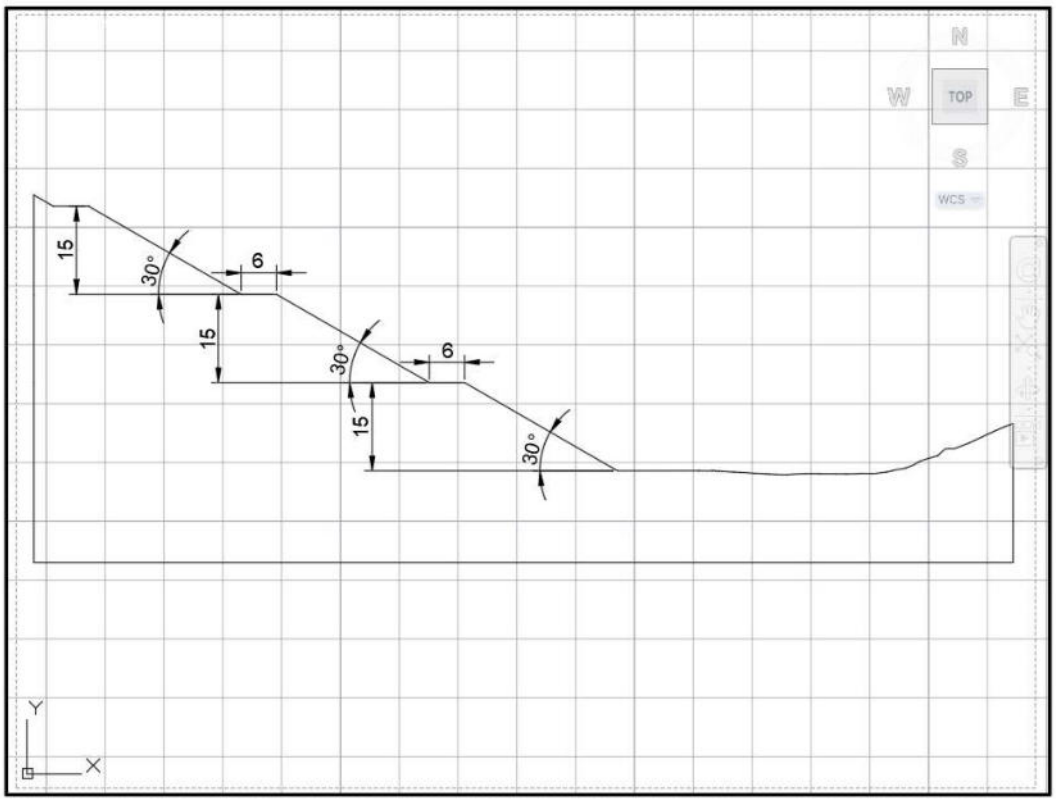
Excavación

- La profundidad de la calicata fue la necesaria para obtención de material representativo de la cantera.

Condiciones de seguridad

- Una persona se encuentra muy próxima al borde de la excavación, lo que representa alto riesgo de caída o colapso del borde.
- Aunque porta EPP (casco y chaleco), no se cumplen condiciones seguras desde el punto de vista geotécnico.

ANEXO 03

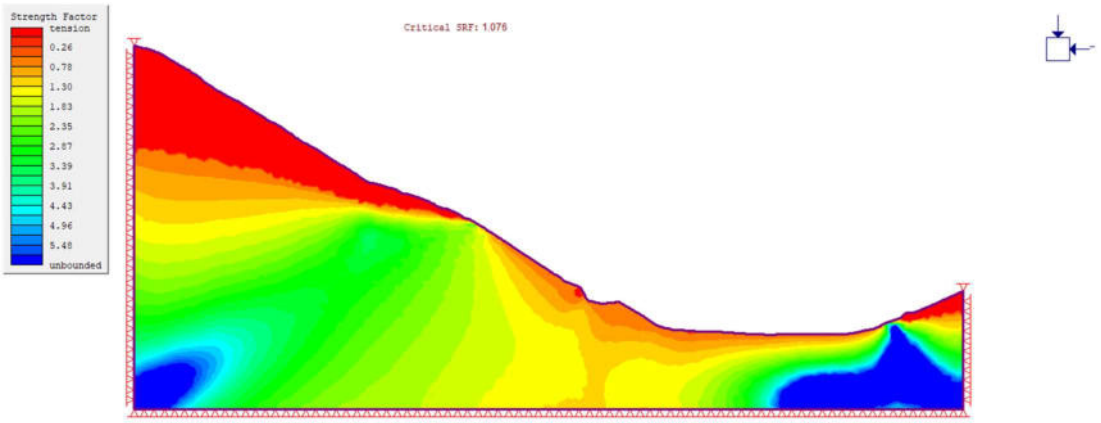


Hoja técnica de los taludes

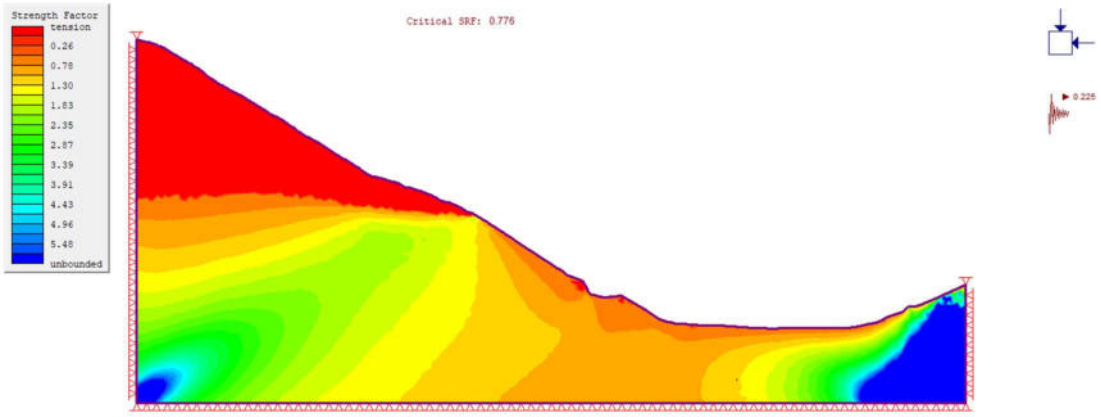
1. **Talud general**
   - Talud global inclinado compuesto por varios **subtaludes** con un ángulo aproximado de **30°**.
   - Este ángulo sugiere un diseño conservador, probablemente asociado a condiciones no axisimétricas como la meteorización, topografía irregular.
2. **Bancos (benching)**
   - El talud está dividido en **bancos de 15 m de altura**, lo cual es estándar en minería superficial.
   - Cada banco incluye:
     - **Altura de banco:** 15 m
     - **Berma (ancho):** 6 m
   - Las bermas funcionan como:
     - Elementos de **interrupción de desprendimientos**
     - Plataformas de **seguridad y acceso**
     - Control de **energía cinética de bloques desprendidos**
3. **Geometría escalonada**
   - La secuencia repetitiva de banco–berma–talud indica un diseño típico de:
     - **Talud inter-rampa** (conjunto de bancos)
     - Control de estabilidad mediante **reducción de la pendiente global.**

ANEXO 04

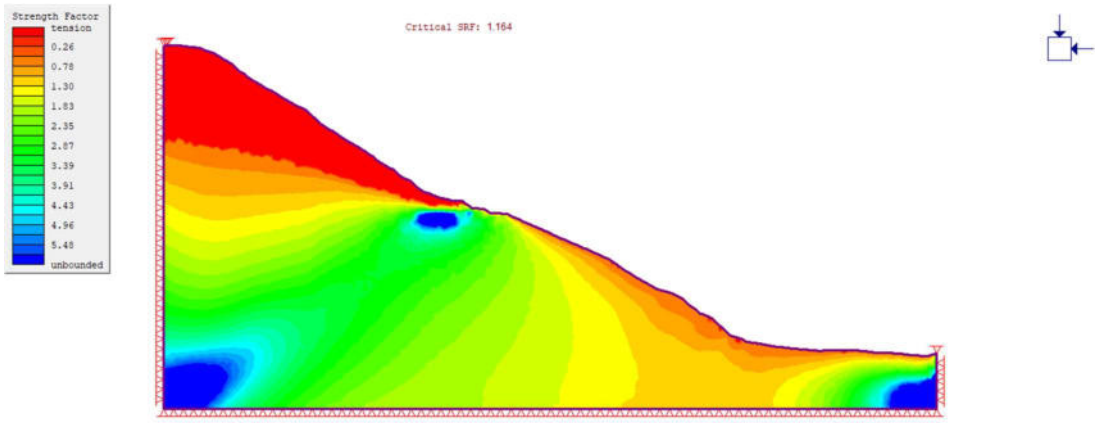
Análisis estático para las condiciones actuales con la metodología FEM para la progresiva 000+100



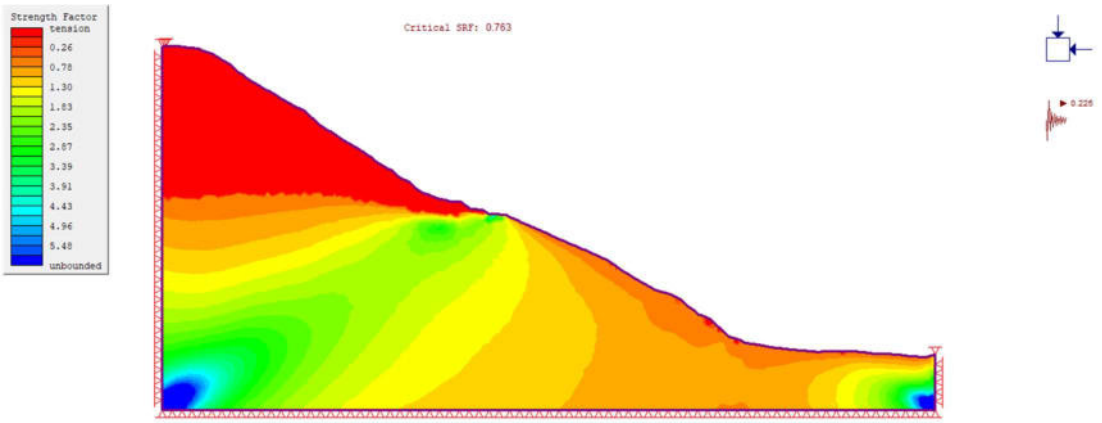
Análisis pseudoestático para las condiciones actuales con la metodología FEM para la progresiva 000+100



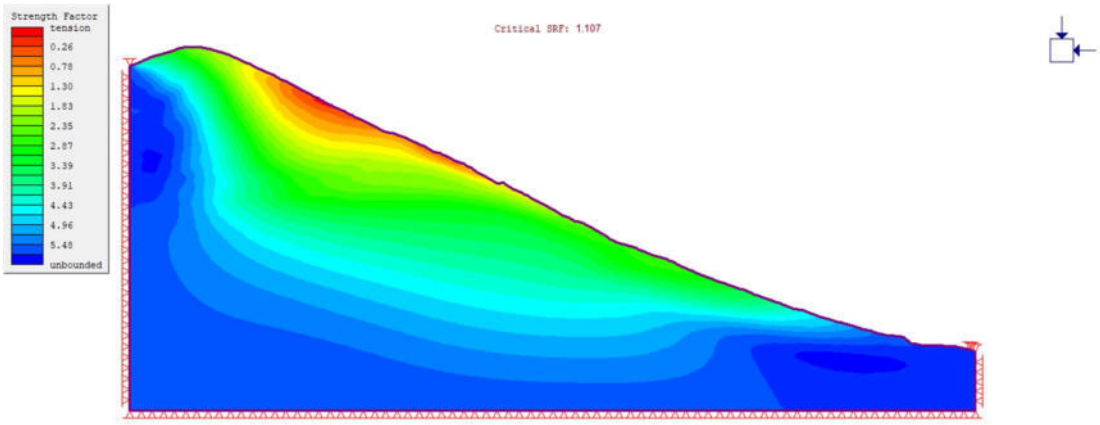
Análisis estático para las condiciones actuales con la metodología FEM para la progresiva 000+140



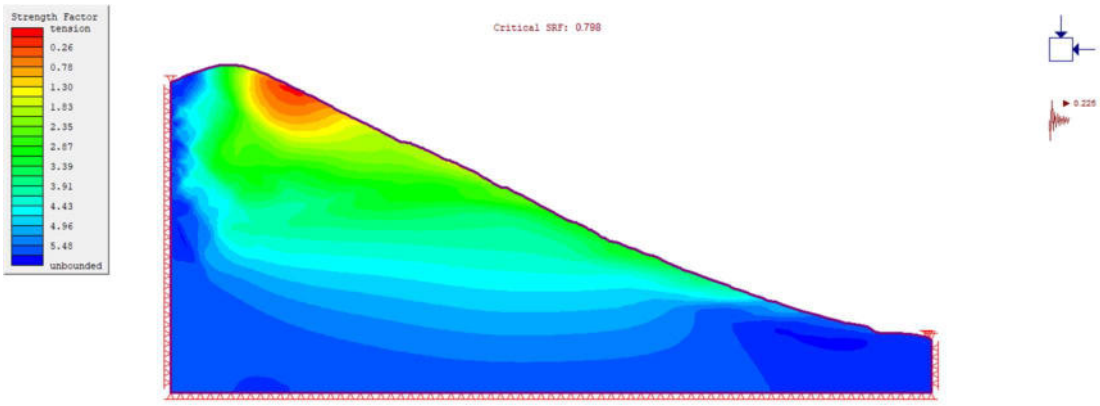
Análisis pseudoestático para las condiciones actuales con la metodología FEM para la progresiva 000+140



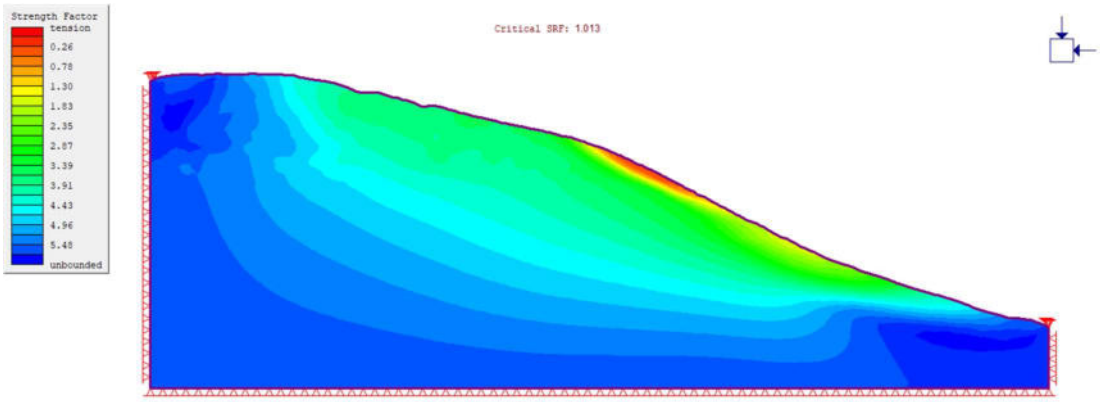
Análisis estático para las condiciones actuales con la metodología FEM para la progresiva 000+180



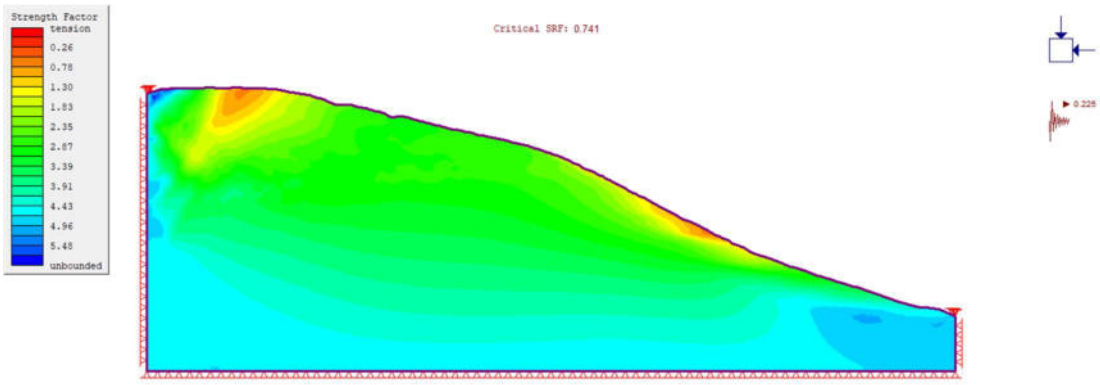
Análisis pseudoestático para las condiciones actuales con la metodología FEM para la progresiva 000+180



Análisis estático para las condiciones actuales con la metodología FEM para la progresiva 000+220

