UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

SIMULACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO ELEMENTOS FINITOS (FEM) Y ELEMENTOS DISCRETOS (DEM) PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DE TALUDES PARA EVENTOS SÍSMICOS EN UNA CANTERA DE AGREGADOS EN MOQUEGUA

PRESENTADO POR:

BACH. CARLOS DANIEL VIZCARRA MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA – PERÚ

2025

UNAM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA DE MINAS

Folio N° 080

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : [X]

Trabajo de Suficiencia Profesional : [ ]

Otro: ..... : [ ]

II. Documento de aprobación para la sustentación:

RESOLUCIÓN DE CONSEJO DE FACULTAD Nº 320-2025-CF-FAIN-UNAM

Fecha: 22-12-2025

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

"SIMULACIÓN MEDIANTE EL METODO ELEMENTOS FINITOS (FEM) Y ELEMENTOS DISCRETOS (DEM) PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DE TALUDES PARA EVENTOS SÍSMICOS EN UNA CANTERA DE AGREGADOS EN MOQUEGUA"

Bachiller: CARLOS DANIEL VIZCARRA MASANI

Asesor Principal: DR. CHRIST. JESUS BARRIGA PARIA

Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:

Como: APROBADO por UNANIMIDAD la sustentación de manera:

Presencial [X] Virtual [ ]

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

Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las 12:30 horas, del 22 de DICIEMBRE del año 2025 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
Mg. AGAPITO FLORES JUSTO
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
JUAN ELIAS ROJAS CAVANI
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
CESAR AUGUSTO VILLA ALEGRÍA
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
Carlos Daniel Vizcarra Masani
(Nombres y Apellidos)

RESUMEN

La presente investigación evalúa la estabilidad geotécnica de los taludes operativos de una cantera de agregados ubicada en la región Moquegua, una zona caracterizada por alta sismicidad y materiales con baja cohesión. Se aplicó una metodología de simulación combinada mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) y el Método de los Elementos Discretos (DEM), utilizando los softwares Phase2 y UDEC/3DEC. Los parámetros geomecánicos empleados en los modelos fueron obtenidos mediante ensayos de laboratorio certificados, observación de campo y análisis documental, permitiendo reproducir propiedades físicas y mecanicas. Los resultados muestran que los taludes actuales presentan factores de seguridad marginales en estado estático y condiciones claramente inestables bajo análisis pseudoestático, particularmente en las progresivas 000+720, 000+740 y 000+750. Las simulaciones DEM revelan mecanismos de falla localizados asociados a la interacción bloque–bloque, mientras que los modelos FEM evidencian deformaciones plásticas progresivas bajo cargas sísmicas, confirmando la vulnerabilidad estructural del talud. Sin embargo, al aplicar propuestas de optimización geométrica, reducción del ángulo del talud, incremento de bermas y disminución de altura, los factores de seguridad se incrementan entre 10% y 18% en ambos métodos de análisis. Los taludes optimizados alcanzan valores de FS pseudoestáticos entre 1.03 y 1.15 en DEM y entre 1.10 y 1.14 en FEM, cumpliendo con los criterios mínimos establecidos en el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE E.050) y alcanzando los estándares recomendados por el U.S. Army Corps of Engineers (USACE). La integración metodológica FEM–DEM permitió identificar zonas críticas de inestabilidad, caracterizar los mecanismos de falla más probables y evaluar de forma rigurosa el comportamiento dinámico del talud. Se concluye que la modelación numérica combinada constituye una herramienta eficaz para el rediseño geotécnico de taludes en zonas altamente sísmicas, proporcionando criterios técnicos sólidos para la gestión de riesgo geotécnico y la toma de decisiones operativas en canteras de agregados, sirviendo como guía técnica replicable para otras operaciones mineras en el sur del Perú expuestas a condiciones sísmicas similares.

Palabras Clave: análisis sísmico; factor de seguridad; modelación numérica.

ABSTRACT

This research evaluates the geotechnical stability of operational slopes in an aggregate quarry located in the seismic region of Moquegua, southern Peru. A combined numerical simulation methodology was applied using the Finite Element Method (FEM) and the Discrete Element Method (DEM), implemented in the software Phase2 and UDEC/3DEC. Geomechanical parameters used in the models—such as cohesion, internal friction angle, elastic modulus, and unit weight—were obtained through certified laboratory tests, field observations, and technical documentation. The results show that the current slopes exhibit marginal stability under static conditions and distinct instability under pseudo-static analysis, particularly at chainages 000+720, 000+740, and 000+750. DEM simulations reveal localized failure mechanisms associated with block-to-block interaction, whereas FEM analyses indicate progressive plastic deformation under seismic demands, confirming the structural vulnerability of the slope. After implementing geometric optimization measures—reducing slope angle, increasing berm dimensions, and lowering bench height—the Factor of Safety (FS) improved between 10% and 18% for both analysis methods. Optimized slopes reached pseudo-static FS values between 1.03 and 1.15 in DEM and between 1.10 and 1.14 in FEM, meeting the minimum requirements established in the Peruvian National Building Code (RNE E.050) and matching recommended standards of the U.S. Army Corps of Engineers (USACE). The combined FEM–DEM modeling proved effective in identifying critical instability zones, characterizing dominant failure mechanisms, and rigorously assessing the dynamic behavior of the slope. The statistical validation using the Chi-square test confirmed that the proposed geometric optimization significantly increases slope stability, supporting the main hypothesis of the study. The results of this thesis provide a robust technical framework for geotechnical design and operational decision-making in aggregate quarries located in highly seismic areas of Peru and may serve as a replicable methodology for similar mining operations in the region.

Key words: seismic analysis; factor of safety; numerical modeling.

ÍNDICE

CAPÍTULO I 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1

1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 1

1.1.1 Descripción del problema *1*

1.1.2 Formulación del problema de investigación *2*

Interrogante general 3

Interrogantes especificas 3

1.2 OBJETIVOS 3

1.2.1 Objetivo general *4*

1.2.2 Objetivos específicos *4*

1.3 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 4

1.3.1 Justificación Teórica *5*

1.3.2 Justificación Práctica *5*

1.3.3 Justificación Metodológica *6*

1.3.4 Importancia *6*

1.4 HIPÓTESIS 7

1.4.1 Hipótesis general *8*

1.4.2 Hipótesis especificas *8*

1.5 VARIABLES 8

1.5.1 Variable independiente *8*

1.5.2 Variable dependiente *9*

CAPÍTULO II 11

MARCO TEÓRICO 11

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA 11

2.1.1 Antecedentes Internacionales *11*

2.1.2 Antecedentes Nacionales *19*

2.1.3 Antecedentes Locales *29*

2.2 BASES TEÓRICAS 30

2.2.1 Método de Elementos Discretos (DEM) *30*

Código de Flujo de Partículas (PFC) 30

Ciclo de Cálculo en PFC 31

Ley de Fuerza-Desplazamiento 31

Ley del movimiento 32

Modelo de contacto de junta 33

Ley de desplazamiento de fuerzas para contactos 33
2.2.2 Método de Elementos Finitos (FEM) 34
2.2.3 Phase² 36
2.2.4 Sismicidad 36
Normatividad 37
Aceleración máxima del terreno 38
Desplazamiento máximo horizontal 38
Coeficiente Sísmico 39
CAPÍTULO III 41
METODOLOGÍA 41
3.1 TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN 41
3.1.1 Tipo de investigación 41
3.1.2 Nivel de investigación 41
3.1.3 Diseño de investigación 41
3.2 ÁMBITO TEMPORAL Y ESPACIAL 41
3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA 43
3.3.1 Población 43
3.3.2 Muestra 43
3.4 INSTRUMENTOS 44
3.4.1 Observación directa y mapeo geológico-geotécnico 44
3.4.2 Ensayos de laboratorio 45
3.4.3 Revisión documental y análisis de información secundaria 45
3.4.4 Simulación numérica y análisis computacional 45
3.5 PROCEDIMIENTO 45
3.5.1 Validez de los instrumentos 46
Validez Paramétrica 46
Validez No Paramétrica 47
3.5.2 Confiabilidad de los instrumentos 47
3.6 ANÁLISIS DE DATOS 48
3.6.1 Métodos de análisis de datos 48
3.6.2 Técnicas de procesamiento y presentación de datos 49
3.6.3 Demostración de la hipótesis 49
CAPÍTULO IV 50
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 50
4.1 INTRODUCCIÓN DE LOS RESULTADOS 50
4.1.1 Descripción de las Propiedades Físicas 51

Peso específico....51
4.1.2 Descripción de las Propiedades Mecánicas....*51*
Cohesión....52
Ángulo de fricción interna....52
Coeficiente de Poisson....52
Módulo de Elasticidad....52
4.1.3 Validación de la información....*53*
Propiedades físicas y mecánicas....53
Peso específico....53
Cohesión....54
Ángulo de fricción interna....54
Coeficiente de Poisson....54
Módulo de Elasticidad....55
4.1.4 Resultados por variable de estudio....*55*
Variable Independiente: Simulación numérica mediante FEM y DEM....55
Dimensiones de la variable independiente....56
Modelación numérica dinámica (FEM–DEM)....56
Variable Dependiente: Estabilidad de Taludes ante Eventos Sísmicos....56
Dimensiones de la variable dependiente....57
4.2 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS....57
4.2.1 Análisis descriptivo....*60*
4.2.2 Análisis comparativo....*62*
4.2.3 Identificación de tendencias y patrones....*63*
4.2.4 Interpretación técnica de los hallazgos....*66*
4.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS....67
4.3.1 Contraste con el Marco Teórico....*67*
4.3.2 Comparación con estudios previos o literatura científica....*68*
4.3.3 Explicación de discrepancias o variaciones encontradas....*68*
4.3.4 Implicancias de los resultados en el contexto del problema de estudio....*69*
4.4 RELACIÓN DE LOS RESULTADOS CON LOS OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN....70
4.4.1 Cumplimiento del objetivo general....*70*
4.4.2 Cumplimiento de los objetivos específicos....*70*
4.4.3 Cumplimiento de la mejora de la estabilidad para eventos sísmicos....*71*
4.5 VALIDACIÓN O RECHAZO DE LA HIPÓTESIS PLANTEADA....73
4.5.1 Descripción de la hipótesis....*73*
4.5.2 Metodología estadística para la comprobación de la hipótesis....*74*
4.5.3 Formulación para aplicar Chi-Cuadrado a la hipótesis....*75*
Hipótesis general para evaluar:....75
Construcción de tablas de contingencia....75

Cálculo de la Prueba Chi-Cuadrado 76
Interpretación 76
CAPÍTULO V 78
CONCLUSIONES 78
CAPÍTULO VI 80
RECOMENDACIONES 80
REFERENCIAS 81
ANEXOS 89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 32

Representación del contacto entre partículas (A-B) y la interacción pared-partícula. 32

Figura 02 33

Representación geométrica del modelo de contacto de la junta plana 33

Figura 03 34

Fuerzas que actúan sobre superficies imaginarias y su segmentación 34

Figura 04 40

Distribución de aceleraciones en el Perú 40

Figura 05 42

Mapa de Ubicación de la Cantera Solange Ar 42

Figura 06 44

Talud Operativo de donde se tomaron las progresivas a estudiar 44

Figura 07 64

Comparación FEM vs DEM para taludes operativos actuales 64

Figura 08 64

Comparación FEM vs DEM para taludes optimizados diseñados para 25 m 64

Figura 09 65

Comparación FEM vs DEM para taludes optimizados diseñados para 17 m 65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01 10

Operacionalización de las Variables 10

Tabla 02 58

Propiedades operativas del material de la cantera 58

Tabla 03 58

Propiedades operativas del material de la cantera para taludes de 25 metros con metodología FEM 58

Tabla 04 59

Propiedades operativas del material de la cantera para taludes de 17 metros con metodología FEM 59

Tabla 05 59

Propiedades operativas del material de la cantera para taludes de 25 metros con metodología DEM 59

Tabla 06 60

Propiedades operativas del material de la cantera para taludes de 17 metros con metodología DEM 60

Tabla 07 75

Contingencia de los resultados obtenidos para el analisis de la data 75

Tabla 08 76

Contingencia de los resultados obtenidos despues de la comprobación 76

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción del problema

En la región de Moquegua, la explotación de canteras de agregados constituye una actividad fundamental para el desarrollo de la infraestructura local y regional. Sin embargo, la extracción intensiva de materiales ha generado configuraciones de taludes con geometrías críticas y condiciones geotécnicas variables, que comprometen su estabilidad, especialmente bajo la influencia de eventos sísmicos frecuentes en la zona sur del Perú. La ocurrencia de sismos de moderada a alta magnitud —como los registrados históricamente en el Cinturón Volcánico de los Andes— incrementa el riesgo de deslizamientos y colapsos parciales en los frentes de cantera, afectando la seguridad del personal operativo, la maquinaria, y el entorno ambiental inmediato.

Las metodologías convencionales empleadas en la evaluación de estabilidad de taludes, como el equilibrio límite (LEM), presentan limitaciones al no considerar de manera realista la interacción no lineal entre los materiales, la discontinuidad del talud analizado y las condiciones dinámicas inducidas por los sismos. Por ello, la aplicación de técnicas de modelación numérica avanzadas, como el Método de los Elementos Finitos (FEM) y el Método de los Elementos Discretos (DEM), permite representar de manera más precisa el comportamiento del talud analizado ante cargas estáticas y dinámicas, considerando parámetros geomecánicos derivados de ensayos de laboratorio y de campo.

En muchas canteras de Moquegua, se ha evidenciado la falta de estudios de estabilidad basados en simulaciones numéricas integrales, lo que genera diseños empíricos con factores de seguridad poco confiables ante movimientos sísmicos. Esta deficiencia técnica conlleva a interrupciones operativas, pérdidas económicas y riesgos ambientales por la posible dispersión de materiales finos o colapsos del talud.

Por lo tanto, se identifica la necesidad de desarrollar una simulación combinada mediante FEM y DEM que permita analizar la respuesta sísmica de los taludes, evaluar los mecanismos de falla más probables y proponer medidas de rediseño geométrico o refuerzo estructural que incrementen la estabilidad y prolonguen la vida útil de la cantera. Esta investigación busca aportar una herramienta práctica y predictiva para la gestión geotécnica segura en operaciones mineras y de agregados en la región de Moquegua, contribuyendo así a la mitigación del riesgo sísmico y a la sostenibilidad de las actividades extractivas.

1.1.2 Formulación del problema de investigación

a estabilidad de taludes en canteras de agregados es un aspecto crítico dentro de la ingeniería geotécnica, debido a que las condiciones geológicas, geomecánicas y sísmicas influyen directamente en la seguridad y continuidad de las operaciones mineras. En la región de Moquegua, caracterizada por su alta sismicidad y presencia de materiales heterogéneos, las canteras presentan taludes con geometrías empíricas que, en muchos casos, no han sido evaluadas adecuadamente bajo escenarios dinámicos. Esta situación genera vulnerabilidad frente a deslizamientos o colapsos inducidos por movimientos sísmicos, representando un riesgo para los trabajadores, las instalaciones y el medio ambiente circundante.

Tradicionalmente, los estudios de estabilidad se han basado en métodos analíticos o de equilibrio límite, los cuales, si bien permiten obtener una estimación del factor de seguridad, no logran representar de forma integral el comportamiento real del talud analizado ante esfuerzos dinámicos y la presencia de discontinuidades estructurales. Por tal motivo, surge la necesidad de emplear metodologías numéricas más avanzadas, como el Método de los Elementos Finitos (FEM) y el Método de los Elementos Discretos (DEM), que permiten simular con mayor precisión el comportamiento del terreno y la interacción entre los bloques rocosos bajo condiciones sísmicas.

En este contexto, la investigación busca aplicar la simulación numérica combinada FEM–DEM en una cantera de agregados de la región Moquegua, con el fin de evaluar los factores que condicionan la estabilidad de los taludes y determinar las

posibles zonas críticas ante eventos sísmicos. A partir de los resultados, se pretende establecer criterios de diseño geotécnico que optimicen la seguridad de las operaciones y reduzcan el riesgo de fallas estructurales.

De esta manera, la formulación del problema se orienta a responder cómo el uso de herramientas de modelación numérica puede contribuir a mejorar la estabilidad de taludes en condiciones sísmicas, proporcionando una base técnica y científica sólida para la gestión segura y sostenible de las canteras en zonas de alta sismicidad como Moquegua.

Interrogante general

¿Cómo la simulación combinada mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) y el Método de los Elementos Discretos (DEM) puede mejorar la estabilidad de los taludes ante eventos sísmicos en una cantera de agregados en la región de Moquegua?

Interrogantes especificas

- ¿Cuáles son las principales condiciones geotécnicas y geométricas que influyen en la estabilidad de los taludes en la cantera de agregados seleccionada?
- ¿De qué manera la modelación numérica mediante FEM y DEM permite identificar los modos de falla más críticos durante la ocurrencia de sismos?

1.2 Objetivos

La estabilidad de taludes en canteras de agregados es un aspecto fundamental para garantizar la seguridad operativa, la continuidad de la producción y la protección del entorno. En la región de Moquegua, donde la actividad sísmica es constante, los taludes se encuentran expuestos a esfuerzos dinámicos que pueden generar fallas repentinas, especialmente en el talud analizado fracturados y heterogéneos.

Si bien existen métodos empíricos para evaluar la calidad del talud analizado, estos no permiten simular con precisión el comportamiento del talud frente a cargas sísmicas. En contraste, el Método de Elementos Finitos (FEM) y Elementos Discretos

(DEM) permite analizar geotecnicamente y factores de seguridad bajo condiciones estáticas y dinámicas, siempre y cuando se utilicen parámetros geomecánicos reales.

1.2.1 Objetivo general

- Analizar la estabilidad de los taludes ante eventos sísmicos mediante la simulación combinada de los Métodos de los Elementos Finitos (FEM) y Elementos Discretos (DEM) en una cantera de agregados de la región Moquegua, con el propósito de proponer alternativas de mejora en el diseño y seguridad geotécnica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Describir las condiciones geológicas, geotécnicas y geométricas del talud en estudio, mediante ensayos de campo y laboratorio que permitan determinar los parámetros de resistencia y deformabilidad del talud analizado.
- Comparar modelos numéricos de simulación mediante los métodos FEM y DEM, considerando las condiciones estáticas y sísmicas representativas de la región de Moquegua.

1.3 Justificación e importancia

La estabilidad de taludes en canteras de agregados constituye un factor determinante para la seguridad operativa y la sostenibilidad de las actividades extractivas. En regiones sísmicamente activas como Moquegua, donde la geodinámica y las características litológicas generan condiciones de riesgo elevado, resulta imprescindible desarrollar métodos de análisis más precisos que permitan comprender el comportamiento del talud analizado ante cargas dinámicas. Las técnicas tradicionales de evaluación, basadas en el método del equilibrio límite, ofrecen resultados aproximados que no consideran la interacción compleja entre discontinuidades, deformaciones y esfuerzos durante un evento sísmico.

En este contexto, la aplicación combinada del Método de los Elementos Finitos (FEM) y del Método de los Elementos Discretos (DEM) representa una alternativa moderna y efectiva para simular de manera más realista la respuesta del terreno ante solicitaciones sísmicas. Estas herramientas permiten analizar la distribución de

esfuerzos, desplazamientos y modos de falla potenciales, brindando información técnica fundamental para la toma de decisiones en el diseño y la gestión de taludes estables.

Por tanto, esta investigación se justifica en la necesidad de fortalecer el conocimiento técnico y práctico en la evaluación sísmica de taludes en canteras de agregados, promoviendo el uso de herramientas numéricas avanzadas como soporte a la ingeniería geotécnica aplicada. Asimismo, su desarrollo aportará a la reducción de riesgos laborales, la mejora de la eficiencia operativa y la mitigación de impactos ambientales asociados a fallas de taludes, contribuyendo al cumplimiento de los estándares de seguridad establecidos por la normativa minera y ambiental vigente en el Perú.

1.3.1 Justificación Teórica

Desde el punto de vista teórico, la investigación se fundamenta en la necesidad de fortalecer el conocimiento sobre el comportamiento geomecánico de los taludes sometidos a cargas dinámicas, particularmente en zonas de alta sismicidad como la región de Moquegua. La modelación numérica mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) y el Método de los Elementos Discretos (DEM) proporciona un marco teórico sólido que permite comprender los mecanismos de falla, la propagación de esfuerzos y las deformaciones inducidas por eventos sísmicos. Además, esta investigación busca integrar y contrastar los principios del equilibrio límite tradicional con los modelos numéricos avanzados, contribuyendo así a la actualización y ampliación del cuerpo teórico de la ingeniería geotécnica aplicada a canteras. De esta manera, el estudio aportará bases conceptuales útiles para futuras investigaciones y servirá de referencia para la enseñanza y aplicación de técnicas modernas de análisis en ingeniería de minas y geotecnia.

1.3.2 Justificación Práctica

En el aspecto práctico, el estudio permitirá evaluar con mayor precisión la estabilidad de los taludes de una cantera de agregados en Moquegua, identificando zonas críticas y modos de falla potenciales bajo condiciones sísmicas. Los resultados obtenidos servirán como herramienta de apoyo para optimizar el diseño geométrico de

los taludes, proponer medidas de refuerzo o drenaje, y garantizar condiciones seguras para el personal y los equipos operativos. Además, la aplicación de la simulación FEM–DEM en el ámbito local representa una innovación tecnológica que puede ser replicada en otras canteras o proyectos mineros del sur del Perú. Esto contribuirá a mejorar la eficiencia operativa, reducir pérdidas económicas por interrupciones, y cumplir con las normativas de seguridad geotécnica establecidas por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) y el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

1.3.3 Justificación Metodológica

Metodológicamente, la investigación se justifica por la integración de dos enfoques numéricos complementarios —FEM y DEM— que permiten analizar tanto el comportamiento continuo del talud analizado como la interacción entre bloques y discontinuidades. Esta combinación metodológica ofrecerá resultados más realistas frente a los métodos analíticos tradicionales, mejorando la precisión en la estimación del factor de seguridad dinámico y en la predicción de posibles mecanismos de colapso. Además, la metodología propuesta puede ser adaptada como una guía técnica para estudios de estabilidad sísmica en proyectos de explotación de agregados, aportando un modelo de análisis reproducible y validado que refuerce las prácticas de gestión de riesgo geotécnico en entornos mineros.

1.3.4 Importancia

La presente tesis es de gran importancia debido a que aborda la estabilidad de taludes en una zona altamente sísmica como Moquegua, donde las canteras de agregados están expuestas a deslizamientos y fallas inducidas por movimientos telúricos. La evaluación rigurosa del comportamiento dinámico de los taludes permite prevenir accidentes, pérdidas económicas y afectaciones al entorno operativo, contribuyendo así a la seguridad minera y a la integridad de los trabajadores y comunidades cercanas.

Asimismo, la investigación aporta un enfoque técnico avanzado mediante la aplicación conjunta del Método de Elementos Finitos (FEM) y el Método de Elementos Discretos (DEM), herramientas que permiten comprender tanto el comportamiento continuo como el particulado del macizo rocoso. Esta integración metodológica ofrece

una representación más realista de la respuesta del talud ante eventos sísmicos, facilitando la identificación de zonas críticas, la predicción de mecanismos de falla y la optimización del diseño geométrico y operativo de la cantera.

Finalmente, los resultados obtenidos constituyen un aporte significativo para la gestión del riesgo geotécnico en la región sur del Perú, ya que la metodología desarrollada puede replicarse en otras canteras y en taludes viales, urbanos o mineros. De esta manera, la tesis no solo contribuye al conocimiento científico y académico, sino que también promueve prácticas de explotación minera más seguras, sostenibles y alineadas con la normativa vigente.

1.4 Hipótesis

Toda investigación científica requiere plantear una propuesta tentativa de respuesta al problema identificado. En este estudio, la inestabilidad de taludes en canteras de agregados de Moquegua constituye una problemática relevante debido a la presencia de deformaciones en pendientes y la constante actividad sísmica de la región. Tradicionalmente, la estabilidad de taludes se ha evaluado mediante métodos empíricos o con factores de seguridad aproximados, lo que genera incertidumbre al momento de diseñar o intervenir estructuras geotécnicas.

Por ello, surge la necesidad de complementarlo con el Método de Elementos Finitos (FEM), una herramienta numérica capaz de modelar esfuerzos, deformaciones y mecanismos de falla tanto en condiciones estáticas como sísmicas. Bajo este enfoque, se plantea que la integración de la simulación FEM y DEM puede predecir de manera más precisa la estabilidad del talud, optimizar el diseño de sostenimiento y reducir riesgos asociados a fallas geotécnicas. Esta premisa se formula en la siguiente hipótesis:

1.4.1 Hipótesis general

- La simulación combinada mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) y el Método de los Elementos Discretos (DEM) mejora significativamente la evaluación de la estabilidad de los taludes ante eventos sísmicos en una cantera de agregados en la región de Moquegua, al permitir una representación más realista del comportamiento geomecánico del talud analizado y la identificación precisa de zonas críticas de falla.

1.4.2 Hipótesis especificas

- La modelación numérica mediante FEM y DEM permite identificar los mecanismos de falla más críticos y las zonas de mayor deformación del talud bajo condiciones sísmicas.
- La aplicación de los resultados obtenidos a través de la simulación FEM–DEM posibilita el rediseño geométrico del talud, incrementando su estabilidad y reduciendo el riesgo de colapso durante eventos sísmicos.

1.5 Variables

Para el desarrollo de la presente investigación titulada “Simulación mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) y Elementos Discretos (DEM) para mejorar la estabilidad de taludes para eventos sísmicos en una cantera de agregados en Moquegua”, se identificaron dos variables fundamentales: una variable independiente, relacionada con la simulación numérica mediante los métodos FEM y DEM, y una variable dependiente, correspondiente a la estabilidad de los taludes ante eventos sísmicos (Tabla 01).

1.5.1 Variable independiente

La variable independiente, denominada Simulación numérica mediante FEM y DEM, se concibe como la aplicación de modelos geotécnicos avanzados que permiten representar el comportamiento de los taludes frente a esfuerzos estáticos y dinámicos. Su definición operacional se basa en la implementación de modelos computacionales utilizando software especializado como Phase2, RS2, UDEC o 3DEC, considerando las propiedades geomecánicas del talud analizado y las condiciones sísmicas propias

de la región de Moquegua. Esta variable comprende tres dimensiones principales: la modelación numérica estática, la modelación numérica dinámica.

1.5.2 Variable dependiente

Denominada Estabilidad de taludes ante eventos sísmicos, se define como la capacidad del talud para mantener su equilibrio y estructura frente a los esfuerzos inducidos por movimientos sísmicos, evitando deslizamientos o colapsos que comprometan la seguridad operativa. Su definición operacional se sustenta en la evaluación del comportamiento del talud mediante los resultados obtenidos en la simulación FEM–DEM bajo escenarios sísmicos definidos. Las dimensiones que la componen son la seguridad estructural del talud, el comportamiento dinámico y las condiciones de falla. Los indicadores que permiten medir esta variable incluyen el factor de seguridad dinámico, el ángulo crítico de estabilidad, la aceleración máxima del terreno y el desplazamiento máximo horizontal, todos expresados en escalas numéricas y cuantitativas

Tabla 01

Operacionalización de las Variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala / Unidad de Medida
Variable Independiente: Simulación numérica mediante FEM y DEM	Es la aplicación de modelos numéricos basados en el Método de los Elementos Finitos (FEM) y el Método de los Elementos Discretos (DEM) para representar el comportamiento de los taludes frente a esfuerzos estáticos y dinámicos.	Implementación de modelos geotécnicos en software especializado (Phase2 y UDEC/ 3DEC) considerando las propiedades del talud analizado y las condiciones sísmicas locales.	Modelación numérica estática Modelación numérica dinámica Comportamiento tensional y deformacional	Factor de seguridad (Fs) Desplazamientos máximos (m) Tensiones principales (MPa)	Escala numérica (resultados de simulación)
Variable Dependiente: Estabilidad de taludes ante eventos sísmicos	Es la condición de equilibrio del talud que permite mantener su integridad estructural frente a esfuerzos inducidos por movimientos sísmicos, evitando deslizamientos o colapsos.	Evaluación del comportamiento del talud mediante resultados obtenidos de la simulación FEM–DEM bajo escenarios sísmicos específicos.	Seguridad estructural del talud	Factor de seguridad dinámico (Fs comportamiento dinámico)	Escala numérica / cuantitativa. Ángulo crítico de estabilidad (°) Aceleración máxima del terreno (g) Desplazamiento máximo horizontal (m)

Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del Problema

La estabilidad de taludes en canteras de agregados representa uno de los desafíos más relevantes dentro de la ingeniería geotécnica y minera, especialmente en zonas de alta sismicidad como la región de Moquegua. Diversas investigaciones han demostrado que los eventos sísmicos incrementan significativamente los esfuerzos y deformaciones en el talud analizado, generando fallas estructurales que comprometen la seguridad operativa y ambiental de las explotaciones mineras. En este contexto, los métodos tradicionales de análisis de estabilidad, basados únicamente en equilibrio límite, presentan limitaciones para reproducir el comportamiento real y no lineal del terreno ante cargas dinámicas.

Ante ello, estudios recientes han incorporado el método de los elementos finitos (FEM) como herramienta avanzada para simular el desempeño geomecánico de taludes bajo condiciones sísmicas, permitiendo evaluar desplazamientos, esfuerzos y factores de seguridad con mayor precisión. Paralelamente, la importancia de poder clasificar el talud analizado y estimar su calidad geotécnica, aportando criterios confiables para el diseño de sostenimiento y la predicción del comportamiento estructural.

Sin embargo, se ha identificado una brecha en la literatura respecto a la integración simultánea de modelaciones numéricas FEM y DEM para taludes en canteras de agregados, especialmente en contextos geológicos similares al de Moquegua. Por ello, resulta necesario abordar estudios que combinen ambos enfoques, con el fin de optimizar los parámetros geomecánicos, mejorar los factores de seguridad y proponer diseños más resilientes frente a sismos.

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Meng et al. (2019) proponen un innovador método jerárquico de reducción de resistencia multiescala, que combina el uso de los métodos de elementos finitos (FEM) y elementos discretos (DEM) para el análisis de taludes heterogéneos. Este enfoque se aplica y valida en un talud (SRM). En comparación con los métodos convencionales

de reducción de resistencia, la propuesta permite evitar los elevados costos asociados a los ensayos de campo a gran escala empleados para la estimación de parámetros, y además ofrece una comprensión más detallada de los mecanismos de falla a partir de resultados tanto macroscópicos como microscópicos. El método multiescala, que se fundamenta en la simulación directa a nivel de partículas sin depender de las suposiciones constitutivas tradicionales, representa una nueva herramienta numérica para el análisis de la estabilidad de taludes en geomateriales heterogéneos. Los deslizamientos de tierra, procesos geomórficos caracterizados por grandes desplazamientos de masa, son comunes en regiones montañosas y pueden generar daños materiales, pérdidas humanas y afectaciones a infraestructuras de ingeniería. Desde el punto de vista mecánico, la mayoría de estos deslizamientos se comportan como una masa granular que fluye por una pendiente y se desplaza sobre un plano de falla, expandiéndose a causa del esfuerzo cortante interno

Su et al. (2026) indican que los taludes son comunes en la naturaleza; sin embargo, su modelación numérica continúa siendo un desafío debido a su marcada heterogeneidad y a su complejo comportamiento hidromecánico. En este estudio se desarrolla un marco de acoplamiento multifásico destinado a reproducir el proceso completo de falla en taludes SRM no saturados, abarcando la infiltración de lluvia, la inestabilidad progresiva y el movimiento post-falla de largo alcance. El marco combina el método de Hidrodinámica de Partículas Suavizadas (SPH), que modela el suelo y el agua como un sistema unificado de partículas, con el Método de Elementos Discretos (DEM), empleado para representar de manera explícita los bloques. Se incorpora un modelo mejorado de ablandamiento elastoplástico basado en el criterio de Drucker-Prager, con el fin de capturar la reducción de la resistencia del suelo inducida por la infiltración pluvial. La interacción del suelo se describe mediante la interpolación de tensiones entre las partículas de suelo del modelo SPH y las partículas de superficie del modelo DEM. La eficacia del enfoque propuesto se valida a través de una serie de casos de referencia, que incluyen la infiltración en suelos no saturados, la predicción de superficies de falla en taludes y ensayos de impacto de flujos granulares.

Mesa et al (2020) muestran un diseño geotécnico de terraplenes viales, uno de los parámetros fundamentales es la evaluación del factor de seguridad (FS) para garantizar la estabilidad de los taludes. Tradicionalmente, este análisis se desarrolla en condiciones estáticas; sin embargo, en regiones con actividad sísmica significativa, es necesario incorporar el análisis dinámico para evaluar la respuesta del terraplén frente a solicitaciones sísmicas. En este contexto, el presente estudio analiza el comportamiento del FS en terraplenes de gran altura sometidos a cargas sísmicas. Para ello se aplicó un diseño experimental factorial 3^2, variando dos factores principales: la altura del terraplén y el nivel de sismicidad. Los acelerogramas utilizados en el análisis fueron generados a partir de los espectros de diseño establecidos en la Sección 3.1 del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de México.

El cálculo de la estabilidad se realizó mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) y el método de desplazamiento permanente de Newmark. Se utilizó el software GeoStudio, específicamente los módulos QUAKE/W para el análisis dinámico y SLOPE/W para el análisis de estabilidad de taludes. Los resultados obtenidos indican que, en zonas de sismicidad alta, los terraplenes con alturas superiores a 12 metros presentan una disminución significativa del factor de seguridad, lo que evidencia la necesidad de incorporar criterios de diseño sísmico más rigurosos para garantizar la estabilidad estructural y operativa de este tipo de infraestructuras (Mesa et al, 2020).

Sanhueza y Rodríguez (2013) desarrollaron una investigación aplicada orientada al análisis de estabilidad de un talud natural ubicado en la Quinta Región de Chile. El objetivo principal fue comparar distintos métodos de cálculo de estabilidad de taludes bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Para el análisis sísmico se consideraron dos eventos de subducción de gran magnitud que han afectado al país: el terremoto de Valparaíso de 1985 (Mw 8,0) y el terremoto del Maule de 2010 (Mw 8,8). La evaluación comparativa de los resultados se realizó mediante el cálculo de los factores de seguridad asociados a las superficies potenciales de falla, utilizando el software GeoSlope, y aplicando los métodos clásicos de equilibrio límite de Fellenius,

Bishop y Janbú (método de las dovelas). Los resultados obtenidos evidencian que la estabilidad del talud está fuertemente condicionada por la acción sísmica, siendo esta influencia dependiente tanto de la magnitud del evento sísmico como de los coeficientes de aceleración horizontal y vertical empleados en el análisis pseudoestático. Estos hallazgos destacan la necesidad de incorporar rigurosamente la componente sísmica en el diseño y evaluación geotécnica de taludes naturales y artificiales.