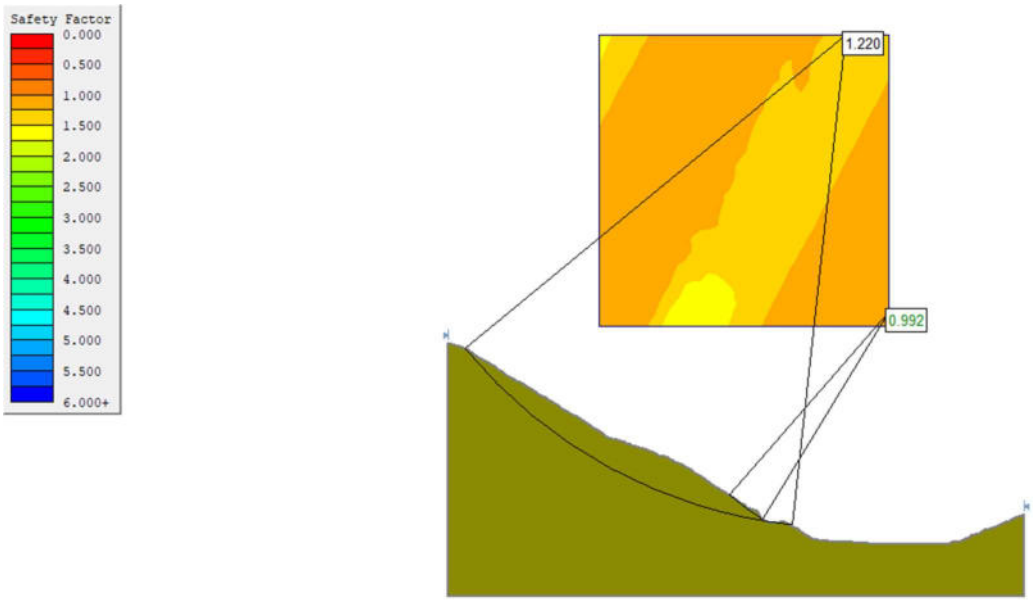


Análisis pseudoestático para las condiciones actuales con la metodología FEM para la progresiva 000+220

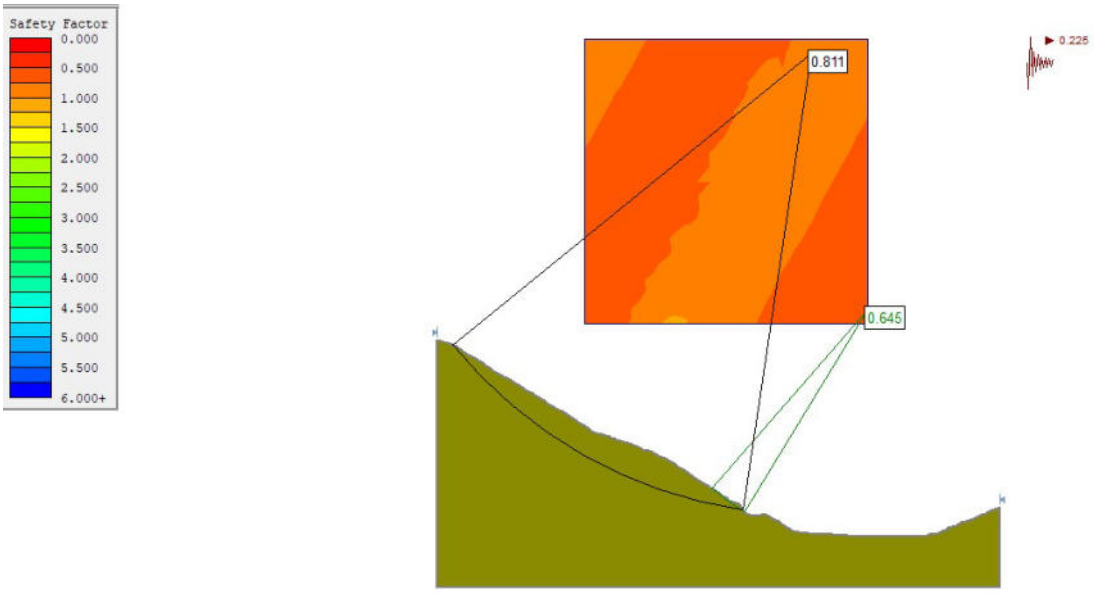


ANEXO 05

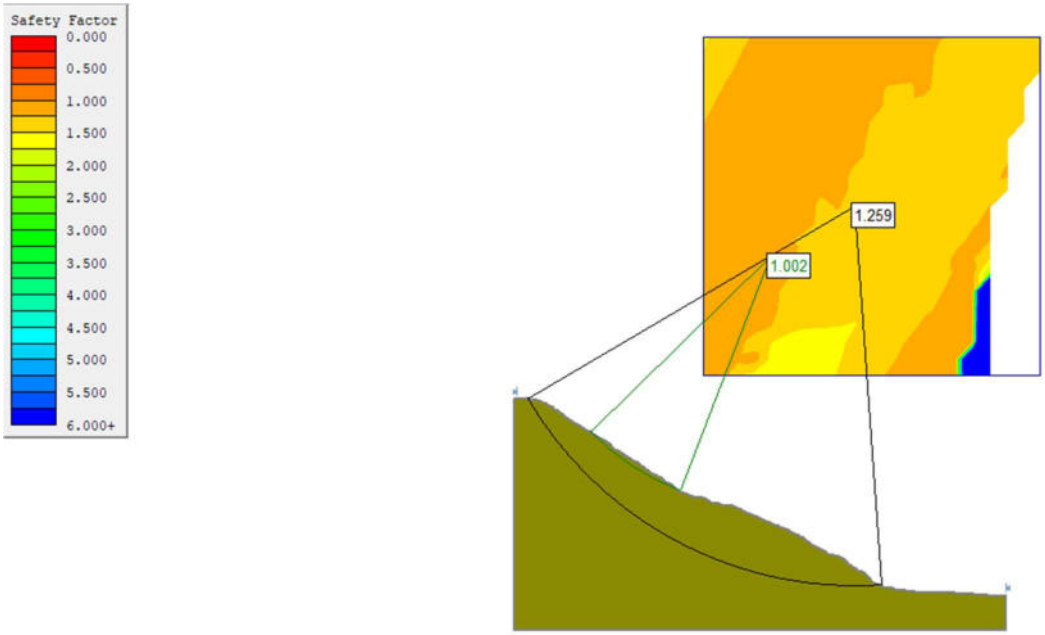
Análisis estático para las condiciones actuales con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+100



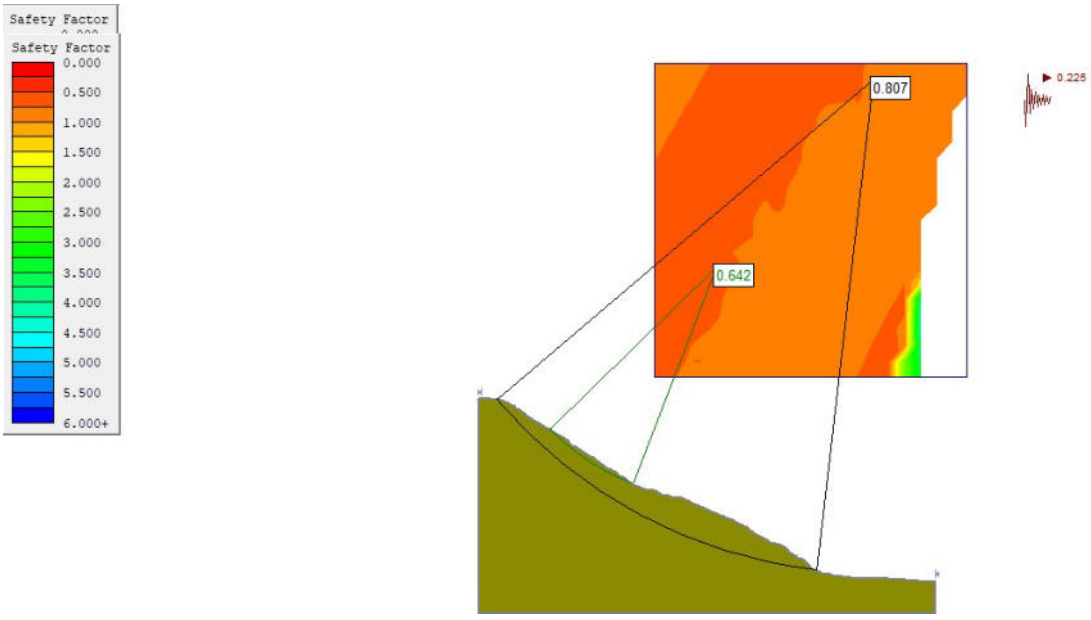
Análisis pseudoestático para las condiciones actuales con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+100



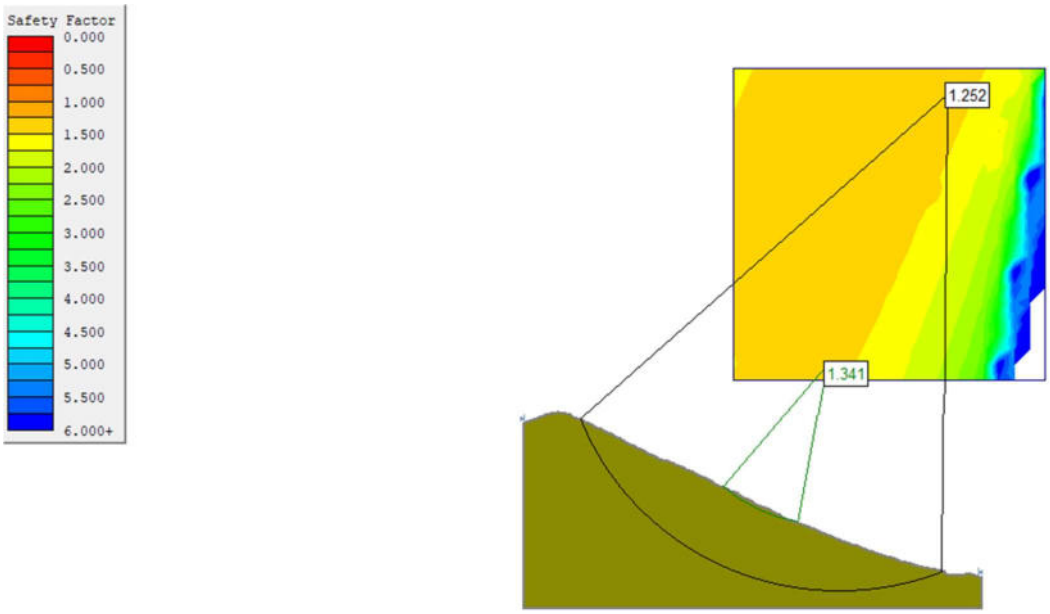
Análisis estático para las condiciones actuales con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+140



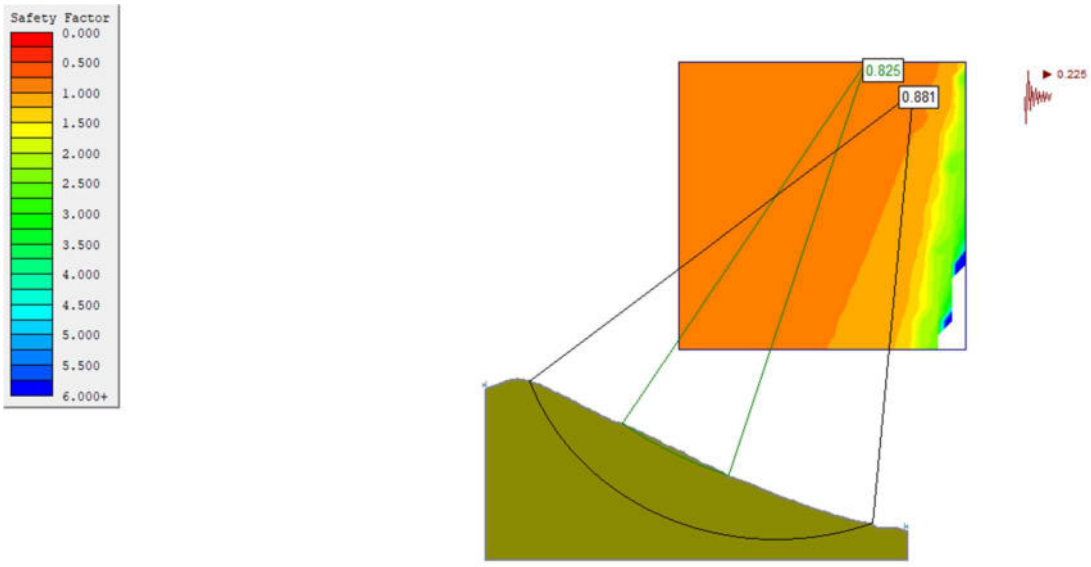
Análisis pseudoestático para las condiciones actuales con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+140



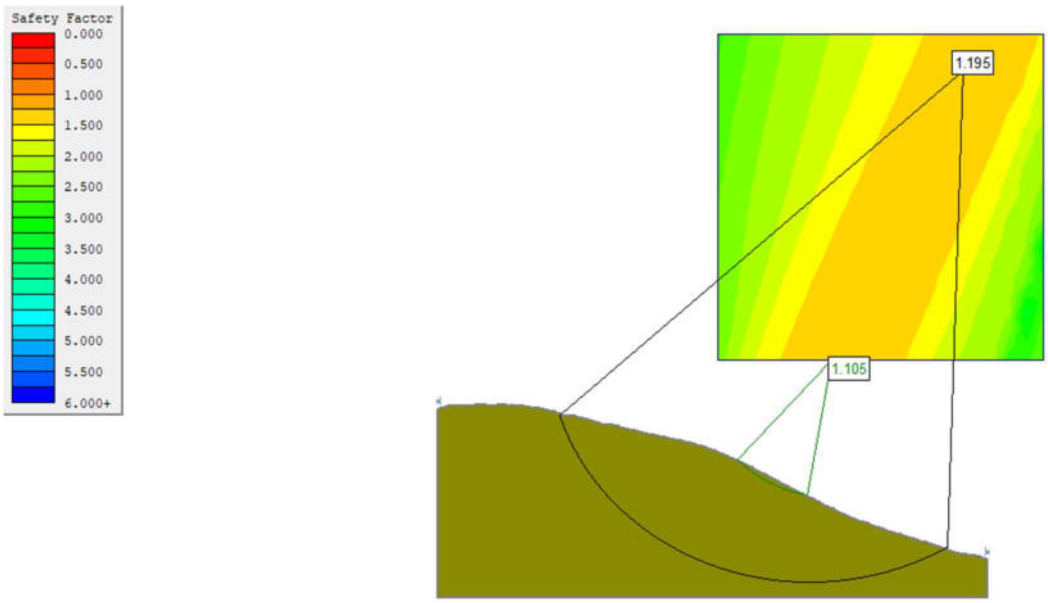
Análisis estático para las condiciones actuales con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+180



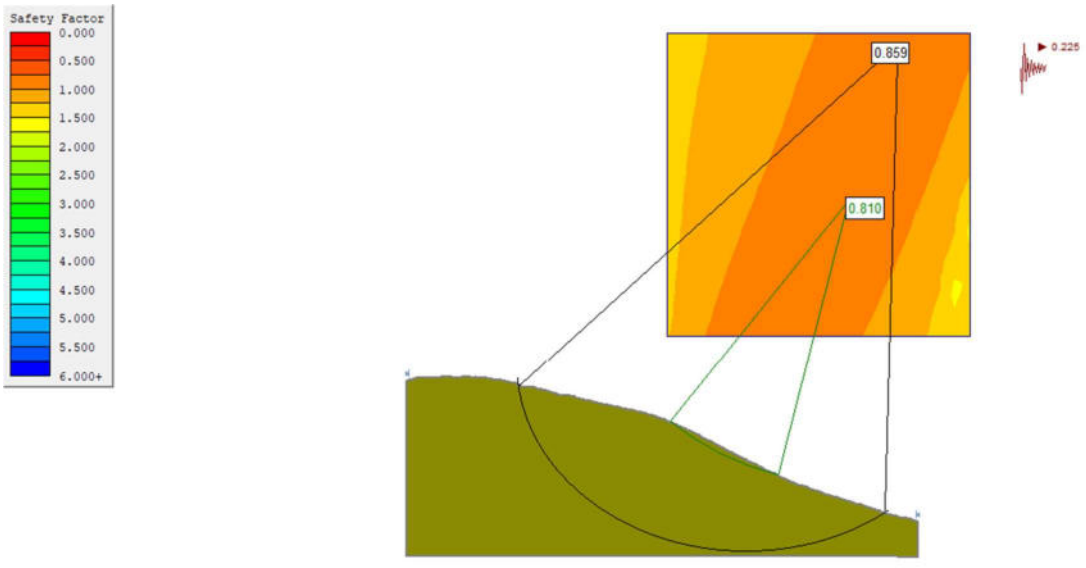
Análisis pseudoestático para las condiciones actuales con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+180