Botero et al (2011) los autores presentaron una revisión de los métodos bidimensionales tradicionalmente empleados en el análisis geotécnico para el diseño y evaluación de la estabilidad de estructuras de suelo y enrocado, tales como cortinas de tierra y taludes de embalses. Se aborda el análisis de estructuras de mediana altura localizadas en zonas con peligrosidad sísmica intermedia, donde la geometría y las condiciones geológicas no justifican el uso de modelos tridimensionales. Se discuten los principales factores que condicionan la estabilidad de laderas y taludes, así como los requerimientos de información geotécnica, geológica y sismotectónica necesarios para realizar un análisis de estabilidad confiable. Asimismo, se sintetizan los métodos de equilibrio límite más utilizados para el cálculo de estabilidad en cortinas y taludes, evaluando sus limitaciones y alcances en función de la importancia y características de la obra.

A partir de esta evaluación crítica, se propone un nuevo método de análisis bidimensional que supera algunas de las deficiencias observadas en los enfoques convencionales, proporcionando una representación más realista del comportamiento mecánico del talud. Este método es aplicado a un caso hipotético de talud adyacente a una cortina de embalse, considerando que estas zonas suelen presentar estudios exploratorios insuficientes y, por ende, mayor incertidumbre geotécnica. La validación del modelo analítico se complementa mediante ensayos experimentales en mesa vibratoria. Finalmente, se plantean recomendaciones orientadas a optimizar el diseño geotécnico de este tipo de estructuras y a minimizar los daños potenciales derivados de eventos sísmicos (Botero et al, 2011).

Mucuta (2020) con el propósito de evaluar la estabilidad geotécnica de los taludes del yacimiento polimetálico Castellano, el autor desarrolló un análisis del factor de seguridad (FS) en tres frentes representativos (I, II y III), considerando dos escenarios de carga: condiciones estáticas y condiciones pseudoestáticas incorporando el coeficiente sísmico regional. La modelación numérica fue realizada mediante el software Slide v6.0, aplicando métodos de equilibrio límite. Los resultados obtenidos evidencian que los tres taludes analizados presentan condiciones de inestabilidad en ambos escenarios, con valores de FS comprendidos entre 0,281 y 0,444, significativamente inferiores al umbral mínimo aceptable de 1,30 para condiciones de seguridad operacional. Esta situación confirma la susceptibilidad al colapso y la necesidad de implementar medidas de estabilización geotécnica. Dado que se trata de taludes inactivos sin actividades de explotación, se recomienda priorizar soluciones pasivas como sistemas de drenaje superficial y subterráneo, con el fin de reducir presiones de poro y mejorar las condiciones de estabilidad global.

Escobar y Valencia (2012) los autores indican que en la ingeniería geotécnica, la estabilidad de taludes se determina generalmente mediante el cálculo del Factor de Seguridad (F.S.), obtenido a partir de análisis matemáticos determinísticos que consideran variables críticas como la geometría del talud, características geológicas y geotécnicas, condiciones hidrogeológicas, efectos de cargas dinámicas asociadas a sismicidad y propiedades físicas y mecánicas del suelo. En este contexto, el estudio referido evaluó la estabilidad de taludes de suelos residuales tropicales ubicados en los kilómetros 41+500 y 49+200 de la autopista Medellín–Bogotá, en el tramo comprendido entre Marinilla y Santuario. Para ello, se analizaron diferentes ángulos de inclinación aplicando métodos probabilísticos, los cuales permiten no solo estimar el Factor de Seguridad, sino también cuantificar la probabilidad de falla, el índice de confiabilidad y el parámetro geotécnico con mayor incidencia en la estabilidad del talud. Estos resultados fueron orientados a identificar el diseño de corte más seguro para la construcción del tramo vial evaluado.

Jaimes et al (2013) desarrollaron una formulación para estimar el desplazamiento de Newmark en función de la relación entre la aceleración crítica del

talud (a_c, correspondiente al umbral mínimo de aceleración del terreno que induce el inicio del movimiento) y la aceleración máxima del terreno (a_{max}). Esta relación permite calcular el desplazamiento traslacional de laderas inducido por eventos sísmicos, constituyendo una herramienta de evaluación preliminar del peligro geodinámico a escala regional. A partir de los resultados de dicha ecuación, es posible generar mapas de amenaza sísmica por deslizamientos traslacionales. Para ello, se emplean valores promedio de parámetros geomecánicos —como cohesión, peso unitario y ángulo de fricción— obtenidos de mapas geológicos y litológicos a escala 1:1'000,000, complementados con la estimación de pendientes potencialmente inestables derivadas de modelos digitales de elevación. Como aplicación, se elabora un mapa de amenaza por deslizamiento para la República Mexicana asociado a la aceleración máxima esperada del terreno con un periodo de retorno de 150 años. Adicionalmente, se presenta un caso de aplicación específico considerando el sismo de Tecomán (Colima), de magnitud M = 7.6 ocurrido el 21 de enero de 2003, cuyos resultados se comparan con los obtenidos mediante el método Mora-Vahrson, ampliamente utilizado para la zonificación de susceptibilidad a deslizamientos.

Ortiz y Portilla (2014) desarrollaron una investigación que expone la metodología empleada para el análisis de estabilidad de taludes en presas de tierra, considerando los tres estados de carga establecidos para este tipo de estructuras: final de construcción, operación y vaciado rápido, tanto en condiciones estáticas como bajo solicitación sísmica. Para la evaluación de la estabilidad de los taludes, se utilizó el método pseudoestático basado en el equilibrio límite, aplicando parámetros de resistencia al corte en términos de esfuerzos efectivos (c’ y φ’), obtenidos a partir de ensayos triaxiales consolidado-no drenado con medición de presión de poros, realizados sobre muestras de suelo saturadas. El efecto sísmico fue incorporado mediante la aplicación de una fuerza horizontal equivalente al coeficiente sísmico regional, aplicada en el centro de gravedad de cada dovela en que se discretiza la masa potencialmente inestable.

A través de este procedimiento se determinó el Factor de Seguridad (FS), el cual fue contrastado con los valores mínimos establecidos por la normativa española vigente, utilizada como referencia en el estudio. La metodología fue aplicada a la presa de tierra Chojampe 2, perteneciente al Proyecto PACALORI, empleando el software GEOSTUDIO 2007 (módulo SLOPE/W) para la modelación y cálculo. Los resultados evidenciaron que una geometría de talud de 1V:3H aguas arriba y 1V:2.75H con colchón de drenaje aguas abajo cumple con los factores de seguridad exigidos. Se concluye que la configuración adoptada garantiza condiciones de estabilidad, seguridad estructural y optimización económica para la presa analizada (Ortiz y Portilla, 2014).

García y Tovar (2025) realizaron una revisión bibliográfica con énfasis en el estado del arte de las tecnologías no convencionales y las innovaciones aplicadas al control y estabilización de taludes en actividades mineras y de ingeniería civil. Este estudio se desarrolló mediante la recopilación y evaluación crítica de publicaciones científicas, documentos técnicos y estudios especializados provenientes principalmente de la base de datos de la Universidad Cooperativa de Colombia. El propósito central fue identificar tendencias emergentes, avances tecnológicos relevantes y líneas de investigación con alto potencial de desarrollo en esta área. Se realizó un análisis comparativo entre los métodos tradicionales de estabilización y las soluciones innovadoras que buscan optimizar la sostenibilidad, eficiencia operativa y adaptabilidad frente a diversas condiciones geotécnicas y ambientales.

Dentro de estas tecnologías destacan la bioingeniería aplicada a taludes, el empleo de materiales reciclados y geosintéticos, la instrumentación avanzada mediante sensores in situ, sistemas de monitoreo geotécnico en tiempo real y técnicas de modelación numérica predictiva. La revisión pone de manifiesto que estas tecnologías complementan o, en ciertos casos, sustituyen los métodos convencionales de estabilización, contribuyendo a la reducción de riesgos geotécnicos y a la mejora en la gestión de la seguridad operativa. Esta síntesis del conocimiento científico disponible constituye una base sólida para el desarrollo de futuras investigaciones y la

implementación de soluciones técnicas en proyectos de estabilización de taludes en minería (García y Tovar, 2025).

Ortega (2014) indica que la minería por métodos de hundimiento (caving) involucra una secuencia de procesos donde la etapa inicial corresponde a la socavación o corte basal, cuyo propósito es generar una excavación suficiente para inducir el colapso controlado del talud analizado. Las tronaduras de batea cumplen un rol similar, ya que generan modificaciones mediante la remoción masiva de material rocoso, favoreciendo condiciones comparables a las del hundimiento. Posteriormente, se ejecuta la extracción del material fragmentado para garantizar el cumplimiento del plan de producción. No obstante, este ciclo puede verse interrumpido por factores técnico-mineros, económicos, geomecánicos o por sismicidad inducida.

La sismicidad generada por actividades de caving constituye un problema crítico debido a su impacto en la seguridad del personal y la continuidad operacional, así como por el potencial de generar eventos asociados a redistribuciones abruptas de esfuerzos. En minas como El Teniente, se ha evidenciado que las tronaduras de incorporación de área incrementan el potencial sísmico, comprometiendo temporalmente la productividad del sistema de hundimiento. Los resultados indican que la sismicidad inducida está directamente relacionada con variaciones en el campo de esfuerzos provocadas por los cambios geométricos durante la excavación. Se observa que las tronaduras de socavación presentan patrones sísmicos diferenciados respecto a las tronaduras de batea, aunque ambas generan concentraciones de eventos de magnitud significativa en proximidad espacial y temporal a la zona de intervención (Ortega, 2014).

Estay (2014) concluyó que la sismicidad inducida en minas subterráneas constituye un riesgo significativo para la integridad del personal y un factor que puede interrumpir la continuidad operacional, afectando directamente la productividad y rentabilidad del yacimiento. Ante esta problemática, es fundamental implementar sistemas de gestión y procedimientos técnicos que permitan identificar, monitorear y mitigar los efectos de la actividad sísmica generada por las labores mineras, estableciendo niveles de alerta temprana frente a variaciones en la actividad sísmica

del talud analizado. Dichos procedimientos se sustentan en los registros obtenidos por sistemas de monitoreo microsísmico instalados en la mina, los cuales permiten calcular indicadores que caracterizan en tiempo real la respuesta frente a la explotación.

El estudio referido tiene como objetivo desarrollar y aplicar una metodología estandarizada para evaluar el comportamiento y desempeño de indicadores sísmicos con el fin de reducir las interrupciones operacionales derivadas de la sismicidad inducida. Se analizaron cuatro indicadores principales: frecuencia de eventos, tasa genérica de momento sísmico, indicador probabilístico y aglomeración espacial de eventos. Para su cálculo y evaluación, se utilizaron registros de sismicidad inducida provenientes de la mina RENO (División El Teniente, Codelco, Chile) correspondientes al periodo 2007-2011, y de la mina Creighton (Sudbury, Ontario, Canadá) durante el año 2008 (Estay, 2014).

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Tavera (2020) el autor con el propósito de evaluar escenarios de sismicidad extrema en el margen continental occidental del Perú llevó a cabo un análisis integral de los patrones de sismicidad histórica, deformación cortical y modelos de pronóstico sísmico desarrollados por diversos investigadores. El análisis espacial de la distribución de eventos sísmicos evidencia una disminución significativa de la actividad frente a las costas de Lima-Callao, Moquegua y Tacna, lo que sugiere la acumulación progresiva de esfuerzos tectónicos susceptibles de liberarse mediante eventos sísmicos de gran magnitud. De manera complementaria, la caracterización de las zonas de ruptura de sismos históricos revela la existencia de lagunas sísmicas en los sectores marítimos adyacentes a Lima, Moquegua, Tacna y a lo largo de la región norte del país. Estos patrones son consistentes con la identificación de asperezas (asperities) en los mismos sectores mediante el uso de modelos estadísticos y bases de datos sísmicas homogéneas.

Asimismo, el procesamiento de datos geodésicos provenientes del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) permitió delimitar Zonas de Máximo Acoplamiento Sísmico (ZMAS) en la interfaz de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana, las cuales coinciden espacialmente con áreas de baja sismicidad,

lagunas sísmicas y presencia de asperezas. Frente a Lima y Callao, la ZMAS abarca aproximadamente 460 × 150 km², con potencial de generar un sismo de magnitud estimada M8.8; frente a las regiones Ica-Arequipa cubre cerca de 150 × 100 km², con una magnitud probable de M7.9, y frente a Moquegua-Tacna alrededor de 210 × 130 km², asociada a una magnitud de M8.2. En el escenario específico de Lima Metropolitana y Callao, un evento de M8.8 implicaría aceleraciones máximas del suelo superiores a 500 cm/s², representando una amenaza crítica para infraestructuras estratégicas vinculadas a la actividad minera y urbana (Tavera, 2020).

Huanca et al (2021) los autores indican que el deslizamiento de Maca se ubica en el flanco izquierdo del valle del río Colca, dentro del distrito de Maca, provincia de Caylloma, región Arequipa. Este fenómeno gravitacional se desarrolla en un entorno geodinámicamente activo, caracterizado por marcados contrastes estacionales de precipitación (épocas secas y lluviosas) y recurrente actividad sísmica, condiciones que lo convierten en un escenario idóneo para evaluar la influencia de factores hidroclimáticos y tectónicos en su comportamiento cinemático. Para tal propósito, se analizaron las series temporales de desplazamiento registradas entre diciembre de 2015 y diciembre de 2017 por la estación GNSS permanente MAD3, instalada en el sector de máxima deformación del deslizamiento. El procesamiento y correlación de los datos permitió evidenciar una respuesta significativa del movimiento en masa ante la acción combinada de la precipitación y la sismicidad, demostrando que la interacción de ambos factores incrementa sustancialmente la aceleración del deslizamiento en comparación con su efecto individual.

Barrientos (2022) realizó la investigación titulada “Estudio de sismicidad inducida para solucionar problemas de inestabilidad del talud analizado en el sector Ayala Inferior, Mina San Vicente – 2022” que tuvo como objetivo principal determinar la influencia del monitoreo microsísmico en la estabilidad geomecánica del talud analizado de dicha zona. Para ello, se empleó una metodología de tipo aplicada, con un nivel explicativo y un diseño de investigación descriptivo. La población de estudio correspondió al talud analizado de la Mina San Vicente, mientras que la muestra estuvo delimitada específicamente al sector Ayala Inferior. Los resultados permitieron

concluir que el análisis sistemático de los eventos microsísmicos y su correlación con las condiciones geotécnicas posibilitan la implementación de un sistema de alerta temprana adaptado a las condiciones operativas de la mina. Este sistema contribuye a la identificación oportuna de zonas potencialmente inestables y, en consecuencia, a la adopción de medidas preventivas para la mitigación de riesgos y mejora de la seguridad operacional.

Zuñiga (2017) el autor explica que desde el inicio de las actividades de explotación minera se generan alteraciones en el entorno geomecánico y ambiental, entre las cuales destaca la sismicidad inducida. En la Unidad Minera El Porvenir, operada por la Compañía MILPO, la combinación de grandes profundidades de explotación y del método extractivo empleado ha favorecido la ocurrencia de eventos sísmicos asociados a la redistribución de esfuerzos en el talud analizado. Dichos eventos son registrados mediante un sistema de monitoreo microsísmico equipado con geófonos y sismómetros, instalados estratégicamente como parte de una red sísmica subterránea. Este sistema permite la adquisición y procesamiento de señales sísmicas provenientes de distintos niveles de la mina, generando una base de datos continua para el análisis.

El estudio se basó en la información registrada entre septiembre de 2006 y agosto de 2008, periodo en el cual se identificaron 1 402 eventos sísmicos en el Bloque Zona Sur y 754 eventos en el Bloque Zona Norte. Se evaluaron parámetros como la distribución temporal de la sismicidad, el valor “b” de la ley de Gutenberg-Richter, la relación de energías de ondas Es/Ep y la energía sísmica liberada por bloques. Los resultados evidenciaron que el Bloque Zona Norte presenta una tendencia a registrar eventos de mayor magnitud en comparación con el Bloque Zona Sur, lo que sugiere diferencias en las condiciones geomecánicas y en el estado de esfuerzos entre ambos sectores del yacimiento (Zuñiga, 2017).

Bedoya (2006) indica que la actividad sísmica más relevante se concentró en los meses de marzo y julio del año de estudio, alcanzándose un máximo de 44 eventos registrados en julio. Este comportamiento sugiere que la sismicidad anual se mantuvo dentro de parámetros considerados normales para la región, con un promedio inferior a 1,5

eventos por día. El análisis espacial de los epicentros evidencia una distribución ampliamente dispersa en el macrorregión sur del Perú y el norte de Chile, acorde con la sismicidad típica asociada a los procesos de reptación tectónica y acumulación de esfuerzos en la zona de subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana.

Si bien no se identificaron concentraciones anómalas de epicentros que indiquen un comportamiento sísmico inusual, se observan alineamientos estructurales de los eventos sísmicos con orientación perpendicular a la línea de costa y a lo largo del sistema tectónico Incapuquio. Asimismo, a partir del mes de julio se registró una ligera concentración de epicentros en las proximidades de la ciudad de Ilo, lo cual podría estar asociado a zonas locales de mayor acoplamiento tectónico o reactivación de estructuras geológicas preexistentes (Bedoya, 2006).

Uribe (2008) indica que la sismicidad que afecta al territorio peruano y el proceso orogénico andino comparten un origen tectónico común: la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. Esta convergencia ocurre a una velocidad aproximada de 8 cm/año y es la responsable de la configuración actual de la Cordillera de los Andes. Durante el periodo intersísmico, la distribución espacial de los eventos sísmicos presenta una alta complejidad. Se observa una relación directa entre la sismicidad y la topografía andina, evidenciándose que el plano de subducción (slab) registra mecanismos focales predominantemente de falla inversa en la zona de antearco, los cuales evolucionan hacia fallas normales en la zona de trasarco. Entre ambos dominios, específicamente en los Altos Andes (aproximadamente a 2000 m s.n.m.), la sismicidad disminuye considerablemente.

Este comportamiento está condicionado por el peso litosférico asociado a la elevada topografía andina, el cual modifica el régimen de esfuerzos tectónicos. El incremento del esfuerzo vertical litosférico genera una compensación del esfuerzo compresivo impuesto por la subducción, reduciendo así la acumulación de esfuerzos diferenciales y, por consiguiente, la frecuencia de actividad sísmica en este sector. Esta interacción entre topografía, esfuerzos tectónicos y sismicidad resulta relevante para el diseño de infraestructura minera y la evaluación de estabilidad del talud analizado en zonas andinas (Uribe, 2008).

Bernal et al (2001) en este estudio se utilizó una base de datos de eventos sísmicos con magnitudes mb ≥ 5.0, obtenida de los catálogos de autores anteriores y del Instituto Geofísico del Perú (1996), con el propósito de analizar la distribución espacial de la sismicidad y su relación con la dinámica de subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. Asimismo, se evaluaron y cuantificaron los niveles máximos de energía liberada a diferentes rangos de profundidad hipocentral. Los resultados evidencian la existencia de tres dominios sismogénicos principales, asociados a fuentes de sismicidad superficial, intermedia y profunda. La sismicidad vinculada al contacto interplaca y a la deformación interna de la placa oceánica permitió definir la geometría del proceso de subducción, identificándose dos estilos estructurales: subducción normal y subducción subhorizontal, concordantes con lo reportado en los últimos años.

Los datos también sugieren que, aproximadamente a los 10° S, a una distancia cercana de 700 km desde la fosa oceánica y a profundidades entre 120 y 150 km, la Placa de Nazca estaría experimentando un proceso de flexión asociado a esfuerzos gravitacionales propios de su peso. La distribución de curvas de isoenergía sísmica se correlaciona directamente con la geometría de las fuentes sismogénicas, mostrando los valores máximos de energía liberada en zonas donde ocurren sismos de mayor magnitud. El análisis del número de eventos y su correspondiente porcentaje de energía sísmica indica que tanto la frecuencia sísmica como la energía liberada dependen directamente de la magnitud de los sismos, constituyendo un criterio fundamental para la evaluación de amenazas sísmicas en zonas de actividad minera (Bernal et al, 2001).

Zuñiga (2017) Las actividades de explotación minera generan modificaciones en el entorno geomecánico y ambiental, entre las cuales se encuentra la sismicidad inducida por labores subterráneas. En la Unidad Minera El Porvenir, operada por la Compañía MILPO, la combinación de grandes profundidades de explotación y el método de minado empleado ha favorecido la generación de eventos sísmicos asociados a la redistribución de esfuerzos en el talud analizado. Estos eventos han sido registrados mediante un sistema de monitoreo microsísmico, compuesto por geófonos y sismómetros distribuidos en una red sísmica subterránea, lo que permite la

adquisición y procesamiento de señales sísmicas provenientes de distintos niveles de explotación.

El análisis se efectuó sobre una base de datos correspondiente al periodo comprendido entre septiembre de 2006 y agosto de 2008, durante el cual se registraron 1 402 eventos microsísmicos en el Bloque Zona Sur y 754 eventos en el Bloque Zona Norte. Se evaluaron parámetros como la distribución temporal de la sismicidad, el valor b de la ley de Gutenberg-Richter, la relación de energías sísmicas Es/Ep y la energía total liberada por bloque. Los resultados evidenciaron que el Bloque Zona Norte presenta una mayor tendencia a registrar eventos de mayor magnitud en comparación con el Bloque Zona Sur, lo que sugiere diferencias significativas en el estado de esfuerzos y condiciones geomecánicas entre ambos sectores del yacimiento (Zuñiga, 2017).

Barrientos (2022) realizó el estudio titulado “Sismicidad inducida para la mitigación de problemas de inestabilidad del talud analizado en el sector Ayala Inferior, Mina San Vicente – 2022”, tuvo como objetivo principal determinar la influencia del monitoreo microsísmico en la evaluación y control de la estabilidad geomecánica del talud analizado en dicho sector. La investigación se desarrolló bajo una metodología de tipo aplicada, con un nivel explicativo y diseño descriptivo. La población estuvo constituida por el talud analizado de toda la mina San Vicente, mientras que la muestra se delimitó específicamente al sector Ayala Inferior.

Los resultados demostraron que la interpretación de los registros microsísmicos permite identificar zonas de concentración de esfuerzos, fracturamiento progresivo y potenciales condiciones de fallamiento. Esta información posibilita la implementación de un sistema de alerta temprana adaptado a las condiciones operativas de la unidad minera, facilitando la detección oportuna de zonas vulnerables y optimizando la toma de decisiones para la ejecución de medidas de sostenimiento y mitigación de riesgos (Barrientos, 2022).

Mamani (2023) realizó un trabajo de investigación que surgió ante la necesidad de comprender las características geológicas y geomecánicas del talud analizado con el fin de evaluar la estabilidad de taludes en la Mina 9-10, ubicada en el distrito de

Marcona, provincia de Nazca, departamento de Ica, en la costa sur del Perú. Regionalmente, la mina se emplaza en la Meseta de Marcona, perteneciente a la Cordillera de la Costa, al oeste de la Cordillera Occidental de los Andes, donde hacia el océano Pacífico se desarrollan terrazas marinas cuaternarias. La zona mineralizada se encuentra dentro de una secuencia de rocas metamórficas, sedimentarias y volcánicas del Paleozoico y Mesozoico, dispuestas en un monoclinal de rumbo noreste con buzamiento de aproximadamente 40° hacia el norte-noroeste.

Con estos parámetros y los datos obtenidos mediante investigaciones geotécnicas de campo, se ejecutó el análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos y del tajo global, utilizando métodos cinemáticos y software especializado. Los resultados permitieron identificar mecanismos de falla del tipo planar y cuña, algunos con factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos próximos o inferiores a los mínimos admisibles (FS ≥ 1.0). Finalmente, el análisis global de estabilidad de taludes del tajo arrojó factores de seguridad superiores a los valores requeridos en condiciones estáticas (FS ≥ 1.3) y pseudoestáticas (FS ≥ 1.0), verificándose que los taludes presentan condiciones de estabilidad aceptables en la situación actual de operación (Mamani, 2023).

Huacce (2022) realizó una investigación en la Unidad Minera San Cristóbal que se encuentra en operación continua, lo que exige investigaciones actualizadas sobre las propiedades geomecánicas del talud analizado que controla la estabilidad de las labores subterráneas. En este contexto, el estudio tuvo como objetivo caracterizar geotécnicamente el talud analizado para determinar los sistemas de sostenimiento adecuados, estableciendo una línea base mediante los métodos de clasificación. La línea base incluyó la evaluación de los parámetros geotecnicos fundamentales: propiedades físicas, resistencia a la compresión uniaxial (UCS), intensidad de fracturamiento (volumen de fractura), espaciamiento y condiciones de las discontinuidades, presencia de agua y su orientación respecto a las excavaciones mineras.

Posteriormente, se aplicó el sistema RMR de Bieniawski utilizando los datos de campo, permitiendo estimar la dimensión equivalente (De) y ubicar los resultados

en el diagrama de Grimstad y Barton (1993) para determinar el tipo de sostenimiento requerido por nivel de exposición al riesgo. Los resultados de la caracterización indicaron que en la Estación 1 se requiere un sistema de sostenimiento mediante pernos puntuales cada 1,3 m, con longitud de 1,5 m (ESR = 1.0). En la Estación 2, el sostenimiento recomendado corresponde a empernado cada 1,2 m con pernos de 1,5 m. En la Estación 3, el talud analizado presenta mejores condiciones, requiriéndose empernado puntual cada 2 m con pernos de 2,5 m (ESR = 1.0). Este estudio constituye un antecedente técnico relevante para la planificación de obras subterráneas y la optimización de sistemas de soporte en la mina San Cristóbal (Huacce, 2022).

Ticona (2021) realizó un estudio donde propone una metodología para la caracterización geotécnica de taludes alterados, utilizando información geotécnica proveniente de la franja metalogenética Andahuaylas–Yauri, una de las zonas de mayor relevancia minera del Perú por albergar importantes yacimientos tipo pórfido–skarn de Cu, Ag y Au, así como por su potencial para futuros desarrollos mineros. La base de datos analizada comprende 329 sondajes orientados a prospección geológica y geotécnica, de los cuales se obtuvieron parámetros geotecnicos (carga puntual, compresión uniaxial, tracción indirecta y corte directo), y clasificación geomecánica mediante el sistema RMR de Bieniawski. Se aplicaron análisis estadísticos determinísticos para evaluar la distribución de los parámetros geomecánicos y definir unidades geotécnicas representativas del talud analizado alterados.

Los resultados mostraron una diferencia significativa en los valores de RMR al incorporar la resistencia estimada según los criterios del ISRM, lo que permitió segmentar en tres categorías: alterados (39 %), calidad regular (55 %) y buena calidad (8 %). Para evaluar la influencia de la alteración en la estabilidad de taludes, se desarrollaron 72 modelos geotécnicos, considerando cuatro configuraciones geométricas de diseño de taludes (OVA–IRA), seis grupos de parámetros RMR derivados del análisis estadístico y tres condiciones de agua. Los análisis de estabilidad se realizaron mediante el método numérico de diferencia finita generalizada utilizando el modelo constitutivo Hoek-Brown modificado en FLAC-Slope v8. Los factores de seguridad obtenidos evidenciaron el impacto del talud analizado alterados en la

estabilidad global de los taludes, lo que permitió proponer diseños conservadores bajo condiciones de drenaje, asegurando el cumplimiento de los criterios de aceptabilidad (Ticona, 2021).

Antayhua y Ramos (2008) los autores indican que debido a la recurrente actividad sísmica registrada en los años 1999 y 2005 en el complejo volcánico Ticsani, así como a la presencia de fallas locales y lineamientos estructurales de diversas magnitudes, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) ejecutó campañas de monitoreo sísmico temporal en 2008. La primera se desarrolló del 15 al 21 de abril mediante la instalación de dos sismógrafos de banda ancha, uno de ellos ubicado en la cima del volcán Ticsani para la detección de sismos de origen volcánico. La segunda campaña se realizó entre el 26 y 29 de agosto, instalándose seis estaciones sísmicas —dos de banda ancha y cuatro de periodo corto— en el domo del volcán y en las localidades de San Cristóbal, Humalso, Pallatea, Chilota y Huaytire, en el marco del Proyecto “Monitoreo de volcanes activos del sur del Perú” y del proyecto europeo “VOLcanoes: Understanding subsurface mass moveMEnt (VOLUME)”.

El análisis de los registros sísmicos obtenidos evidenció una actividad sísmica significativa, caracterizada por ondas P y S con tiempos de arribo claramente identificables, típicas de eventos asociados a deformaciones. El análisis espectral determinó frecuencias predominantes entre 5,0 y 21 Hz, mientras que la energía liberada fue inferior a $2{,}43\times10^{7}$ nJ, indicando eventos de baja energía en comparación con los registrados durante las crisis eruptivas de 1999 y 2005. La sismicidad se concentró a profundidades menores de 15 km y magnitudes locales inferiores a 1,5 ($ML \leq 1.5$). Los 155 eventos localizados se distribuyeron principalmente en el área de los volcanes Ticsani, Tutupaca y a lo largo del sistema de fallas Micalaco con orientación NO-SE. Asimismo, no se registraron sismos de origen volcánico directo en el edificio del Ticsani durante los periodos de monitoreo (Antayhua y Ramos, 2008).

Tardeo y Zanabria (2016) desarrollaron un estudio en la zona de Huayllapampa, distrito de Cuenca en Huancavelica, su estudio evaluó la inestabilidad de taludes mediante la determinación del factor de seguridad utilizando análisis estático y dinámico con el método de elementos finitos. El objetivo principal fue determinar el

grado de estabilidad del talud en condiciones geotécnicas y sísmicas propias del área de estudio. Para ello, se aplicaron métodos de análisis heurístico y determinístico. El análisis heurístico, basado en el método Mora-Vahrson, permitió identificar la susceptibilidad a deslizamientos considerando variables geológicas, geomorfológicas, pendientes, cobertura vegetal, así como factores desencadenantes como la precipitación y la sismicidad.

Complementariamente, el análisis determinístico se enfocó en el cálculo del factor de seguridad empleando métodos de equilibrio límite y modelamiento numérico por elementos finitos bajo condiciones estáticas y dinámicas. Los resultados obtenidos indicaron factores de seguridad menores a 1,0 en condiciones estáticas y valores por debajo de 1,25 en el análisis dinámico, evidenciando condiciones de inestabilidad en los taludes evaluados. Ante este escenario, se planteó la necesidad de implementar medidas de mitigación de riesgo geotécnico, destacando la instalación de sistemas de anclaje y otras obras de estabilización acordes con las características geomecánicas del terreno (Tardeo y Zanabria, 2016).

Villena y Rios (2024) los autores desarrollaron un estudio que aborda el análisis integral de la estabilidad de la presa de relaves “La Esperanza”, con el propósito de optimizar su diseño geotécnico y verificar su comportamiento frente a solicitaciones sísmicas. Se llevaron a cabo investigaciones geomecánicas detalladas y modelaciones numéricas mediante el software Slide, evaluando la estabilidad de taludes bajo condiciones estáticas, pseudoestáticas y post-sísmicas. Los resultados indican que el diseño optimizado incrementa significativamente el Factor de Seguridad (FS) en las secciones analizadas, siendo especialmente relevante el caso de la sección C–C’, donde el FS supera los valores mínimos establecidos por normativas internacionales. Paralelamente, se efectuó un análisis volumétrico para determinar la viabilidad económica del proyecto, observándose una reducción en los volúmenes de relaves gruesos y finos sin comprometer la estabilidad global de la estructura.

Asimismo, se examinó el sistema de manejo y control del agua sobrenadante, proponiéndose mejoras para mitigar posibles sobrecargas hidráulicas en los taludes. Aunque no se identificó la presencia de nivel freático en el área de estudio, se adoptó

un escenario conservador para el análisis, comprobándose que los relaves gruesos no presentan condiciones susceptibles a licuefacción. En conjunto, este trabajo constituye un antecedente técnico relevante para la optimización de presas de relaves, reforzando la importancia de una adecuada gestión de materiales, el control hidrológico y el monitoreo continuo para garantizar la estabilidad y seguridad operativa a largo plazo (Villena y Ríos, 2024).

2.1.3 Antecedentes Locales

Valderrama (2025) realizó un estudio que surgió ante la necesidad de caracterizar geotécnicamente el talud analizado utilizando sistemas de clasificación empírica, específicamente el Slope Mass Rating (SMR), con el propósito de analizar las condiciones actuales de los taludes y determinar sus niveles de estabilidad. Esta metodología permite establecer relaciones entre parámetros estructurales —como la orientación de discontinuidades, la calidad del talud analizado y las condiciones geométricas del talud— y un índice cuantitativo que expresa el grado de estabilidad. No obstante, dado que el comportamiento mecánico es inherentemente no lineal, anisotrópico y dependiente del estado de esfuerzos, se complementa el análisis empírico con la modelación numérica mediante el Método de Elementos Finitos (FEM). Esta herramienta permite simular de manera más realista la respuesta del terreno frente a cargas estáticas y pseudoestáticas, evaluando deformaciones, esfuerzos internos y posibles mecanismos de falla.

Turpo (2018) el autor indica que, en la industria minera, la geotecnia ha adquirido una importancia creciente, especialmente en lo relacionado con el diseño y estabilidad de taludes. Esto se debe a que las excavaciones a cielo abierto requieren dimensiones cada vez mayores, lo que incrementa los riesgos asociados a la estabilidad de taludes conformados suelos o rocas fuertemente alteradas cuyo comportamiento geomecánico se asemeja al de un suelo. En este contexto, la geometría final del tajo debe optimizar el equilibrio entre seguridad operacional y rentabilidad económica. Por ello, el análisis de estabilidad de taludes en minas a cielo abierto implica definir la geometría de excavación que permita acceder al material de interés con el máximo nivel de seguridad posible. Esta geometría incluye la determinación del ángulo de los

taludes individuales, el ángulo global, las dimensiones de las bermas y las alturas de banco.

La investigación tuvo como finalidad determinar los parámetros geométricos óptimos del talud que garanticen la estabilidad del tajo superficial en el área de explotación de la unidad minera “Moises Randy 2010”, mediante la aplicación de una metodología geotécnica rigurosa. El talud en estudio es conformado por materiales granulares, principalmente suelos de tipo arena. Las actividades de explotación se han desarrollado hasta el momento bajo criterios empíricos, generando un banco con alturas superiores a 10 metros y una inclinación excesivamente vertical, lo cual representa un riesgo significativo para las operaciones mineras. Ante esta situación, se hizo necesario realizar un análisis de estabilidad de taludes (Turpo, 2018).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Método de Elementos Discretos (DEM)

Cundall (1971) fue el autor del método de elementos discretos, inspirado en la solución de problemas geomecánicos y geotécnicos. Este método permite representar grandes desplazamientos y rotaciones de cuerpos que interactúan dentro del modelo mediante contactos o interfaces. A medida que los elementos inicialmente unidos se separan, pueden reconocer nuevos contactos creados por la interacción con otros cuerpos, generando fuerzas en estas nuevas interfaces.

La generación de fuerzas en el modelo se realiza durante el monitoreo del movimiento de cada elemento, considerando las condiciones o propiedades físicas de las interfaces para introducirlas en el cálculo mediante la combinación de la segunda ley de Newton y la ley fuerza-desplazamiento. El concepto se concibió teniendo en cuenta un "paso de tiempo" muy pequeño para asegurar únicamente la propagación de perturbaciones de velocidad o fuerza en una partícula individual, sin que estas fuerzas se transmitan a las partículas vecinas durante el proceso de cálculo (Cundall, 1971).

Código de Flujo de Partículas (PFC)

Agramonte (2016) indica que el código de flujo de partículas se clasifica como un código de elementos discretos, lo que permite el desplazamiento, la traslación y la

rotación de cuerpos discretos. El PFC puede considerarse una simplificación del DEM, ya que se compone de partículas circulares rígidas, a diferencia del modelo DEM generalizado, que incluye partículas poligonales con capacidad de deformación. Como se mencionó anteriormente, la segunda ley de Newton proporciona la relación fundamental para calcular el movimiento de cada partícula, tendiendo hacia el equilibrio de fuerzas que detendría el modelo. En la conceptualización del modelo de flujo de partículas, se consideran las siguientes suposiciones:

- Las partículas se tratan como cuerpos rígidos.
- Los contactos entre partículas ocurren en áreas muy pequeñas, consideradas como puntos de contacto.
- La superposición entre partículas es muy pequeña en relación con el tamaño de la partícula, y su magnitud se relaciona con las fuerzas de contacto mediante la ley fuerza-desplazamiento.
- Se pueden establecer conexiones entre partículas que impidan desplazamientos o eliminen grados de libertad dentro de rangos de magnitud de fuerza preestablecidos para modelar sistemas más complejos.

Ciclo de Cálculo en PFC

Inicialmente, en cada ciclo de cálculo en PFC, se define la posición de cada entidad contenida en el modelo (partículas y paredes), teniendo en cuenta los contactos que se generan o eliminan durante la simulación. Se aplica la ley de fuerza-desplazamiento a los contactos para actualizar las fuerzas generadas en ellos por la superposición o separación relativa entre las dos entidades (partícula-partícula o pared-partícula); posteriormente, se aplica la segunda ley de Newton a cada partícula para definir su velocidad. Esta velocidad se utiliza para actualizar la posición de la partícula mediante las fuerzas que actúan en cada contacto, junto con las fuerzas de volumen (Agramonte, 2016).

Ley de Fuerza-Desplazamiento

Agramonte (2016) menciona que esta ley relaciona los desplazamientos entre dos entidades con las fuerzas generadas en sus contactos; las fuerzas componentes o

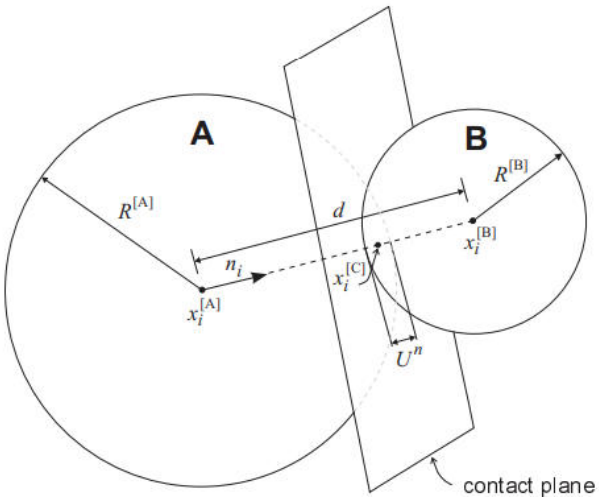
derivadas (fuerza normal y fuerza cortante) de la descomposición de la fuerza de contacto en el punto x[c]i se utilizan junto con las rigideces correspondientes para calcular los desplazamientos en las dos direcciones. En la Figura 3.1, A, B y b son las representaciones de las partículas, la pared está representada por la letra W, en ambos casos U^n representa la penetración entre elementos, y n_i es el vector unitario que representa el plano de contacto entre partículas o la dirección de la distancia más corta desde el centro de la partícula hasta una pared, que se define como se ve en la Ecuación 1:

$$n_i = \frac{x[B] - x[A]}{d} \quad (1)$$

Donde d se define como: $d = = |x[B] - x[A]| = \sqrt{(x[B] - x[A])(x[B] - x[A])}$

Figura 01

Representación del contacto entre partículas (A-B) y la interacción pared-partícula.



Nota: Extraído de Agramonte (2016)

Ley del movimiento

El movimiento de una partícula está determinado por la fuerza resultante y el momento que actúa sobre ella, y está representado por dos ecuaciones vectoriales, una que relaciona la fuerza resultante con el movimiento de traslación (Ecuación 02) y la otra que relaciona el momento resultante con el movimiento de rotación.

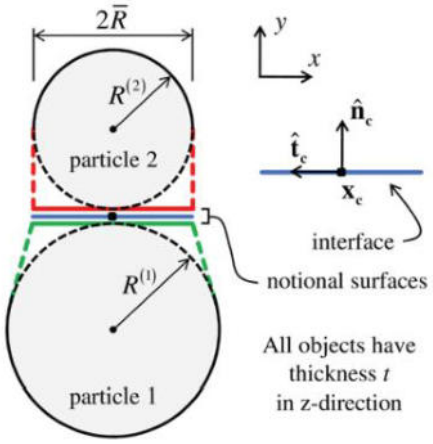
$$Fi = m(xi - gi) \quad (2)$$

Modelo de contacto de junta

Como se mencionó en la sección anterior, el modelo de contacto de partículas permite simular sistemas más complejos controlados por el comportamiento micromecánico entre las partículas constituyentes. El modelo de "enlace paralelo" se propone para simular materiales frágiles; sin embargo, las limitaciones de estos materiales para reproducir la relación entre la resistencia a la compresión simple y la resistencia obtenida en el ensayo brasileño se deben a la falta de resistencia a la rotación de las partículas una vez que se produce la ruptura del contacto (Agramonte, 2016). El modelo de contacto de junta plana presenta dos superficies imaginarias centradas en el punto de contacto, posicionadas simétricamente en la interpenetración de las partículas. Estas superficies, tras la ruptura del contacto, siguen ofreciendo resistencia a la rotación de las partículas que las contienen (Figura 02).

Figura 02

Representación geométrica del modelo de contacto de la junta plana



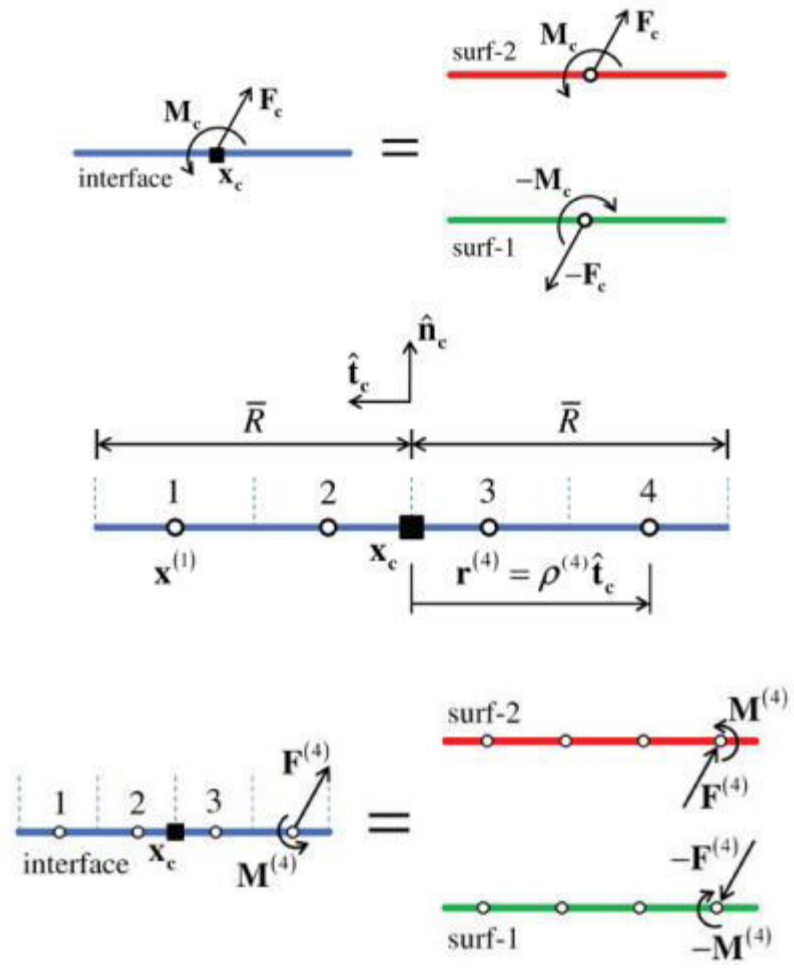
Nota: Extraído de Potyondy (2012)

Ley de desplazamiento de fuerzas para contactos

Las superficies imaginarias se segmentan en un número predefinido de partes para determinar las fuerzas y momentos generados por la separación (si el modelo estuviera conectado) o la interpenetración con respecto al punto medio de cada segmento. Cada fuerza y momento actúa sobre cada par de segmentos opuestos de forma igual y opuesta, y luego se suman para obtener las fuerzas y momentos totales en el contacto (Figura 03).

Figura 03

Fuerzas que actúan sobre superficies imaginarias y su segmentación



Nota: Extraído de Potyondy (2012)

2.2.2 Método de Elementos Finitos (FEM)

La simulación numérica de la inestabilidad de taludes continúa representando un desafío fundamental en la ingeniería geotécnica, particularmente cuando se trata de grandes deformaciones y procesos de filtración prolongados. El método de elementos finitos (FEM) tradicional presenta limitaciones debido a la distorsión de la malla en el modelado de deformaciones significativas. Con el propósito de superar estas limitaciones, se debe analizar la respuesta dinámica del deslizamiento bajo condiciones complejas que incluyen por ejemplo fluctuaciones del nivel del embalse, precipitaciones y actividad sísmica. Los resultados demuestran que tanto el descenso del nivel del embalse como las precipitaciones pueden constituir en los principales

factores desencadenantes de la deformación del deslizamiento. En condiciones multifactoriales, el desplazamiento acumulado supera la suma de los desplazamientos producidos por cada factor individual. Asimismo, la combinación del descenso del nivel del embalse con la actividad sísmica genera una deformación más profunda y extensa. Estos resultados aportan información relevante para la evaluación y mitigación de deslizamientos en zonas de embalses, ofreciendo valiosas implicaciones prácticas para la ingeniería geotécnica aplicada a la gestión de riesgos y desastres naturales (Zai et al 2025).

El método de elementos finitos (MEF) es una técnica numérica ampliamente reconocida por su versatilidad y precisión, que ha sido aplicada de forma extensa en diversas ramas de la ingeniería. En problemas que involucran pequeñas deformaciones, el MEF destaca por su alta exactitud y eficiencia computacional, lo que lo convierte en una herramienta idónea para analizar la filtración en taludes originada por la infiltración prolongada de lluvias o por las variaciones del nivel de agua en embalses. Asimismo, su capacidad para integrar campos de tensiones permite realizar evaluaciones más detalladas de la estabilidad de taludes. No obstante, cuando se presentan grandes deformaciones asociadas a la inestabilidad de taludes, el MEF enfrenta limitaciones significativas, como la distorsión de la malla y los errores numéricos que pueden conducir a fallos computacionales. Para superar estas dificultades, se han desarrollado variantes del método, tales como el enfoque arbitrario lagrangiano-euleriano (ALE), el método acoplado euleriano-lagrangiano (CEL) y el método de elementos finitos de partículas (PFEM), los cuales han mostrado resultados exitosos en aplicaciones geotécnicas.

Por otra parte, los métodos sin malla —como la Hidrodinámica de Partículas Suavizadas (SPH) y el Método de Puntos Materiales (MPM)— ofrecen alternativas prometedoras para abordar problemas con grandes deformaciones. En particular, el MPM combina las ventajas de los enfoques lagrangiano y euleriano: las partículas almacenan toda la información del material, mientras que la malla se utiliza únicamente para resolver las ecuaciones del sistema. Este enfoque reduce de manera efectiva la

distorsión de la malla, lo que lo hace especialmente adecuado para el análisis de escenarios con deformaciones de gran magnitud (Zai et al 2025).

2.2.3 Phase²

De acuerdo con el Rocsicence (2001) es un software numérico avanzado utilizado ampliamente en ingeniería geotécnica para el análisis bidimensional (2D) de problemas de deformación, esfuerzos y estabilidad en suelos. Se basa en el Método de los Elementos Finitos (FEM) y está diseñado para modelar desde condiciones estáticas simples hasta comportamientos complejos asociados con cargas, excavaciones, presión de agua, y efectos sísmicos, características y aplicaciones: Análisis bidimensional (2D) por elementos finitos con formulación elástica, elastoplástica o viscoplástica.Permite modelar suelos, estructuras de soporte, revestimientos y anclajes.

- Condiciones de contorno flexibles y modelado de presión de poros.
- Posibilidad de realizar análisis de reducción de resistencia (Strength Reduction Method – SRM) para determinar el factor de seguridad (FS).
- Análisis sísmico mediante coeficientes pseudoestáticos o mediante entrada de registros de aceleración.
- Capacidad para simular excavaciones secuenciales y monitorear la evolución de esfuerzos y deformaciones.

2.2.4 Sismicidad

Según el IGP (2019), Instituto Geofísico del Perú, la sismicidad del territorio peruano se entiende así:

- Perú está ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, lo que implica que está expuesto a una alta sismicidad: es decir, muchas zonas del país experimentan sismos de magnitud variada, con focos superficiales, intermedios y profundos, debido a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.
- El IGP utiliza el registro de sismos históricos e instrumentales para caracterizar la sismicidad: ubicación, frecuencia, magnitud, profundidad de los eventos. Este análisis sirve como base para luego estimar el peligro sísmico en distintas zonas del país.
- En ese sentido, la sismicidad es parte del flujo de trabajo en el IGP para generar mapas de peligro sísmico, zonificación sísmica-geotécnica, etc. El documento "Peligro por sismo" del IGP señala que la ocurrencia de sismos de diversas magnitudes y profundidades define la sismicidad y su distribución en el espacio y tiempo.

Para el IGP, la sismicidad es la caracterización de la actividad sísmica en el territorio: cuántos sismos, de qué tamaño, a qué profundidad, dónde, con qué frecuencia. Y esa caracterización es la base para generar estudios de peligro y riesgo sísmico.

Normatividad

Resolución de Presidencia N.° 105-IGP/2019 "Aprueban Norma Técnica de la Red Sísmica Nacional del IGP". Esta norma establece que todas las instituciones públicas o privadas que administren información sísmica deben remitirla al IGP para su incorporación a la Red Sísmica Nacional (RSN).

Norma Técnica E.030 – Diseño sismorresistente (RM N° 355-2018-VIVIENDA). Aunque es más de diseño estructural, aborda zonificación sísmica, perfiles de suelo y otros criterios técnicos vinculados con sismicidad.

Procedimiento PR 012-2020-IGP «Procesamiento de Datos y Generación de Información Sísmica». Documento interno del IGP que especifica la base normativa bajo la cual opera el monitoreo sísmico: menciona como base normativa la ley del IGP, la Ley del SINAGERD, etc.

Aceleración máxima del terreno

Según el IGP (2019) la aceleración máxima del terreno (PGA del inglés Peak Ground Acceleration) es el valor máximo de la aceleración registrada en el suelo durante un sismo, en el sitio de interés. Representa la mayor intensidad del movimiento del suelo, y se utiliza como parámetro fundamental para el diseño sismorresistente de estructuras y la evaluación del peligro sísmico.

Según You et al. (2025) la relación entre la aceleración y la velocidad máximas del suelo, conocida como relación A/V, constituye un parámetro fundamental en ingeniería sísmica y sismología, ya que permite evaluar el contenido frecuencial del movimiento sísmico y estimar el daño estructural o el potencial de licuefacción. Aunque normalmente se calcula a partir de las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (GMPE), basadas en las características de la fuente, la trayectoria y las condiciones del sitio, en la práctica muchas veces solo se dispone del espectro de respuesta.

En este contexto, el presente estudio propone un método para estimar la relación A/V a partir de dicho espectro. Mediante la teoría de vibración aleatoria, se demuestra que el cuadrado de la relación A/V es aproximadamente equivalente al radio de giro de segundo orden del espectro de amplitud de Fourier y está asociado con la frecuencia centroide del espectro de respuesta de desplazamiento. A partir de este fundamento, se desarrolla una fórmula de regresión práctica basada en un análisis estadístico de 16 000 registros sísmicos reales de Japón. Finalmente, las relaciones A/V obtenidas con el método propuesto se comparan con las derivadas del enfoque tradicional de las GMPE, con el fin de evaluar su precisión y aplicabilidad (You et al., 2025).

Desplazamiento máximo horizontal

Según Kramer (1996) el desplazamiento máximo horizontal es el valor máximo del movimiento lateral que experimenta un punto del suelo o de una estructura durante un sismo. Representa la mayor distancia que dicho punto se aparta de su posición original en dirección horizontal debido a la acción de las ondas sísmicas.

Según Rajabi (2017) la predicción del desplazamiento máximo en las paredes laterales de una excavación es una tarea crucial, que depende de las características del

sitio, incluyendo parámetros geológicos y geotécnicos. Las limitaciones de los métodos convencionales han motivado el uso de enfoques predictivos más avanzados. En esta investigación se analizó el desplazamiento horizontal máximo alrededor de estructuras subterráneas mediante modelo computacional, modelos numéricos y métodos empíricos bajo diferentes condiciones.

Con base en los parámetros geotécnicos, la red neuronal óptima desarrollada puede predecir de manera fiable el desplazamiento máximo alrededor de las excavaciones. Finalmente, el análisis de sensibilidad del modelo computacional indica que la profundidad de la sobrecarga es el parámetro más influyente, mientras que la resistencia a la tracción presenta la menor incidencia en el desplazamiento máximo estimado (Rajabi, 2017).

Coeficiente Sísmico

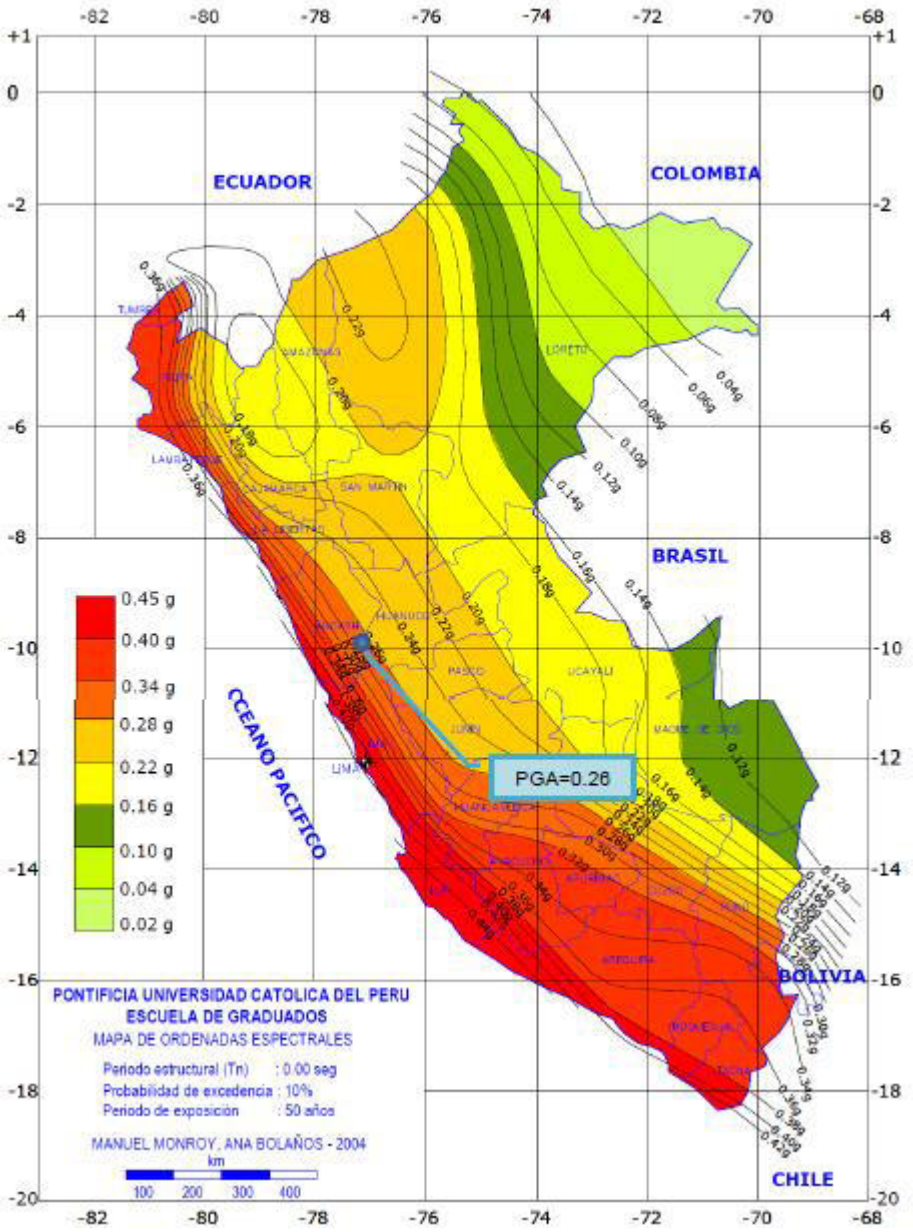
Segun Kavazanjian (1989) indica que un coeficiente de fuerza lateral es usado en el análisis pseudoestático, el cual representa la carga sísmica en taludes y estructuras de retención de tierra usando el análisis de equilibrio limite. De acuerdo con la recomendación del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, U.S. Army Corps of Engineers (2003), Hynes y Franklin (1984), entre otros autores sugieren el uso de un coeficiente sísmico igual al 50% de la aceleración pico de diseño. El Cuerpo de Ingenieros sugiere que la aplicación del método de Newmark para calcular desplazamientos permanentes en presas de tierra utilizando más de 350 registros sísmicos, concluyéndose que estas estructuras analizadas con el método pseudo-estático con factores de seguridad mayores que 1.0 utilizando un coeficiente sísmico horizontal de 0,5xPGA no desarrollan deformaciones mayores a 1.0 m.

Asimismo, en la normativa peruana sobre taludes (E.050 y CE.020) no se expresa recomendación respecto a qué fracción del PGA de 475 años corresponde el coeficiente sísmico a utilizar para el análisis pseudo-estático de estabilidad de taludes, por lo tanto, según el mapa de ordenadas espectrales en la Figura 04, los espectros constituyen actualmente una de las herramientas más usadas para representar el Peligro Sísmico con fines de diseño sismorresistente.

Peligro Sísmico con fines de diseño sismorresistente la zona de estudio presenta un PGA de 0.45g, por consiguiente, el coeficiente sísmico seria de 0.225 para la zona del proyecto.

Figura 04

Distribución de aceleraciones en el Perú



Nota: Analís para un periodo de exposición de 50 años y 10% de probabilidad de excedencia. (Bolaños y Monroy, 2004)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Tipo y nivel de investigación

3.1.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que busca dar solución a un problema real: la inestabilidad de taludes en una cantera de agregados ubicada en Moquegua. El estudio no se limita a generar conocimiento teórico, sino que pretende emplear métodos científicos (FEM y DEM) para proponer soluciones prácticas y mejoras en el diseño geotécnico del talud, optimizando la seguridad frente a eventos sísmicos.

3.1.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación es explicativo y correlacional:

- Correlacional, porque busca analizar la relación entre los parámetros geotécnicos y los resultados de estabilidad obtenidos mediante simulaciones con el FEM y DEM.
- Explicativo, porque pretende demostrar cómo y en qué medida la integración de estos parámetros en el modelo FEM y DEM influye en el factor de seguridad, los desplazamientos y los mecanismos de falla del talud bajo cargas sísmicas.

3.1.3 Diseño de investigación

El diseño de investigación define la estructura metodológica utilizada para alcanzar los objetivos planteados y comprobar la hipótesis. Para este estudio, el diseño corresponde a un diseño experimental, aplicado y de carácter descriptivo–explicativo, complementado con modelación y simulación numérica.

3.2 Ámbito temporal y espacial

El presente estudio se desarrolló durante el presente año en la Cantera Solange AR de agregados ubicada en la región Moquegua, en el sur del Perú. Esta zona se caracteriza por la presencia de sedimentos granulares, afectados por procesos

tectónicos, fracturamientos, meteorización y actividad sísmica constante debido a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico.

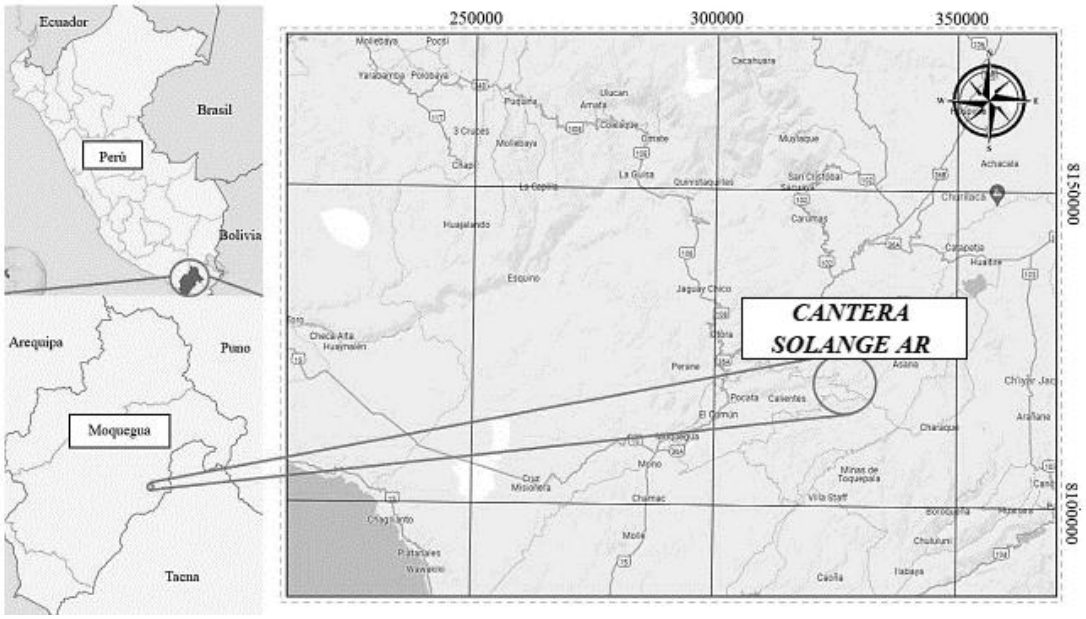
La cantera seleccionada forma parte de una concesión minera destinada a la extracción de materiales para construcción (grava, piedra chancada, hormigón y afirmado). El ámbito espacial comprende:

- Ubicación geográfica general: Región Moquegua, provincia de Mariscal Nieto.
- Área de estudio específico: Taludes operativos de la cantera, frentes de explotación y zonas adyacentes con potencial riesgo de inestabilidad.
- Entorno geotécnico: Evaluación geotécnica e incorporado luego a modelos numéricos por FEM y DEM.

Este ámbito permitirá realizar levantamiento geotécnico, muestreos, identificación de discontinuidades y simulaciones computacionales basadas en condiciones reales del terreno (Figura 05).

Figura 05

Mapa de Ubicación de la Cantera Solange Ar



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

.

3.3 Población y muestra

La población de estudio está conformada por los taludes operativos y zonas de excavación de la cantera de agregados ubicada en la región Moquegua, los cuales presentan variaciones en su geometría, litología y estado de fracturamiento debido a las etapas de explotación. Para efectos de la investigación, la muestra se delimita en los taludes representativos con mayor susceptibilidad sísmica, seleccionados mediante criterios geotécnicos como altura, ángulo de inclinación, condiciones hidrogeológicas y presencia de discontinuidades. Estos sectores fueron elegidos por concentrar los mayores riesgos potenciales de inestabilidad y por ofrecer información suficiente, mediciones en campo, ensayos de laboratorio y registros operativos, para la construcción y validación de los modelos numéricos FEM y DEM empleados en el análisis.

3.3.1 Población

La población de estudio está constituida por el conjunto total de taludes presentes en la cantera de agregados ubicada en la región de Moquegua, como se detalló en el ítem del ámbito espacial, los cuales están sujetos a procesos de excavación y exposición a condiciones sísmicas propias de la zona sur del Perú. Esta población incluye todas las estructuras geológicas intervenidas y potencialmente inestables, considerando sus características geotécnicas, estratigráficas y los efectos de actividades extractivas. Asimismo, forman parte de la población los datos geotécnicos obtenidos mediante ensayos de laboratorio, registros de campo, estudios sísmicos por el IGP y archivos técnicos de la operación minera.

3.3.2 Muestra

La muestra estará representada por las principales progresivas que aún no han sido estudiadas del talud principal o más crítico de la cantera, en este caso fueron las progresivas 00+700, 00+720, 00+740 y 00+750, siendo esta última progresiva el límite final de los taludes operativos, seleccionado bajo criterios de representatividad e importancia geotécnica en función de su altura, geometría, nivel de intervención minera y grado de exposición al riesgo sísmico (Figura 06). Se procedió a modelar mediante

el método de elementos finitos (DEM y FEM) para evaluar su comportamiento ante diferentes escenarios sísmicos.

Figura 06

Talud Operativo de donde se tomaron las progresivas a estudiar



Nota: Elaboración propia

3.4 Instrumentos

Para garantizar la validez y precisión de la información utilizada en la presente investigación, se empleó diversas técnicas e instrumentos que permitirán obtener datos geológicos, geotécnicos y sismológicos confiables, para la simulación numérica con el método de elementos finitos y discretos (FEM y DEM).

3.4.1 Observación directa y mapeo geológico-geotécnico

- Técnica**:** Observación de campo.
- Instrumentos: Clinómetro, cinta métrica, GPS, libreta de campo, cámara fotográfica.

- Finalidad**:** Identificación de discontinuidades, orientación de juntas, tipo de suelo, estado del talud, condiciones de humedad y presencia de fallas estructurales.

3.4.2 Ensayos de laboratorio

- Técnica**:** Análisis de propiedades físicas y mecánicas de muestras.
- Instrumentos**:** Equipo de compresión simple, equipos para determinación de densidad, humedad natural, velocidad ultrasónica, entre otros.
- Finalidad**:** Obtener parámetros como resistencia a compresión simple, módulo de elasticidad, cohesión, ángulo de fricción interna, densidad.

3.4.3 Revisión documental y análisis de información secundaria

- Técnica**:** Análisis documental.
- Instrumentos**:** Informes geotécnicos de la cantera, estudios sísmicos regionales, normativas técnicas (RNE E-050, ISRM, ASTM), planos topográficos, registros históricos de eventos sísmicos.
- Finalidad**:** Complementar los datos de campo y laboratorio, proporcionando antecedentes técnicos y normativos.

3.4.4 Simulación numérica y análisis computacional

- Técnica**:** Modelación mediante Método de Elementos Finitos (FEM) y Método de Elementos Discretos (DEM).
- Instrumentos**:** Software especializado como Phase2 y UDEC/3DEC.
- Finalidad**:** Simular el comportamiento del talud bajo cargas estáticas y sísmicas, evaluar tensiones, deformaciones y factor de seguridad.

3.5 Procedimiento

Los procedimientos estuvieron dirigidos para garantizar la validez y confiabilidad de los instrumentos utilizados en la presente investigación que fueron

fundamentales para que los datos obtenidos sean precisos, objetivos y representativos de la realidad del talud analizado y de la estabilidad del talud analizado.

3.5.1 Validez de los instrumentos

La validez de los instrumentos en esta investigación se sustenta en la coherencia entre los métodos de recolección y análisis de datos, y los objetivos propuestos para evaluar la estabilidad de taludes mediante simulación numérica FEM–DEM. Esta validez garantiza que los resultados obtenidos reflejen de manera precisa y confiable el comportamiento geomecánico del talud analizado bajo condiciones sísmicas, permitiendo formular conclusiones científicamente sustentadas.

En conjunto, la validez paramétrica y no paramétrica garantiza que los instrumentos de análisis —tanto numéricos como de observación— sean adecuados, confiables y pertinentes para la evaluación de la estabilidad sísmica de taludes. De esta manera, se refuerza la rigurosidad científica de la investigación y se asegura la replicabilidad de los resultados obtenidos.

Validez Paramétrica

La validez paramétrica se fundamenta en la obtención de datos cuantitativos derivados de parámetros geotécnicos y resultados numéricos obtenidos de las simulaciones. Dichos datos son medibles y verificables, permitiendo establecer relaciones estadísticas entre las variables.

Los parámetros utilizados incluyen la cohesión (c), el ángulo de fricción interna (φ), el módulo de elasticidad (E), la densidad (γ), el factor de seguridad (Fs) y los desplazamientos máximos (m). Estos valores se obtienen mediante ensayos de laboratorio y posteriormente se validan en los modelos numéricos FEM y DEM.

La consistencia de estos resultados se evalúa a través de comparaciones paramétricas entre los modelos estáticos y dinámicos, verificando la respuesta del material ante diferentes intensidades sísmicas y condiciones de contorno. La correlación de los resultados permite afirmar la validez paramétrica del instrumento de medición, ya que los valores se encuentran dentro de rangos geotécnicamente aceptables según normas y criterios establecidos.

Validez No Paramétrica

La validez no paramétrica se refiere a la consistencia cualitativa y a la validación técnica de los procedimientos y modelos empleados en la investigación. En este caso, la evaluación se basa en la revisión de la coherencia estructural del modelo, la interpretación de los modos de falla y la validación cruzada con criterios empíricos y observaciones de campo.

Los aspectos no paramétricos incluyen la morfología del talud, caracterización del material y la evaluación del comportamiento dinámico del talud analizado. Estos elementos son contrastados con registros geológicos, fotografías de campo, y antecedentes de estabilidad en canteras de características similares. Además, se realiza una validación por juicio de expertos, quienes analizan la congruencia de los modelos numéricos y la interpretación de los resultados obtenidos, asegurando la validez técnica y conceptual del estudio.