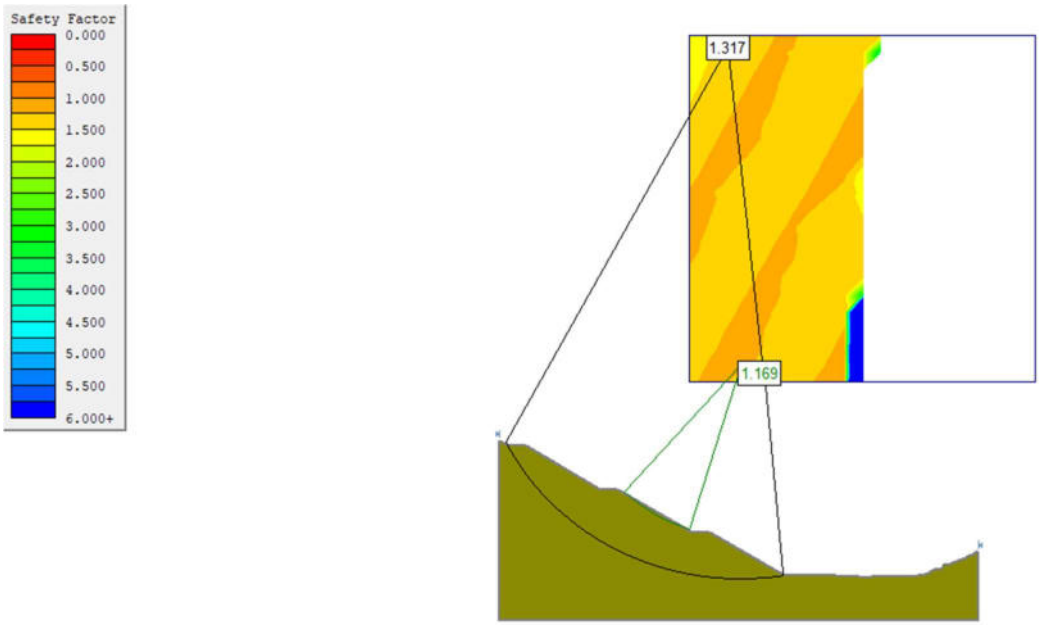
Análisis estático para las condiciones actuales con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+220



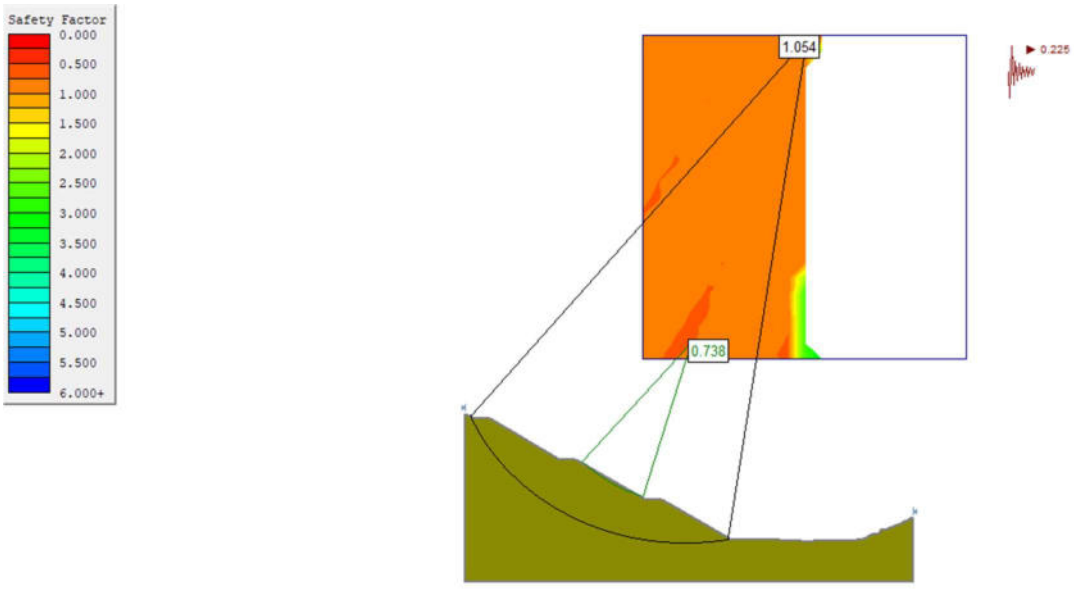
Análisis pseudoestático para las condiciones actuales con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+220



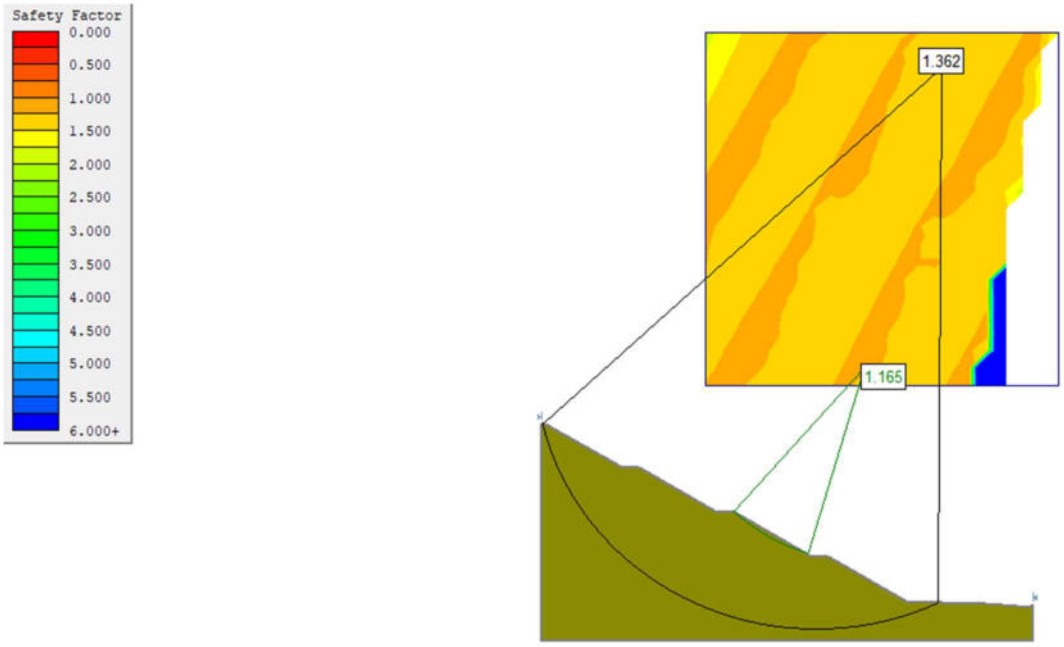
Análisis estático para el nuevo diseño con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+100



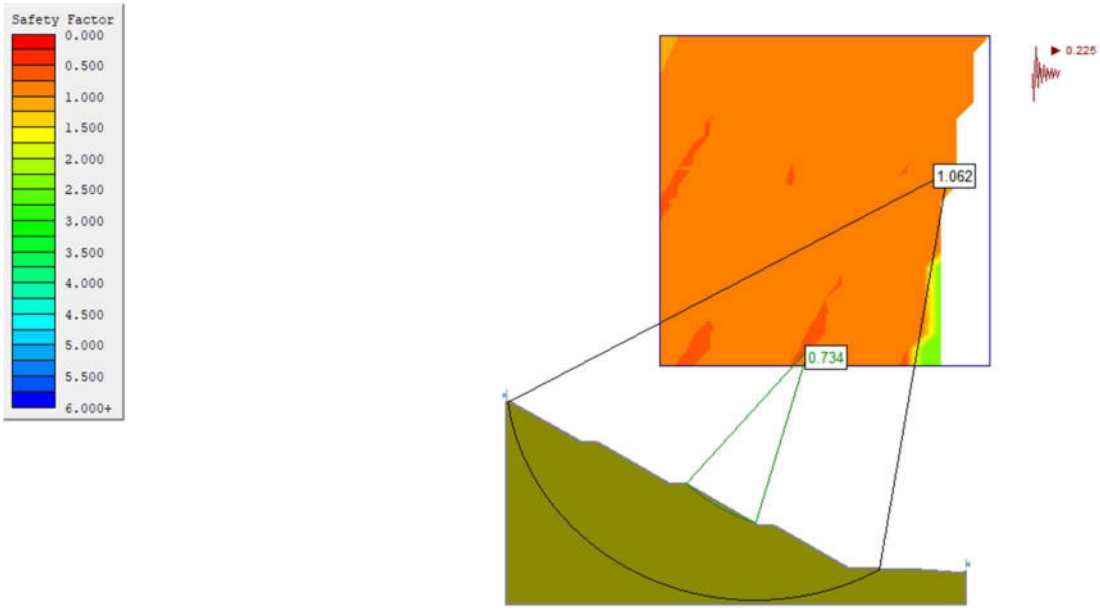
Análisis pseudoestático para el nuevo diseño con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+100



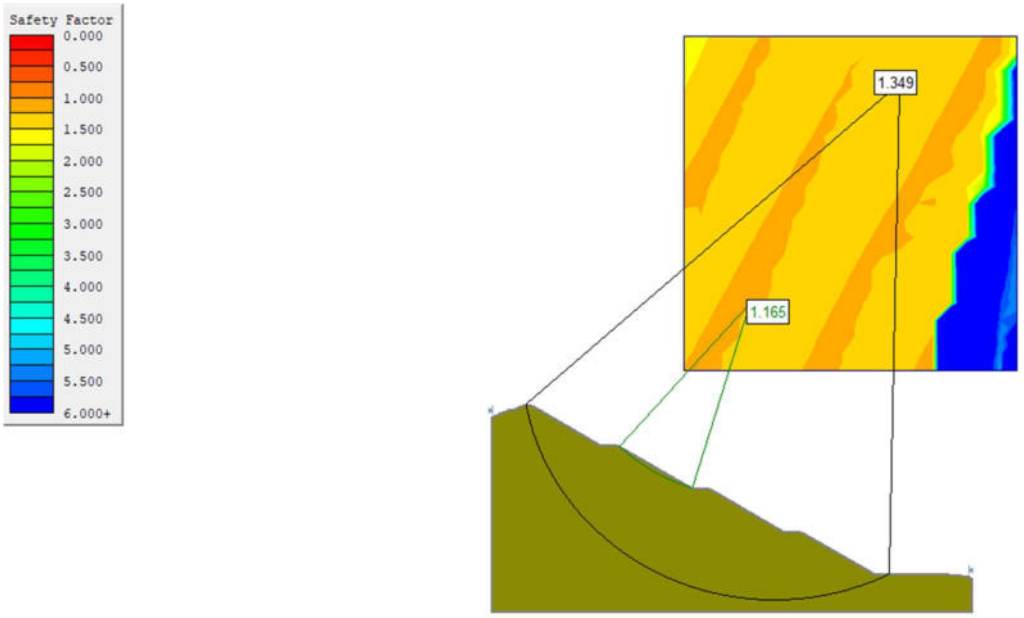
Análisis estático para el nuevo diseño con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+140



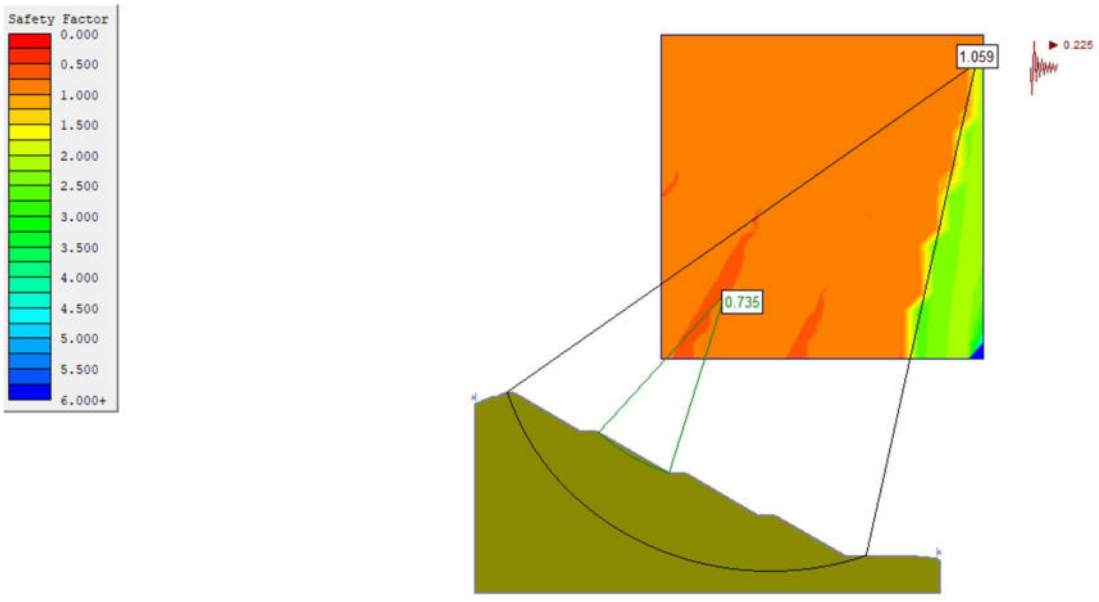
Análisis pseudoestático para el nuevo diseño con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+140



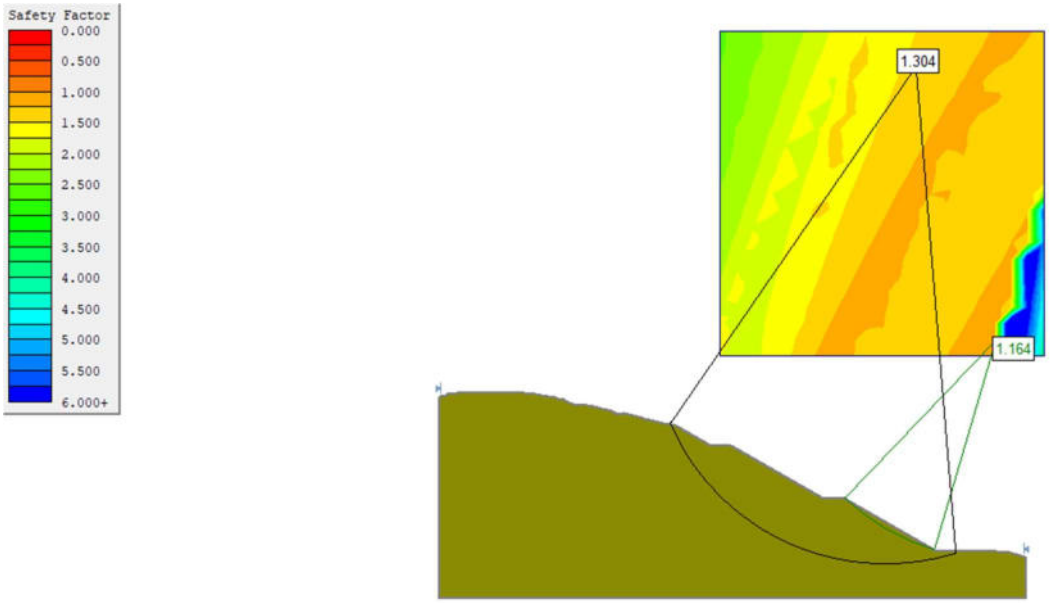
Análisis estático para el nuevo diseño con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+180



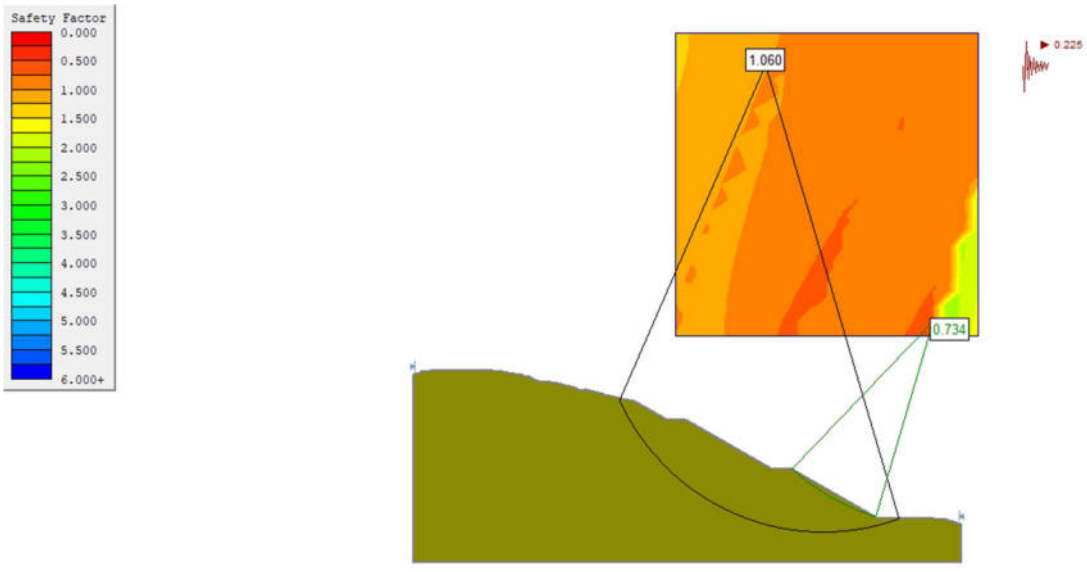
Análisis pseudoestático para el nuevo diseño con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+180



Análisis estático para el nuevo diseño con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+220



Análisis pseudoestático para el nuevo diseño con la metodología Equilibrio Límite para la progresiva 000+220



CALICATA Nº 01

ENSAYOS DE LABORATORIO

E-02

APCOOR S.A.C.	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Código de Documento:	APCOP-01-16
GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	FORMATO	Fecha de Aprobación:	4/12/2020
	REGISTRO DE EXCAVACIÓN DE CALICATAS	Versión de Documento:	2
		Cantidad de Páginas:	1 de 1