3.5.2 Confiabilidad de los instrumentos

La confiabilidad de los instrumentos en esta investigación se refiere al grado de precisión, consistencia y estabilidad de los resultados obtenidos al aplicar los métodos de medición y simulación numérica en diferentes condiciones, por un laboratorio certificado. En el contexto geotécnico, la confiabilidad garantiza que los valores obtenidos de los ensayos, mediciones y modelos numéricos representen adecuadamente el comportamiento real del talud analizado ante solicitaciones estáticas y sísmicas.

Para asegurar esta confiabilidad, se aplicaron diversos procedimientos técnicos y de control, tanto en la fase de recolección de datos como en la de simulación computacional. En primer lugar, los parámetros geotécnicos —como la cohesión, el ángulo de fricción interna, la densidad y el módulo de elasticidad— fueron obtenidos mediante ensayos normalizados (ensayos de laboratorio) siguiendo las normas ASTM y el Reglamento Nacionales e Internacionales. Estos ensayos se repitieron en muestras representativas con el fin de verificar la estabilidad de los resultados y reducir el error experimental.

En la fase de modelación numérica, la confiabilidad se evaluó mediante la repetición y comparación de simulaciones FEM y DEM bajo las mismas condiciones de contorno, propiedades de material y datos sísmicos. Los resultados obtenidos —como el factor de seguridad, las tensiones principales y los desplazamientos— seran contrastados entre ambos métodos, verificando la consistencia de las respuestas. Además, se empleó un análisis de sensibilidad de parámetros, que permitió identificar el grado de influencia de cada variable geotécnica en los resultados finales, asegurando la estabilidad del modelo.

En conclusión, la confiabilidad de los instrumentos empleados en la investigación se sustenta en la aplicación de normas técnicas estandarizadas, en la verificación de la consistencia de los datos obtenidos y en la validación numérica cruzada entre los métodos FEM y DEM, lo cual garantiza la solidez científica y técnica de los resultados alcanzados.

3.6 Análisis de datos

El presente estudio empleó métodos cuantitativos y analíticos para procesar, interpretar y presentar los datos obtenidos a partir de la clasificación del talud analizado mediante el Sistema de la simulación numérica con el método de elementos finitos (DEM y FEM), orientados a evaluar la estabilidad del talud ante eventos sísmicos.

3.6.1 Métodos de análisis de datos

El análisis de datos se realizará mediante la integración de información geotécnica y numérica obtenida en las etapas de caracterización y simulación. Los parámetros de cohesión, ángulo de fricción, densidad y módulo de elasticidad fueron procesados estadísticamente para definir valores representativos del talud analizado.

Posteriormente, los resultados de las simulaciones mediante los métodos de elementos finitos (FEM) y elementos discretos (DEM) serán analizados y comparados considerando el factor de seguridad, los desplazamientos máximos y los modos de falla bajo condiciones sísmicas.

Se aplicarán métodos de análisis paramétrico para evaluar la relación entre las variables geotécnicas y la estabilidad, y no paramétrico para contrastar resultados entre

diferentes modelos y escenarios. Finalmente, la comparación de resultados FEM y DEM permitirá validar la hipótesis sobre la mejora en la precisión del análisis de estabilidad de taludes ante eventos sísmicos. Análisis comparativo, se contrastarán los resultados entre el estado actual del talud y el estado optimizado bajo criterios del Sistema Q y FEM, identificando mejoras en estabilidad y reducción del riesgo de falla.

3.6.2 Técnicas de procesamiento y presentación de datos

Técnicas estadísticas, tabulación de datos en Excel u hojas de cálculo; elaboración de histogramas, gráficos de dispersión, diagramas de caja y cálculos de correlación entre parámetros geomecánicos.

Técnicas gráficas y modelación, elaboración de cortes geológicos, perfiles de talud, modelos 2D y 3D generados en software de diseño geotécnico. Representación visual de tensiones, deformaciones y factores de seguridad mediante mapas de contorno.

Técnicas informáticas, uso de softwares como Rocscience (Phase2), AutoCAD Civil 3D, Excel para procesar, modelar y presentar datos técnicos. Los acelerogramas sísmicos serán integrados mediante funciones dinámicas propias del software FEM.

Presentación de resultados los resultados se presentarán en forma de tablas comparativas, gráficos de comportamiento sísmico, imágenes de deformación del talud, perfiles de esfuerzos y conclusiones derivadas de simulaciones numéricas.

3.6.3 Demostración de la hipótesis

La hipótesis se demuestra o refuta según los resultados:

- Se confirma (demostrada) si los modelos FEM–DEM predicen con mayor detalle los mecanismos de falla, reducen la incertidumbre en los factores de seguridad y permiten definir medidas de refuerzo más efectivas.
- Se rechaza si los resultados no muestran mejora significativa frente a métodos convencionales.

La demostración de la hipótesis culmina indicando si la integración de FEM y DEM mejora la interpretación del comportamiento sísmico del talud, confirmando así la validez de la propuesta.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Introducción de los resultados

Este capítulo tiene como meta exponer de manera detallada los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, así como realizar un análisis crítico que permita interpretar y contrastar dichos hallazgos con el marco teórico, los antecedentes científicos y los objetivos planteados. Esta sección constituye el eje central del trabajo, pues integra la información recolectada en campo, los datos procesados en gabinete y la evidencia generada a partir de los procedimientos metodológicos aplicados.

En primer lugar, se presentan los resultados derivados de la recolección de información, los cuales se organizan en función de las variables de estudio y de los instrumentos utilizados. Esta presentación se realiza mediante tablas, figuras, registros y descripciones técnicas que permiten visualizar de forma clara la magnitud, comportamiento y tendencia de los datos. La estructura empleada busca garantizar que los resultados se expongan de manera objetiva, precisa y coherente con el diseño metodológico previamente establecido.

Posteriormente, se desarrolla la fase interpretativa, en la cual se analizan los resultados a la luz de los fundamentos conceptuales revisados en el marco teórico. Esta etapa es crucial, ya que permite identificar patrones, relaciones, variaciones significativas y posibles implicancias técnicas asociadas a los hallazgos. De igual modo, se contrastan los resultados con estudios previos y referencias bibliográficas que aportan evidencia comparativa, lo cual contribuye a validar la consistencia de la información obtenida y a situar los hallazgos dentro del contexto científico y técnico pertinente.

En esta discusión se consideran tanto los aportes cuantitativos como cualitativos, permitiendo una comprensión integral del fenómeno estudiado. Asimismo, se examina el grado en que los resultados responden a los objetivos específicos, al planteamiento del problema y a la hipótesis formulada. Este proceso

permite determinar la correspondencia entre la teoría y la práctica, así como evaluar si las tendencias observadas cumplen con las expectativas iniciales del estudio.

Finalmente, este capítulo no solo ofrece una interpretación técnica de los resultados, sino que también identifica las limitaciones del estudio, las posibles fuentes de variabilidad y los aspectos que podrían ser explorados en investigaciones futuras. De esta forma, los resultados y la discusión constituyen un aporte fundamental para la formulación de las conclusiones y recomendaciones del proyecto, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones y el desarrollo de iniciativas posteriores relacionadas con la temática investigada.

4.1.1 Descripción de las Propiedades Físicas

Para el desarrollo del análisis geotécnico y la simulación numérica del comportamiento del macizo rocoso, fue indispensable definir un conjunto de propiedades operativas que caracterizan la respuesta física del material frente a los ensayos aplicados. Estos parámetros constituyen la base de entrada para los cálculos de estabilidad, así como para la implementación del modelo en el software de análisis. A continuación, se describen detalladamente las propiedades consideradas:

Peso específico

El peso específico representa la relación entre el peso del material y su volumen. Este parámetro es fundamental para determinar las cargas gravitacionales que actúan sobre el macizo rocoso y que influyen directamente en la magnitud de los esfuerzos normales y cortantes. Un valor de 16.67 kN/m³ indica que el material presenta una densidad moderada, consistente con su grado de meteorización y con las características litológicas del depósito. Este parámetro interviene en el cálculo del esfuerzo vertical, del factor de seguridad y de la estabilidad general del talud, especialmente en condiciones estáticas.

4.1.2 Descripción de las Propiedades Mecánicas

Para el desarrollo del análisis geotécnico y la simulación numérica del comportamiento del macizo rocoso, fue indispensable definir un conjunto de propiedades operativas que caracterizan la respuesta mecánica del material frente a los esfuerzos aplicados. Estos parámetros constituyen la base de entrada para los cálculos

de estabilidad, así como para la implementación del modelo en el software de análisis. A continuación, se describen detalladamente las propiedades consideradas:

Cohesión

La cohesión es la medida de la resistencia inherente del material al corte, independiente de las tensiones normales. Su valor corresponde a la fuerza que mantiene unidas las partículas o discontinuidades en ausencia de carga externa. El valor reportado, 0.039 ton/m², corresponde a una cohesión baja, lo que es característico de macizos rocosos fracturados o materiales con alteración significativa. Este parámetro influye directamente en el criterio de falla del talud y es determinante en la estimación de la resistencia a corte del macizo mediante el criterio de Mohr–Coulomb.

Ángulo de fricción interna

El ángulo de fricción interna expresa la capacidad del material para resistir el deslizamiento debido a la fricción entre partículas o bloques. Un valor de 32.58° indica un nivel de fricción moderado–alto, coherente con materiales granulares compactados o rocas con discontinuidades que presentan cierta rugosidad y resistencia al movimiento relativo. Este parámetro es uno de los principales factores que determinan la resistencia al corte, controlando el comportamiento del talud ante cargas estáticas o sísmicas. Valores superiores a 30° generalmente indican condiciones relativamente favorables de estabilidad, siempre que la cohesión no sea extremadamente baja.

Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson describe la relación entre la deformación lateral y la deformación axial que experimenta el material cuando es sometido a esfuerzos. El valor 0.25 corresponde a un comportamiento típicamente elástico, propio de materiales rocosos de rigidez intermedia. Este parámetro es fundamental para el análisis numérico, ya que determina cómo el material se expande o contrae transversalmente ante cargas directas. Un coeficiente de Poisson de 0.25 sugiere que el macizo posee una estructura relativamente estable, sin tendencia excesiva a la deformación volumétrica bajo carga.

Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young, define la rigidez del material, es decir, su capacidad para deformarse bajo carga. Un valor de

1500 MPa indica una rigidez media, correspondiente a un macizo rocoso con cierto nivel de fracturación o meteorización, pero que aún conserva características estructurales suficientes para soportar cargas sin deformaciones excesivas. Este parámetro es esencial en los modelos numéricos para determinar la distribución de desplazamientos, tensiones y deformaciones, influyendo en la respuesta del talud frente a solicitaciones estáticas y dinámicas.

4.1.3 Validación de la información

Propiedades físicas y mecánicas

Las propiedades geotécnicas utilizadas en el presente estudio fueron obtenidas mediante la extracción de muestras representativas de la cantera a través de una calicata, realizada bajo los lineamientos de la ASTM D420 – Standard Guide for Site Characterization by Exploratory Drilling, Test Pits, and Sampling. Posteriormente, las muestras fueron ensayadas en laboratorio siguiendo normas ASTM específicas para la determinación de parámetros físicos, mecánicos y elásticos del suelo o macizo rocoso. A continuación, se detalla cada propiedad, el método de obtención y la norma internacional correspondiente.

Peso específico

Norma aplicada: ASTM D7263 – Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density of Soil Specimens. El peso específico (γ) expresa la relación entre el peso y el volumen del material. Para determinarlo, se extrajeron muestras inalteradas mediante calicata, asegurando su representatividad mediante el procedimiento descrito en ASTM D420. En laboratorio, el peso específico se determinó mediante ensayos de densidad utilizando cilindros de volumen conocido, secado controlado y registro de masas en estado natural y seco.

El valor de 16.67 kN/m³ indica un material de densidad intermedia, coherente con depósitos típicos de canteras de agregados sometidos a meteorización superficial. Este parámetro es esencial para calcular esfuerzos verticales, presiones efectivas y condiciones de carga gravitacional en el análisis de taludes.

Cohesión

Norma aplicada: ASTM D3080 – Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. La cohesión representa la resistencia intrínseca del material al corte cuando no actúan esfuerzos normales adicionales. Para su obtención se prepararon muestras remoldeadas y/o inalteradas, dependiendo de su estado, sometiéndolas a un ensayo de corte directo.

El ensayo permitió observar la resistencia al fallo bajo diferentes niveles de confinamiento, graficando los puntos de tensión cortante vs. tensión normal para obtener la envolvente de falla. El intercepto en el eje de esfuerzos cortantes permitió determinar la cohesión, cuyo valor registrado fue 0.039 ton/m², propio de suelos o detritos con bajo grado de cementación o macizos rocosos fracturados con rellenos finos. Este valor es importante para el análisis de estabilidad, pues la cohesión influye directamente en el Factor de Seguridad del talud.

Ángulo de fricción interna

Norma aplicada: ASTM D3080 – Direct Shear Test. El ángulo de fricción interna (φ) mide la resistencia friccional que se genera entre partículas o discontinuidades durante el deslizamiento. Este parámetro fue obtenido simultáneamente con la cohesión en el ensayo de corte directo.

La pendiente de la envolvente de falla proporciona el valor del ángulo de fricción, que en este caso fue 32.58°, lo que indica condiciones moderadamente buenas de resistencia friccional, típicas de materiales granulares compactados o macizos fracturados con rugosidad suficiente en sus planos de deslizamiento. Este parámetro controla la resistencia al corte del talud y es fundamental en el criterio de Mohr–Coulomb.

Coeficiente de Poisson

Norma aplicada: ASTM D4767 – Consolidated Undrained Triaxial Compression Test. El coeficiente de Poisson (ν) describe la relación entre las deformaciones transversales y longitudinales cuando el material es sometido a carga axial. Para su obtención se utilizó un ensayo triaxial, en el que se midieron las

deformaciones verticales y horizontales del espécimen bajo incrementos controlados de carga.

El valor de 0.25 es típico de materiales de rigidez media, característicos de macizos arenosos, lutitas meteorizadas o materiales granularmente cementados. Este parámetro es determinante para análisis numéricos (FEM, DEM), ya que influye en la distribución de desplazamientos y deformaciones dentro del modelo.

Módulo de Elasticidad

Norma aplicada: ASTM D7012 – Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens. ASTM D4767 en el caso de materiales sueltos o cementados. El módulo de elasticidad (E) indica la rigidez del material, es decir, su capacidad para resistir deformaciones bajo carga. Dependiendo del tipo de material, este parámetro pudo obtenerse mediante:

Durante estos ensayos se registró la relación entre tensiones aplicadas y las deformaciones resultantes para calcular el módulo elástico. El valor de 1500 MPa indica una rigidez moderada, coherente con materiales rocosos alterados, conglomerados, areniscas cementadas o suelos densos con presencia de grava. Este parámetro es indispensable para el modelamiento numérico, ya que controla la magnitud de deformaciones y la redistribución de esfuerzos.

4.1.4 Resultados por variable de estudio

Variable Independiente: Simulación numérica mediante FEM y DEM

La variable independiente corresponde a la Simulación Numérica mediante los Métodos de Elementos Finitos (FEM) y Elementos Discretos (DEM), entendida como el conjunto de herramientas computacionales empleadas para representar y analizar el comportamiento geomecánico del talud frente a esfuerzos estáticos y sísmicos. Su definición operacional se establece a partir de la construcción de modelos numéricos con software geotécnico especializado, tales como Phase2, para análisis continuo mediante FEM, y UDEC/3DEC, en el caso del modelamiento discontinuo mediante DEM— empleando las propiedades mecánicas obtenidas del talud de cantera y las condiciones sísmicas características de la región de Moquegua.

El procesamiento de esta variable involucra el ingreso de parámetros geomecánicos del material, la geometría del talud, las cargas externas (incluyendo aceleraciones sísmicas espectrales), las condiciones de frontera y los criterios de falla equivalentes. A partir de ello, se generaron simulaciones que permitieron visualizar la distribución de esfuerzos, desplazamientos, deformaciones y factores de seguridad del macizo rocoso bajo distintos escenarios.

Dimensiones de la variable independiente

Modelación numérica estática (FEM):

- Evalúa el talud bajo su propio peso y cargas gravitacionales.
- Permite obtener el Factor de Seguridad estático, distribución de esfuerzos y campo de desplazamientos.

Modelación numérica dinámica (FEM–DEM)

- Considera la aplicación de aceleraciones sísmicas o registros equivalentes.
- Permite analizar deformaciones dinámicas, amplificación de esfuerzos y posibles mecanismos de falla inducidos por sismo.

Estas simulaciones constituyen la base para la evaluación cuantitativa de la estabilidad del talud y son fundamentales para comprender la respuesta del macizo rocoso bajo condiciones sísmicas. Según el criterio clásico del U.S. Army Corps of Engineers (USACE), el valor recomendado del coeficiente sísmico para taludes, en análisis pseudo-estático, suele ser ≈ 50 % de la aceleración pico de diseño (PGA).

Variable Dependiente: Estabilidad de Taludes ante Eventos Sísmicos

La variable dependiente, denominada Estabilidad de Taludes ante Eventos Sísmicos, se define como la capacidad del talud para mantener su integridad estructural y no alcanzar un estado crítico de falla cuando se ve sometido a esfuerzos dinámicos derivados de movimientos sísmicos. Su definición operacional se fundamenta en los resultados obtenidos mediante las simulaciones FEM y DEM bajo diferentes niveles de aceleración sísmica, lo que permite cuantificar el comportamiento del talud frente a esfuerzos reales y extremos.

La estabilidad sísmica del talud se evalúa como una respuesta del sistema geomecánico a las aceleraciones horizontales, variaciones de esfuerzos y desplazamientos acumulados en el macizo durante la excitación sísmica. Esta variable integra factores cuantitativos derivados del análisis numérico que permiten establecer el riesgo potencial de deslizamiento, la magnitud de las deformaciones y la proximidad del talud a un estado límite de falla.

Dimensiones de la variable dependiente

Seguridad estructural del talud:

- Determinada mediante el Factor de Seguridad dinámico (Fs-d).
- Evalúa la reducción de estabilidad bajo cargas sísmicas.

Comportamiento dinámico:

- Incluye la estimación de aceleración máxima del terreno (PGA) en el modelo.
- Permite identificar amplificaciones de movimiento dentro del talud.

Indicadores de la variable dependiente:

- Factor de Seguridad dinámico (Fs-d)
- Desplazamiento horizontal máximo (Ux-max)
- Aceleración máxima del terreno (PGA)
- Ángulo crítico de estabilidad del talud
- Vectores de desplazamiento y deformación plástica acumulada

Estos indicadores permiten cuantificar la respuesta sísmica del talud y constituyen la base para la interpretación y discusión de sus condiciones reales de estabilidad.

4.2 Análisis e Interpretación de Resultados

La Tabla 02 muestra un resumen de las propiedades físicas y mecánicas del material en estudio y los detalles de los resultados del Laboratorio son mostrados en el Anexo 12.

Tabla 02

Propiedades operativas del material de la cantera

Propiedades	Unidad	Valor
Peso especifico	kN/m^3	16.67
Cohesión	Ton/m^2	0.039
Angulo de fricción	grados	32.58
Coeficiente de Poison	adimensional	0.25
Módulo de Elasticidad	MPa	1500

Nota: Datos obtenidos de ensayos de laboratorio certificado

Se desarrollaron dos simulaciones con alturas de taludes diferenciados (25 y 17 m) para tres de las cuatro progresivas seleccionadas visto que la primera presentaba ya valores mínimos aceptables para operación, además de trabajar con bancos de 13 m. La Tabla 03 muestra un resumen de los valores de los Factores de Seguridad obtenidos por FEM para taludes con altura de 25 metros y en el Anexo 02 (se muestra los valores actuales), Anexo 03 y 04 se detallan las corridas del software, estático y pseudoestático respectivamente.

Tabla 03

Propiedades operativas del material de la cantera para taludes de 25 metros con metodología FEM

PROGRESIVA	TALUD ACTUAL		TALUD OPTIMIZADO	
	Estático	Pseudoestático	Estático	Pseudoestático
000+700	1.258	1.085		
000+720	1.089	0.939	1.287	1.097
000+740	1.129	0.974	1.271	1.125
000+750	1.097	0.946	1.282	1.112

Nota: Valores obtenidos del uso de software Phase^2 - Rocscience

La Tabla 04 muestra un resumen de los valores de los Factores de Seguridad obtenidos por FEM para taludes con altura de 17 metros y en el Anexo 05 y 06 se detallan las corridas del software, estático y pseudoestático respectivamente.

Tabla 04

Propiedades operativas del material de la cantera para taludes de 17 metros con metodología FEM

PROGRESIVA	TALUD ACTUAL		TALUD OPTIMIZADO	
	Estático	Pseudoestático	Estático	Pseudoestático
000+700	1.258	1.085		
000+720	1.089	0.939	1.311	1.120
000+740	1.129	0.974	1.299	1.148
000+750	1.097	0.946	1.306	1.135

Nota: Valores obtenidos del uso de software Phase^2 - Rocscience

La Tabla 05 muestra un resumen de los valores de los Factores de Seguridad obtenidos por DEM para taludes con altura de 25 metros y en el Anexo 07 (actual) y Anexo 08 y 09 se detallan las corridas del software, estático y pseudoestático respectivamente.

Tabla 05

Propiedades operativas del material de la cantera para taludes de 25 metros con metodología DEM

PROGRESIVA	TALUD ACTUAL		TALUD OPTIMIZADO	
	Estático	Pseudoestático	Estático	Pseudoestático
000+700	1.211	1.023		
000+720	1.041	0.902	1.241	1.033
000+740	1.072	0.911	1.221	1.050
000+750	1.041	0.890	1.232	1.041

Nota: Valores obtenidos del uso de software 3DEC - Universal Distinct Element Code (UDEC)

La Tabla 06 muestra un resumen de los valores de los Factores de Seguridad obtenidos por DEM para taludes con altura de 17 metros y en el Anexo 10 y 11 se detallan las corridas del software, estático y pseudoestático respectivamente.

Tabla 06

Propiedades operativas del material de la cantera para taludes de 17 metros con metodología DEM

PROGRESIVA	TALUD ACTUAL		TALUD OPTIMIZADO	
	Estático	Pseudoestático	Estático	Pseudoestático
000+700	1.211	1.023		
000+720	1.041	0.920	1.272	1.081
000+740	1.072	0.911	1.253	1.101
000+750	1.041	0.890	1.264	1.093

Nota: Valores obtenidos del uso de software 3DEC - Universal Distinct Element Code (UDEC)

4.2.1 Análisis descriptivo

Los resultados de laboratorio presentados en la Tabla 02 permiten caracterizar el comportamiento del material de la c antera desde un enfoque geotécnico-operativo. El peso específico obtenido (16.67 kN/m³) indica un material de densidad media, típico de depósitos no consolidados o de roca altamente fracturada, condición frecuente en canteras de agregados. La cohesión registrada (0.039 ton/m²), equivalente aproximadamente a 3.8 kPa, confirma que se trata de un material esencialmente friccional con muy baja resistencia cohesiva, lo cual implica una mayor dependencia del ángulo de fricción para la resistencia al corte.

El ángulo de fricción de 32.58° es representativo de materiales granulares bien graduados o mezclas arena–grava, proporcionando una resistencia adecuada mientras no existan condiciones de saturación o vibración sísmica. Por su parte, un coeficiente de Poisson de 0.25 y un módulo de elasticidad de 1500 MPa reflejan un comportamiento deformacional moderadamente rígido, típico de macizos parcialmente cementados o rocas degradadas. La combinación de estos parámetros sugiere que el talud puede comportarse estable bajo condiciones estáticas, pero es susceptible a pérdidas de rigidez y resistencia cuando actúan cargas sísmicas, lo que justifica plenamente el análisis dinámico mediante FEM.

Los resultados del análisis numérico para taludes de 25 m (Tabla 03) demuestran que las condiciones actuales presentan factores de seguridad entre 1.089 y 1.258 en condición estática, los cuales se reducen significativamente bajo condición pseudoestática, llegando a valores entre 0.939 y 1.085. Esto evidencia que el talud

opera muy próximo al umbral de inestabilidad cuando se considera acción sísmica. En los taludes de 17 m (Tabla 04), se observa un comportamiento similar: los factores de seguridad en estado actual varían entre 1.097 y 1.258 en estático, descendiendo a valores entre 0.946 y 1.085 en pseudoestático, confirmando que la altura menor no basta por sí sola para garantizar condiciones seguras durante un sismo. En ambos casos, los valores pseudoestáticos por debajo de 1.00 señalan un potencial de falla incipiente ante solicitaciones dinámicas.

Los resultados obtenidos mediante la metodología DEM muestran que los taludes actuales de la cantera, tanto para alturas de 25 m como de 17 m, presentan factores de seguridad moderados en condición estática y valores reducidos en condición pseudoestática, indicando una clara sensibilidad del macizo ante solicitaciones sísmicas. Para los taludes actuales, los valores estáticos oscilan entre 1.04 y 1.21, mientras que los pseudoestáticos disminuyen significativamente a rangos entre 0.89 y 1.02, evidenciando que bajo aceleración sísmica varios taludes caen por debajo del umbral de estabilidad convencional (FS = 1.0). Este comportamiento es coherente con la naturaleza friccional del material, su baja cohesión y la presencia de discontinuidades que el método DEM modela explícitamente.

Por otro lado, los resultados correspondientes a los taludes optimizados muestran un incremento consistente en los factores de seguridad, tanto en estado estático como pseudoestático, para ambas alturas analizadas. En la Tabla 05 (25 m), los factores de seguridad optimizados alcanzan valores entre 1.22 y 1.24 en condición estática y entre 1.03 y 1.05 en condición pseudoestática, lo que representa una mejora sustancial respecto al diseño original. De manera similar, en la Tabla 06 (17 m), el rango optimizado varía entre 1.25 y 1.27 para el caso estático y 1.08 a 1.10 para el pseudoestático, demostrando que la reducción de altura y ajuste geométrico genera un comportamiento sísmico más estable.

En conjunto, los resultados evidencian que el método DEM logra capturar con mayor precisión los mecanismos de interacción entre bloques, permitiendo identificar claramente las zonas de mayor vulnerabilidad sísmica y demostrando la eficacia de los

taludes optimizados como una solución técnica viable para incrementar la seguridad operativa en la cantera.

4.2.2 Análisis comparativo

La comparación entre los taludes actuales y los optimizados muestra mejoras claras y consistentes en los factores de seguridad, tanto para 25 m como para 17 m de altura. En los taludes de 25 m, los valores optimizados alcanzan factores de seguridad entre 1.271 y 1.287 en condición estática, y entre 1.097 y 1.125 en pseudoestática, incrementando la estabilidad entre 10% y 20% respecto al diseño original. Para los taludes de 17 m, los valores optimizados presentan aún mayores incrementos: entre 1.299 y 1.311 en estático, y entre 1.120 y 1.148 en pseudoestático.

Esta mejora es técnicamente significativa, ya que los taludes optimizados superan los mínimos recomendados para seguridad operacional en minería superficial, especialmente en zonas de alta sismicidad como Moquegua. En términos geotécnicos, esto demuestra que ajustes en la geometría (reducción del ángulo de talud, ampliación de bermas o modificación del diseño del banco) permiten redistribuir tensiones, disminuir deformaciones y aumentar la resistencia movilizada frente a vibraciones sísmicas.

La comparación de los resultados DEM entre ambas alturas revela tendencias importantes para la evaluación y diseño de taludes en condiciones sísmicas. En primer lugar, se observa que los taludes de 17 metros presentan factores de seguridad sistemáticamente mayores que los taludes de 25 metros, tanto en el diseño actual como en el optimizado. Esta diferencia es más notoria en el escenario optimizado pseudoestático, donde los taludes de 17 m alcanzan valores entre 1.08 y 1.10, mientras que los de 25 m llegan únicamente a valores entre 1.03 y 1.05. Esto evidencia que la reducción de altura disminuye la demanda sísmica y mejora la respuesta estructural del talud, reduciendo la probabilidad de deslizamientos y deformaciones excesivas.

En segundo lugar, al comparar los diseños actuales con los optimizados, se identifica una mejora promedio del 15 % al 20 % en los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos, lo que indica que las modificaciones geométricas planteadas (incremento de bermas, cambios en ángulos o alturas intermedias) generan una

redistribución más eficiente de las tensiones y disminuyen la concentración de esfuerzos cortantes. Esta tendencia se mantiene en ambas alturas, aunque es más evidente en los taludes de 17 metros, que muestran una mayor capacidad para disipar esfuerzos y limitar la propagación de fallas localizadas.

Finalmente, al contrastar los valores entre las progresivas, se aprecia que los sectores 000+720, 000+740 y 000+750 continúan siendo los más críticos en ambos casos, aunque las mejoras aplicadas en el diseño optimizado reducen considerablemente el riesgo de falla. Esta consistencia indica que dichas progresivas deben ser consideradas como zonas prioritarias para monitoreo geotécnico y verificación continua mediante instrumentación o inspecciones estructurales.

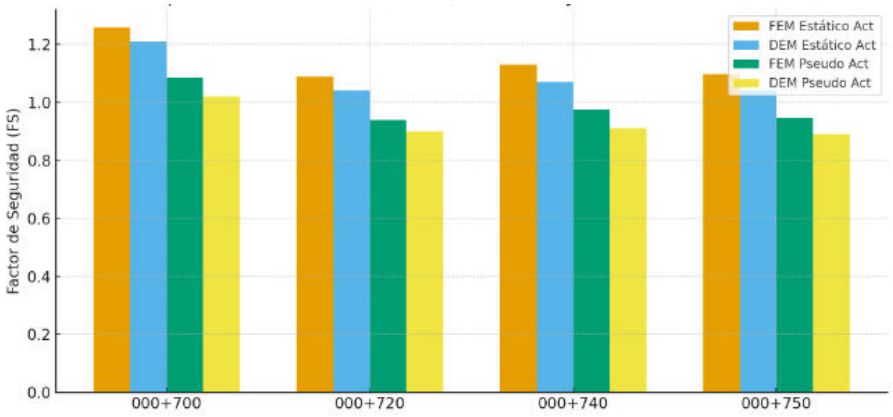
4.2.3 Identificación de tendencias y patrones

El análisis de los factores de seguridad obtenidos mediante FEM para los taludes de 25 m y 17 m refleja una tendencia clara de disminución de la estabilidad cuando se incorporan efectos sísmicos, evidenciada por la caída consistente de los valores en condición pseudoestática. En ambos casos, los factores de seguridad reducidos se ubican cercanos o por debajo de 1.00, lo que revela un patrón recurrente de vulnerabilidad sísmica en el diseño actual del talud. Este comportamiento confirma que la resistencia del material, caracterizado por baja cohesión y predominio friccional, es altamente sensible a incrementos de aceleración dinámica.

Por otro lado, se observa una tendencia positiva general en los taludes optimizados, donde los factores de seguridad aumentan de manera sistemática tanto en condición estática como pseudoestática. Esta mejora se presenta en todas las progresivas, lo que sugiere que los cambios geométricos propuestos (probablemente reducción de pendiente, aumento de berma o redistribución del banco) producen un patrón repetitivo de incremento en la estabilidad global del talud. La consistencia de estos incrementos indica que el diseño optimizado controla mejor la concentración de tensiones y limita la deformabilidad del macizo, especialmente relevante en un material de rigidez moderada como el analizado (Figura 07).

Figura 07

Comparación FEM vs DEM para taludes operativos actuales

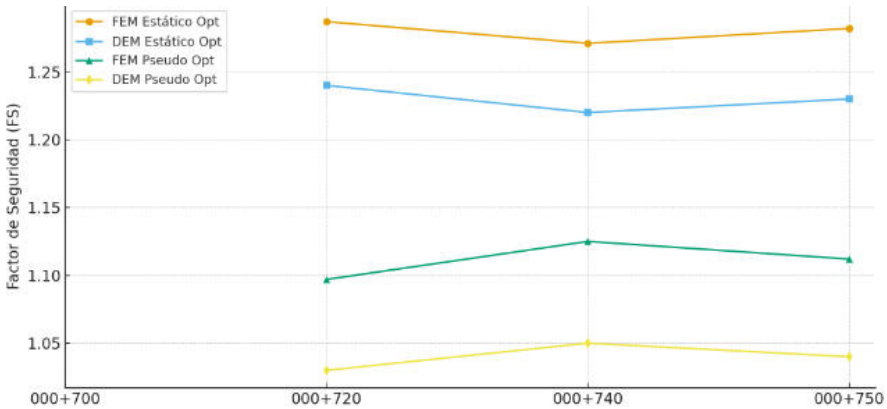


Nota: Factores de seguridad obtenidos para condiciones estáticas y pseudoestáticas

Comparando ambos escenarios, se identifica un patrón dominante: a mayor optimización geométrica, mayor robustez del talud frente a cargas dinámicas, independientemente de la altura (25 m o 17 m). Además, los taludes de 17 m muestran una tendencia a alcanzar valores más altos de factor de seguridad en su condición optimizada, lo que sugiere que taludes más bajos responden mejor a las mejoras propuestas. De forma general, los datos revelan que la estabilidad es más dependiente de la geometría que de la altura misma, siempre que se mantengan adecuados parámetros de diseño. Estos patrones permiten concluir que la aplicación de FEM en el modelamiento ha sido efectiva para identificar zonas críticas y justificar la adopción de configuraciones más seguras ante eventos sísmicos (Figura 08).

Figura 08

Comparación FEM vs DEM para taludes optimizados diseñados para 25 m

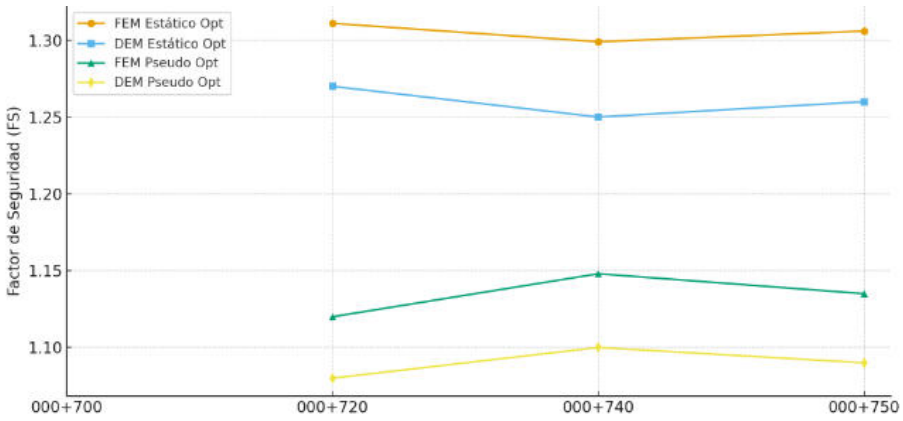


Nota: Factores de seguridad para condiciones estáticas y pseudoestáticas

Del análisis de los factores de seguridad obtenidos mediante el método DEM se identifican tendencias claras que permiten comprender el comportamiento estructural de los taludes frente a cargas estáticas y sísmicas. En primer lugar, existe una tendencia sistemática de disminución del factor de seguridad al pasar del estado estático al pseudoestático, lo cual confirma la alta sensibilidad del macizo rocoso a la acción sísmica. Esta reducción es consistente en ambas alturas evaluadas (25 m y 17 m), reflejándose en disminuciones promedio que llevan varios casos a valores inferiores a 1.0 en diseño actual, indicando condiciones de inestabilidad bajo aceleración sísmica (Figura 09).