REGISTRO DE EXCAVACIÓN DE CALICATAS

Norma: ASTM D 2488-09a

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025
Hoja 01 de 01

INFORMACIÓN GENERAL

Proyecto: PROYECTO DE VIVIENDA UNIFAMILIAR LIZET TATIANA TACCA SILVA, GRANN PAULO CHIPOCO DIAZ

Solicitante: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA GRARAJA — R.U.C.: — — Contrato N°: —

Contacto: — — Teléfono: — — Departamento: MOQUEGUA — Provincia: MARISCAL NIETO — Distrito: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Identificación: C-01 — Profundidad: 4.00 m — Estrato N°: — — Zona de Muestreo: CANTERA SOLANGE AR — Tipo de Material: Terreno Natural

Lugar de Muestreo: CANTERA SOLANGE AR — Tramo Evaluado: — — Coordenadas E: 286713.7 — Coordenada N: 8088294.793

Elevación m.s.n.m.: — — Requisito y/o Especificación del Solicitante: — — Fecha de Ensaye: 6/05/2025

PANEL FOTOGRÁFICO — C-01



DATOS DE PROYECTO

Actividad: ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS CON FINES DE CIMENTACION

Zona: — — Lugar Muestreo: CANTERA SOLANGE AR

Coordenada E: 286713.7 — Coordenada N.: 8088294.8 — Elevación: —

DESCRIPCIÓN DE LA CALICATA

Nivel Freático: NO PRESENTA — Fecha de Calicateo: 6/05/2025

Superficie: IRREGULAR

Raíces: NO PRESENTA

DATOS DEL PERSONAL QUE EJECUTO

Ing. Responsable: C. PECHE — Equipo: RETROEXCAVADORA

Téc. Responsable: L. ASTORGA — Operador: —

Aux. de Laboratorio: A. ASTORGA

Profundidad (m)	Estrato N°	Descripción del Material (Nombre y Símbolo del Grupo) Humedad, estructura, tamaño máximo de la partícula, dureza grava/bolones, resistencia en seco, dilatancia y tenacidad	% Sobretamaño (1)	% de Grava (2)	% de Arena (2)	% de Finos (2)	Color	Consistencia (3) o Densidad Relativa (4)	Plasticidad (NP=, B, M, A)	Cementación (5)	Otros Test (6), (7)
0.00 – 0.20	E-01	MATERIAL DE COBERTURA CONTAMINADO									
0.20 – 1.90	E-02	GRAVA BIEN GRADUADA CON ARENA CON BLOQUES, EXCELENTE A BUENO COMO SUBGRADO FRAGMENTOS DE ROCA, GRAVA Y ARENA	6.03	40.97	49.94	3.06	Blanco y Gris	Suelto	Baja	Debil	—
1.90 – 4.00	E-03	MATERIAL DE CLASIFICACION TIPO GW, CON CONTENIDO DE HUMEDAD BAJO, GRAVA BIEN GRADUADA CON ARENA. EXCELENTE A BUENO COMO SUBGRADO, FRAGMENTOS DE ROCA, GRAVA Y ARENA ESTRUCTURA HOMOGENEA TAMAÑO MAXIMO DE PARTICULA 6" GRAVAS DURAS, DILATANCIA BAJA, TENACIDAD BAJA.	8.87	51.18	38.09	1.86	Marron Claro	Suelto	NP	Debil	—

NOTA:

(1) Porcentaje Material > 3 Pulg.
(2) Suma de Grava, Arena y Finos = 100%
(3) Para suelos de grano fino (cohesivos) muy blando, blando, firme, duro y muy duro
(4) Para Suelos de grano grueso (sin cohesión); muy suelto, suelto, compacta, denso, muy denso
(5) Débil, moderada, fuerte
(6) Densidad in situ
(7) Estratificado, laminado, fisurado, fallado (slickensided), en bloques, lenticular, homogéneo.

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN DE DOCUMENTO

Ing. Cesar Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46620

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación.

EURO CERT

APCOOR S.A.C. Ingeniería Gerencial y Construcción — GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-01
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/06/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	INFORME DE LABORATORIO DE SUELOS	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

INFORME DE LABORATORIO DE SUELOS

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

DIVISIÓN DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS — HOJA 01 DE 08

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: --- — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-165-2025 — CONTRATO N°: ---

CONTACTO: --- — TELEFONO: --- — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA — PROVINCIA: MARISCAL NIETO — DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: EL SOLICITANTE — CALICATA N°: C-01 — ESTRATO N°: E-02 — PROFUNDIDAD: 4.00 m — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-01 — COORDENADA N: 8088284.6 — COORDENADA E: 289713.7 — ALTITUD: ---

FECHA DE MUESTREO: 8/05/2025 — FECHA DE RECEPCIÓN: 8/05/2025 — FECHA DE ENSAYO: 8/05/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

LUGAR DE MUESTREO: CANTERA SOLANGE AR — TRAMO EVALUADO: — — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

INFORME

Descripción de Ensayo	Normas	Resultados		Registro de Ensayo	Observación
DISTRIBUCIÓN GRANULOMETRICA DE SUELOS POR TAMIZADO	Norma: ASTM D6913/6913M-17, ASTM D 422, AASHTO T-88, MTC E107, NTP 339.128	% Pasante 3 in 93.97 % 2 in 88.19 % 1 1/2 in 81.84 % 1 in 75.58 % 3/4 in 69.60 % 1/2 in 61.72 % 3/8 in 62.87 % N° 04 58.00 %	% Pasante N° 10 32.84 % N° 20 22.88 % N° 40 15.73 % N° 60 12.54 % N° 140 8.20 % N° 200 3.06 % < N° 200 0.00 %	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 02 de 08	---
DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN SUELOS	Normas: ASTM D2216-19, MTC E 108, NTP 339.127	Porcentaje de Humedad = 2.80 %		AP-REG-LS-165-2025 Hoja 03 de 08	---
LIMITE LÍQUIDO, LIMITE PLÁSTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS	Normas: ASTM D4318-17e1, AASTHO T 89, AASTHO T 90, MTC E 110, MTC E 111, NTP 339.129	Limite Liquido = 23 % Limite Plastico = 22 % Indice de Plasticidad = 1 %		AP-REG-LS-165-2025 Hoja 04 de 08	---
SALES SOLUBLES EN AGREGADOS	Normas: ASTM D1888, MTC E 219, NTP 339.177	Contenido de sales Agregado Grueso = 0.07 % Contenido de Sales Agregado Fino = 0.09 %		AP-REG-LS-165-2025 Hoja 05 de 08	---
ENSAYOS QUIMICOS DETERMINACIÓN DE CLORUROS Y SULFATOS	Normas: ASTM D1888, MTC E 219, NTP 339.177	Contenido de Cloruros = 0.07 % Contenido de Sulfatos = 0.07 %		AP-REG-LS-165-2025 Hoja 06 de 08	—
MÉTODO DE CLASIFICACIÓN S.U.C.S.	Norma: NTP 339.134	GW	Grava bien graduada con arena con bloques	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 07 de 08	---
MÉTODO DE CLASIFICACIÓN AASHTO	MÉTODO DE CLASIFICACIÓN AASHTO	A-1-a (0)	Excelente a bueno como subgrado Fragmentos de roca, grava y arena	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 08 de 08	---

Ing. Cesar Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 466.23

APCOOR S.A.C. Ingeniería Gerencia y Construcción — GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/05/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	DISTRIBUCIÓN GRANULOMETRICA DE SUELOS POR TAMIZADO	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

DISTRIBUCIÓN GRANULOMETRICA DE SUELOS POR TAMIZADO

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

Norma: ASTM D6913/6913M-17, ASTM D 422, AASHTO T-88, MTC E107, NTP 339.128

HOJA 02 DE 08

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: — — COTIZACIÓN Nro.: — — CONTRATO N°: —

CONTACTO: — TELÉFONO: — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA — PROVINCIA: MARISCAL NIETO — DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: EL SOLICITANTE — CALICATA N°: C-01 — ESTRATO N°: E-02 — PROFUNDIDAD: 4.00 m — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-01 — COORDENADA N: 8098234.791 — COORDENADA E: 299713.728 — ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 5/05/2025 — FECHA DE RECEPCIÓN: 8/05/2025 — FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

PROGRESIVA DE MUESTREO: — — TRAMO EVALUADO: — — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

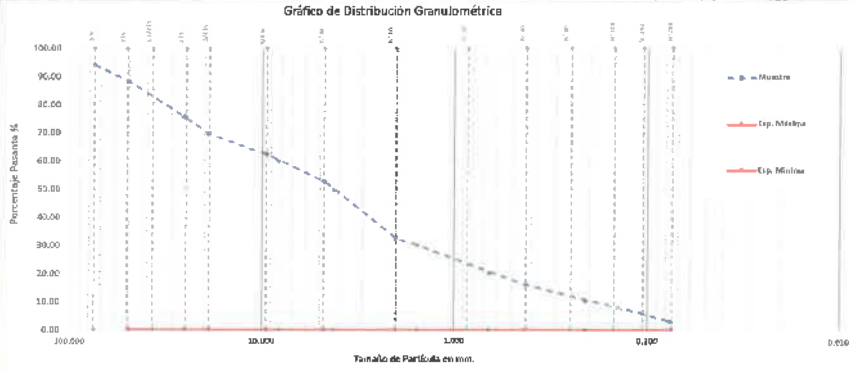
DATOS DE ENSAYO

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MASAS
Masa Seca Fracción Gruesa Retenida en Tamiz 3/4 in	g	20,980.00
Masa Seca Fracción Fina Retenida en Tamiz N° 04	g	11,443.00
Masa Seca Fracción Fina Pasante en Tamiz N° 04	g	36,842.00
Masa Seca Total	g	68,945.00

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Tamaño Máximo de la Muestra	in	4.00
Tamaño Máximo Nominal de la Muestra	in	3.00
Masa Fracción Fina a Ensayar	g	1,836.00
Tipo de Procedimiento	---	---

Tamiz de Diámetro ¾ in			Masas Secas Retenidas					ESPECIFICACIÓN		
Abertura en (Pulg.)	Abertura en (mm.)	Certificado de Calibración	Masa Retenida (g.)	Factor de Tamizado	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)	Mínimo Pasante %	Máximo Pasante %	Tolerancias %
3 in	75.000	TC-06361-2025	4,155.00	0.001450	6.03	6.03	93.97	---	---	
2 in	50.000	TC-06362-2025	3,984.00	0.001450	5.78	11.81	88.19	---	---	
1 1/2 in	37.500	TC-06364-2025	4,659.00	0.001450	6.76	18.56	81.44	---	---	
1 in	25.000	TC-06365-2025	4,036.00	0.001450	5.85	24.42	75.58	---	---	
3/4 in	19.000	TC-06366-2025	4,125.00	0.001450	5.98	30.40	69.60	---	---	
1/2 in	12.700	TC-06367-2025	5,432.00	0.001450	7.88	38.28	61.72	---	---	
3/8 in	9.500	TC-06368-2025	4,965.00	0.001450	7.23	37.63	62.37	---	---	
N° 04	4.750	TC-06370-2025	6,458.00	0.001450	9.37	47.00	53.00	---	---	
N° 10	2.000	TC-06372-2025	698.00	0.028884	20.16	67.16	32.84	---	---	
N° 20	0.850	TC-06375-2025	345.00	0.028884	9.96	77.12	22.88	---	---	
N° 40	0.425	TC-06377-2025	246.00	0.028884	7.11	84.23	15.77	---	---	
N° 80	0.250	TC-06379-2025	112.00	0.028884	3.23	87.46	12.54	---	---	
N° 140	0.106	TC-06382-2025	150.00	0.028884	4.33	91.80	8.20	---	---	
N° 200	0.075	TC-06383-2025	178.00	0.028884	5.14	96.94	3.06	---	---	
< N° 200	---	---	106.00	0.028884	3.06	100.00	0.00	---	---	

Gráfico de Distribución Granulométrica



Porcentaje de Sobretamaño (%)	6.03
Porcentaje de Grava (%)	41.0
Porcentaje de Arena (%)	49.9
Porcentaje de Finos (%)	3.1
Especificación Granulométrica	—
Diámetro Efectivos	
Diámetro Efectivo 10 (D_{10})	0.21
Diámetro Efectivo 20 (D_{20})	0.66
Diámetro Efectivo 30 (D_{30})	1.55
Diámetro Efectivo 50 (D_{50})	4.25
Diámetro Efectivo 60 (D_{60})	6.19
Coef. De Uniformidad (Cu)	28.95
Coef. De Curvatura (Cc)	1.85

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN

Ing. Cesar Pacho Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46023

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CODIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Gerencia y Construcción — GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÒN SOCIEDAD ANÒNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/05/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN SUELOS	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN SUELOS

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

Normas: ASTM D2216-19, MTC E 108, NTP 339.127

HOJA 03 DE 08

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: — — COTIZACIÓN Nro.: — — CONTRATO N°: —

CONTACTO: — TELÉFONO: — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA PROVINCIA: MARISCAL NIETO DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: EL SOLICITANTE — CALICATA N°: C-01 — ESTRATO N°: E-02 — PROFUNDIDAD: 4.00 m — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-01 — COORDENADA N: 8098294.793 — COORDENADA E: 289713.728 — ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 5/05/2025 — FECHA DE RECEPCIÓN: 5/05/2025 — FECHA DE ENSAYO: 5/05/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2026

PROGRESIVA DE MUESTREO: — — TRAMO EVALUADO: — — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

SELECCIÓN DE METODO DE ENSAYO

Método A (± 1%)		Método B (± 0.1%)	X

DATOS DE EQUIPO DE SECADO EMPLEADO

Horno Eléctrico	X	Temperatura de Secado	110 °C	Suelo Granular	X	Suelo Fino	

Certificado de Calibración N° TC-06355-2025 — Código de Equipo AP-17038-LAB

DATOS DE ENSAYO

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	1.00	2.00		
Masa de Recipiente	g	—	—		
Masa de Suelo Humedo + Recipiente	g	645.50	748.50		
Masa de Suelo Seco + Recipiente	g	628.95	726.85		
Masa del Agua	g	16.55	21.65		
Masa de Suelo Seco	g	628.95	726.85		
Contenido de Humedad en el Suelo	%	2.63	2.98		

Resultado Contenido de Humedad en la Muestra: 2.80 %

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN

Ing. Cesar Pedro Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46823

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Gerencia y Construcción — GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/05/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	LIMITE LÍQUIDO, LIMITE PLÁSTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

LIMITE LÍQUIDO, LIMITE PLÁSTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

Normas: ASTM D4318-17e1, AASTHO T 89, AASTHO T 90, MTC E 110, MTC E 111, NTP 339.129

HOJA 04 DE 08

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: --- — COTIZACIÓN Nro.: --- — CONTRATO N°: ---

CONTACTO: --- — TELEFONO: --- — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA — PROVINCIA: MARISCAL NIETO — DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: EL SOLICITANTE — CALICATA N°: C-01 — ESTRATO N°: E-02 — PROFUNDIDAD: 4.00 m — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-01 — COORDENADA N: 8082284.793 — COORDENADA E: 296719.728 — ALTITUD: ---

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2025 — FECHA DE RECEPCIÓN: 6/05/2025 — FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

PROGRESIVA DE MUESTREO: --- — TRAMO EVALUADO: --- — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: ---

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Secado al Aire		Agua Destilada para Mezcla	X	Mezclado de Partículas de Arena Removidas en Cápsula	X
Secado al Horno		Agua Desmineralizada para Mezcla		Lavado de Muestra por Tamiz N° 40	
Humedecida 24h	X	Otro Tipo de Agua		Tamizado en Seco de Muestra por Tamiz N° 40	

DETERMINACIÓN DEL LIMITE LÍQUIDO DE MATERIAL

Normas: ASTM D4318-17e1, AASTHO T 89, MTC E 110, NTP 339.129

DATOS DE EQUIPO EMPLEADO

Equipo Manual: X — Equipo Motorizado: — Ranurador Metálico: — Ranurador Plástico: X

Certificado de Calibración N°: TC-D7156-2025 — Código de Equipo: AP-16029-LAB

Método Multipunto

Descripción	Unidad	Punto N° 01	Punto N° 02	Punto N° 03
Número de Cápsula	Nro.	6	14	25
Número de Golpes	Nro.	32	25	15
Temperatura Ambiente	°C	22.90	22.90	22.90
Suelo Humedo + Masa de Capsula	g	88.57	88.45	80.10
Suelo Seco + Masa de Cápsula	g	78.15	84.15	75.48
Temperatura de Secado	°C	110	110	110
Masa del Agua Contenida	g	5.52	4.3	4.62
Masa de la Cápsula	g	51.3	49	50.1
Masa del Suelo Seco	g	26.85	18.59	17.58
Contenido de Humedad	%	20.56	23.13	26.28

Método del Unipunto

Descripción	Unidad	Punto N° 01
Número de Cápsula	Nro.	
Número de Golpes	Nro.	
Temperatura Ambiente	°C	
Suelo Humedo + Masa de Capsula	g	
Suelo Seco + Masa de Cápsula	g	
Temperatura de Secado	°C	
Masa del Agua Contenida	g	
Masa de la Cápsula	g	
Masa del Suelo Seco	g	
Contenido de Humedad	%	

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO DE SUELOS

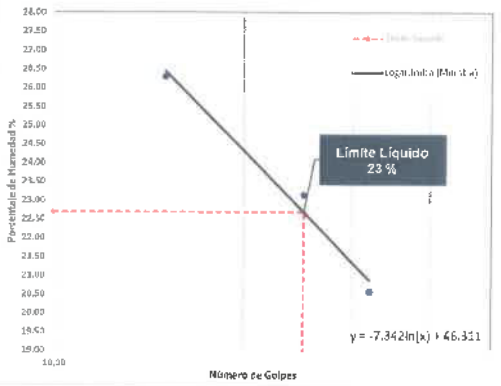
Normas: ASTM D4318-17e1, AASTHO T 90, MTC E 111, NTP 339.129

Descripción	Unidad	Punto N° 01	Punto N° 02
Número de Cápsula	Nro.	1	3
Temperatura Ambiente	°C	22.50	22.50
Suelo Humedo + Masa de Capsula	g	45.36	45.15
Suelo Seco + Masa de Cápsula	g	40.15	37.85
Temperatura de Secado	°C	110	110
Masa del Agua Contenida	g	5.21	5.3
Masa de la Cápsula	g	15.19	16.22
Masa del Suelo Seco	g	24.96	23.63
Contenido de Humedad	%	20.87	22.43

RESULTADOS

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	RESULTADOS
Limite Liquido del Suelo (LL)	%	23
Limite Plástico del Suelo (LP)	%	22
Indice de Plasticidad del Suelo (IP)	%	1
Indice de Liquidez (IL)	---	
Interpretación del Indice de Liquidez (IL)	---	

Diagrama de Fluidez



OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACION

Ing. Edgar Cecile Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 40623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

IMPORTANTE. Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Gerencia y Construcción GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/05/2021
	FORMATO:	Version de Documento:	01
	SALES SOLUBLES EN AGREGADOS	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

SALES SOLUBLES EN AGREGADOS

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

Normas: ASTM D1888, MTC E 219, NTP 339.177

HOJA 05 DE 08

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA R.U.C.: --- COTIZACIÓN Nro.: --- CONTRATO N°: ---

CONTACTO: --- TELÉFONO: --- DEPARTAMENTO: MOQUEGUA PROVINCIA: MARISCAL NIETO DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: EL SOLICITANTE CALICATA N°: C-01 ESTRATO N° E-02 PROFUNDIDAD: 4.00 m TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO NÚMERO DE MUESTRA: M-01 COORDENADA N: 8098294.79 COORDENADA E: 289713.728 ALTITUD: ---

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2025 FECHA DE RECEPCIÓN: 6/05/2025 FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

PROGRESIVA DE MUESTREO: --- TRAMO EVALUADO: --- REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: ---

DATOS DE EQUIPO DE SECADO EMPLEADO

Horno Eléctrico: X Temperatura de Secado: 110 °C Suelo Granular: X Suelo Fino:

Certificado de Calibración N°: TC-06355-2025 Código de Equipo: AP-17038-LAB

DATOS DE ENSAYO CONTENIDO DE SALES EN AGREGADO GRUESO

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	1.00	2.00		
Masa del Recipiente	g	50.25	51.98		
Masa de Recipiente + Agua + Sal	g	162.25	155.24		
Masa de Recipiente + Sal	g	50.33	52.06		
Masa de Sal Contenida	g	0.08	0.08		
Masa de Agua	g	111.94	103.18		
Porcentaje de Sal Contenida	%	0.05	0.08		
Contenido de Sales	ppm	536	775		

Resultado Porcentaje de Sales en la Muestra: 0.07 %

Resultado Contenido de Sales en la Muestra: 656 ppm

DATOS DE ENSAYO CONTENIDO DE SALES EN AGREGADO FINO

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	3.00	4.00		
Masa del Recipiente	g	49.85	47.84		
Masa de Recipiente + Agua + Sal	g	165.25	188.25		
Masa de Recipiente + Sal	g	49.94	47.98		
Masa de Sal Contenida	g	0.09	0.14		
Masa de Agua	g	115.31	140.27		
Porcentaje de Sal Contenida	%	0.08	0.10		
Contenido de Sales	ppm	781	998		

Resultado Contenido de Sales en la Muestra: 0.09 %

Resultado Contenido de Sales en la Muestra: 889 ppm

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN

Ing. César Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 186528

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Gerencia y Construcción GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD FORMATO: ENSAYOS QUIMICOS DETERMINACIÓN DE CLORUROS Y SULFATOS	Código de Documento: AP-OP-01-02 Fecha de Aprobación: 21/06/2021 Versión de Documento: 01 Estado de Documento: Vigente Cantidad de Páginas: 01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

ENSAYOS QUIMICOS DETERMINACIÓN DE CLORUROS Y SULFATOS

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-188-2025

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA R.U.C.: --- COTIZACIÓN Nro.: --- CONTRATO N°: ---

CONTACTO: --- TELÉFONO: --- DEPARTAMENTO: MOQUEGUA PROVINCIA: MARISCAL NIETO DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: EL SOLICITANTE CALICATA N°: C-01 ESTRATO N°: E-02 PROFUNDIDAD: 4.00 m TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO NÚMERO DE MUESTRA: M-01 COORDENADA N: 8068294.793 COORDENADA E: 299713.726 ALTITUD: ---

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2025 FECHA DE RECEPCIÓN: 8/05/2025 FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 FECHA DE VALIDACIÓN: 13/05/2025

PROGRESIVA DE MUESTREO: --- TRAMO EVALUADO: --- REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: ---

DATOS DE EQUIPO DE SECADO EMPLEADO

Horno Eléctrico [X] Temperatura de Secado 110 °C Suelo Granular [X] Suelo Fino [ ]

Certificado de Calibración N° TC-06355-2025 Código de Equipo AP-17088-LAB

DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE CLORUROS

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	9.00	10.00		
Masa del Recipiente	g	184.25	142.35		
Masa del Recipiente + Agua + Cloruros	g	289.69	249.88		
Masa del Recipiente Seco + Cloruros	g	284.32	242.43		
Masa de Contenido de Cloruros	g	0.07	0.07		
Masa de Agua	g	105.37	107.45		
Porcentaje de Cloruros Contenido	%	0.07	0.07		
Contenido de Sales	ppm	664	651		

Resultado Porcentaje de Cloruros en la Muestra: 0.07 %

Resultado Contenido de Cloruros en la Muestra: 658 ppm

DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE SULFATOS

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	11.00	12.00		
Masa del Recipiente	g	175.15	166.95		
Masa del Recipiente + Agua + Sulfatos	g	346.95	338.52		
Masa del Recipiente Seco + Sulfatos	g	175.27	169.05		
Masa de Contenido de Sulfatos	g	0.12	0.10		
Masa de Agua	g	171.68	169.47		
Porcentaje de Sulfatos Contenido	%	0.07	0.07		
Contenido de Sulfatos	ppm	699	669		

Resultado Contenido de Sulfatos en la Muestra: 0.07 %

Resultado Contenido de Sulfatos en la Muestra: 684 ppm

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN

Ing. Cesar Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CODIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., salvo con carácter de veracidad sin las firmas de validación

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

MÉTODO DE CLASIFICACIÓN S.U.C.S.

Norma: NTP 339.134

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

HOJA 07 DE 08

INFORMACIÓN GENERAL

Proyecto: ESTUDIO DE SUELOS

Solicitante: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA R.U.C.: --- CONTRATO N°: ---

Contacto: --- Teléfono: --- Departamento: MOQUEGUA Provincia: MARISCAL NIETO Distrito: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

CALICATA N°: C-01 Profundidad: 4.00 m Estrato N°: E-02 Zona de Muestreo: 4.00 m Tipo de Material: GRANULAR

Prog. Muestreo: CANTERA SOLANGE AR Tramo Evaluado: --- Coordenadas E: 289713.726 Coordenadas N: 8058294.8

Elevación m.s.n.m.: --- Requisito y/o Especificación del Solicitante: --- Fecha de Ensayo: 9/05/2025

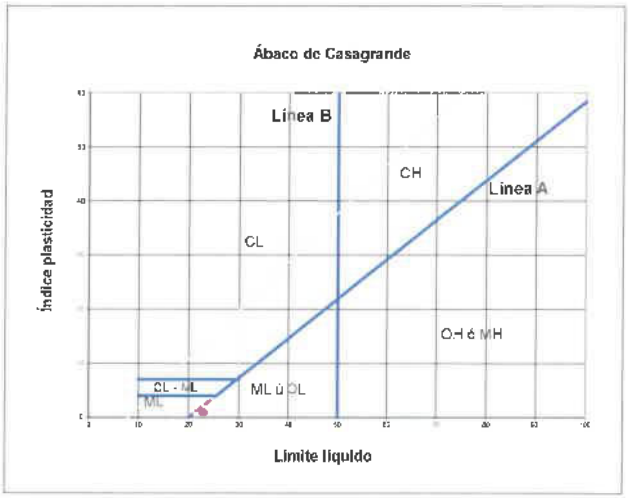
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	DATOS
Diámetro 10 (D_{10})	%	0.210
Diámetro 30 (D_{30})	%	1.550
Diámetro 60 (D_{60})	%	8.180
Coeficiente de Uniformidad (Cu)	%	38.95
Coeficiente de Curvatura (Cc)	%	1.40
Pasante Malla N° 04	%	45.12
Pasante Malla N° 200	%	2.61
Límite Líquido	%	23.00
Límite Plástico	%	22.00
Índice de Plasticidad	%	1.00

CLASIFICACIÓN DEL SUELO MÉTODO S.U.C.S.

GW

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

Grava bien graduada con arena con bloques



OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN DE DOCUMENTO

Ing. Cesar Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación.

MÉTODO DE CLASIFICACIÓN AASHTO

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025
HOJA 08 DE 08

INFORMACIÓN GENERAL

Proyecto: ESTUDIO DE SUELOS

Solicitante: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA R.U.C.: — CONTRATO N°: —

Contacto: — Teléfono: — Departamento: MOQUEGUA Provincia: MARISCAL NIETO Distrito: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Calicata: C-01 Profundidad: 4.00 m Estrato N°: E-02 Zona de Muestreo: — Tipo de Material: GRANULAR

Prog. Muestreo: CANTERA SOLANGE AR Tramo Evaluado: — Coordenadas E: 299713.728 Coordenada N: 8098294.8

Elevación m.s.n.m.: — Requisito y/o Especificación del Solicitante: — Fecha de Ensayo: 9/05/2025

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	DATOS
Pasante Malla N° 10	%	27.96
Pasante Malla N° 40	%	13.43
Pasante Malla N° 200	%	2.81
Límite Líquido	%	23.00
Límite Plástico	%	22.00
Indice de Plasticidad	%	1.00

Valor de Indice de Grupo	0

CLASIFICACIÓN DEL SUELO MÉTODO AASHTO
A-1-a (0)

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL
Excelente a bueno como subgrado Fragmentos de roca, grava y arena

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN DE DOCUMENTO

Ing. Cesar Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación.

E-03

INFORME DE LABORATORIO DE SUELOS

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

DIVISIÓN DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS

HOJA 01 DE 15

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA R.U.C.: --- COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-165-2025 ORDEN DE SERVICIO N°: ---

CONTACTO: --- TELÉFONO: --- DEPARTAMENTO: MOQUEGUA PROVINCIA: M. NIETO DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE CALICATA N°: C-01 ESTRATO N°: E-03 PROFUNDIDAD: 4.00 m. TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO NÚMERO DE MUESTRA: M-02 COORDENADA N: 8068294.731 COORDENADA E: 289713.73 ALTITUD: ---

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2025 FECHA DE RECEPCIÓN: 6/05/2025 FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

LUGAR DE MUESTREO: CANTERA SOLANGE AR TRAMO EVALUADO: --- REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: ---

INFORME

Descripción de Ensayo	Normas	Resultados	Registro de Ensayo	Observación
DISTRIBUCIÓN GRANULOMETRICA DE SUELOS POR TAMIZADO	Norma: ASTM D6913/6913M-17, ASTM D 422, AASHTO T-88, MTC E107, NTP 339.128	% Pasante: 3 in 91.13 %; 2 in 84.51 %; 1 1/2 in 76.59 %; 1 in 69.51 %; 3/4 in 62.65 %; 3/8 in 52.15 %; N° 04 39.95 %; % Pasante: N° 10 32.11 %; N° 20 24.74 %; N° 40 18.13 %; N° 60 14.56 %; N° 100 11.19 %; N° 140 7.09 %; N° 200 1.86 %	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 02 de 15	---
DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN SUELOS	Normas: ASTM D2216-19, MTC E 108, NTP 339.127	Porcentaje de Humedad = 2.68 %	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 03 de 15	—
LIMITE LÍQUIDO, LIMITE PLÁSTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS	Normas: ASTM D4318-17e1, AASTHO T 89, AASTHO T 90, MTC E 110, MTC E 111, NTP 339.129	Límite líquido = 22 %; Límite Plastico = NP; Índice de Plasticidad = NP	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 04 de 15	---
DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZA Y MATERIA ORGÁNICA DE TURBAS Y OTROS SUELOS ORGÁNICOS	Normas: ASTM D2974	Contenido de Materia Orgánica = 0.22	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 05 de 15	---
DETERMINACION DEL VALOR DE pH EN SUELOS Y AGUA SUBTERRANEA	Norma: ASTM D 4792, MTC E 129, NTP 339.176	LECTURA DE pH PROMEDIO: = 7.065	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 06 de 15	—
SALES SOLUBLES EN AGREGADOS	Normas: ASTM D1888, MTC E 219, NTP 339.177	Contenido de sales Agregado Grueso = 0.07 %; Contenido de Sales Agregado Fino = 0.06 %	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 07 de 15	---
ENSAYOS QUIMICOS DETERMINACIÓN DE CLORUROS Y SULFATOS	Normas: ASTM D1888, MTC E 219, NTP 339.177	Contenido de Cloruros = 0.06 %; Contenido de Sulfatos = 0.04 %	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 08 de 15	---
METODO DE ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SUELOS Y AGREGADOS MEDIANTE PICNOMETRO DE AGUA	Normas: ASTM C127, ASTM D854, AASTHO T-85, AASTHO T-100, , MTC E 113, MTC E 206, NTP 339.131, NTP 400.021	Gravedad Específica = 2.576 g/cm3; Porcentaje de Absorción = 1.767 %	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 09 de 15	---
DENSIDAD NATURAL DEL SUELO METODO CONO DE ARENA	Normas: ASTM D 1556, MTC E 117	Densidad Natural Seca 1.667 gr/cm3	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 10 de 15	---
METODO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS S.U.C.S.	ASTM D 2487	GW Grava bien gradiuada con arena	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 11 de 15	---
METODO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO	—	A - 1 - a(0) Excelente a bueno como subgrado Fragmentos de roca, grava y arena	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 12 de 15	—
ENSAYO DE CORTE DIRECTO RESIDUAL	Normas: ASTM D 3080	Ángulo de Fricción Interna 32.58°; Cohesión 0.04 %	AP-REG-LS-165-2025 Hoja 13 de 15	---

Ing. Cesar Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 166239

APCOOR S.A.C. Ingeniería Gerencia y Construcción GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANONIMA CERRADA SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD FORMATO: DISTRIBUCIÓN GRANULOMETRICA DE SUELOS POR TAMIZADO	Código de Documento:	AP-OP-01-02
		Fecha de Aprobación:	21/05/2021
		Versión de Documento:	01
		Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Paginas:	01 de 01

DISTRIBUCIÓN GRANULOMETRICA DE SUELOS POR TAMIZADO

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-166-2025

Norma: ASTM D6913/6913M-17, ASTM D 422, AASHTO T-88, MTC E107, NTP 339.128

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: — — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-166-2026 — ORDEN DE SERVICIO N°: —

CONTACTO: — — TELÉFONO: — — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA — PROVINCIA: M. NIETO — DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE — CALICATA N°: C-01 — ESTRATO N°: E-03 — PROFUNDIDAD: 4.00 m. — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-02 — COORDENADA N: 8093294.792 — COORDENADA E: 299713.726 — ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2026 — FECHA DE RECEPCIÓN: 8/05/2025 — FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

PROGRESIVA DE MUESTREO: — — TRAMO EVALUADO: — — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

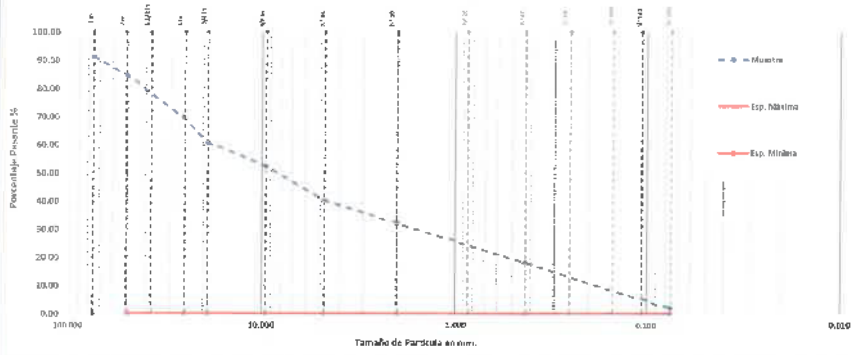
DATOS DE ENSAYO

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MASAS
Masa Seca Fraccion Gruesa Retenida en Tamiz 3/4 in	g	27,312.00
Masa Seca Fracción Fina Retenida en Tamiz N° 04	g	14,362.00
Masa Seca Fracción Fina Pasante en Tamiz N° 04	g	27,726.00
Masa Seca Total	g	69,400.00