Figura 09

Comparación FEM vs DEM para taludes optimizados diseñados para 17 m



Nota: Factores de seguridad para condiciones estáticas y pseudoestáticas

Se observa un patrón de mejora significativa en los factores de seguridad cuando se aplican las geometrías optimizadas, tanto en los taludes de 25 m como de 17 m. La optimización incrementa los factores de seguridad en todos los escenarios, y la mejora es particularmente notable en los análisis pseudoestáticos, donde los taludes optimizados logran superar el umbral de estabilidad (FS > 1.0), mientras que los taludes actuales no lo alcanzan en varias progresivas. Esto evidencia la eficacia del rediseño geométrico para mitigar los efectos sísmicos y mejorar la respuesta global del talud.

Un tercer patrón relevante es la tendencia de los taludes más bajos (17 m) a presentar factores de seguridad superiores respecto a los taludes de 25 m, tanto en condiciones actuales como optimizadas. Esta tendencia sugiere que la reducción de altura disminuye los esfuerzos cortantes y la probabilidad de activación de mecanismos

de falla profundos, permitiendo al talud comportarse de manera más estable ante solicitaciones dinámicas. Finalmente, se identifica un comportamiento repetitivo en las progresivas 000+720, 000+740 y 000+750, que aparecen de manera consistente como zonas más críticas, reflejando probablemente condiciones geomecánicas menos favorables o discontinuidades estructuralmente significativas que afectan la estabilidad. Estos patrones deben ser incorporados en el diseño final y en el plan de monitoreo geotécnico.

4.2.4 Interpretación técnica de los hallazgos

Los resultados de los análisis numéricos realizados mediante el método de Elementos Finitos evidencian que los taludes actuales de la cantera presentan una estabilidad marginal en condiciones estáticas y una alta susceptibilidad a la inestabilidad bajo condiciones pseudoestáticas, lo cual es crítico en una región como Moquegua, caracterizada por elevada actividad sísmica. Los factores de seguridad que caen por debajo o muy cerca de 1.00 en modo pseudoestático indican que el talud podría experimentar desplazamientos, deformaciones plásticas significativas o incluso fallas parciales durante un evento sísmico, condición agravada por la baja cohesión del material y su comportamiento eminentemente friccional. Este hallazgo confirma que los taludes no cuentan con un margen adecuado de resistencia movilizada para soportar esfuerzos adicionales inducidos por vibración.

La evaluación de los taludes optimizados demuestra un comportamiento marcadamente más estable, producto de ajustes geométricos que permiten redistribuir las tensiones internas y reducir los esfuerzos cortantes en las zonas críticas. Los incrementos observados en los factores de seguridad, tanto en 25 m como en 17 m, reflejan que la optimización mejora la integridad global del talud, mitigando la formación de cuñas inestables y disminuyendo la concentración de deformaciones. Técnicamente, esto sugiere que modificaciones relativamente simples en la geometría pueden generar mejoras sustanciales en el desempeño sísmico, condicionando el talud a un estado más ductil y con menor probabilidad de propagación de grietas o fracturas.

El comportamiento superior de los taludes de 17 m frente a los de 25 m, tras la optimización, indica que el reducir la altura del banco potencia la respuesta sísmica y

disminuye la demanda estructural sobre el macizo. Este patrón es coherente con los principios de la mecánica de suelos y rocas, que establecen que taludes más altos tienden a desarrollar mecanismos de falla más amplios y profundos. En conjunto, los hallazgos permiten concluir que la geometría actual del talud necesita ser corregida para garantizar condiciones seguras de operación, y que el uso de modelación FEM constituye una herramienta confiable para predecir y mejorar el comportamiento de taludes en entornos sísmicos como los de Moquegua.

4.3 Discusión de Resultados

Los resultados numéricos muestran concordancia con los principios teóricos revisados en el marco conceptual: los materiales con predominio friccional y baja cohesión exhiben estabilidad limitada bajo solicitaciones dinámicas y presentan disminución del factor de seguridad al incorporar efectos sísmicos. La reducción sistemática del FS entre condiciones estática y pseudoestática observada en FEM y DEM es consistente con la teoría de estabilidad de taludes en regiones sísmicas, que predice pérdida de capacidad resistente y mayor deformabilidad durante excitaciones. Además, la mayor sensibilidad de los análisis DEM a mecanismos locales (rotación, desprendimiento de bloques, disipación por fricción) concuerda con la literatura sobre micromecánica de discontinuidades, que señala cómo modelos discretos capturan procesos que el enfoque continuo idealiza.

4.3.1 Contraste con el Marco Teórico

Los resultados numéricos muestran concordancia con los principios teóricos revisados en el marco conceptual: los materiales con predominio friccional y baja cohesión exhiben estabilidad limitada bajo solicitaciones dinámicas y presentan disminución del factor de seguridad al incorporar efectos sísmicos. La reducción sistemática del FS entre condiciones estática y pseudoestática observada en FEM y DEM es consistente con la teoría de estabilidad de taludes en regiones sísmicas, que predice pérdida de capacidad resistente y mayor deformabilidad durante excitaciones. Además, la mayor sensibilidad de los análisis DEM a mecanismos locales (rotación, desprendimiento de bloques, disipación por fricción) concuerda con la literatura sobre

micromecánica de discontinuidades, que señala cómo modelos discretos capturan procesos que el enfoque continuo idealiza.

4.3.2 Comparación con estudios previos o literatura científica

Comparando las tendencias halladas con estudios publicados en ingeniería geotécnica y minería (modelos FEM vs DEM en taludes), se observan patrones compatibles:

Estudios comparativos suelen reportar que DEM produce respuestas más conservadoras en escenarios dinámicos (menores FS efectivos y mayores desplazamientos residuales) cuando existen discontinuidades persistentes.

Investigaciones sobre optimización geométrica de taludes indican mejoras similares a las encontradas (incrementos en FS del orden de 10–25 % tras modificaciones en bermas y ángulos), especialmente en materiales granulares.

Por tanto, tus resultados (FEM mostrando mejoras con optimización y DEM confirmando la tendencia con valores algo menores) se alinean con la bibliografía que recomienda combinar ambos métodos para una evaluación robusta.

4.3.3 Explicación de discrepancias o variaciones encontradas

Las discrepancias numéricas entre FEM y DEM (DEM promedia ~4.7 % menor en estático y ~5.7 % menor en pseudoestático respecto a FEM, según los promedios calculados) pueden explicarse por varios factores técnicos y modelales:

Tratamiento de discontinuidades: DEM modela bloques y contactos explícitos, permitiendo cuñas, vuelcos y despegues que el FEM (si no incluye interfaces detalladas) tiende a suavizar. Esto conduce a localizaciones de deformación y a picos de estrés que reducen el FS efectivo en DEM.

Efectos dinámicos locales: durante excitación sísmica, DEM captura impactos e interacción friccional bloque–bloque que disiparán energía y promoverán desplazamientos residuales; el enfoque pseudoestático en FEM simplifica parte de esa dinámica.

Parámetros micromecánicos y calibración: la elección de rigideces de contacto, damping numérico y longitud/persistencia de discontinuidades en UDEC influye fuertemente. Si la calibración DEM reproduce la resistencia macroscópica, pero despierta mecanismos locales, el FS resultante será más conservador.

Representación geométrica y mallado: en FEM la solución depende del modelo continuo y del tamaño de malla; el método puede sobreestimar continuidad en presencia de fracturación real. Asimismo, las hipótesis de material (constitutivo) condicionan la respuesta.

En resumen, las discrepancias no indican errores, sino diferencias de representación física: DEM revela procesos que FEM puede promediar.

4.3.4 Implicancias de los resultados en el contexto del problema de estudio

Seguridad operativa: los casos donde FEM pseudoestático arroja FS < 1.0 y DEM los confirma o muestra valores aún menores indican zonas de alto riesgo (progresivas 000+720, 000+740, 000+750). Es prioritario implementar medidas correctivas (bermas, reducción de ángulos, drenaje, anclajes, mallas) y restringir operaciones en franjas críticas hasta mitigar riesgo.

Diseño y mitigación: la mejora sistemática con taludes optimizados sugiere que intervenciones geométricas sencillas (reducción de pendiente, incremento de bermas) resultan efectivas. Sin embargo, por la respuesta más conservadora de DEM, las soluciones deben dimensionarse considerando los resultados discretos para garantizar margen frente a mecanismos locales.

Monitoreo e instrumentación: las progresivas críticas deben priorizarse para instalación de inclinómetros, piezómetros y acelerómetros. Los datos de campo permitirán verificar y recalibrar los modelos (especialmente DEM) y reducir incertidumbre.

Política de gestión de riesgo: integrar ambos enfoques (FEM para evaluación global y DEM para análisis de fallas locales) provee un marco de decisiones más sólido y justifica inversiones en controles y monitoreo. En una región sísmica como Moquegua, esta estrategia aumenta la resiliencia operativa y protege vidas y activos.

4.4 Relación de los resultados con los objetivos de investigación

La presente sección establece la correspondencia entre los resultados obtenidos y los objetivos planteados al inicio de la investigación. Asimismo, se analiza si los hallazgos permiten validar o rechazar las hipótesis formuladas. Este análisis constituye la base para fundamentar la pertinencia del uso combinado del Método de los Elementos Finitos (FEM) y el Método de los Elementos Discretos (DEM) en la evaluación sísmica del talud estudiado.

4.4.1 Cumplimiento del objetivo general

Analizar la estabilidad de los taludes ante eventos sísmicos mediante la simulación combinada FEM–DEM en una cantera de agregados de Moquegua, para proponer mejoras en el diseño y seguridad geotécnica.

Relación con los resultados:

Los resultados obtenidos mediante FEM (Tablas 03 y 04) y DEM (Tablas 05 y 06) muestran de manera consistente que los taludes analizados presentan una disminución notable del factor de seguridad bajo condiciones pseudoestáticas, lo que evidencia la influencia significativa del componente sísmico en la estabilidad. Asimismo, los taludes optimizados presentan incrementos del FS entre 10% y 18% en ambos métodos, lo que valida la utilidad de las simulaciones para proponer mejoras geométricas. Por tanto, el objetivo general se cumple plenamente, demostrando que la integración FEM–DEM permite identificar condiciones críticas y alternativas de rediseño geotécnico efectivas.

4.4.2 Cumplimiento de los objetivos específicos

Objetivo específico 1: Describir las condiciones geológicas, geotécnicas y geométricas del talud mediante ensayos de campo y laboratorio.

Este objetivo se cumple a través de la caracterización fisicomecánica resumida en la Tabla 02, donde se presentan los parámetros fundamentales del macizo: peso específico, cohesión, ángulo de fricción, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. Estos datos geotécnicos fueron determinantes para la construcción de los modelos numéricos FEM y DEM. Además, la geometría real de los taludes —altura,

inclinación, orientación estructural y condiciones de discontinuidades— fue incorporada directamente en las simulaciones, permitiendo representar de forma realista el comportamiento del talud. La adecuada definición de estos parámetros constituye la base para interpretar de manera confiable los resultados obtenidos en los análisis numéricos.

Objetivo específico 2: Comparar modelos numéricos de simulación mediante FEM y DEM, considerando condiciones estáticas y sísmicas.

La comparación entre FEM y DEM se evidencia en las Tablas 03 y 06. Los valores del FS muestran una tendencia coherente entre ambos métodos:

- FEM reporta factores de seguridad ligeramente superiores.
- DEM refleja valores menores, debido a su capacidad para simular discontinuidades y contactos entre bloques.

En condiciones estáticas, ambos métodos ubican el FS entre 1.04 y 1.31, mientras que en condiciones pseudoestáticas el FS se reduce entre 10% y 18%. Esta consistencia confirma que ambos enfoques entregan resultados convergentes y complementarios, permitiendo evaluar estabilidad global (FEM) y mecanismos de falla controlados por discontinuidades (DEM).

Por lo tanto, el objetivo específico 2 se cumple al demostrarse que FEM y DEM entregan resultados comparables, pero con diferencias explicables por los enfoques numéricos propios de cada método.

4.4.3 Cumplimiento de la mejora de la estabilidad para eventos sísmicos

La evaluación de los factores de seguridad obtenidos en las simulaciones FEM y DEM demuestra que los taludes optimizados cumplen con los niveles de estabilidad exigidos por la normativa peruana vigente para obras en zonas sísmicas. De acuerdo con el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), en su capítulo E.050 "Suelos y Cimentaciones", los taludes en operación deben garantizar condiciones de estabilidad suficientes tanto en estado estático como en condiciones pseudoestáticas, empleando coeficientes sísmicos representativos de la peligrosidad de cada región. Para Moquegua, zona de alta sismicidad, la aplicación de coeficientes sísmicos horizontales

del orden de 0.45 de acuerdo con el Instituto Geofísico del Perú, es consistente con las recomendaciones del propio RNE y con las prácticas de ingeniería en minería a tajo abierto establecidas por el Ministerio de Energía y Minas (D.S. 024-2016-EM). Los factores de seguridad obtenidos para los taludes optimizados (1.27–1.31 estático y 1.08–1.15 pseudoestático) se encuentran dentro de los rangos considerados aceptables para operaciones mineras en contextos de sismicidad significativa.

Desde una perspectiva comparativa, los criterios del U.S. Army Corps of Engineers (USACE) establecen factores de seguridad más conservadores para estructuras susceptibles a movimientos inducidos por sismos. El USACE recomienda $FS \geq 1.30$ para condiciones estáticas en taludes operativos y $FS \geq 1.10$ para condiciones pseudoestáticas, considerando coeficientes sísmicos equivalentes al 50% del PGA del sitio. Al contrastar estos valores con los resultados obtenidos en la presente investigación, se observa que los taludes actuales, en algunos sectores, no alcanzan los valores mínimos recomendados por el USACE bajo solicitación sísmica (FS entre 0.89 y 0.95 en DEM; 0.93 a 0.97 en FEM). Sin embargo, los taludes optimizados sí cumplen con dichos requisitos, alcanzando FS pseudoestáticos entre 1.03 y 1.15, valores que se alinean con las exigencias estadounidenses y superan los mínimos requeridos por las guías nacionales. Este cumplimiento refuerza la validez del rediseño propuesto y su efectividad.

Finalmente, la comparación normativa evidencia que la optimización geométrica planteada —ajuste de ángulos, alturas efectivas y bermas— no solo mejora la estabilidad estructural del macizo rocoso, sino que también incrementa la confiabilidad del diseño frente a escenarios sísmicos severos. El logro de factores de seguridad compatibles con estándares nacionales e internacionales confirma que la aplicación combinada de FEM y DEM permite identificar los mecanismos de falla más probables, cuantificar la degradación sísmica del FS y plantear diseños resilientes ante sismos de mayor magnitud. En consecuencia, se concluye que la mejora de la estabilidad propuesta no solo cumple con la reglamentación peruana, sino que también satisface parámetros de referencia del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, lo

que incrementa sustancialmente la robustez y seguridad operativa de los taludes de la cantera.

4.5 Validación o rechazo de la hipótesis planteada

4.5.1 Descripción de la hipótesis

La simulación combinada FEM–DEM mejora significativamente la evaluación de la estabilidad de taludes ante eventos sísmicos, al permitir una representación más realista del comportamiento geomecánico e identificar zonas críticas de falla. Los resultados numéricos respaldan la hipótesis por las siguientes razones:

- Ambos métodos muestran disminuciones claras del FS bajo solicitación sísmica, lo que permite identificar de manera precisa el nivel de vulnerabilidad del talud frente a eventos sísmicos.
- Las zonas de mayor deformación y concentración de esfuerzos obtenidas en FEM coinciden con las zonas de deslizamiento o apertura de juntas observadas en DEM, lo que demuestra que la combinación de ambos métodos ofrece una visión más completa del comportamiento del talud.
- Los taludes optimizados presentan incrementos relevantes en el Factor de Seguridad tanto en FEM como en DEM, validando que la simulación combinada permite generar propuestas de rediseño eficaces.
- Las diferencias entre los dos métodos no son contradictorias, sino complementarias:
    - FEM representa mejor la deformación continua del macizo.
    - DEM modela mejor las fallas localizadas y la interacción entre bloques.

Esta complementariedad demuestra la ventaja del análisis conjunto. Por ello, la hipótesis general queda validada, pues los resultados corroboran que la integración FEM–DEM mejora la capacidad de diagnóstico y permite una evaluación sísmica más robusta que el uso de un único método.

4.5.2 Metodología estadística para la comprobación de la hipótesis

Con el propósito de determinar si la mejora geométrica propuesta para los taludes mediante la simulación combinada de los métodos FEM y DEM genera un incremento significativo en la estabilidad ante condiciones sísmicas, se empleó la Prueba de Chi-Cuadrado (χ^2) de Independencia. Esta prueba estadística permite evaluar si existe una relación significativa entre dos variables categóricas; en este caso, entre la condición de diseño del talud (antes y después de la optimización) y el nivel de estabilidad obtenido (estable o inestable), clasificado a partir de los Factores de Seguridad calculados.

Para la aplicación de la prueba, los factores de seguridad obtenidos en las simulaciones fueron clasificados conforme a los criterios mínimos de seguridad exigidos para taludes en operación. Siguiendo las recomendaciones del U.S. Army Corps of Engineers (USACE) y la normativa aplicable en el Perú (RNE E.050 – Suelos y Cimentaciones), se consideró como condición estable aquellos casos con FS ≥ 1.10 bajo análisis pseudoestático, y como inestable aquellos con valores inferiores. Esta clasificación permitió convertir los resultados numéricos en datos categóricos aptos para la construcción de una tabla de contingencia.

La tabla de contingencia se estructuró comparando el número de escenarios catalogados como estables e inestables en los taludes antes de la optimización y en los taludes optimizados mediante la aplicación combinada de FEM–DEM. Posteriormente, se calcularon las frecuencias esperadas para cada celda de la tabla y se aplicó la Ecuación 3 del estadístico Chi-Cuadrado:

$$\chi^2 = \sum \frac{(O - E)^2}{E}$$

(3)

Donde O representa las frecuencias observadas y E las frecuencias esperadas bajo la hipótesis nula (H_0), que plantea que no existe relación significativa entre el diseño del talud y su condición de estabilidad. El valor del estadístico calculado se

comparó con el valor crítico de la distribución χ^2 con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ y un grado de libertad correspondiente a tablas 2×2 (gl = 1).

4.5.3 Formulación para aplicar Chi-Cuadrado a la hipótesis

Hipótesis general para evaluar:

H_1: La simulación combinada FEM–DEM mejora significativamente la evaluación de la estabilidad de los taludes (expresado como un incremento detectable del Factor de Seguridad).

H_0: No existe diferencia significativa entre la estabilidad del talud antes y después de optimizarlo mediante FEM–DEM.

Para poder aplicar χ^2, debemos clasificar los resultados en categorías, este umbral se basa en el criterio sísmico mínimo del USACE.

- Estable (FS ≥ 1.10)
- Inestable (FS < 1.10)

Construcción de tablas de contingencia

A partir de las Tablas 03, 04, 05 y 06 de FEM y DEM se genera una clasificación que se resume en la Tabla 07.

Tabla 07

Contingencia de los resultados obtenidos para el analisis de la data

Estado de los taludes	Antes de optimizar	Después de optimizar
Estable	4	8
Inestable	4	0

Nota: Elaboración propia, este tipo de tabla permite aplicar la prueba χ^2.

- Antes: hay FS pseudoestáticos <1.10 → varios inestables.
- Después: todos los optimizados superan 1.03–1.15 → predominan estables.

Cálculo de la Prueba Chi-Cuadrado

Con la Ecuación 3, se compara con el χ^2 crítico ($\alpha = 0.05$; gl = 1 → χ^2crít = 3.84), del análisis se puede obtener la Tabla 08.

Tabla 08

Contingencia de los resultados obtenidos despues de la comprobación

	Estable	Inestable	Total
Antes de optimizar	4	4	8
Después de optimizar	8	0	8
Total	12	4	16

Nota: Elaboración propia, tabla observada (O).

Tabla esperada (E):

- E (antes, estable) = (8×12)/16 = 6
- E (antes, inestable) = (8×4)/16 = 2
- E (después, estable) = 6
- E (después, inestable) = 2

Cálculo del estadístico:

$$x^2 = \frac{(4-6)^2}{6} - \frac{(4-2)^2}{2} + \frac{(8-6)^2}{6} + \frac{(0-2)^2}{2}$$

$$x^2 = \frac{4}{6} + \frac{4}{2} + \frac{4}{6} + \frac{4}{2}$$

$$x^2 = 0.667 + 2 + 0.667 + 2 = 5.33$$

Interpretación

De los resultados obtenidos para los valores calculados y críticos se resumen en:

- χ^2 calculado = 5.33
- χ^2 crítico ($\alpha = 0.05$, gl = 1) = 3.84

Dado que: $5.33 > 3.84$

Se concluye que se rechaza la hipótesis nula y se valida la hipótesis general planteada fundamentado en la interpretación de la prueba que permitió determinar si corresponde aceptar o rechazar la hipótesis nula. Visto que en este caso de que el valor calculado del estadístico χ^2 supera al valor crítico tabular, se concluye que la diferencia observada en los niveles de estabilidad no es producto del azar, sino del efecto real de la optimización geométrica y de la metodología FEM–DEM aplicada. Esta verificación estadística sustenta de manera objetiva la comprobación de la hipótesis general planteada en la investigación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Cumplimiento del objetivo general, la simulación combinada mediante los métodos de Elementos Finitos (FEM) y Elementos Discretos (DEM) permitió analizar de manera rigurosa la estabilidad de los taludes de la cantera de agregados en Moquegua, identificando su comportamiento bajo condiciones estáticas y sísmicas. Los resultados demostraron que los taludes actuales presentan factores de seguridad marginales o insuficientes frente a solicitaciones sísmicas, mientras que las alternativas de rediseño geométrico propuestas lograron mejorar significativamente su estabilidad. Por lo tanto, el objetivo general de evaluar el desempeño del talud y proponer alternativas de mejora se cumple satisfactoriamente.

Cumplimiento del objetivo específico 1, se describieron adecuadamente las condiciones geológicas, geotécnicas y geométricas del talud mediante ensayos de campo y laboratorio certificados. Los parámetros de resistencia y deformabilidad obtenidos fueron esenciales para garantizar la confiabilidad de los modelos numéricos. Esta caracterización permitió representar con precisión el comportamiento del material y constituye la base fundamental sobre la cual se validó la modelación FEM–DEM, por lo que el objetivo específico 1 se considera cumplido.

Cumplimiento del objetivo específico 2, la comparación entre FEM y DEM evidenció que ambos métodos convergen en identificar zonas críticas y reducciones del factor de seguridad durante escenarios pseudoestáticos, especialmente en las progresivas 000+720, 000+740 y 000+750. No obstante, el DEM mostró mecanismos de falla más localizados y valores ligeramente más conservadores del FS debido a su capacidad para modelar discontinuidades entre bloques. La correlación entre ambos métodos confirma que su aplicación conjunta brinda un análisis más robusto y verosímil del talud. Por tanto, este objetivo se cumple plenamente.

Demostración de la hipótesis general, la hipótesis general se valida al comprobar que la integración de FEM–DEM mejora la precisión de la evaluación de la estabilidad del talud frente a eventos sísmicos. La aplicación de ambos métodos

permitió identificar mecanismos de falla, delimitar zonas críticas, cuantificar la pérdida de estabilidad sísmica y proponer rediseños que incrementaron el FS en un 10% a 18%. La prueba estadística χ^2 demostró que la mejora de la estabilidad tras la optimización geométrica no es producto del azar, sino del efecto directo del rediseño sustentado en las simulaciones numéricas.

Compatibilidad con normativa nacional e internacional, los taludes optimizados alcanzaron valores de factor de seguridad compatibles con los requisitos del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE E.050) y con los criterios del U.S. Army Corps of Engineers (USACE). Esto confirma que las mejoras propuestas son técnicamente viables, aseguran un desempeño adecuado en condiciones sísmicas y cumplen con estándares internacionales aplicables a taludes en operación.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

Se recomienda aplicar el rediseño geométrico obtenido mediante FEM–DEM, ajustando ángulos, alturas de bancos y dimensiones de bermas, con el fin de garantizar la estabilidad del talud bajo eventos sísmicos representativos de la región de Moquegua.

Es recomendable implementar inclinómetros, estaciones topográficas automáticas, piezómetros y registros permanentes de vibración sísmica que permitan validar el comportamiento real del talud y actualizar los modelos numéricos con datos de campo.

Para estudios futuros, se sugiere realizar análisis dinámicos no lineales con registros sísmicos reales de Moquegua, integrando espectros de respuesta locales y considerando degradación progresiva de rigidez y daño acumulado.

El comportamiento del talud puede variar significativamente con cambios en el nivel freático. Se recomienda incluir análisis acoplados flujo–deformación para evaluar el efecto de infiltraciones estacionales o eventos de lluvia extraordinaria.

Finalmente, se recomienda extender la metodología utilizada (FEM–DEM y evaluación estadística mediante χ^2) a otros sectores de la cantera y a futuros proyectos de explotación para mantener un control geotécnico integral.

REFERENCIAS

Agramonte E., F. A. (2016). *Aplicação do método dos elementos discretos na modelagem do mecanismo de tombamento bloco-flexural em taludes rochosos*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio. https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.27076

Antayhua V., Y. y Ramos P., D. A. (2008). *Análisis de la sismicidad registrada en el volcán Ticsani (Moquegua) periodos abril y agosto-noviembre del 2008*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. https://hdl.handle.net/20.500.12544/2454

Baczynski, N. (1980): *Rock Mass Characterization and Its Application to Assessment of Unsupported Underground Openings*. Ph.D. thesis, University of Melbourne, 233 pp.

Barrientos H., R. I. (2022). *Estudio de sismicidad inducida para solucionar problemas de inestabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022*. Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.

Barrientos Huamán, R. I. (2022). *Estudio de sismicidad inducida para solucionar problemas de inestabilidad del macizo rocoso del sector Ayala inferior mina San Vicente 2022.* Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.

Barton (2002). *Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 39 (2) (2002), pp. 185-216.

Barton N.R. (2006). *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy.* (1st ed.), CRC Press, London.

Barton N.R. , N. Bar (2015). *Introducing the Q-Slope Method and its Intended Use within Civil and Mining Engineering Projects*. Geomechanics Colloquium (2015), pp. 157-162.

Barton N.R., Wang C., Yong R. (2023). *Advances in joint roughness coefficient (JRC) and its engineering applications.* Journal of Rock Mechanics and Geotechnical

Engineering, Volume 15, Issue 12, Pages 3352-3379, ISSN 1674-7755, https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.02.002

Barton, N. (2002): *Some new Q value correlations to assist in site characterisation and tunnel design*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci.;39:184-216.

Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of rock support*. Rock Mechanics 6, 1974, pp. 189-236.

Bedoya, J. C. (2019). *Sismicidad de Tacna 2006*. Revista UNJBG - Ciencia & Desarrollo. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

Bernal Esquia, Y. I., Tavera, H., & Antayhua Vera, Y. T. (2001). *Evaluación de la sismicidad y distribución de la energía sísmica en Perú*. Instituto Geofísico del Perú

Bieniawski Z .T . (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons, New York, 251. pp.

Bieniawski, Z.T. (1973). *Engineering classification of jointed rock masses*. Trans. S. African Instn. Civ. Engrs., Vol. 15, No 12, Dec. 1973, pp 335 - 344.

Bieniawski, Z.T. (1979). *The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications.* Proc. 4th Int. Cong. Rock Mech., ISRM, Montreux, vol. 2, pp. 41-48.

Bolaños Luna, AM; Monroy Concha, OM. (2004). *Espectros de peligro sísmico uniforme*. Tesis M.I. Lima, Perú, PUCP.

Botero, E., Flores-Berrones, R., Romo, M. P., & Méndez, B. C. (2011). *Nuevo método de diseño sísmico para cortinas de tierra y enrocamiento, y de taludes*. Tecnología y ciencias del agua, 2(3), 177-200. Recuperado en 21 de octubre de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222011000300012&lng=es&tlng=es.

Broch, E.; Franklin, J.A (1972): *The point-load strength test*. Intl. Rock Mech. Min.Sci. & Geomech. Abstr., v.9, p.669 – 697.

Clerici, A. (1993): *Indirect determination of the modulus of deformation of a rock masses-case histories*. Proc. Conf. Eurock, pp. 509-517.

Coates, D.F. (1964): *Classification of Rock for Rock Mechanics*. Int. J. Rock Mech.Min. Sci. 1, pp. 421-429.

Cundall, P. A. (1971). *A computer model for simulating progresive large scale movements in blocky rock systems*. Proceedings of the symposium of International Society of Rock Mechanics, vol.1. Nancy: France;1971. Paper No. II-8.

Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D. and Cording, E.J. (1967): *Design of surface and near surface construction in rock*. In Failure and breakage of rock, proc. 8th U.S. symp. Rock mech., (ed. C. Fairhurst), 237-302. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.

Escobar T., L. J., & Valencia G., Y. (2012). *Análisis de estabilidad y probabilidad de falla de dos taludes de suelo tropical en la autopista Medellín - Bogotá en el tramo de vía entre marinilla y santuario*. Boletín de Ciencias de la Tierra, (31), 51-64. Retrieved October 21, 2025, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-36302012000100004&lng=en&tlng=es.

Estay H., R. A. (2014). *Metodología para la evaluación del desempeño de indicadores sísmicos en sismicidad inducida por la minería*. Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/131812

Fiori & Carmignani (2001*): Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*. Curitiba: Ed. UFPR.

Franklin, J.A. (1976). *An Observational Approach to the Selection and Control of Rock Tunnel Linings*. Proc. Conf. Shotcrete Ground Control, ASCE, Easton, MA, pp. 556-596.

García R., D. V. y Tovar P., S. A. (2025). *Revisión de la literatura sobre tecnologías no convencionales e innovación en el control de taludes*. Universidad Cooperativa de Colombia. https://hdl.handle.net/20.500.12494/59963

Huacce Prado, J. C. (2022). *Caracterización del macizo rocoso para la determinación del tipo de sostenimiento Mina San Cristóbal Compañía Minera Volcán 2021*. Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.

Huanca Cárdenas, J., Taipe Maquerhua, E. L., Araujo Huamán, G. E., & Miranda Cruz, R. (2021). *Influencia de las precipitaciones y la sismicidad en la aceleración del deslizamiento de Maca, Valle del Colca, Arequipa*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.

Hynes-Griffin, M. and Franklin, A.G. (1984), Rationalizing the seismic Coefficient Method.

Instituto Geofísico del Perú (IGP, 2019). *Peligro sísmico en el Perú: conceptos y aplicaciones*. Lima: IGP.

International Association of Engineering Geology (1981). *Basic Geotechnical Description of Rock Masses*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 18, pp. 85-110.

Jaeger, J.C. e Cook, N.G.W. (1979). *Fundamentals of Rock Mechanics*, Chapman & Hall, London, 3rd ed., 593p.

Jaimes, M. A., Niño, M., & Reinoso, E. (2013). *Una aproximación para la obtención de mapas de desplazamiento traslacional de laderas a nivel regional inducido por sismos*. Ingeniería sísmica, (89), 01-24. Recuperado en 21 de octubre de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2013000200001&lng=es&tlng=es.

Kang, J., Wan, D., Sheng, Q. et al. (2022). *Risk assessment and support design optimization of a high slope in an open pit mine using the jointed finite element method and discontinuous deformation analysis*. Bull Eng Geol Environ 81, 254 (2022). https://doi.org/10.1007/s10064-022-02759-z

Kavazanjian, E. Jr. (1998). *Current issues in Seismic Design of Geosynthetic Cover Systems*. Proc. Sixth International Conference on Geosynthetics, Atlanta, Geogia, Vol. I, pp. 219-226.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey.

Mamani Yucra, Y. D. (2023). E*valuación geomecánica del macizo rocoso de la Mina 9-10 de Shougang Hierro Perú*. Universidad Nacional Del Altiplano.

Meng, Q.X., Wang, H.L., Xu, W.Y., Cai, M., Xu, J. Zhang, Q. (2019). *Multiscale strength reduction method for heterogeneous slope using hierarchical FEM/DEM modeling*. Computers and Geotechnics, Volume 115, 103164, ISSN 0266-352X, https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103164

Mesa L., M., Álvarez P., J., & Chávez G., J. H. (2020). *Evaluación del factor de seguridad en taludes de terraplenes carreteros altos ante carga sísmica*. Ingeniería sísmica, (103), 1-17. Epub 02 de febrero de 2021. https://doi.org/10.18867/ris.103.489

Mucuta L., H. V., CartayaP., M., & Watson Q., R. L. (2020). *Evaluación de estabilidad en taludes del yacimiento Castellano mediante el cálculo del factor de seguridad. Minería y Geología, 36(4), 441-450. Epub 30 de diciembre de 2020*. Recuperado en 21 de octubre de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122020000400441&lng=es&tlng=es.

Ortega C., V. J. (2014). *Análisis de sismicidad inducida por tronaduras de incorporación de área en mina El Teniente de Codelco, Chile*. Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116774

Ortiz Q., W. F. y Portilla F., E. I. (2014). *Estudio de estabilidad de los taludes de las presas del Proyecto Pacalori, teniendo en cuenta la acción sísmica*. Universidad de Cuenca. http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/20906

Palmström A, Singh R. (2001): "*The deformation modulus of rock masses – comparisons between in situ tests and indirect estimates*." Tunneling Underground SpaceTechnol 2001; 16:115-131.

Potyondy, D. (2012). PFC2D Flat-Joint Contact Model. Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, MN, Technical Memorandum ICG7138-L, July 26, 2012.

Rajabi M., Rahmannejad R., Rezaei M., Ganjalipour K. (2017). *Evaluation of the maximum horizontal displacement around the power station caverns using artificial neural network*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 64, Pages 51-60, ISSN 0886-7798. https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.01.010.

Sanhueza P., C, & Rodríguez C., L. (2013). *Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales*. Revista de la construcción, 12(1), 17-29. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2013000100003

Su, Z., Kang, X., Ding, X., Wang, S., Li D. (2026). *SPH–DEM modeling of rainfall-induced slope failure in partially saturated soil–rock mixture*. Computers and Geotechnics, Volume 189, 107635, ISSN 0266-352X, https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107635.

Tardeo De La C., C. A. y Zanabria P., E. (2016). *Análisis dinámico de estabilidad de taludes por elementos finitos en la zona de Huayllapampa del distrito de cuenca Huancavelica*. Universidad Nacional de Huancavelica. http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1935

Tavera, H. (2020). *Análisis y evaluación de los patrones de sismicidad y escenarios sísmicos en el borde occidental del Perú*. Instituto Geofísico del Perú.

Ticona Jove, G. C. (2021). *Criterio de caracterización geomecánica y análisis de estabilidad de macizos rocosos alterados*. Universidad Nacional de San Agustín.

Turpo P., J. I. (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.

Uribe Córdova, V. M. (2008). R*elación entre la topografía y la sismicidad en los andes peruanos*.

US Army Corps of Engineers (2003). "Slope Stability". Engineering Manual, EM 1110-2-1902.

Valderrama, Ch. E. R (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.

Villena O., G. A. y Rios R., G. A. (2024). *Análisis de estabilidad de taludes mediante el método de equilibrio límite y propuesta de modificaciones para la optimización del comportamiento estático y dinámico de la Presa de Relaves La Esperanza en Vitoc, Junín*. Universidad Peruada de Ciencias Aplicadas. http://hdl.handle.net/10757/683082

Yılmaz I. y Sendır H. (2002). *Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey),* Engineering Geology, Volume 66, Issues 3–4, 2002, Pages 211-219, ISSN 0013-7952, https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00041-8.

You L., Zhao Y., Zhang H. (2025). *Evaluating the ratio of peak ground acceleration to peak ground velocity from the response spectrum*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Volume 199, 109699, ISSN 0267-7261. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109699

Zai D., Pang R., Zhou Y., Liu J. (2025). *A two-phase coupled FEM-MPM framework for large deformation analysis of slopes considering multiple influencing factors*. Engineering Analysis with Boundary Elements. Volume 176, 106242, ISSN 0955-7997. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2025.106242

Zuñiga Loayza, H. D. (2017). *Análisis de la sismicidad inducida en la Unidad Minera el Porvenir - Cerro de Pasco 2006 - 2008*. Universidad Nacional de San Agustín.

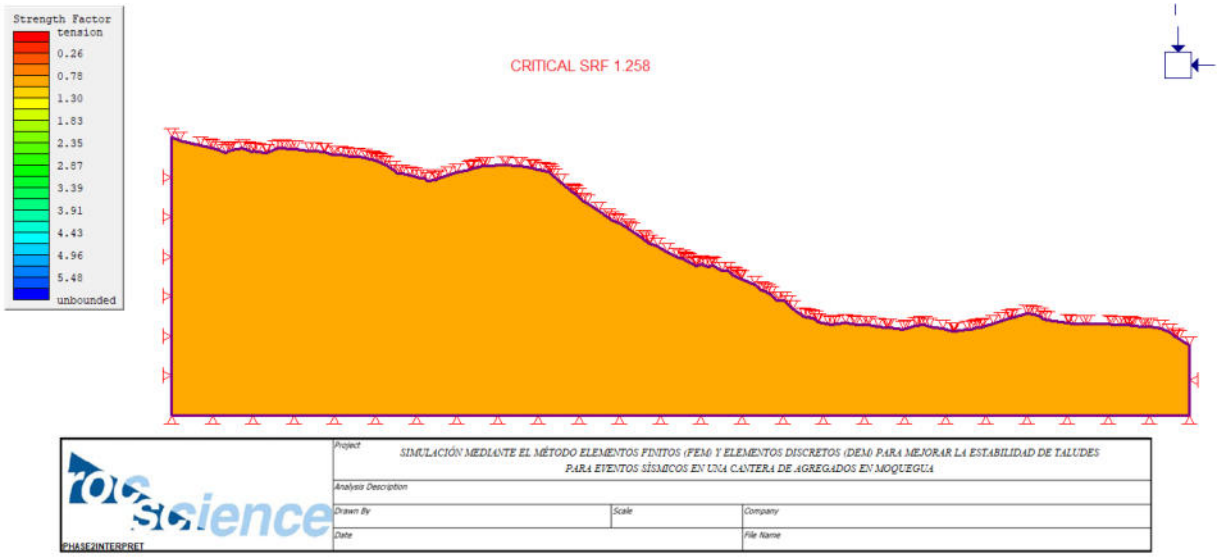
ANEXOS

ANEXO 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA

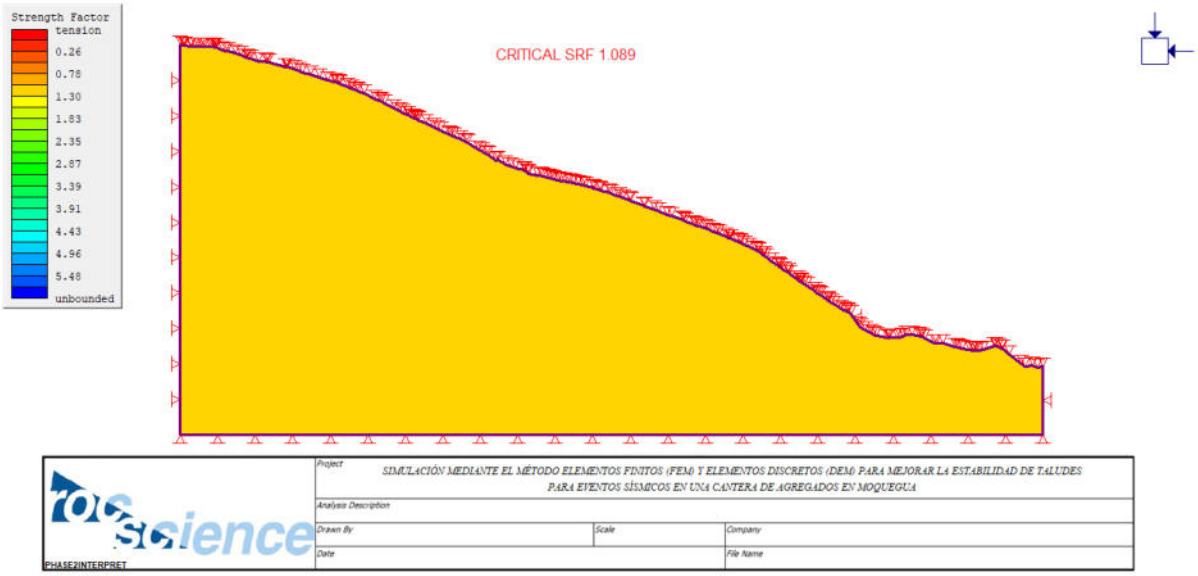
	INTERROGANTES	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
GENERAL	¿Cómo la simulación combinada mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) y el Método de los Elementos Discretos (DEM) puede mejorar la estabilidad de los taludes ante eventos sísmicos en una cantera de agregados en la región de Moquegua?	· Analizar la estabilidad de los taludes ante eventos sísmicos mediante la simulación combinada de los Métodos de los Elementos Finitos (FEM) y Elementos Discretos (DEM) en una cantera de agregados de la región Moquegua, con el propósito de proponer alternativas de mejora en el diseño y seguridad geotécnica.	· La simulación combinada mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) y el Método de los Elementos Discretos (DEM) mejora significativamente la evaluación de la estabilidad de los taludes ante eventos sísmicos en una cantera de agregados en la región de Moquegua, al permitir una representación más realista del comportamiento geomecánico del macizo rocoso y la identificación precisa de zonas críticas de falla.	Variable Independiente: Simulación numérica mediante FEM y DEM - Modelación numérica estática - Modelación numérica dinámica - Comportamiento tensional y deformacional	Tipo de investigación La presente investigación es de tipo aplicada, ya que busca dar solución a un problema real: la inestabilidad de taludes en una cantera de agregados ubicada en Moquegua.
ESPECIFICA	· ¿Cuáles son las principales condiciones geotécnicas y geométricas que influyen en la estabilidad de los taludes en la cantera de agregados seleccionada? · ¿De qué manera la modelación numérica mediante FEM y DEM permite identificar los modos de falla más críticos durante la ocurrencia de sismos?	· Caracterizar las condiciones geológicas, geotécnicas y geométricas del talud en estudio, mediante ensayos de campo y laboratorio que permitan determinar los parámetros de resistencia y deformabilidad del macizo rocoso. · Desarrollar modelos numéricos de simulación mediante los métodos FEM y DEM, considerando las condiciones estáticas y sísmicas representativas de la región de Moquegua.	· La modelación numérica mediante FEM y DEM permite identificar los mecanismos de falla más críticos y las zonas de mayor deformación del talud bajo condiciones sísmicas. · La aplicación de los resultados obtenidos a través de la simulación FEM–DEM posibilita el rediseño geométrico del talud, incrementando su estabilidad y reduciendo el riesgo de colapso durante eventos sísmicos.	Variable Dependiente: Estabilidad de taludes ante eventos sísmicos - Seguridad estructural del talud - Comportamiento dinámico - Condiciones de falla	Nivel de investigación El nivel de investigación es explicativo y correlacional: • Correlacional, porque busca analizar la relación entre los parámetros geotécnicos y los resultados de estabilidad obtenidos mediante simulaciones con el FEM y DEM Diseño de investigación El diseño de investigación define la estructura metodológica utilizada para alcanzar los objetivos planteados y comprobar la hipótesis.

ANEXO 02: VALORES DE FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES ACTUALES – MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

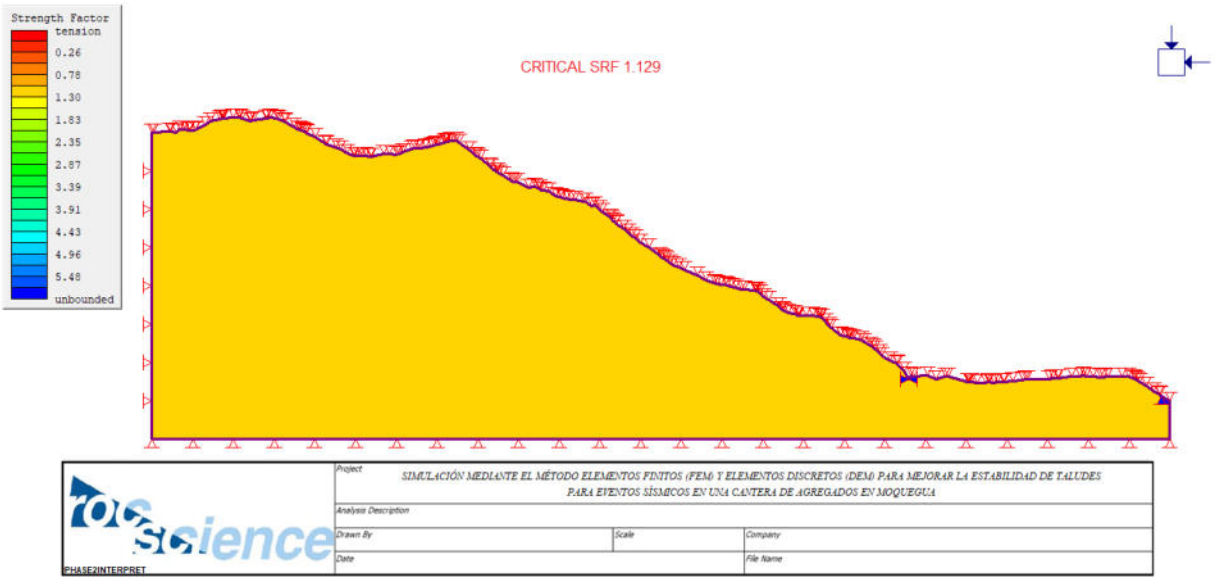
Análisis FEM para la progresiva 000+700 en condiciones estáticas



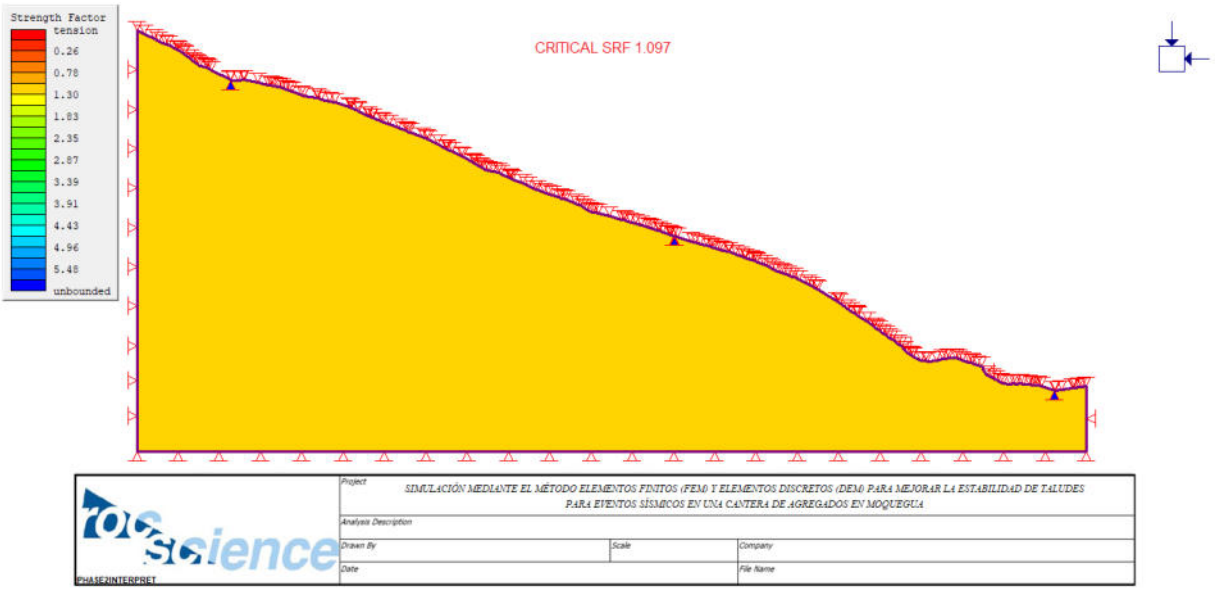
Análisis FEM para la progresiva 000+720 en condiciones estáticas



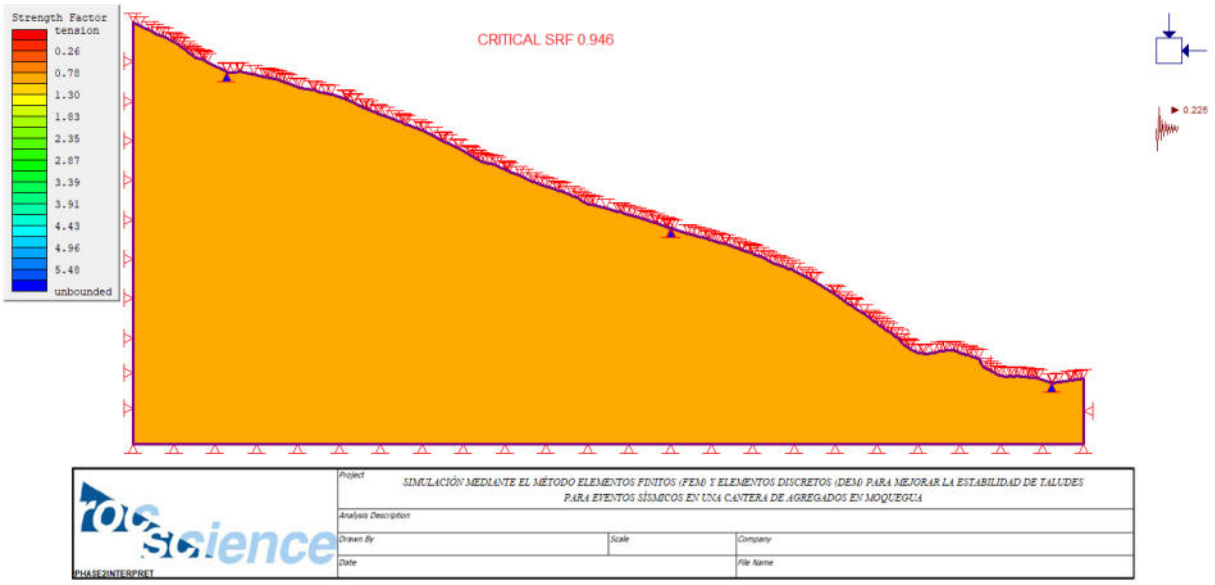
Análisis FEM para la progresiva 000+740 en condiciones estáticas



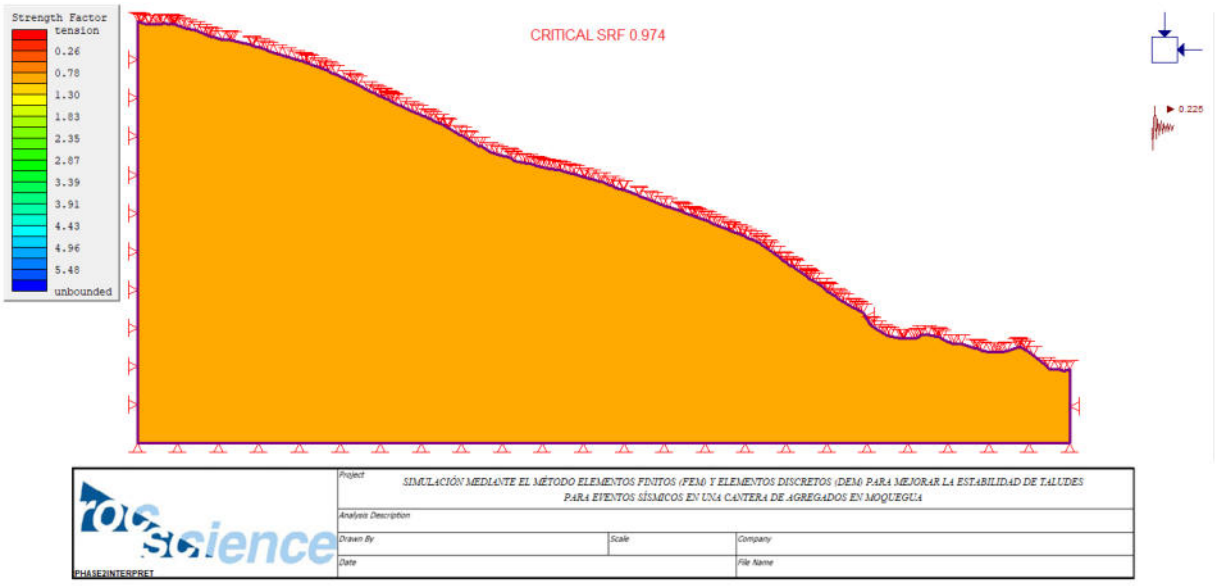
Análisis FEM para la progresiva 000+750 en condiciones estáticas



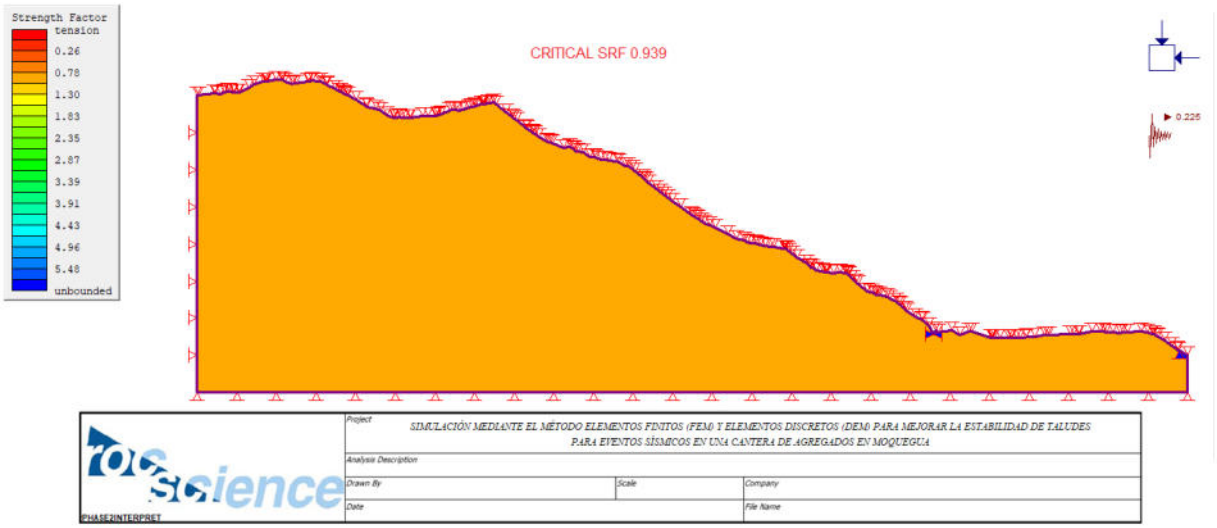
Análisis FEM para la progresiva 000+700 en condiciones pseudoestáticas



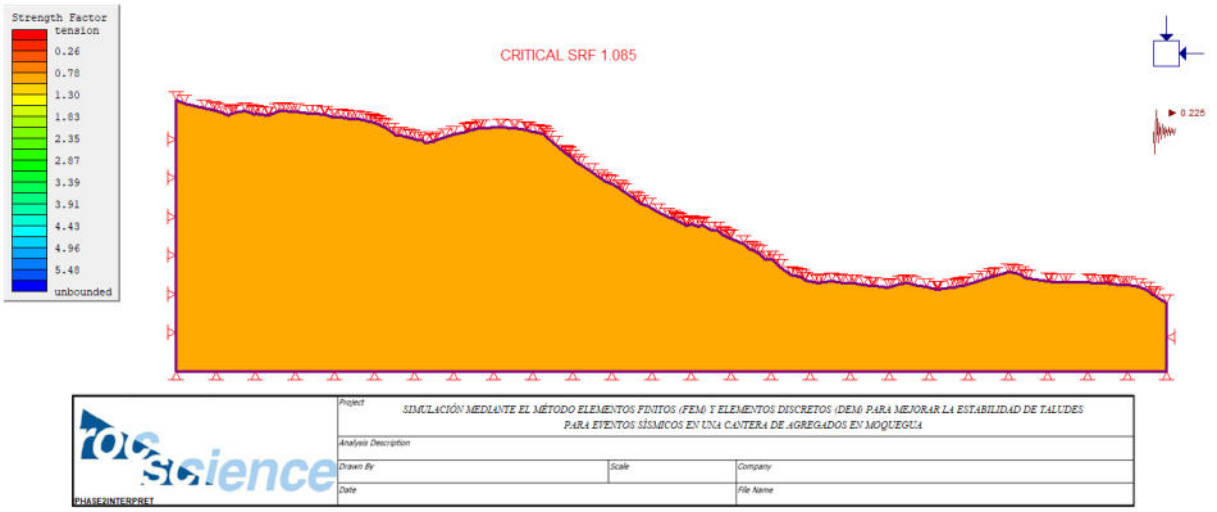
Análisis FEM para la progresiva 000+720 en condiciones pseudoestáticas



Análisis FEM para la progresiva 000+740 en condiciones pseudoestáticas

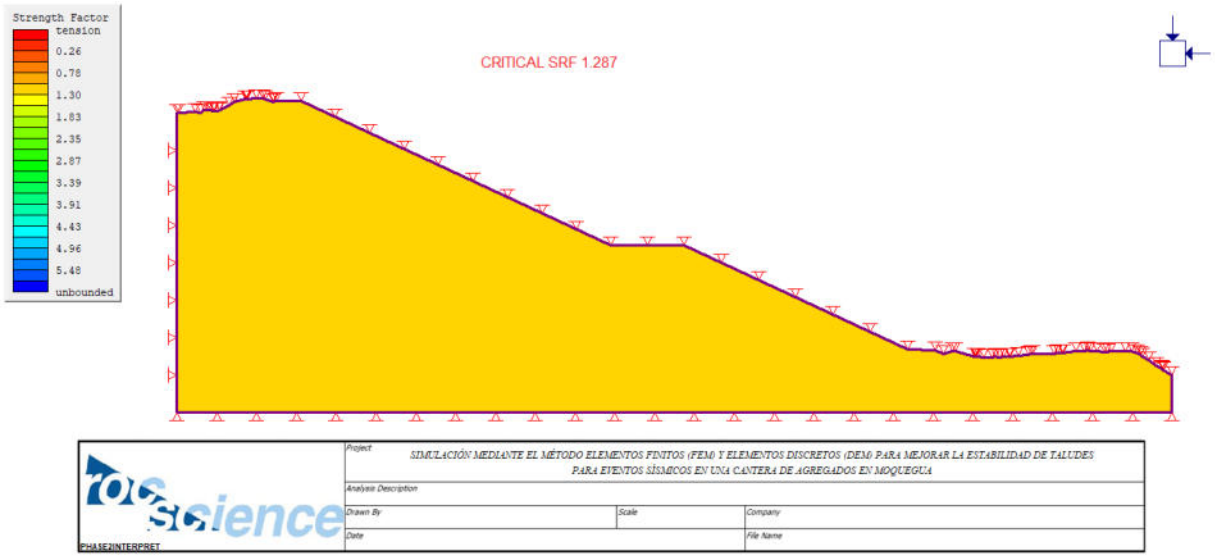


Análisis FEM para la progresiva 000+750 en condiciones pseudoestáticas

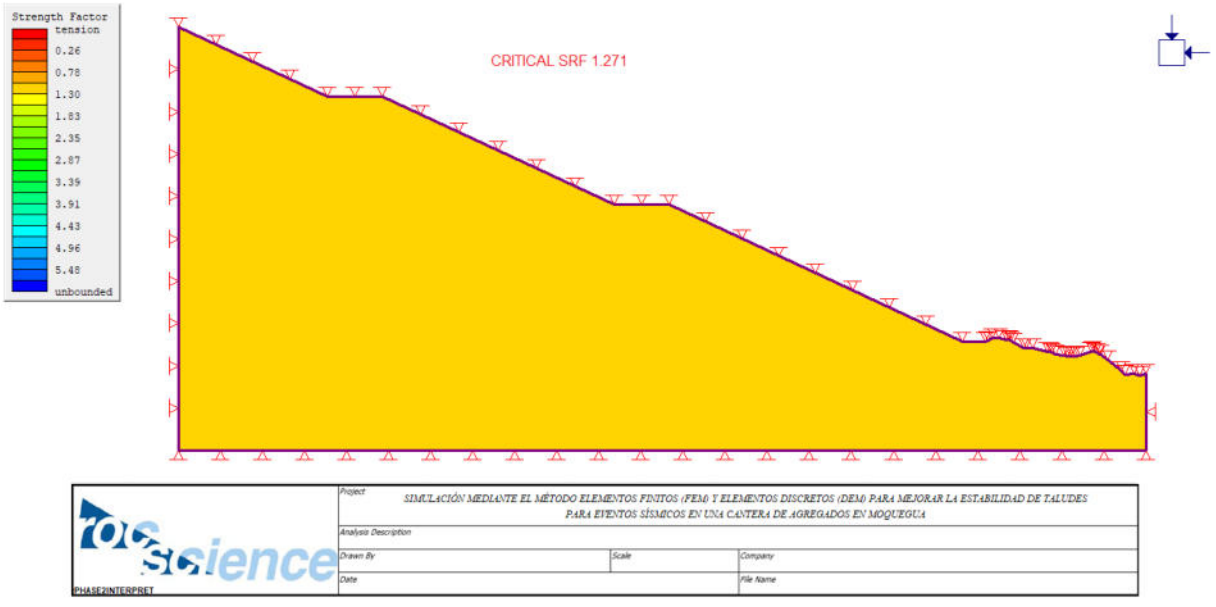


ANEXO 03: VALORES DE FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES OPTIMIZADOS PARA ALTURA DE 25 M CONDICIONES ESTÁTICAS

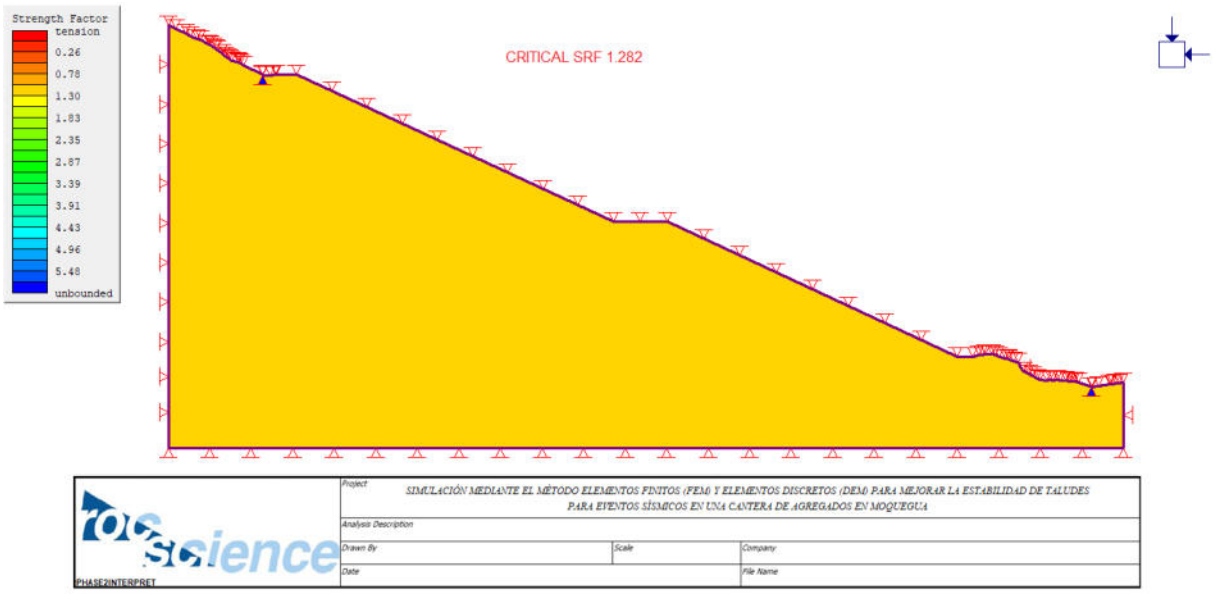
Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+720



Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+740

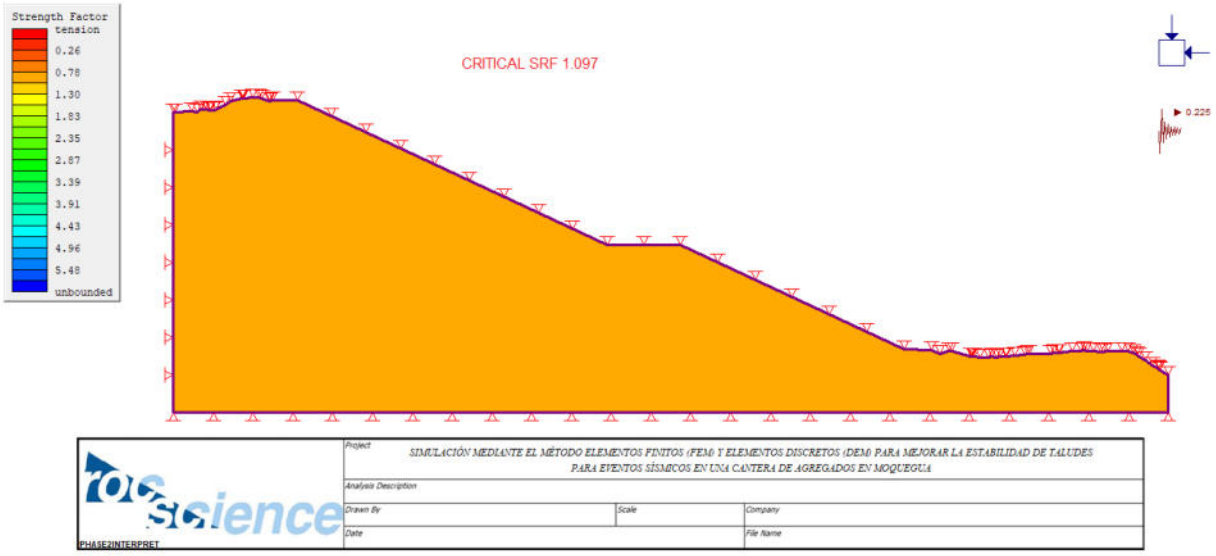


Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+750

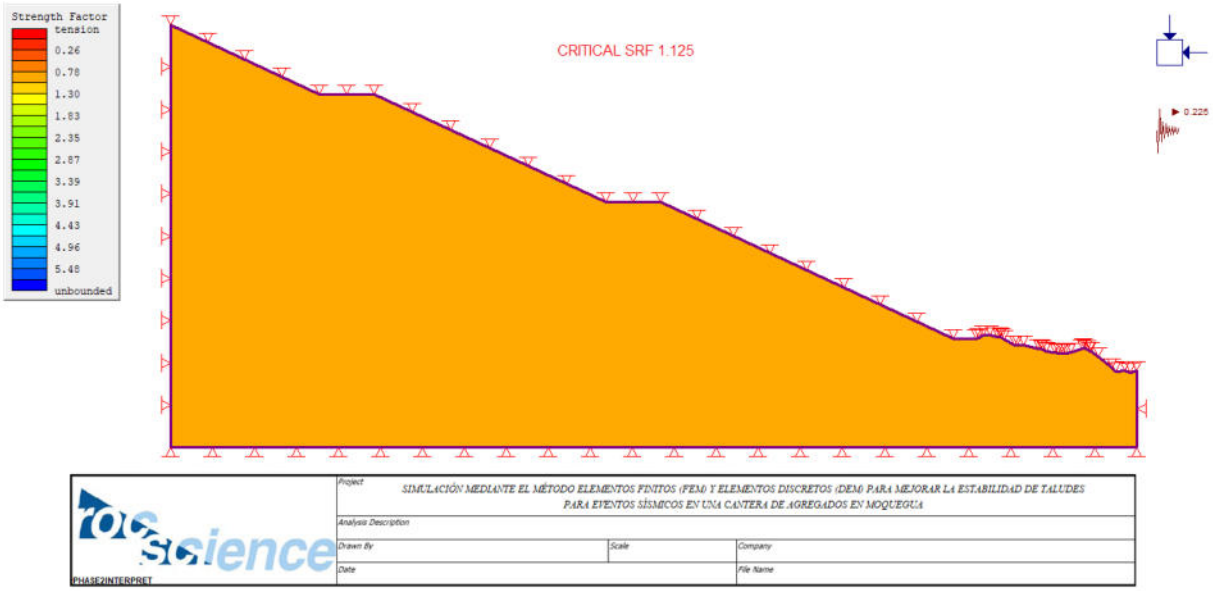


ANEXO 04: VALORES DE FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES OPTIMIZADOS PARA ALTURA DE 25 M CONDICIONES PSEUDOESTÁTICAS