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
Tamaño Máximo de la Muestra	in	1.00
Tamaño Máximo Nominal de la Muestra	in	—
Masa Fracción Fina a Ensayar	g	1,074.76
Tipo de Procedimiento	—	—

Tamiz de Diámetro Ø 8 in			Masas Secas Retenidas					ESPECIFICACIÓN		Tolerancias %
Abertura ø in [Pulg.]	Abertura en [mm.]	Certificado de Calibración	Masa Retenida (g.)	Factor de Tamizado	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Acumulado (%)	Porcentaje Pasante (%)	Mínimo Pasante %	Máximo Pasante %	
3 in	75.000	TC-07207-2024	6,158.00	0.001441	8.87	8.87	91.13	---	---	
2 in	50.000	TC-07205-2024	4,589.00	0.001441	6.61	15.49	84.51	---	---	
1 1/2 in	37.500	TC-07189-2024	5,426.00	0.001441	7.82	23.31	76.69	---	---	
1 in	25.000	TC-07188-2024	4,985.00	0.001441	7.18	30.49	69.51	---	---	
3/4 in	19.000	TC-07187-2024	6,151.00	0.001441	8.86	39.35	60.65	---	---	
3/8 in	9.500	TC-07191-2024	5,894.00	0.001441	8.49	47.85	52.15	---	---	
N° 04	4.750	TC-07216-2024	8,468.00	0.001441	12.20	60.05	39.95	---	---	
N° 10	2.000	TC-07214-2024	210.80	0.037174	7.84	67.89	32.11	---	---	
N° 20	0.850	TC-07210-2024	198.40	0.037174	7.38	75.26	24.74	---	---	
N° 40	0.425	TC-07208-2024	176.50	0.037174	6.56	81.82	18.18	---	---	
N° 60	0.250	TC-05970-2024	97.20	0.037174	3.61	85.44	14.56	---	---	
N° 100	0.150	TC-07186-2024	90.80	0.037174	3.38	88.81	11.19	---	---	
N° 140	0.106	TC-07168-2024	110.20	0.037174	4.10	92.91	7.09	---	---	
N° 200	0.075	TC-07167-2024	140.80	0.037174	5.23	98.14	1.86	---	---	
< N° 200	—	—	50.00	0.037174	1.86	100.00	0.00	---	---	

Gráfico de Distribución Granulométrica



Porcentaje de Sobretamaño (%)	8.9
Porcentaje de Grava (%)	51.2
Porcentaje de Arena (%)	38.1
Porcentaje de Finos (%)	1.9
Especificación Granulométrica	—

Diámetro Efectivos	
Diámetro Efectivo 10 (D_{10})	0.14
Diámetro Efectivo 20 (D_{20})	0.54
Diámetro Efectivo 30 (D_{30})	1.67
Diámetro Efectivo 50 (D_{50})	8.66
Diámetro Efectivo 60 (D_{60})	18.28
Coef. De Uniformidad (C_U)	133.27
Coef. De Curvatura (C_C)	1.11

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACION

Ing. Cesar Poclle Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CODIGO QR

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de validez sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Geotecnia y Construcción — GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/05/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN SUELOS	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN SUELOS

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

Normas: ASTM D2216-19, MTC E 108, NTP 339.127

HOJA 03 DE 15

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: — — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-168-2025 — ORDEN DE SERVICIO N°: —

CONTACTO: — — TELÉFONO: — — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA — PROVINCIA: M. NIETO — DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE — CALICATA N°: C-01 — ESTRATO N°: E-03 — PROFUNDIDAD: 4.00 m. — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-02 — COORDENADA N: 8098294.793 — COORDENADA E: 289713.728 — ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 8/05/2025 — FECHA DE RECEPCIÓN: 9/05/2025 — FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

PROGRESIVA DE MUESTREO: — — TRAMO EVALUADO: — — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

SELECCION DE METODO DE ENSAYO

Método A (± 1%)		Método B (± 0.1%)	X

DATOS DE EQUIPO DE SECADO EMPLEADO

Horno Eléctrico	X	Temperatura de Secado	110 °C	Suelo Granular	X	Suelo Fino	

Certificado de Calibración N° TC-07184-2024 — Código de Equipo AP-17058-LAB

DATOS DE ENSAYO

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	22.00			
Masa de Recipiente	g	—			
Masa de Suelo Humedo + Recipiente	g	846.25			
Masa de Suelo Seco + Recipiente	g	824.15			
Masa del Agua	g	22.10			
Masa de Suelo Seco	g	824.15			
Contenido de Humedad en el Suelo	%	2.68			

Resultado Contenido de Humedad en la Muestra: 2.68 %

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACION

Ing. Cesar Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Gerencia y Construcción — GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/05/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	LIMITE LÍQUIDO, LIMITE PLÁSTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

LIMITE LÍQUIDO, LIMITE PLÁSTICO E INDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-166-2025

Normas: ASTM D4318-17e1, AASTHO T 89, AASTHO T 90, MTC E 110, MTC E 111, NTP 339.129

HOJA 04 DE 15

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: --- — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-166-2025 — ORDEN DE SERVICIO N°: ---

CONTACTO: --- — TELÉFONO: --- — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA — PROVINCIA: M. NIETO — DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE — CALICATA N°: C-01 — ESTRATO N°: E-03 — PROFUNDIDAD: 4.00 m. — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-02 — COORDENADA N: 8098294.793 — COORDENADA E: 299713.726 — ALTITUD: ---

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2025 — FECHA DE RECEPCIÓN: 6/05/2025 — FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

PROGRESIVA DE MUESTREO: --- — TRAMO EVALUADO: --- — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: ---

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Secado al Aire		Agua Destilada para Mezcla	X	Mecdado de Partículas de Arena Removidas en Cápsula	X
Secado al Horno		Agua Desmineralizada para Mezcla		Lavado de Muestra por Tamiz N° 40	
Humedecida 24h	X	Otro Tipo de Agua		Tamizado en Seco de Muestra por Tamiz N° 40	

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE MATERIAL

Normas: ASTM D4318-17e1, AASTHO T 89, MTC E 110, NTP 339.129

DATOS DE EQUIPO EMPLEADO

Equipo Manual: X — Equipo Motorizado: — — Ranurador Metálico: — — Ranurador Plástico: X

Certificado de Calibración N°: TC-07166-2024 — Código de Equipo: AP-16025-LAB

Método Multipunto

Descripción	Unidad	Punto N° 01	Punto N° 02	Punto N° 03
Número de Cápsula	Nro.	11	13	15
Número de Golpes	Nro.	15	26	36
Temperatura Ambiente	°C	24.50	24.50	24.50
Suelo Humedo + Masa de Capsula	g	58.89	62.05	62.58
Suelo Seco + Masa de Cápsula	g	56.25	57.86	59.05
Temperatura de Secado	°C	110	110	110
Masa del Agua Contenida	g	3.64	4.19	3.83
Masa de la Cápsula	g	40.15	38.78	40.89
Masa del Suelo Seco	g	16.1	19.08	18.16
Contenido de Humedad	%	22.61	21.96	21.09

Método del Unipunto

Descripción	Unidad	Punto N° 01
Número de Cápsula	Nro.	
Número de Golpes	Nro.	
Temperatura Ambiente	°C	
Suelo Humedo + Masa de Capsula	g	
Suelo Seco + Masa de Cápsula	g	
Temperatura de Secado	°C	
Masa del Agua Contenida	g	
Masa de la Cápsula	g	
Masa del Suelo Seco	g	
Contenido de Humedad	%	

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO DE SUELOS

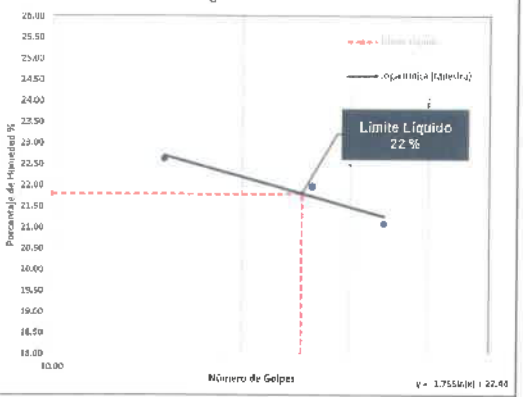
Normas: ASTM D4318-17e1, AASTHO T 90, MTC E 111, NTP 339.129

Descripción	Unidad	Punto N° 01	Punto N° 02
Número de Cápsula	Nro.		
Temperatura Ambiente	°C		
Suelo Humedo + Masa de Capsula	g		
Suelo Seco + Masa de Cápsula	g		
Temperatura de Secado	°C		
Masa del Agua Contenida	g		
Masa de la Cápsula	g		
Masa del Suelo Seco	g		
Contenido de Humedad	%		

RESULTADOS

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	RESULTADOS
Limite Líquido del Suelo (LL)	%	22
Limite Plástico del Suelo (LP)	%	NP
Indice de Plasticidad del Suelo (IP)	%	NP
Indice de Liquidez (IL)	---	0.12
Interpretación del Indice de Liquidez (IL)	---	Estado Plastico

Diagrama de Fluidez



OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN

Ing. Cesar Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46628

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Geotécnica y Construcción — GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/05/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZA Y MATERIA ORGÁNICA DE TURBAS Y OTROS SUELOS ORGÁNICOS	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZA Y MATERIA ORGÁNICA DE TURBAS Y OTROS SUELOS ORGÁNICOS

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

Normas: ASTM D2974

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: — — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-165-2025 — ORDEN DE SERVICIO N°: —

CONTACTO: — — TELÉFONO: — — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA — PROVINCIA: M. NIETO — DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACION DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE — CALICATA N°: C-01 — ESTRATO N°: E-03 — PROFUNDIDAD: 4.00 m — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-02 — COORDENADA N: 8086254.793 — COORDENADA E: 296745.728 — ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 8/05/2025 — FECHA DE RECEPCIÓN: 9/05/2025 — FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

PROGRESIVA DE MUESTREO: — — TRAMO EVALUADO: — — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

DATOS DE EQUIPO DE SECADO EMPLEADO

Horno Eléctrico	X	Temperatura de Secado	441 °C	Suelo Granular	X	Suelo Fino	

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	1.00			
Masa de Recipiente	g	0.00			
Masa de Suelo Humedo + Recipiente	g	993.80			
Masa de Suelo Seco + Recipiente	g	987.80			
Masa del Agua	g	6.00			
Masa de Suelo Seco	g	987.80			
Contenido de Humedad en el Suelo	%	0.61			
Promedio de Contenido de Humedad	%	0.61			

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	T-14			
Masa de Recipiente	g	81.85			
Masa de Suelo Seco + Recipiente	g	146.25			
Temperatura de Horno Mufla	°C	441.00			
Fecha de Ingreso a Horno	dd/mm/yy	9/05/2025			
Hora de Ingreso a Horno	hh:mm:ss	08:24:00			
1er. Registro: Masa Ceniza + Recipiente	g	146.17			
Fecha de Ingreso a Horno	dd/mm/yy	9/05/2025			
Hora de Ingreso a Horno	hh:mm:ss	12:40:00			
2do. Registro: Masa Ceniza + Recipiente	g	146.11			
Fecha de Ingreso a Horno	dd/mm/yy	9/05/2025			
Hora de Ingreso a Horno	hh:mm:ss	15:15:00			
Masa de Suelo Seco	g	64.40			
Masa de Ceniza	g	64.26			
Contenido de Ceniza	%	99.78			
Contenido de Materia Orgánica	%	0.22			

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN

Ing. César Pacha Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CODIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., teniendo carácter de veracidad sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Geotecnia y Construcción GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/06/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	DETERMINACION DEL VALOR DE pH EN SUELOS Y AGUA SUBTERRANEA	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

DETERMINACION DEL VALOR DE pH EN SUELOS Y AGUA SUBTERRANEA

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-166-2026

Norma: ASTM D 4792, MTC E 129, NTP 339.176

HOJA 06 DE 15

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA R.U.C.: — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-165-2026 ORDEN DE SERVICIO —

CONTACTO: — TELÉFONO: — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA PROVINCIA: MARISCAL NIETO DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE CALICATA N°: C-01 ESTRATO N°: E-03 PROFUNDIDAD: 4.00 m. TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO NÚMERO DE MUESTRA: M-03 COORDENADA N: 8098294.79 COORDENADA E: 289713.726 ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2025 FECHA DE RECEPCIÓN: 6/05/2025 FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

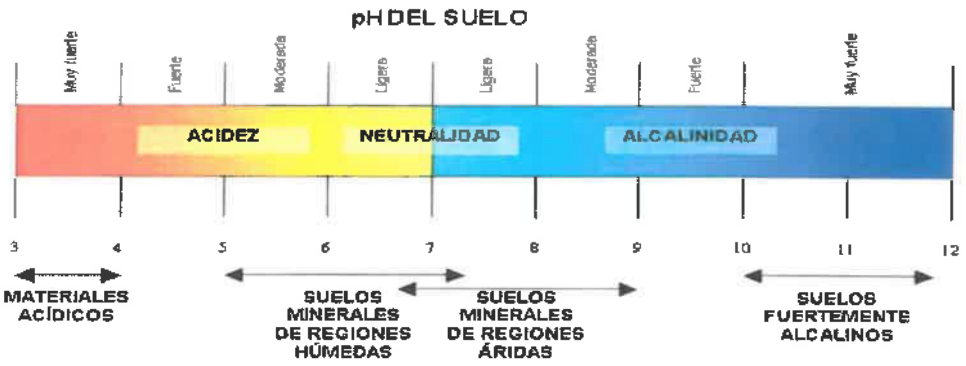
LUGAR DE MUESTREO: CANTERA SOLANGE AR TRAMO EVALUADO: — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

DATOS DEL EQUIPO UTILIZADO

Equipo Utilizado: POTENCIOMETRO pH Código de Equipo: AP-17025-LAB

DATOS DE ENSAYO VALOR pH EN SUELOS Y AGUA SUBTERRANEA

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	1.00	3.00		
Masa del Recipiente	g	114.25	116.52		
Masa de Recipiente + Suelo	g	146.11	148.03		
Masa del Suelo	g	31.99	31.18		
Masa del Agua Destilada	g	70.00	70.00		
Masa de Recipiente + Suelo + Agua Destilada	g	216.24	217.70		
Lectura pH	Und.	7.06	7.11		



LECTURA DE pH PROMEDIO: **7**

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN

Ing. Cesar Peche Hernandez
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Gerencia y Construcción GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/06/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	SALES SOLUBLES EN AGREGADOS	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

SALES SOLUBLES EN AGREGADOS

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

Normas: ASTM D1888, MTC E 219, NTP 339.177

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA R.U.C.: -- COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-165-2025 ORDEN DE SERVICIO N°: ---

CONTACTO: --- TELÉFONO: --- DEPARTAMENTO: MOQUEGUA PROVINCIA: M. NIETO DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE CALICATA N°: C-01 ESTRATO N°: E-03 PROFUNDIDAD: 4.00 m. TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO NÚMERO DE MUESTRA: M-02 COORDENADA N: 8088264.783 COORDENADA E: 298713.728 ALTITUD: --

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2025 FECHA DE RECEPCIÓN: 5/06/2025 FECHA DE ENSAYO: 9/06/2025 FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

PROGRESIVA DE MUESTREO: --- TRAMO EVALUADO: --- REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: ---

DATOS DE EQUIPO DE SECADO EMPLEADO

Horno Eléctrico	X	Temperatura de Secado	110 °C	Suelo Granular	X	Suelo Fino	

Certificado de Calibración N°: TC-07184-2024 Código de Equipo: AP-17036-LAB

DATOS DE ENSAYO CONTENIDO DE SALES EN AGREGADO GRUESO

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	12.00			
Masa del Recipiente	g	136.32			
Masa de Recipiente + Agua + Sal	g	235.26			
Masa de Recipiente + Sal	g	136.39			
Masa de Sal Contenida	g	0.07			
Masa de Agua	g	98.87			
Porcentaje de Sal Contenida	%	0.07			
Contenido de Sales	ppm	708			

Resultado Porcentaje de Sales en la Muestra: 0.07 %

Resultado Contenido de Sales en la Muestra: 708 ppm

DATOS DE ENSAYO CONTENIDO DE SALES EN AGREGADO FINO

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	13.00			
Masa del Recipiente	g	135.26			
Masa de Recipiente + Agua + Sal	g	223.60			
Masa de Recipiente + Sal	g	135.33			
Masa de Sal Contenida	g	0.07			
Masa de Agua	g	88.27			
Porcentaje de Sal Contenida	%	0.08			
Contenido de Sales	ppm	793			