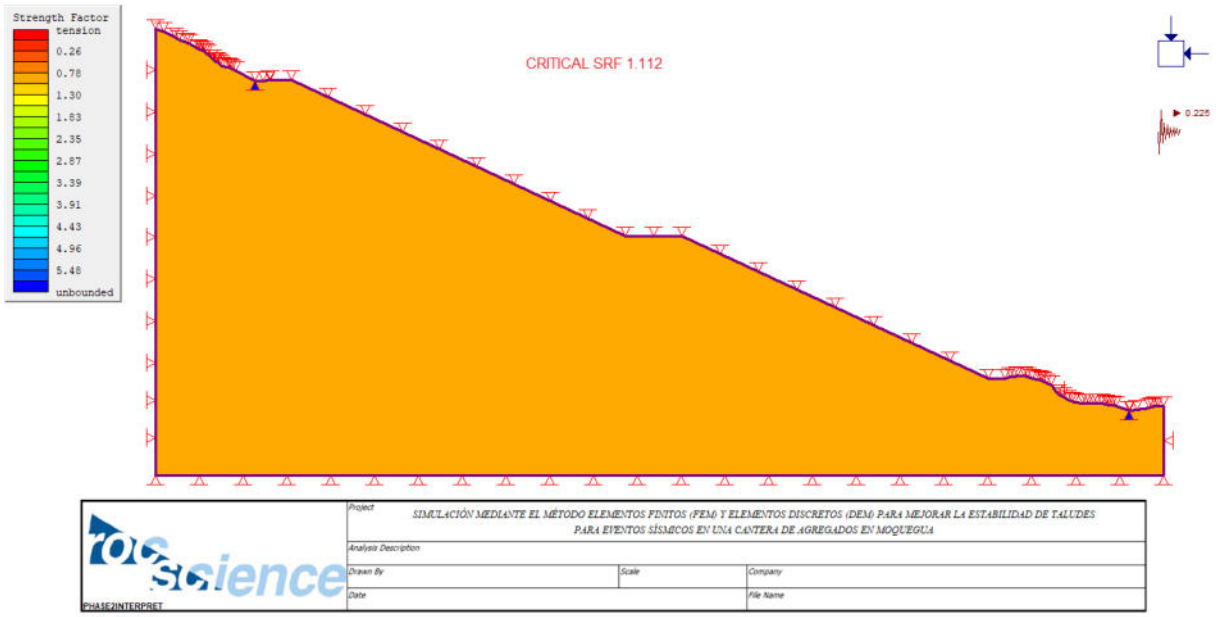
Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+720



Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+740

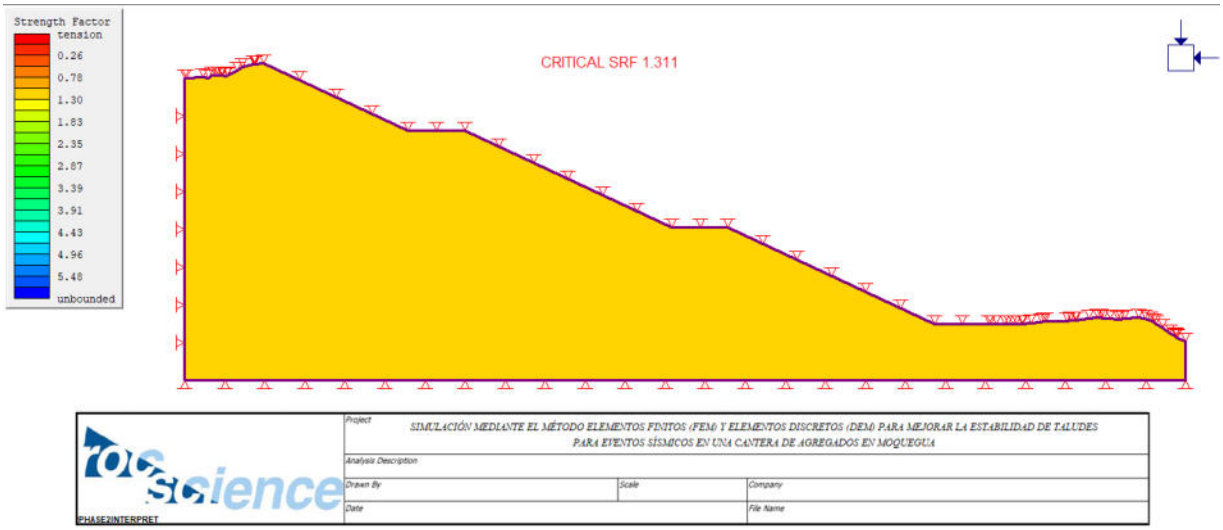


Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+750

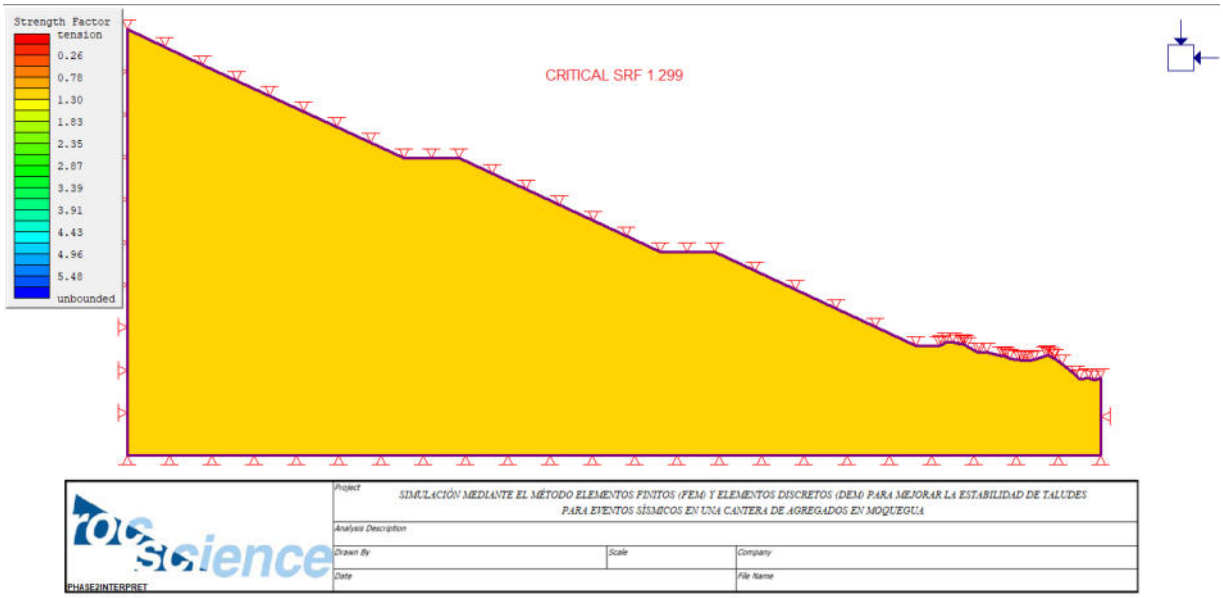


ANEXO 05: VALORES DE FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES OPTIMIZADOS PARA ALTURA DE 17 M CONDICIONES ESTÁTICAS

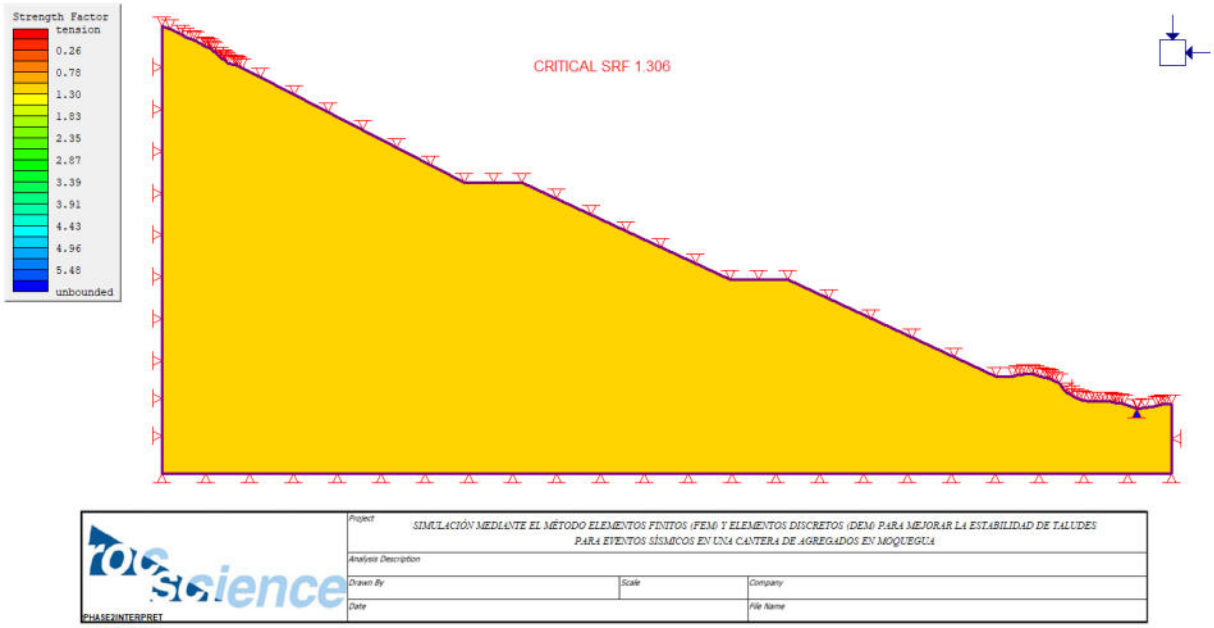
Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+720



Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+740

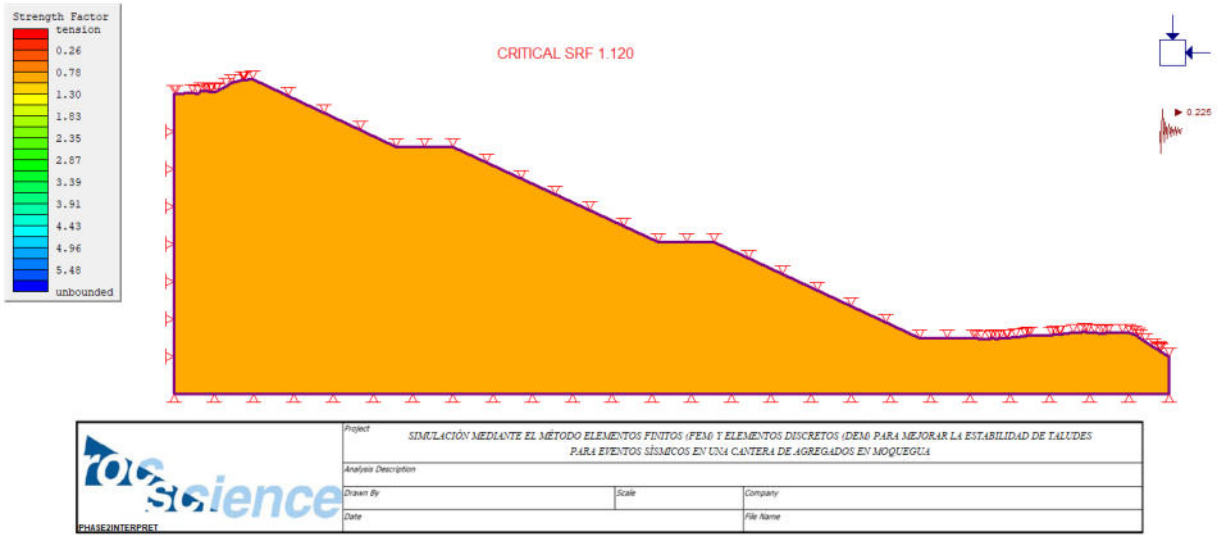


Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+750

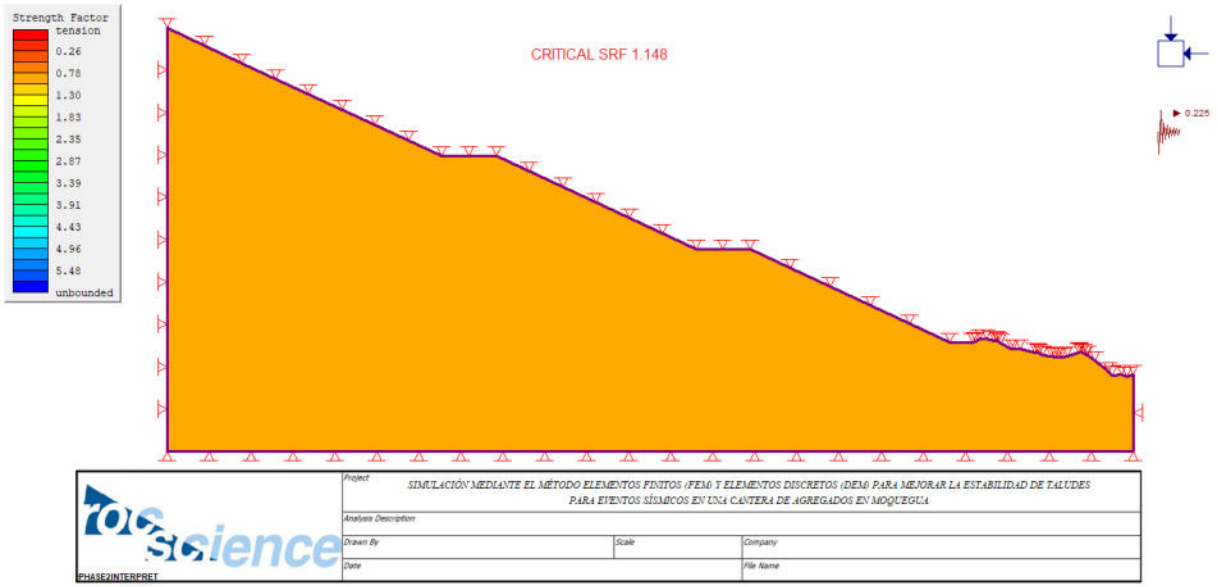


ANEXO 06: VALORES DE FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES OPTIMIZADOS PARA ALTURA DE 17 M CONDICIONES PSEUDOESTÁTICAS

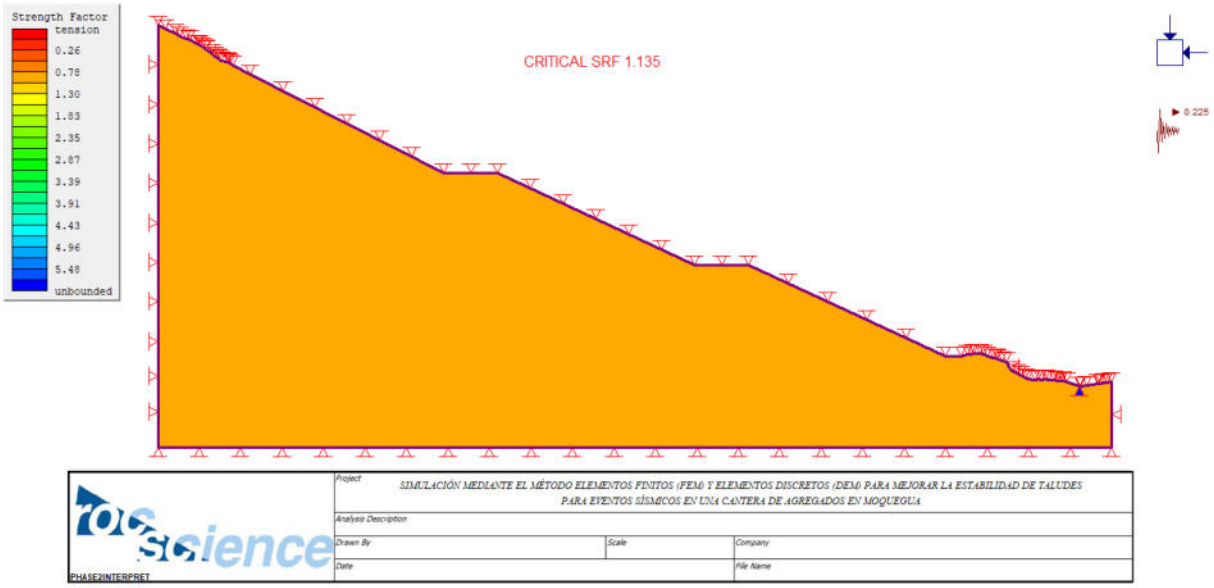
Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+720



Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+740

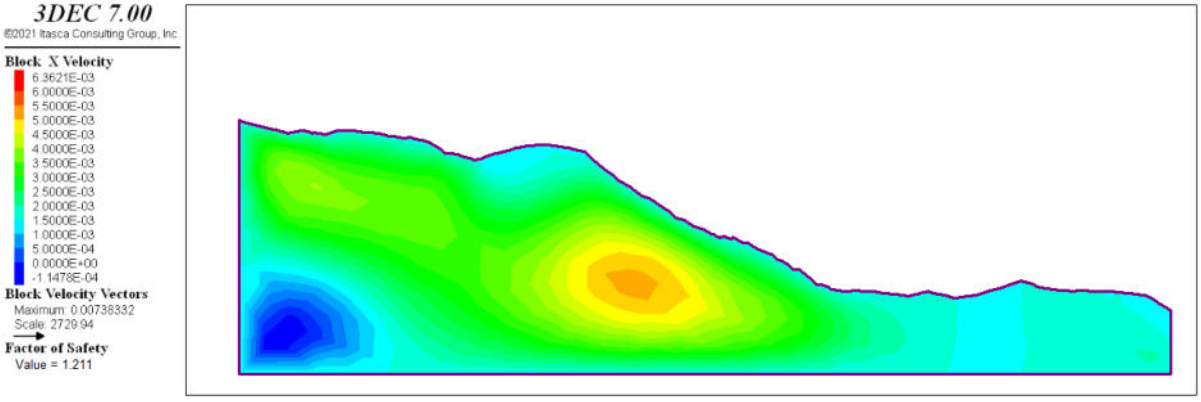


Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+750

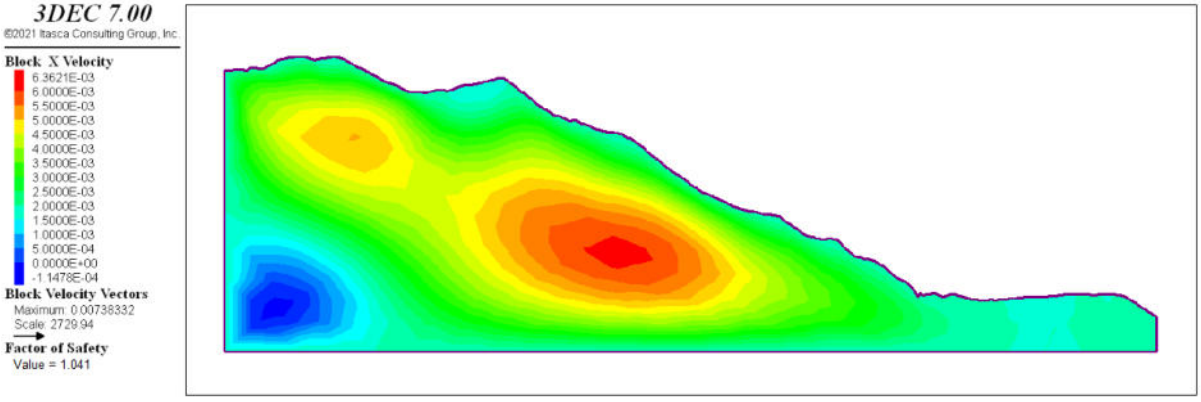


ANEXO 07: VALORES DE FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES ACTUALES – MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS

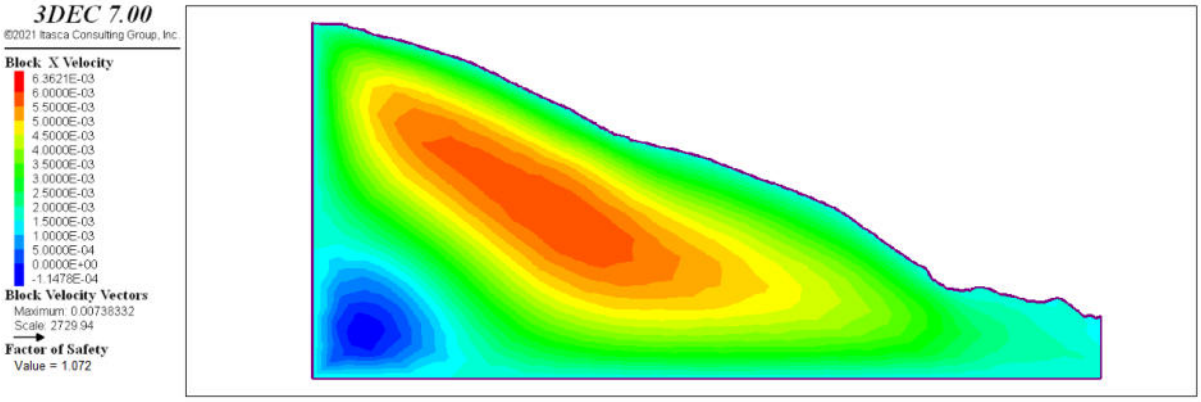
Análisis DEM para la progresiva 000+700 en condiciones estáticas



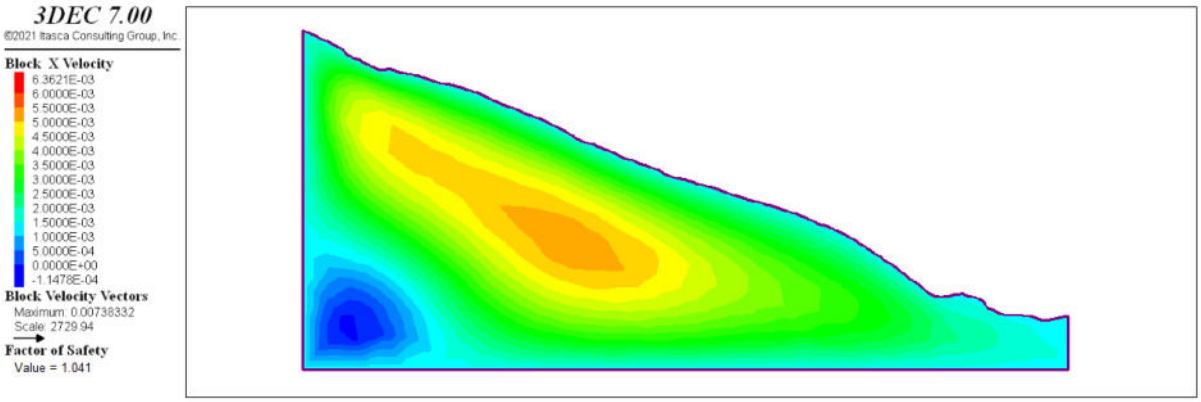
Análisis DEM para la progresiva 000+720 en condiciones estáticas



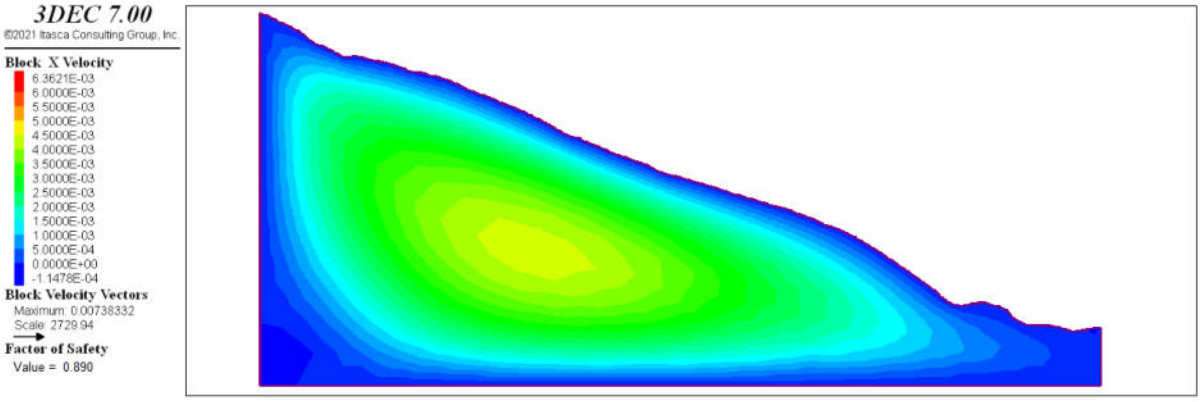
Análisis DEM para la progresiva 000+740 en condiciones estáticas



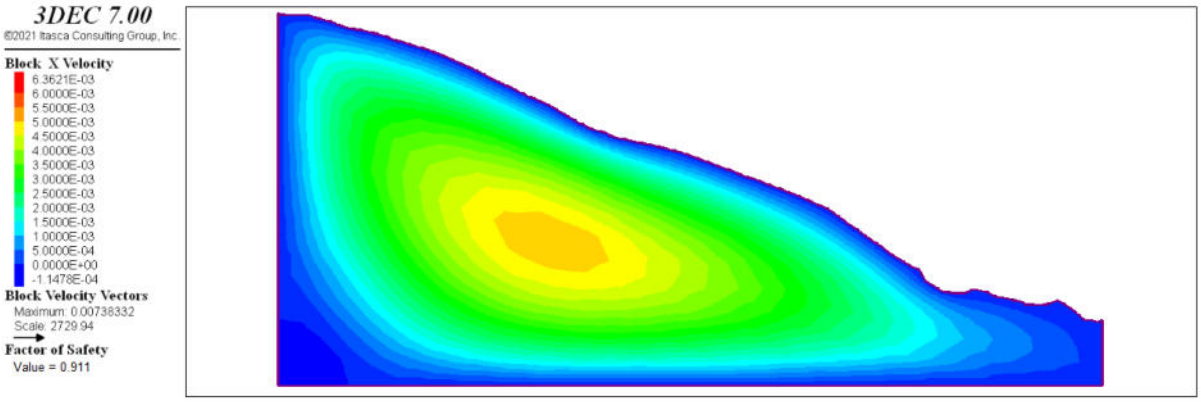
Análisis DEM para la progresiva 000+750 en condiciones estáticas



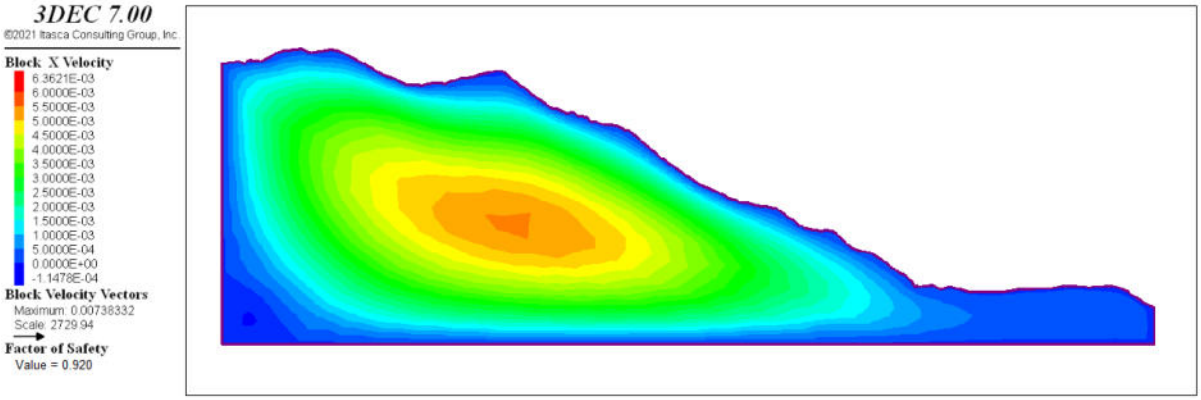
Análisis DEM para la progresiva 000+700 en condiciones pseudoestáticas



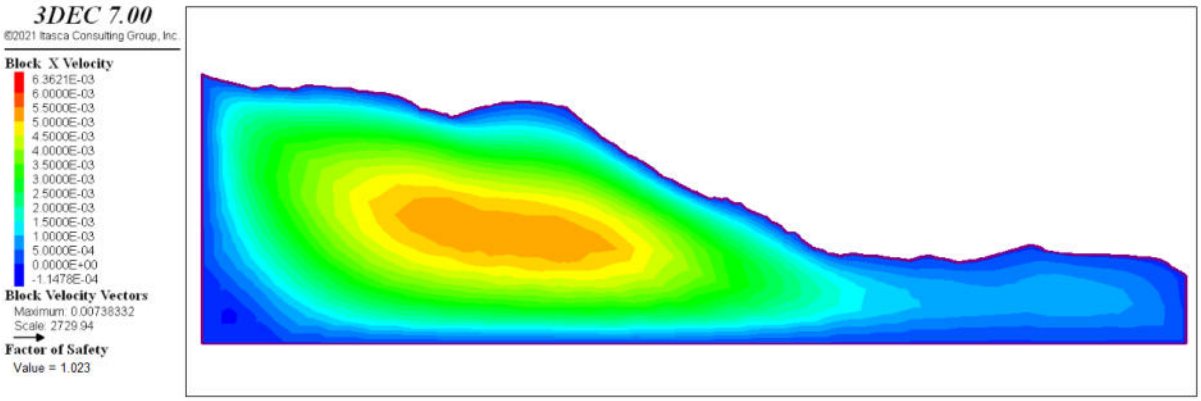
Análisis DEM para la progresiva 000+720 en condiciones pseudoestáticas



Análisis DEM para la progresiva 000+740 en condiciones pseudoestáticas

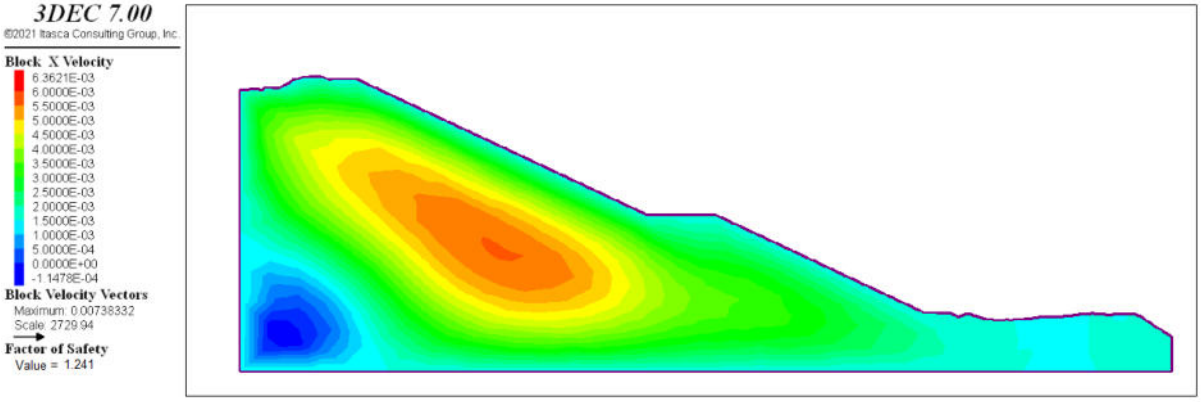


Análisis DEM para la progresiva 000+750 en condiciones pseudoestáticas

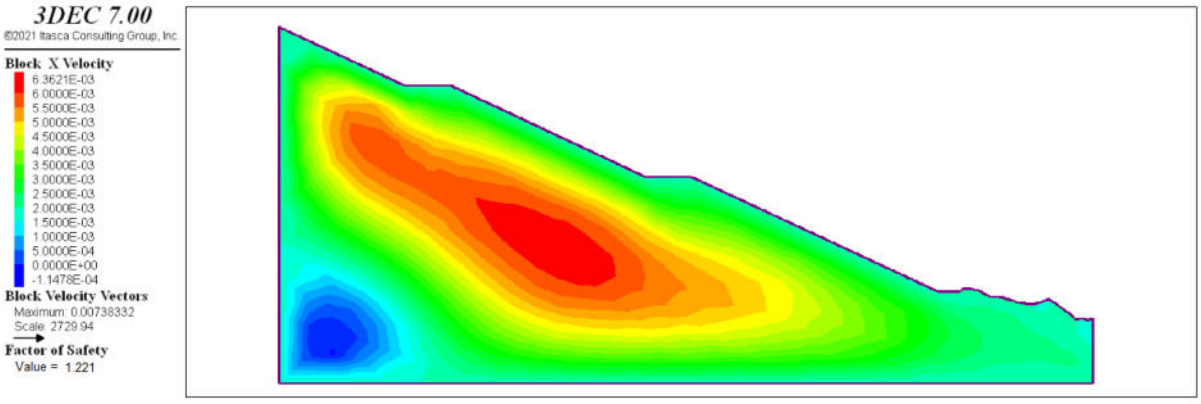


ANEXO 08: VALORES DE FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES OPTIMIZADOS PARA ALTURA DE 25 M CONDICIONES ESTÁTICAS

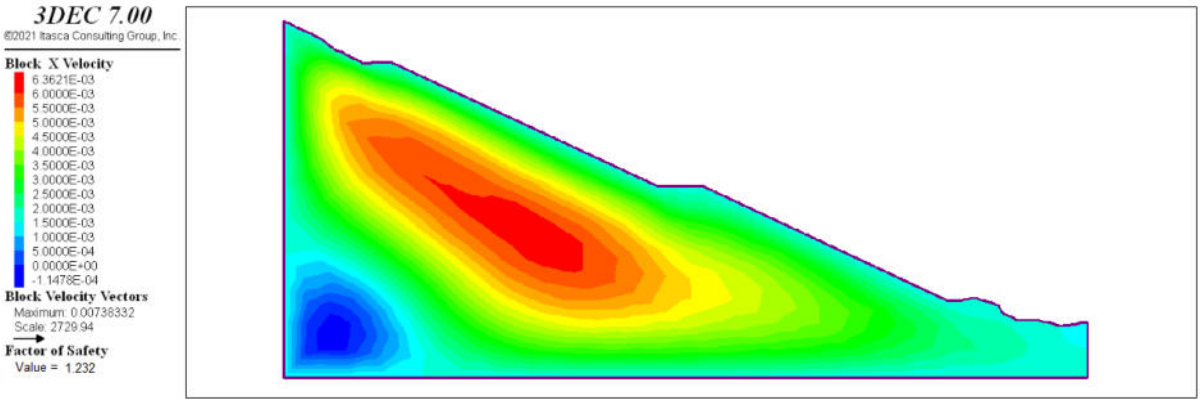
Análisis por el Método de Elementos Discretos para la progresiva 000+720