Resultado Contenido de Sales en la Muestra: 0.08 %

Resultado Contenido de Sales en la Muestra: 793 ppm

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN

Ing. Cesar Pecha Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., es válido solo en su versión original con las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Geotecnia y Construcción GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD FORMATO: ENSAYOS QUIMICOS DETERMINACIÓN DE CLORUROS Y SULFATOS	Código de Documento:	AP-OP-01-02
		Fecha de Aprobación:	21/05/2021
		Versión de Documento:	01
		Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

ENSAYOS QUIMICOS DETERMINACIÓN DE CLORUROS Y SULFATOS

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

HOJA 08 DE 15

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA R.U.C.: — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-165-2025 ORDEN DE SERVICIO N° —

CONTACTO: — TELÉFONO: — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA PROVINCIA: M. NIETO DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACION DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE CALICATA N°: C-01 ESTRATO N°: E-03 PROFUNDIDAD: 4.00 m. TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO NÚMERO DE MUESTRA: M-02 COORDENADA N: 8096284.793 COORDENADA E: 399713.726 ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2025 FECHA DE RECEPCIÓN: 6/05/2025 FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

PROGRESIVA DE MUESTREO: — TRAMO EVALUADO: — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

DATOS DE EQUIPO DE SECADO EMPLEADO

Horno Eléctrico	X	Temperatura de Secado	110 °C	Suelo Granular	X	Suelo Fino	

Certificado de Calibración N° TC-07184-2024 Código de Equipo AP-17033-LAB

DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE CLORUROS

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	13.00	14.00		
Masa del Recipiente	g	135.26	138.52		
Masa del Recipiente + Agua + Cloruros	g	254.25	253.25		
Masa del Recipiente Seco + Cloruros	g	135.31	138.61		
Masa de Contenido de Cloruros	g	0.05	0.09		
Masa de Agua	g	118.94	114.64		
Porcentaje de Cloruros Contenido	%	0.04	0.08		
Contenido de Sales	ppm	420	785		

Resultado Porcentaje de Cloruros en la Muestra 0.06 %

Resultado Contenido de Cloruros en la Muestra 603 ppm

DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE SULFATOS

DESCRIPCIÓN	Unidad	Prueba N° 01	Prueba N° 02	Prueba N° 03	Prueba N° 04
Número de Recipiente	Nro.	22.00	23.00		
Masa del Recipiente	g	132.52	132.66		
Masa del Recipiente + Agua + Sulfatos	g	256.25	254.25		
Masa del Recipiente Seco + Sulfatos	g	132.58	132.71		
Masa de Contenido de Sulfatos	g	0.06	0.05		
Masa de Agua	g	123.67	121.54		
Porcentaje de Sulfatos Contenido	%	0.05	0.04		
Contenido de Sulfatos	ppm	469	411		

Resultado Contenido de Sulfatos en la Muestra 0.04 %

Resultado Contenido de Sulfatos en la Muestra 440 ppm

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN

Ing. Cesar Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CODIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Gerencia y Construcción — GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/05/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	METODO DE ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SUELOS Y AGREGADOS MEDIANTE PICNOMETRO DE AGUA	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Paginas:	01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SUELOS Y AGREGADOS MEDIANTE PICNOMETRO DE AGUA

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

Normas: ASTM C127, ASTM D854, AASTHO T-85, AASTHO T-100, , MTC E 113, MTC E 206, NTP 339.131, NTP 400.021

HOJA 09 DE 15

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: — — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-165-2025 — ORDEN DE SERVICIO N°: —

CONTACTO: — — TELÉFONO: — — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA — PROVINCIA: M. NIETO — DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE — CALICATA N°: C-01 — ESTRATO N° E-03 — PROFUNDIDAD: 4.00 m. — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-02 — COORDENADA N: 8098294.793 — COORDENADA E: 299712.728 — ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 9/05/2025 — FECHA DE RECEPCIÓN: 9/05/2025 — FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

PROGRESIVA DE MUESTREO: — — TRAMO EVALUADO: — — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

DETERMINACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADO GRUESO

Normas: ASTM C127, AASTHO T-85, MTC E 206, NTP 400.021

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Porcentaje de Fracción de Sobretamaño: 39.35 % — Porcentaje de Fracción de Ensayo: 60.65 % — Clasificación S.U.C.S: GW

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	MUESTRA > 3/4 in			3/4 in > MUESTRA > # 04		
		PUNTO 01	PUNTO 02	PROMEDIO	PUNTO 01	PUNTO 02	PROMEDIO
Temperatura de Agua de Ensayo	°C				23.20	23.60	
Masa de Muestra Saturada Superficialmente Seca en el Aire	g				5000.00	5000.00	
Masa de Muestra Saturada Superficialmente Seca en Agua	g				3035.25	3032.50	
Volumen de Masa + Volumen de Vacios	cm^3				1,966.75	1,967.50	
Masa de Material Seco en Estufa a 110°C (24 Horas)	g				4931.25	4928.52	
Volumen de Masa	cm^3				1,898.00	1,896.02	
Gravedad Específica BULK Base Seca	g/cm^3				2.507	2.505	2.506
Gravedad Específica BULK Base Saturada	g/cm^3				2.542	2.541	2.542
Gravedad Específica Aparente Base Seca	g/cm^3				2.598	2.599	2.599
Capacidad de Absorción	%				1.394	1.450	1.422
Porosidad del Agregado	%				3.622	3.770	3.696

DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SUELOS MEDIANTE EL MÉTODO DEL PIGNÓMETRO

Normas: ASTM D854, AASTHO T-100, MTC E 113, NTP 339.131

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Método de Ensayo a Aplicar: A — Muestra Saturada: SI — Tamaño Máx. de Partículas Considerados:

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PUNTO 01	PUNTO 2	PUNTO 3	PROMEDIO
N° de Picnómetro	N°	1.00	2.00	3.00	
Masa de Muestra Saturada Superficialmente Seca en el Aire	g	500.00	500.00	500.00	
Masa de Picnómetro + Agua	g	653.05	652.90	655.69	
Masa de Pignómetro + Agua + Muestra	g	1153.05	1152.90	1155.69	
Masa de Muestra + Agua en el Picnómetro	g	953.89	954.28	956.16	
Volumen de Masa + Volumen de Vacios	cm^3	199.16	198.62	199.53	
Masa de Material Seco en Estufa a 110°C (24 Horas)	g	493.25	496.02	494.25	
Volumen de Masa	cm^3	192.41	194.64	193.78	
Gravedad Específica BULK Base Seca	g/cm^3	2.477	2.497	2.477	2.484
Gravedad Específica BULK Base Saturada	g/cm^3	2.511	2.517	2.505	2.511
Gravedad Específica Aparente Base Saturada	g/cm^3	2.564	2.548	2.551	2.554
Capacidad de Absorción	%	1.368	0.802	1.169	1.111
Porosidad del Agregado	%	3.508	2.045	2.967	2.840

Peso Específico Aparente Promedio (Gs): 2.576 gr/cm^3 — Porcentaje de Absorción Promedio: 1.267 %

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN

Ing. Cesar Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 466233

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

DENSIDAD NATURAL DEL SUELO METODO CONO DE ARENA

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

Normas: ASTM D 1556, MTC E 117

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA R.U.C.: — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-165-2025 ORDEN DE SERVICIO N°: —

CONTACTO: — TELÉFONO: — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA PROVINCIA: M. NIETO DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE CALICATA N°: C-01 ESTRATO N°: E-03 PROFUNDIDAD: 4.00 m. TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO NÚMERO DE MUESTRA: M-02 COORDENADA N: 8083284.793 COORDENADA E: 289713.728 ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2025 FECHA DE RECEPCIÓN: 6/05/2026 FECHA DE ENSAYO: 5/05/2025 FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

LUGAR DE MUESTREO: CANTERA SOLANGE AR TRAMO EVALUADO: — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

DATOS DE ENSAYO METODO CONO DE ARENA

Descripción	Unidad	Punto N° 01	Observaciones
Peso de la Arena + Frasco	gr.	8816.0	
Peso de la Arena Remanente + Frasco	gr.	3488.0	
Peso de la Arena Empleada	gr.	5328.0	
Peso de la Arena en el Cono y Placa	gr.	1570.0	
Peso de la Arena en el Hoyo	gr.	3758.0	
Densidad de la Arena	gr/cm3	1.443	
Volumen del Hoyo	cm3	2602.9	
Peso de la Muestra Extraida del Hoyo + Recipiente	gr.	4455.0	
Peso del Recipiente	gr.	0.0	
Peso de la Muestra Extraida del Hoyo	gr.	4455.0	
Densidad Natural Humeda	gr/cm3	1.712	
Porcentaje de Humedad Natural (Speedy)	%	2.7	
Densidad Natural Seca	gr/cm3	1.667	

DENSIDAD NATURAL SECA	1.667 gr/cm3

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACION

Ing. Cesar Pacha Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 48623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CODIGO QR

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Gerencia y Construcción — GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/06/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	METODO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS S.U.C.S.	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

METODO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS S.U.C.S.

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

HOJA 11 DE 15

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: --- — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-165-2025 — ORDEN DE SERVICIO Nº: ---

CONTACTO: --- — TELÉFONO: --- — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA — PROVINCIA: M. NIETO — DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE — CALICATA Nº: C-01 — ESTRATO Nº: E-03 — PROFUNDIDAD: 4.00 m. — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-02 — COORDENADA N: 8098294.6 — COORDENADA E: 298713.726 — ALTITUD: ---

FECHA DE MUESTREO: 6/06/2025 — FECHA DE RECEPCIÓN: 8/06/2025 — FECHA DE ENSAYO: 9/06/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/06/2025

LUGAR DE MUESTREO: CANTERA SOLANGE AR — TRAMO EVALUADO: --- — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: ---

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	DATOS
Diámetro 10 (D_{10})	%	0.137
Diámetro 30 (D_{30})	%	1.670
Diámetro 60 (D_{60})	%	18.278
Coeficiente de Uniformidad (Cu)	%	133.20
Coeficiente de Curvatura (Cc)	%	1.11
Pasante Malla Nº 04	%	38.96
Pasante Malla Nº 200	%	1.86
Límite Líquido	%	21.78
Límite Plástico	%	NP
Índice de Plasticidad	%	NP

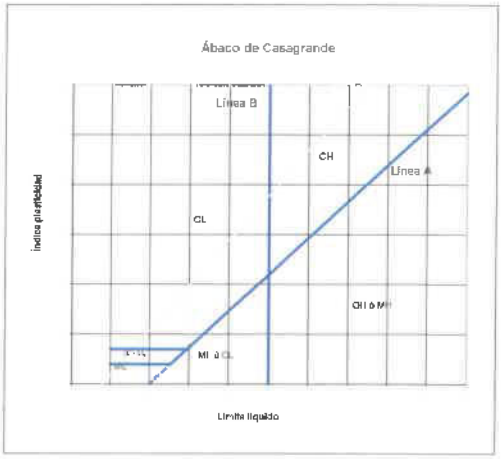
CLASIFICACIÓN DEL SUELO MÉTODO S.U.C.S.

GW



DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

Grava bien graduada con arena



OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN DE DOCUMENTO

Ing. Cesar Paolo Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

METODO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS AASHTO

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-165-2025 — ORDEN DE SERVICIO N°: —

CONTACTO: — — TELÉFONO: — — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA — PROVINCIA: M. NIETO — DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE — CALICATA N°: C-01 — ESTRATO N°: E-03 — PROFUNDIDAD: 4.00 m. — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-02 — COORDENADA N: 8093284.79 — COORDENADA E: 295713.328 — ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2025 — FECHA DE RECEPCIÓN: 6/05/2025 — FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

LUGAR DE MUESTREO: CANTERA SOLANGE AR — TRAMO EVALUADO: — — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	DATOS
Pasante Malla N° 10	%	32.11
Pasante Malla N° 40	%	18.18
Pasante Malla N° 200	%	1.88
Límite Líquido	%	21.79
Límite Plástico	%	NP
Índice de Plasticidad	%	NP

Valor de Indice de Grupo	(0)

CLASIFICACIÓN DEL SUELO MÉTODO AASHTO

A - 1 - a

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL

Excelente a bueno como subgrado Fragmentos de roca, grava y arena

OBSERVACIONES

—

FIRMAS DE VALIDACIÓN DE DOCUMENTO

Ing. Cesar Pastor Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CODIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

CÁLCULO DE CAPACIDAD PORTANTE. (C-01).

APCOOR S.A.C.	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANÓNIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobacion:	21/05/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	ENSAYO DE CORTE DIRECTO RESIDUAL	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Paginas:	01 de 01

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

ENSAYO DE CORTE DIRECTO RESIDUAL

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

Normas: ASTM D 3080

HOJA 13 DE 15

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-165-2025 — ORDEN DE SERVICIO N°: —

CONTACTO: — TELÉFONO: — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA PROVINCIA: M. NIETO DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE — CALICATA N°: C-01 — ESTRATO N°: E-03 — PROFUNDIDAD: 4.05 m. — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-02 — COORDENADA N: 8398204.793 — COORDENADA E: 298713.726 — ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 5/05/2025 — FECHA DE RECEPCIÓN: 6/05/2025 — FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

LUGAR DE MUESTREO: CANTERA SOLANGE AR — TRAMO EVALUADO: — — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

CONTENIDO DE HUMEDAD INICIAL

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	P-01	P-02	P-03
N° de Recipiente	Nro.	11	12	13
Peso de Recipiente	g	33.45	33.58	33.62
Peso de Recipiente + Suelo Húmedo	g	153.65	154.25	155.89
Peso de Recipiente + Suelo Seco	g	143.50	144.50	147.26
Peso del Agua	g	10.07	9.67	8.63
Porcentaje de Humedad	%	8.14	8.71	8.43

CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	P-01	P-02	P-03
N° de Recipiente	Nro.	14	15	17
Peso de Recipiente	g	33.02	33.16	33.81
Peso de Recipiente + Suelo Húmedo	g	156.25	155.05	154.85
Peso de Recipiente + Suelo Seco	g	142.88	142.70	142.95
Peso del Agua	g	13.37	12.35	11.90
Porcentaje de Humedad	%	12.48	12.00	11.82

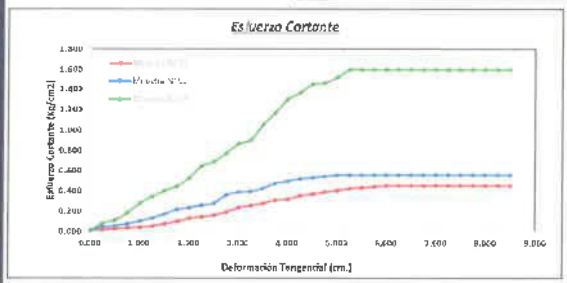
CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA Y APLICACIÓN DE CARGAS

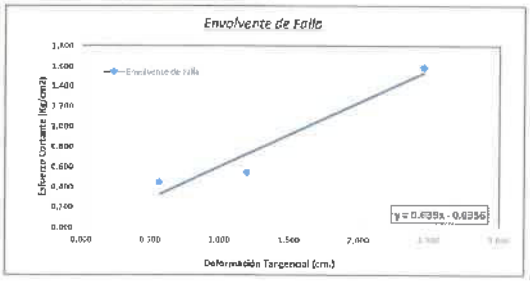
CARACTERISTICAS
Diámetro
5.00 cm.
Alcura
2.11 cm.
Area
19.63 cm2
Volumen
41.43 cm3

APLICACIÓN DE CARGAS				
Descripción	Unidad	P-01	P-02	P-03
Velocidad de Carga	mm/min	0.750	0.750	0.750
Peso de la Semi Caja Superior	kg	1.410	1.410	1.410
Peso del Pistón de Carga	kg	0.220	0.220	0.220
Peso del Pistón de Soporte	kg	3.420	3.420	3.420
Peso de Placa Base de Pesas	kg	0.000	0.000	0.000
Valor de la Pesa	kg	1.000	3.000	7.000
Carga Normal		11.22	23.67	48.26

ESFUERZOS

TIPO DE ESFUERZO	P-01	P-02	P-03
Esfuerzo Normal	0.579	1.201	2.469
Esfuerzo Tangencial	0.446	0.853	1.892





Ángulo de Fricción	32.58°
Cohesión (Kg/cm2)	0.039

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACIÓN DE DOCUMENTO

Ing. César Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de validez sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C.	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANONIMA CERRADA	Código de Documento:	AP-OP-01-02
GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD	Fecha de Aprobación:	21/05/2021
	FORMATO:	Versión de Documento:	01
	DENSIDAD NATURAL DEL SUELO METODO CONO DE ARENA	Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

DENSIDAD NATURAL DEL SUELO METODO CONO DE ARENA

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

Normas: ASTM D 1556, MTC E 117

HOJA 14 DE 15

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA R.U.C.: — COTIZACIÓN Nro.: AP-COT-165-2025 ORDEN DE SERVICIO N°: —

CONTACTO: — TELÉFONO: — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA PROVINCIA: M. NIETO DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE CALICATA N°: C-01 ESTRATO N°: E-03 PROFUNDIDAD: 4.00 m TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO NÚMERO DE MUESTRA: M-02 COORDENADA N: 8089284.783 COORDENADA E: 296713.728 ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2025 FECHA DE RECEPCIÓN: 6/05/2025 FECHA DE ENSAYO: 8/05/2025 FECHA DE VALIDACIÓN: 12/05/2025