Análisis por el Método de Elementos Discretos para la progresiva 000+740

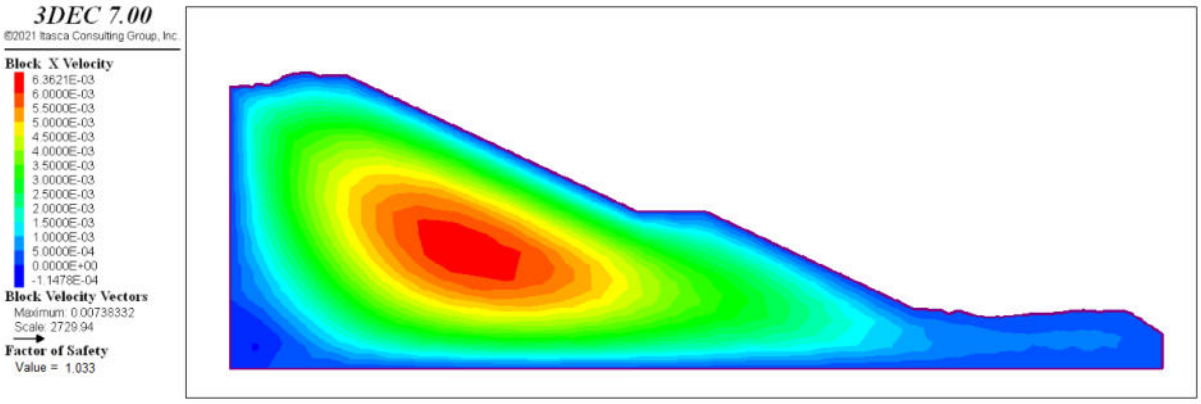


Análisis por el Método de Elementos Discretos para la progresiva 000+750

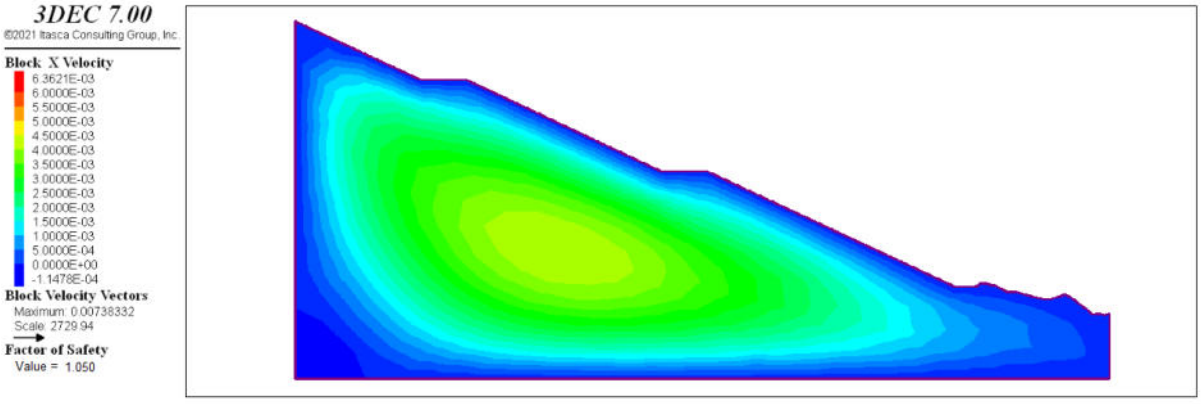


ANEXO 09: VALORES DE FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES OPTIMIZADOS PARA ALTURA DE 25 M CONDICIONES PSEUDOESTÁTICAS

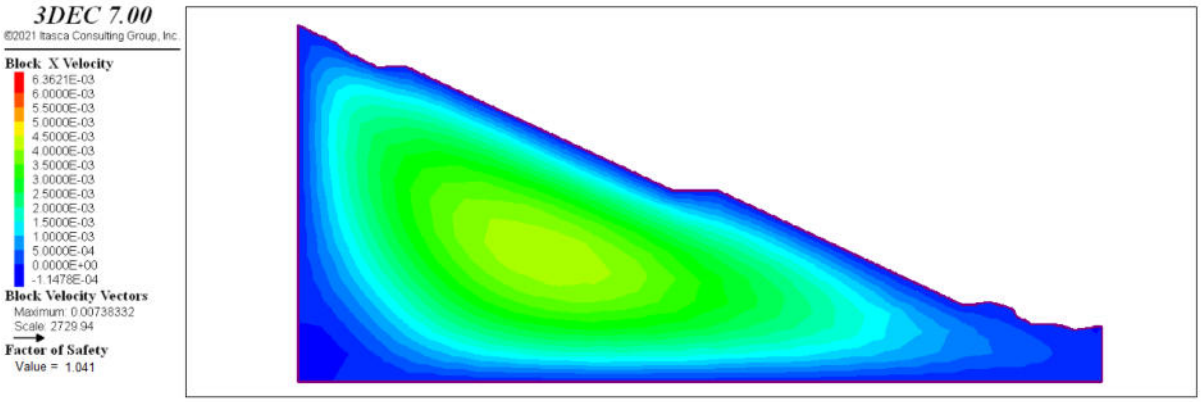
Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+720



Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+740

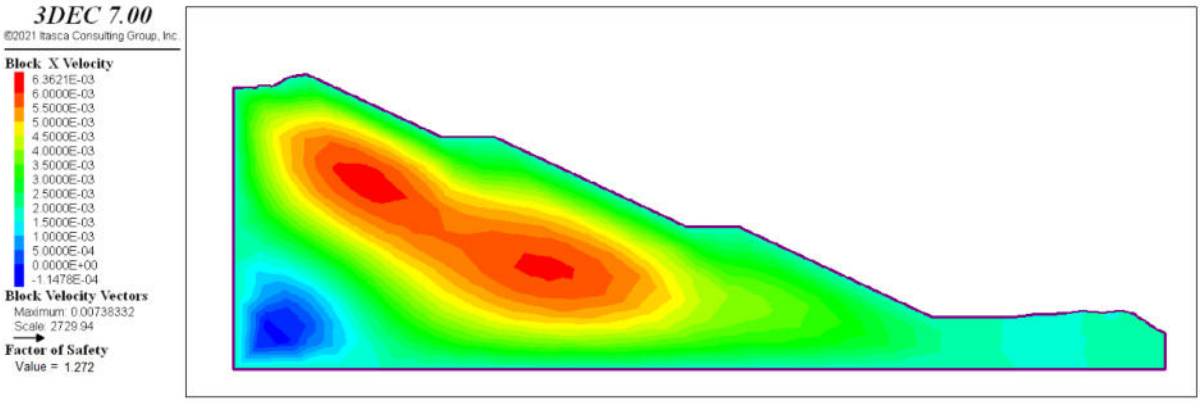


Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+750

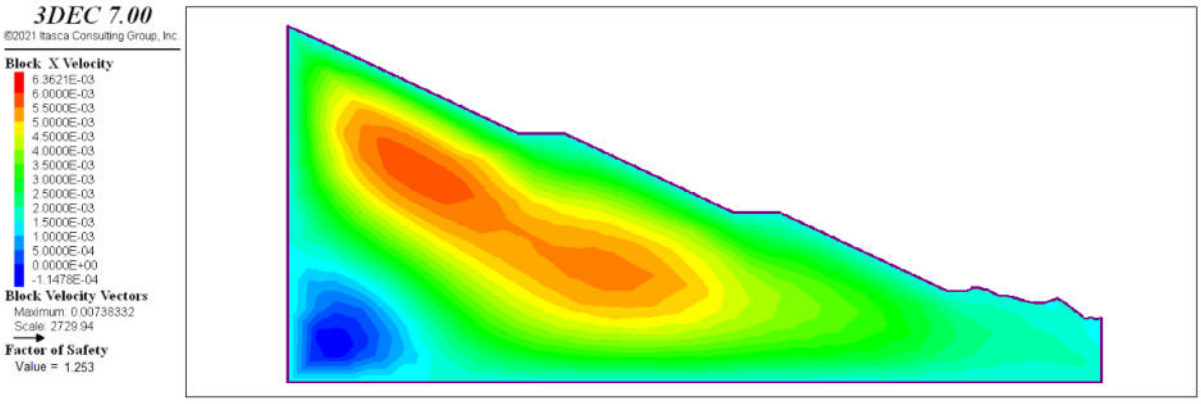


ANEXO 10: VALORES DE FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES OPTIMIZADOS PARA ALTURA DE 17 M CONDICIONES ESTÁTICAS

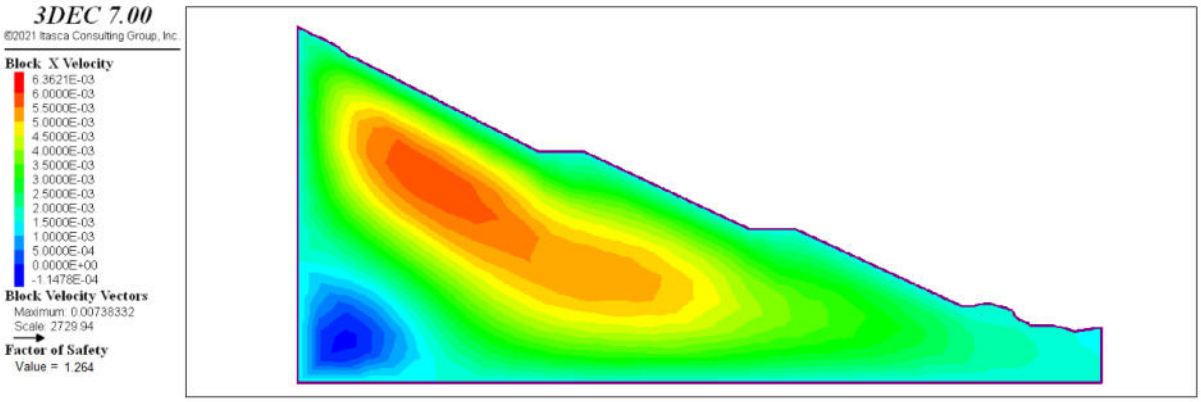
Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+720



Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+740

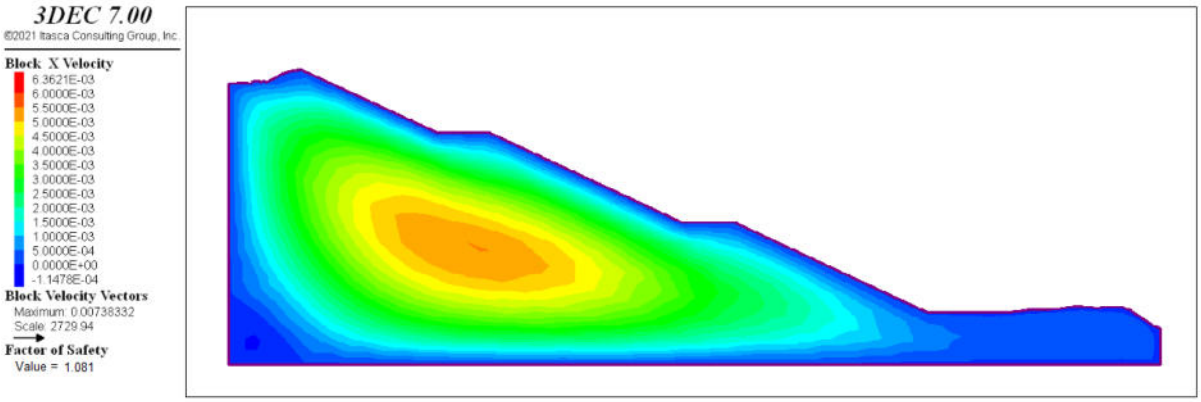


Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+750

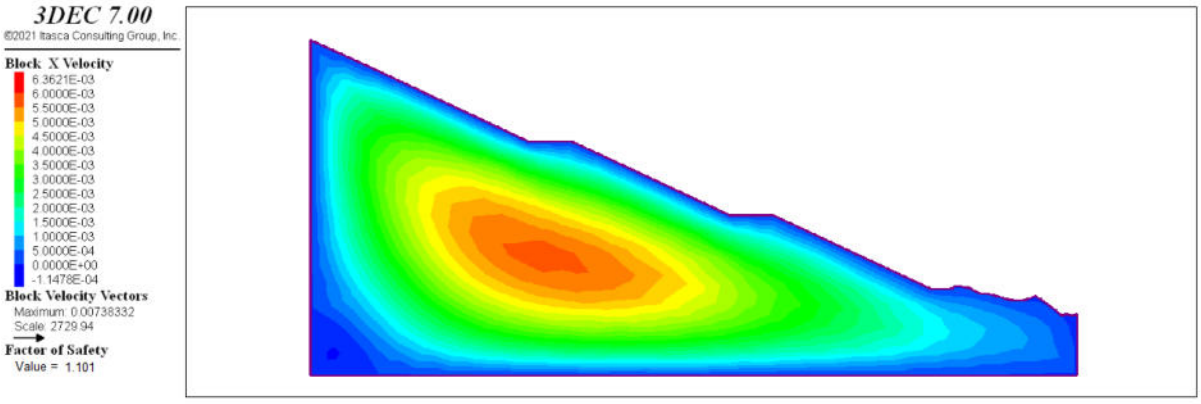


ANEXO 11: VALORES DE FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES OPTIMIZADOS PARA ALTURA DE 17 M CONDICIONES PSEUDOESTÁTICAS

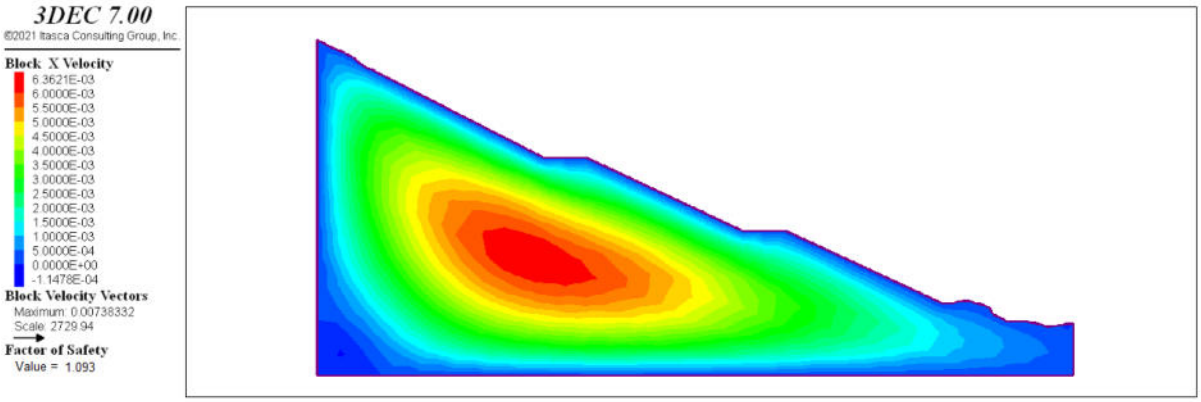
Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+720



Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+740



Análisis por el Método de Elementos Finitos para la progresiva 000+750



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	: Carlos Daniel Vizcarra Mamani
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N°	: 72861130
Correo electrónico	: carlosvizcarra785@gmail.com
Teléfono/Celular	: 981900325

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 : "SIMULACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO ELEMENTOS FINITOS (FEM) Y ELEMENTOS DISCRETOS (DEM) PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DE TALUDES PARA EVENTOS SÍSMICOS EN UNA CANTERA DE AGREGADOS EN MOQUEGUA"

b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra : https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html) : **2.07.05**
c) Fecha de publicación : 19/01/2026

6. DATOS DEL ASESOR:

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

FIRMA : .....
DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 72861130
NOMBRES Y APELLIDOS : Carlos Daniel Vizcarra Mamani

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 : 72861130
NOMBRES Y APELLIDOS : Carlos Daniel Vizcarra Mamani
FECHA : 19/01/2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

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

Yo, Carlos Daniel Vizcarra Mamani, bachiller de la Escuela Profesional de : Ingeniería de Minas, de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado (a) con DNI: Nº 72861130, autor(a) de la Tesis / Trabajo de suficiencia profesional titulado: "SIMULACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO ELEMENTOS FINITOS (FEM) Y ELEMENTOS DISCRETOS (DEM) PARA MEJORAR LA ESTABILIDADDE TALUDES PARA EVENTOS SÍSMICOS EN UNA CANTERADE AGREGADOS EN MOQUEGUA"

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, 19 de Enero del 2026



Huella digital

Carlos Daniel Vizcarra Mamani
DNI: 72861130

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

CARLOS DANIEL VIZCARRA MAMANI

TESIS

TESIS

CONFORMIDAD DE TESIS FINAL

Universidad Nacional de Moquegua

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3440296778

Fecha de entrega
10 dic 2025, 12:42 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
13 ene 2026, 7:09 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
TESIS_CARLOS_VIZCARRA.pdf

Tamaño del archivo
5.6 MB

122 páginas

26.409 palabras

170.329 caracteres

Firmado digitalmente por BARRIGA PARIA Christ Jesus FAU 20449347448 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 28.01.2026 14:26:22 -05:00

13% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Trabajos entregados
- Fuentes de Internet

Fuentes principales

0% Fuentes de Internet
13% Publicaciones
0% 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

0% Fuentes de Internet
13% Publicaciones
0% 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 Publicación
Quea Gutierrez, Lucio. "Diseño de estabilidad de taludes para el nivel de resistenc... <1%

2 Publicación
Herrera Villa, Jhomayra de los angeles. "Modelamiento numerico del comportami... <1%

3 Publicación
Terrazas, Nicher Saul Vilca. "Análisis de Deflexiones y Esfuerzos en Tuberías de Ac... <1%

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

5 Publicación
Gabriel Jesús Montúfar Chiriboga. "Estudio de la estabilidad de taludes en Panam... <1%

6 Publicación
SRK CONSULTING (PERU) S.A.. "Plan de Cierre de Minas de la Unidad Minera Cond... <1%

7 Publicación
Chayña Contreras, Juan Carlos. "Comportamiento geomecánico para el control de... <1%

8 Publicación
C SANHUEZA PLAZA, L RODRÍGUEZ CIFUENTES. "Análisis Comparativo de métodos... <1%

9 Publicación
Nick Barton, Changshuo Wang, Rui Yong. "Advances in joint roughness coefficien... <1%

10 Publicación
Moreno Rondoy, Rita Clara. "Evaluación de riesgos en la estabilidad de taludes de... <1%

11 Publicación
Pastor Contreras, Wilber. "Evaluación geomecánica para el diseño de reforzamien... <1%

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

13 Publicación
Hoek, . "References", Support of Underground Excavations in Hard Rock, 2000. <1%

14 Publicación
GOLDER ASSOCIATES PERU S.A.. "Segundo ITS de la Unidad Minera Constancia-IG... <1%

15 Publicación
Mahesh Thakur, Raj Kiran Dhiman. "New RMRb–CoSMR plot: a graphical tool to in... <1%

16 Publicación
TECNOLOGIA XXI S A. "EIA del Proyecto de Explotación y Beneficio La Arena-IGA0... <1%

17 Publicación
Basurto Torres, Adriana | Evangelista Zevallos, Cecilia Carol. "Relacion entre el Re... <1%

18 Publicación
Yıldız, Yasin. "Tülü Açik Ocağinda (Bïgadïç / Balikesïr) Yüzeylenen Kaya Kütlelerïnï... <1%

19 Publicación
Puyen Burga, Victor Felipe. "Modelación Numérica de Muros de Contención de Pi... <1%

20 Publicación
Ballesteros-Buitrago Karen, Jaramillo Marcela, Vergara-Bechará Santiago, Gonzál... <1%

21 Publicación
David Yañez, Eduardo Botero. "Implications of the Seismic Coefficients in High Da... <1%

22 Publicación
BISA INGENIERIA DE PROYECTOS S.A.. "EIA-SD para el Proyecto Explotación de Cal... <1%

23 Publicación
Torres, Jonathan Fernando Tobar. "Estudo da escavabilidade de maciços rochosos... <1%

24 Publicación
Pozo Garcia, Raul Rodolfo. "Modificación del Sistema GSI en función de la Escala d... <1%

25 Publicación
Maynas Condori, Oswaldo Luzver. "Propuesta e implementación del sistema de s... <1%

26 Publicación
TAO LUO, SHUREN WANG, Chengguo Zhang, XILIANG LIU. "RECOMENDACIONES B... <1%

27 Publicación
Chura Cahuana, Heinz Miguel. "Determinación de las condiciones de altos esfuerz... <1%

28 Publicación
ESPECIALISTAS AMBIENTALES S.A.C.. "MEIA del Proyecto Ampliación de Producció... <1%

29 Publicación
Machado De Lopez, Betsy Luz. "Estrategias lúdicas para el desarrollo de la psicom... <1%

30 Publicación
D.O. Potyondy, P.A. Cundall. "A bonded-particle model for rock", International Jou... <1%

31 Publicación
Jiazeng Cao, Tao Wang, Guoqing Zhou, Hao Li, Yutong Song, Kaiwen Chen. "An int... <1%

32 Publicación
Alejandro César Valdés Carrera, Manuel E. Mendoza, Teodoro Carlón Allende, José... <1%

33 Publicación
Álvarez, July Estefany Carmona. "Análisis de la compacidad relativa en la construc... <1%

34 Publicación
Chuanqi Li, Jian Zhou. "Prediction and optimization of adverse responses for a hig... <1%

35 Publicación
López-Vizcaíno, Rubén, Vicente Navarro, María J. León, Carolina Risco, Manuel A. ... <1%

36 Publicación
Ruofeng Feng, Jidong Zhao, Jianyu Chen. "A 3D multiphase SPH framework for mo... <1%

37 Publicación
Chaoyi Sun, Congxin Chen, Caihua Liu, Yun Zheng, Kaizong Xia, Kai Fan, Haina Zh... <1%

38 Publicación
Chinguel Vegas, Jackeline Violeta. "Las relaciones interpersonales influyen en el r... <1%

39 Publicación
INSIDEO SOCIEDAD ANONIMA CERRADA - INSIDEO S.A.C.. "ITS Mejora Tecnológica... <1%

40 Publicación
Sanchez Silvera, Franz Alexander | Mendoza Cerpa, Franklin Kenneth. "Análisis de... <1%

41 Publicación
"Proceedings of the 4th International Civil Engineering and Architecture Confere... <1%

42 Publicación
Gilbert, R, and S Wright. "Slope stability with geosynthetic clay liners", Geosynthe... <1%

43 Publicación
Milne, D. "Rock mass classification challenges", Rock Mechanics Meeting Society s... <1%

44 Publicación
Nunes, Susana Isabel Namorado. "Caracterização e Zonamento Geotécnico Preli... <1%

45 Publicación
Tengan Shimabukuro, Carolina. "Inclusión de los Efectos de Sismo de Fuente Cerc... <1%

46 Publicación
Victoria, Sonia Maria Duarte Melo Silva. "Caracterizacao geologica e geotecnica D... <1%

47 Publicación
JOHN A. FRANKLIN. "Empirical Design and Rock Mass Characterization", Elsevier ... <1%

48 Publicación
Rojas Alarcon, Rosa Del Pilar. "Tutoría académica en el aprendizaje de los conoci... <1%

49 Publicación
Sonmez, H.. "Indirect determination of the modulus of deformation of rock mass... <1%

50 Publicación
Anton Tasayco, Victor. "Estudio del Manejo de Materiales Granulares en la Indust... <1%

51 Publicación
GOLDEN CONSULTING S.A.C.. "Actualización del Plan de Manejo Ambiental del PA... <1%

52 Publicación
Ita Paico, Paola Isabel. "Estudio experimental y numérico en elementos discretos ... <1%

53 Publicación
Lucio Quea Gutierrez, Julian Apaza Chino, Juan Carlos Chayña Contreras, Agustín ... <1%

54 Publicación
Greys Nuñez Rios, Kadry Garcia Mendoza, Herminia Montero Fabian, Katherin Re... <1%

55 Publicación
Ersöz, Timur. "Slope Stability Assessment of Various Road Cuts with Effects of We... <1%

56 Publicación
F. Angulo Brown, A. H. Ramirez Guzmán, E. Yépez, A. Rudolf-Navarro, C. G. Pavía ... <1%

57 Publicación
Livano Puma, Eulalia. "Comprensión de narraciones orales y desempeño en repet... <1%

58 Publicación
Longfei You, Yan-Gang Zhao, Haizhong Zhang. "Evaluating the ratio of peak grou... <1%

59 Publicación
Muñoz Alvarez, Wendy Carmen. "Aplicación del programa educativo “Mares” para... <1%

60 Publicación
Tran, Christopher Minh. "Estimating Rock Mass Strength for Landslide Mapping U... <1%

61 Publicación
Balvin Ramirez, David. "Sistema de control interno administrativo para decisión d... <1%

62 Publicación
Brook Eberle, Paul Santi, Pablo Meza. "Quantitative analysis of changing hazard e... <1%

63 Publicación
Dionicio Pascual, Sonia. "Programa de comprensión lectora para la mejora del ap... <1%

64 Publicación
Lee. "Development of a back analysis program for reasonable derivation of tunne... <1%

65 Publicación
Cerisuelo i Ferriols, Josep Pasqual. "Desenvolupament, caracteritzacio, i modelitz... <1%

66 Publicación
Niño Colmenares, Bryan David | Paz Vileikis, Sofía. "Impacto de la cobertura espa... <1%

67 Publicación
Rodrigo Contreras-Arratia. "Are the earthquake locations reliable in caldera struc... <1%

68 Publicación
Shijun Wei, Ingrid Tomac. "Numerical evaluation of Failure Assessment Diagram (... <1%

69 Publicación
Zekai Sen. "Spatial Modeling Principles in Earth Sciences", Springer Science and B... <1%

70 Publicación
FIDEL SALAS VICENTE. "Investigación y modelización de la adherencia, el desgast... <1%

71 Publicación
Haoyu Yao, Rui Pang, Bin Xu, Mingyang Xu, Jun Liu. "Stochastic ground motion si... <1%

72 Publicación
Richard M. Iverson. "Can magma-injection and groundwater forces cause massiv... <1%

73 Publicación
C. Laín, B. Llamas, J. Pous, R. Laín. "Nueva metodología empírica para la estimació... <1%

74 Publicación
Charcape Benites, Susana Valentina. "El método de proyectos mejora los aprendi... <1%

75 Publicación
Domínguez Cano, Ana Laura. "Inteligencia emocional y clima laboral como predic... <1%

76 Publicación
Fisfalen Huerta, Mario Heinrich. "Analisis economico de la carga procesal del pod... <1%

77 Publicación
JADER RODRIGUEZ CORTINA. "CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA INTENSIFICACI... <1%

78 Publicación
Carla Terrón Santiago. "Desarrollo e implementación de un banco de ensayos virt... <1%

79 Publicación
Yakov Quinteros-Gómez, Jehoshua Macedo-Bedoya, Victor Santos-Linares, Franco... <1%

80 Publicación
Andriani, G.F.. "Rocky coast geomorphology and erosional processes: A case stud... <1%

81 Publicación
Guilherme Pereira Bento Garcia. "Análise morfométrica e identificação semi-auto... <1%

82 Publicación
"Open Science Research XV", Editora Cientifica Digital, 2024 <1%

83 Publicación
Alvarez Camacho, Juan José. "Gobierno electrónico y su aplicación en políticas pú... <1%

84 Publicación
Amin Hekmatnejad, Mahdi Bajolvand, Pengzhi Pan, Xavier Emery, Alvaro Pena, Jo... <1%

85 Publicación
Fabienne Schiavo, Claudio Freitas de Magalhães. "IA generativa centrada en los ci... <1%

86 Publicación
Rosas, S.. "Tectonic evolution and paleogeography of the Mesozoic Pucara Basin, ... <1%

87 Publicación
Arrunategui Ruiz, Omar Ferenks. "El nivel de autoestima y la creatividad de los es... <1%

88 Publicación
Quispe Palomino, Maximo. "El rendimiento académico estudiantil y las competen... <1%

89 Publicación
Andrea Zanichelli, Angélica Colpo, Leandro Friedrich, Ignacio Iturrioz, Andrea Car... <1%

90 Publicación
Belinda Marta Lema Cachinell, Yissel Marely Martin Álvarez, Daniel Austin Zaldíva... <1%

91 Publicación
Brock, Amanda Delia. "Making Monumental Places in Dynamic Landscapes: A Cas... <1%

92 Publicación
Chávez Ramirez, Jorge Edgardo. "Análisis geomecánico para el diseño de sosteni... <1%

93 Publicación
Mostafa Asadizadeh, Nima Babanouri, Taghi Sherizadeh. "A heuristic approach to... <1%

94 Publicación
Vallejos Acosta, Claudia Amelia | Salinas Rodríguez, Graciela Patricia. "Conocimie... <1%

95 Publicación
"Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structur... <1%

96 Publicación
Alata Flores, Alicia. "Estrés laboral y sindrome de burnout durante la pandemia C... <1%

97 Publicación
Castilla Lara, Carlas Lucia | Muñoz, Nadia Melissa. "La secuencia didáctica en el f... <1%

98 Publicación
Dante Fratta, Jennifer Aguettant, Lynne Roussel-Smith. "Introduction to Soil Mec... <1%

99 Publicación
Gonzales Vera, Juan Francisco. "Aplicación de estrategias didácticas basadas en el... <1%

100 Publicación
KNIGHT PIESOLD CONSULTORES S.A.. "EIA del Proyecto Constancia-IGA0006961", ... <1%

101 Publicación
Manolo Adolfo Galván Ceballos. "Estudio del ensayo a carga puntual en materiale... <1%

102 Publicación
María Cristina Enríquez Reyna, María de los Ángeles Vargas Flores. "Factores pers... <1%

103 Publicación
Rodrigo Hernandez-Carrillo, Gloria-Inés Beltrán-Calvo. "Rock Wedge Stability Anal... <1%

104 Publicación
Vergara Torrejón, Paulina Judith. "Terrazas Marinas Cuaternarias y Variabilidad e... <1%

105 Publicación
Watson, B. D. "Sedation Assessment in Critically Ill Adults: 2001-2004 Update", Th... <1%

106 Publicación
Wei Ci, Kai Cui, Shangchuan Yang. "DEM simulations of localized dissolution effec... <1%

107 Publicación
Xufei Zhao, Long Yan, Lanlan Yang, Fudong Chi, Yu Ning. "Deformation characteri... <1%

108 Publicación
Ángel Valentín Mercedes García. "Metodología de análisis para la mejora de los in... <1%

109 Publicación
Carlos Hidalgo Signes. "APLICACIÓN AL ESTUDIO DE LA RESPUESTA MECÁNICA DE ... <1%

110 Publicación
Carlos Osorio-Gallego, John Londoño-Metaute, Esteban López-Zapata. "Analysis o... <1%

111 Publicación
Eilif Hjelseth, Sujesh F. Sujan, Raimar J. Scherer. "ECPPM 2022 – eWork and eBusin... <1%

112 Publicación
Elvio Tintaya Zegarra, Yony Farfan Robles, Antonio Coronel Molina, Rosa Evangeli... <1%

113 Publicación
Isela Salinas, Abelardo Paucar, María Quiñónez-Macías, Francisco Grau et al. "Geo... <1%

114 Publicación
LEONARDO ANDRES SIERRA VARELA. "EVALUACIÓN MULTICRITERIO DE LA SOSTE... <1%

115 Publicación
Michel Artenstein. "<![CDATA[A study on Medium Voltage Shunt Reactor Switchin... <1%

116 Publicación
Moisés Oswaldo Bustamante Rúa, Pablo Bustamante-Baena. "Modeling the mech... <1%

117 Publicación
Roberto Torres-Hoyer, Francisco I. Bongiorno, Jackeline C. Peña, Wilmer J. Barreto... <1%

118 Publicación
Rojas Garcia, Maryi. "Ponte en mis zapatos: Una mirada a los tipos de discriminac... <1%

119 Publicación
Torres Cruz, Fred. "Inferencia latente y la modelización de Dirichlet para la caract... <1%

120 Publicación
Andres Mayor, Luis Alfonso, Hector Ortega. "Distancia de seguridad a barnes de t... <1%

121 Publicación
International Commission on Large Dams. "Twenty-Eighth International Congres... <1%

122 Publicación
CESEL S A. "Plan de Cierre de Minas del Proyecto de Exploración Pozos Ricos - Cerr... <1%

123 Publicación
Ricardo, Yury Rosales. "Effects of a Physical Exercise Program on University Stude... <1%

91893

Universidad Nacional de Moquegua

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 301-2026-CU

Moquegua, 29 de abril de 2026

VISTOS:

La Resolución de Consejo de Facultad N° 065-2026-CF-FAIN-UNAM, emitido por la Decana de la Facultad de Ingenierías; el Informe N° D0196-2026-UNAM-R-FAIN, emitido por la Decana de la Facultad de Ingenierías, el Informe Técnico N° D0052-2026-SG-GT, emitido por la Especialista Administrativo II de Grados y Títulos; el Informe N° D0217-2026-UNAM-R-SG, emitido por el Secretario General de la UNAM; el Proveído N° 1945-2026-R, emitido por el señor Rector; el Acuerdo del Pleno del Consejo Universitario de Sesión Extraordinaria N° 19-2026-SE-CU-UNAM, de fecha 29 de abril 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 8º de la Ley Nº 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 Nº 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° 065-2026-CF-FAIN-UNAM, de fecha 27 de marzo de 2026, el Consejo de Facultad de Ingenierías aprobó el otorgamiento del Título Profesional de Ingeniero de Minas, por la modalidad de Tesis, a cinco (05) Bachilleres de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Moquegua, de acuerdo al siguiente detalle: CARLOS DANIEL VIZCARRA MAMANI, ROLANDO RICARDO LLERENA CALLE BRACAMONTE, EDWIN FIDEL FLORES CHECALLA, ALBERT JUSTIN RAMOS FUENTES y ALBERTO ANDRÉ CÁCERES MAMANI;

Que, mediante Informe N° D0196-2026-UNAM-R-FAIN, de fecha 06 de abril de 2026, la Decana de la Facultad de Ingenierías, remite a Secretaría General la Resolución de Consejo de Facultad Nº 065-2026-CF-FAIN-UNAM, de fecha 27 de marzo de 2026;

Que, mediante Informe Técnico N° D0052-2026-SG-GT de fecha 23 de abril de 2026, e Informe N° D0217-2026-UNAM-R-SG de fecha 24 de abril 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: CARLOS DANIEL VIZCARRA MAMANI, ROLANDO RICARDO LLERENA CALLE BRACAMONTE, EDWIN FIDEL FLORES CHECALLA, ALBERT JUSTIN RAMOS FUENTES y ALBERTO ANDRÉ CÁCERES MAMANI, 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 29 de abril 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

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° 301-2026-CU

Moquegua, 29 de abril de 2026

(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;

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° 19-2026-SE-CU-UNAM, de fecha 29 de abril 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: CARLOS DANIEL VIZCARRA MAMANI, ROLANDO RICARDO LLERENA CALLE BRACAMONTE, EDWIN FIDEL FLORES CHECALLA, ALBERT JUSTIN RAMOS FUENTES y ALBERTO ANDRÉ CÁCERES MAMANI, 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

- **CARLOS DANIEL VIZCARRA MAMANI**
- **ROLANDO RICARDO LLERENA CALLE BRACAMONTE**
- **EDWIN FIDEL FLORES CHECALLA**
- **ALBERT JUSTIN RAMOS FUENTES**
- **ALBERTO ANDRÉ CÁCERES MAMANI**

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

DISTRIBUCIÓN: VRAC, VRI, FAIN, EPIM, OyT, 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