LUGAR DE MUESTREO: CANTERA SOLANGE AR TRAMO EVALUADO: — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Tiempo		F. Corte			Esf. Cort.			Esf. Norm		
Seg.	Min.	CD-01	CD-02	CD-03	CD-01	CD-02	CD-03	CD-01	CD-02	CD-03
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.572	1.201	2.458
60.00	1.00	0.20	0.65	1.40	0.010	0.038	0.071	0.572	1.201	2.458
120.00	2.00	0.40	0.85	2.60	0.020	0.043	0.102	0.572	1.201	2.458
180.00	3.00	0.55	1.30	3.40	0.028	0.066	0.173	0.572	1.201	2.458
240.00	4.00	0.80	1.80	5.30	0.031	0.092	0.270	0.572	1.201	2.458
300.00	5.00	0.95	2.40	6.80	0.043	0.122	0.336	0.572	1.201	2.458
360.00	6.00	1.30	3.20	7.70	0.066	0.163	0.392	0.572	1.201	2.458
420.00	7.00	1.80	4.10	8.60	0.092	0.209	0.438	0.572	1.201	2.458
480.00	8.00	2.40	4.40	10.20	0.122	0.224	0.520	0.572	1.201	2.458
540.00	9.00	2.70	4.90	12.50	0.138	0.250	0.637	0.572	1.201	2.458
600.00	10.00	3.00	5.30	13.40	0.153	0.270	0.683	0.572	1.201	2.458
660.00	11.00	3.60	6.90	15.02	0.183	0.352	0.765	0.572	1.201	2.458
720.00	12.00	4.64	7.50	15.90	0.236	0.382	0.811	0.572	1.201	2.458
780.00	13.00	4.85	7.60	17.60	0.247	0.387	0.897	0.572	1.201	2.458
840.00	14.00	5.30	8.20	20.50	0.270	0.418	1.045	0.572	1.201	2.458
900.00	15.00	5.80	9.20	22.80	0.301	0.469	1.162	0.572	1.201	2.458
960.00	16.00	6.10	9.50	25.40	0.311	0.484	1.295	0.572	1.201	2.458
1020.00	17.00	6.80	10.10	26.84	0.346	0.515	1.367	0.572	1.201	2.458
1080.00	18.00	7.10	10.30	26.60	0.362	0.525	1.483	0.572	1.201	2.458
1140.00	19.00	7.60	10.50	28.70	0.382	0.535	1.462	0.572	1.201	2.458
1200.00	20.00	7.80	10.80	28.80	0.397	0.550	1.518	0.572	1.201	2.458
1260.00	21.00	8.20	10.80	31.25	0.418	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
1320.00	22.00	8.35	10.80	31.25	0.426	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
1380.00	23.00	8.55	10.80	31.25	0.436	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
1440.00	24.00	8.75	10.80	31.25	0.446	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
1500.00	25.00	8.75	10.80	31.25	0.446	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
1560.00	26.00	8.75	10.80	31.25	0.446	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
1620.00	27.00	8.75	10.80	31.25	0.446	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
1680.00	28.00	8.75	10.80	31.25	0.446	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
1740.00	29.00	8.75	10.80	31.25	0.446	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
1800.00	30.00	8.75	10.80	31.25	0.446	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
1860.00	31.00	8.75	10.80	31.25	0.446	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
1920.00	32.00	8.75	10.80	31.25	0.446	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
1980.00	33.00	8.75	10.80	31.25	0.446	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458
2040.00	34.00	8.75	10.80	31.25	0.446	0.550	1.592	0.572	1.201	2.458

OBSERVACIONES

—

FIRMAS DE VALIDACION DE DOCUMENTO

Ing. Cesar Peche Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

APCOOR S.A.C. Ingeniería Geotecnia y Construcción — GENERANDO SOLUCIONES PARA USTED	AyP COORPORACIÓN SOCIEDAD ANONIMA CERRADA SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD FORMATO: DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE DE UN SUELO	Código de Documento:	AP-OP-01-02
		Fecha de Aprobación:	21/05/2021
		Versión de Documento:	01
		Estado de Documento:	Vigente
		Cantidad de Páginas:	01 de 01

DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE DE UN SUELO

REGISTRO DE LABORATORIO Nro. AP-REG-LS-165-2025

MÉTODO TERZAGHI — HOJA 15 DE 15

INFORMACIÓN GENERAL

PROYECTO: ESTUDIO DE SUELOS

SOLICITANTE: ENRIQUE RIVALDO VALDERRAMA CHARAJA — R.U.C.: — — COTIZACIÓN Nro.: AP-CO7-165-2025 — ORDEN DE SERVICIO N°: —

CONTACTO: — — TELÉFONO: — — DEPARTAMENTO: MOQUEGUA — PROVINCIA: M. NIETO — DISTRITO: MOQUEGUA

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTREADO POR: POR EL SOLICITANTE — CALICATA N°: C-01 — ESTRATO N°: E-03 — PROFUNDIDAD: 4.00 m. — TIPO DE MATERIAL: GRANULAR

IDENTIFICACIÓN: SACO POLIPROPILENO — NÚMERO DE MUESTRA: M-02 — COORDENADA N: 8082284.793 — COORDENADA E: 295713.725 — ALTITUD: —

FECHA DE MUESTREO: 6/05/2025 — FECHA DE RECEPCIÓN: 6/05/2025 — FECHA DE ENSAYO: 9/05/2025 — FECHA DE VALIDACIÓN: 12/06/2025

LUGAR DE MUESTREO: CANTERA SOLANGE AR — TRAMO EVALUADO: — — REQUISITO Y/O ESPECIFICACIÓN DEL SOLICITANTE: —

DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE DE UN SUELO

DATOS DE LA MUESTRA

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	DATOS
Profundidad de desplante para cimiento cuadrado y circular: Df	m.	3.00
Profundidad de desplante para cimiento continuo Df	m.	3.00
Peso Volumetrico del Suelo, Gm, (Densidad Natural)	Ton/m3	1.667
Cohesión del suelo c	Ton/m2	6.039
Angulo de Fricción interna del Suelo Fi	Grados	33.88
Ancho o Radio del cimiento cuadrado y circular, B ó R	m.	1.80
Ancho o Radio de cimiento continuo, B ó R	m.	1.60
Tipo de Suelo: 1 - Arcilloso Firme, 2 - Arcillosa Blando, 3 - Arenoso		3.0
Factor de Seguridad, F.S.: 3.5 - 3.0 - 2.5		3.5

CALCULOS Y RESULTADOS

FACTORES DEPENDIENTES DEL ANGULO DE FRICCIÓN	
Método Aplicado [1]	MÉTODO TERZAGHI
Factor de Cohesión, Nc =	21.87
Factor de Sobrecarga, Nq =	10.32
Factor de Peso, Ny =	5.08

CALCULO DE ASENTAMIENTOS - MÉTODO ELASTICO	
Relación de Poisson u =	0.25
Factor de Forma If =	1.20
Módulo de Elasticidad Es =	1500.00

LIMITE MÁXIMO DE ASENTAMIENTO: 2.54 cm.	
PROFUNDIDAD (m.)	ASENTAMIENTO (cm.)
0.30 m.	0.51 cm.
0.60 m.	0.71 cm.
0.90 m.	0.90 cm.
1.20 m.	1.10 cm.
1.50 m.	1.30 cm.
1.80 m.	1.50 cm.
2.10 m.	1.70 cm.
2.40 m.	1.90 cm.
2.70 m.	2.10 cm.
3.00 m.	2.30 cm.

CALCULO DE CAPACIDADES DE CARGA ULTIMA (qu) Y CARGA ADMISIBLE (qa)

Tipo de Carga	Profundidad m.	Cimiento Continuo kg/cm²	Cimiento Cuadrado kg/cm²	Cimiento Circular kg/cm²
qc	0.30	1.41	1.36	1.17
qa		0.40	0.38	0.34
qc	0.60	1.93	1.87	1.69
qa		0.55	0.53	0.46
qc	0.90	2.44	2.38	2.25
qa		0.70	0.68	0.63
qc	1.20	2.85	2.80	2.72
qa		0.85	0.83	0.78
qc	1.50	3.47	3.42	3.24
qa		0.98	0.98	0.92
qc	1.80	3.98	3.93	3.75
qa		1.34	1.12	1.07
qc	2.10	4.51	4.45	4.27
qa		1.25	1.27	1.22
qc	2.40	5.02	4.97	4.78
qa		1.43	1.42	1.37
qc	2.70	5.54	5.48	5.30
qa		1.58	1.57	1.51
qc	3.00	6.05	6.00	5.82
qa		1.73	1.71	1.66

OBSERVACIONES

FIRMAS DE VALIDACION DE DOCUMENTO

César Pedro Hernández
ESP. SUELOS, CONCRETO Y ASFALTO
CIP. N° 46623

CERTIFICACIONES

ISO 9001 - 2015

EURO CERT

CÓDIGO QR

SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD NTP ISO/IEC 17025 - 2017

IMPORTANTE: Este documento no puede ser reproducido total o parcialmente sin autorización de APCOOR S.A.C., asimismo carece de veracidad sin las firmas de validación

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UNAM

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

1. DATOS DEL AUTOR

Nombres y Apellidos	: Manuel Jesus Cabañas Lopez
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N°	: 73480571
Correo electrónico	: lopez15.cab@gmail.com
Teléfono/Celular	: 940859170

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

Bachiller	Título Profesional	Magister	Doctor	Segunda Especialidad
	X			

3. TIPO DE PUBLICACIÓN (Marque con una X)

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

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

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

5. DATOS DE LA PUBLICACION

a) Título : MODELAMIENTO GEOTÉCNICO DE TALUDES OPERATIVOS EN CONDICIONES NO AXISIMÉTRICAS CON LA METODOLOGÍA FEM EN LA CANTERA DE ARIDOS SOLANGE AR
b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra : https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html) : 2.07.02
c) Fecha de publicación : 09 de Abril del 2026

6. DATOS DEL ASESOR:

a) Nombres y Apellidos : CHRIST JESUS BARRIGA PARIA
b) DNI/Pasaporte/Cédula : 44331713
c) ORCID : https://orcid.org/0000-0002-7130-9297

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 73480571
NOMBRES Y APELLIDOS : MANUEL JESUS CABAÑAS LOPEZ

LICENCIAS

Licencia Estándar

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

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

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

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

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

Autorizo el depósito (marque con una X).

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

FIRMA : .....



DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 73480571
NOMBRES Y APELLIDOS : MANUEL JESUS CABAÑAS LOPEZ
FECHA : 04 DE MAYO DEL 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

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

Yo, **Manuel Jesus Cabañas Lopez**. bachiller de la Escuela Profesional de **Ingeniería de Minas** de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado (a) con DNI: Nº **73480571** autor(a) de la Tesis / Trabajo de suficiencia profesional titulado **MODELAMIENTO GEOTÉCNICO DE TALUDES OPERATIVOS EN CONDICIONES NO AXISIMETRICAS CON LA METODOLOGIA FEM EN LA CANTERA DE ARIDOS SOLANGE AR.**

Declaro bajo juramento que:

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

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

Moquegua, 04 de Mayo del 2026



Huella digital

Nombres y Apellidos: Manuel Jesus Cabañas Lopez
DNI:73480571

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

MANUEL JESUS CABAÑAS LOPEZ

TESIS FINAL

TESIS

CONFORMIDAD DE TESIS FINAL

Universidad Nacional de Moquegua

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3536200616

Fecha de entrega
13 abr 2026, 11:21 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
13 abr 2026, 11:27 a.m. GMT-5

Nombre del archivo
Tesis_Manuel_Caba_as.pdf

Tamaño del archivo
6.8 MB

139 páginas

26.725 palabras

170.206 caracteres

UNAM

Firmado digitalmente por BARRIGA PARIA Christ Jesus FAU 20449347448 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 13.04.2026 11:29:35 -05:00

13% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

9% Fuentes de Internet
3% Publicaciones
8% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

Fuentes principales

9% Fuentes de Internet
3% Publicaciones
8% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

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

1 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Moquegua 5%

2 Internet
hdl.handle.net <1%

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

4 Internet
www.grafiati.com <1%

5 Internet
oa.upm.es <1%

6 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurimac <1%

7 Internet
www.coursehero.com <1%

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

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

10 Internet
www.researchgate.net <1%

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

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

13 Trabajos del estudiante
FUNIBER <1%

14 Internet
www.repositorio.ufop.br <1%

15 Trabajos del estudiante
Corporación Universitaria Minuto de Dios,UNIMINUTO <1%

16 Internet
repositorio.unjfsc.edu.pe <1%

17 Trabajos del estudiante
Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez <1%

18 Trabajos del estudiante
Universidad Cesar Vallejo <1%

19 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional del Centro del Peru <1%

20 Trabajos del estudiante
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas <1%

21 Internet
repositorio.uap.edu.pe <1%

22 Trabajos del estudiante
Universidad Alas Peruanas <1%

23 Internet
apirepositorio.unh.edu.pe <1%

24 Internet
de.slideshare.net <1%

25 Internet
www.jornadasforestales.com.ar <1%

26	Trabajos del estudiante Universidad San Francisco de Quito	<1%
27	Trabajos del estudiante Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC	<1%
28	Internet repositorio.unica.edu.pe	<1%
29	Trabajos del estudiante Universidad Abierta para Adultos	<1%
30	Trabajos del estudiante Universidad Nacional Agraria de la Selva	<1%
31	Internet 1library.co	<1%
32	Internet repositorio.unfv.edu.pe	<1%
33	Trabajos del estudiante Universidad Andrés Bello	<1%
34	Trabajos del estudiante Universidad Nacional de Colombia	<1%
35	Trabajos del estudiante Universitat Politècnica de València	<1%
36	Internet www.slideshare.net	<1%
37	Publicación KNIGHT PIESOLD CONSULTORES S.A.. "EIA del Proyecto Constancia-IGA0006961", ...	<1%
38	Internet da.montes.upm.es	<1%
39	Internet ojs.brazilianjournals.com.br	<1%

40 Internet
repositorio.unheval.edu.pe <1%

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

42 Internet
repositorio.upeu.edu.pe <1%

43 Internet
repositorio.uta.edu.ec <1%

44 Trabajos del estudiante
uni <1%

45 Publicación
Iván Orozco-Paredes, Rodrigo Cortez-Méndez. "AVANCES DE INVESTIGACIÓN 2026... <1%

46 Trabajos del estudiante
Universidad Peruana de Las Americas <1%

47 Internet
idus.us.es <1%

48 Internet
pubmed.ncbi.nlm.nih.gov <1%

49 Internet
repositorio.unah.edu.pe <1%

50 Internet
repositorio.unamad.edu.pe <1%

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

52 Internet
repositorio.utea.edu.pe <1%

53 Internet
agendamagicademar.blogspot.com <1%

54 Internet
doaj.org <1%

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

56 Internet
repositorio.uancv.edu.pe <1%

57 Internet
repositorio.upt.edu.pe <1%

58 Internet
worldwidescience.org <1%

59 Internet
www2.iadb.org <1%

60 Publicación
Arias Cruz, Jesús Emilio | Díaz Barón, Andrés Felipe. "GeoGebra y el método de Pó... <1%

61 Publicación
Javier Rodríguez García. "Metodología para la optimización del beneficio de la res... <1%

62 Publicación
Ligia Marcela Baspineiro Zabala. "Metodología Híbrida con Python para Enseñanz... <1%

63 Publicación
Pastor Contreras, Wilber. "Evaluación geomecánica para el diseño de reforzamien... <1%

64 Trabajos del estudiante
Universidad Politécnica del Perú <1%

65 Internet
docplayer.es <1%

66 Internet
fastercapital.com <1%

67 Internet
fr.slideshare.net <1%

68 Internet
futur.upc.edu <1%

69 Internet
prezi.com <1%

70 Internet
rcta.unah.edu.cu <1%

71 Internet
red.uao.edu.co <1%

72 Internet
repositorio.pedagogicochimbote.edu.pe <1%

73 Internet
repositorio.uct.edu.pe <1%

74 Internet
repositorio.upsjb.edu.pe <1%

75 Internet
trid.trb.org <1%

76 Internet
vdocuments.pub <1%

77 Internet
vsip.info <1%

78 Internet
www.centrogeotecnico.com <1%

79 Internet
www.colibri.udelar.edu.uy <1%

80 Internet
www.psicoconsult.com <1%

81 Internet
www.tdx.cat <1%

82 Internet

www.uv.es <1%

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 442-2026-CU

Moquegua, 30 de junio de 2026

VISTOS:

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

CONSIDERANDO:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Universidad Nacional de Moquegua

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO

N° 442-2026-CU

Moquegua, 30 de junio de 2026

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

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

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

SE RESUELVE:

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

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

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

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

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

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

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

REGÍSTRESE, PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE;

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA SECRETARIA GENERAL

MTRO. JOSE LUIS PACHECO CACERES
SECRETARIO GENERAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA CONSEJO UNIVERSITARIO

DR. HUGO RUBEN MARCA MAQUERA
RECTOR
PRESIDENTE DEL CONSEJO UNIVERSITARIO

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

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