

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Estabilidad de taludes en macizos rocosos análisis talud la Yesca

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A N

Eduardo Figueroa Elizalde

Aurora Yeli Ramires Zafiro

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Francisco García Sánchez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS ANALISIS TALUD LA YESCA que presenté para obtener el titulo de INGENIERO GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

EDUARDO FIGUEROA ELIZALDE
Número de cuenta: 315129667

PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS ANALISIS TALUD LA YESCA que presenté para obtener el titulo de INGENIERA GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.



AURORA YELI RAMIRES ZAFIRO
Número de cuenta: 312349273

Índice

Contenido

Índice 2
Índice de tablas 4
Índice de figuras 5
Resumen 6
Abstract 7
Capítulo 1 8
1 Introducción 8
1.1 Antecedentes 8
1.2 Objetivos 8
1.3 Alcances y limitaciones 9
Capítulo 2 10
2 Fundamentos teóricos 10
2.1 Fundamentos del análisis de estabilidad de taludes en macizos rocosos 10
2.2 Mecanismos de falla en taludes 11
2.3 Criterios de rotura 15
2.4 Clasificación Geomecánica 17
Capítulo 3 24
3 Análisis del talud en La Yesca, Nayarit 24
3.1 Introducción 24
3.2 Localización y sismicidad del sitio 24
3.3 Marco Geológico 27
3.4 Exploración Geotécnica 29
3.5 Exploración Geofísica 36
3.6 Estudios Geomecánicos 40
3.7 Pruebas de Laboratorio 42
3.8 Unidades Geotécnicas 44
3.9 Análisis de estabilidad 45
Capítulo 4 47

4 Análisis Económico 47
4.1 Introducción 47
4.2 Consideraciones generales del presupuesto 48
4.3 Catálogo de conceptos 48
4.4 Presupuesto estimado de estabilización 55
4.5 Análisis costo-beneficio 56
Capítulo 5 57
5 Conclusiones 57
GLOSARIO 58
ANEXOS 59
BIBLIOGRAFIA 74

Índice de tablas

Tabla 1 Clasificación RQD 23
Tabla 2 Datos estructurales del talud 34
Tabla 3 Datos del sistema de fracturas 34
Tabla 4 Coordenadas geográficas de cada TRS 36
Tabla 5 Resultados de la prueba con esclerómetro 41
Tabla 6 Clasificación geomecánica de Bieniawsky 42
Tabla 7 Parámetros geomecánicos 44
Tabla 8 Unidades Geotécnicas 45
Tabla 9 Factores de seguridad en los diferentes tipos de falla 47
Tabla 10 FS falla rotacional 49
Tabla 11 Presupuesto del talud 56

Índice de figuras

Figura 1 Falla por desplazamiento planar 12
Figura 2 Geometría de la falla tipo cuña 13
Figura 3 Representación esquemática de la falla por volteo de bloques 14
Figura 4 Representación esquemática de una falla circular 15
Figura 5 Clasificación RMR, Modificada de Abimael Cruz Alavez 19
Figura 7 Sostenimiento según el índice Q (Barton, 2000) 21
Figura 8 Diagrama GSI, Hoek (2000) 22
Figura 9 Mapa con la localización del talud 25
Figura 10 Corte km 37+910 al km 38+120, lado izquierdo 25
Figura 11 Corte km 37+910 al km 38+120, lado izquierdo 26
Figura 12 Regionalización Sísmica de Nayarit, modificado de SEDATU 27
Figura 13 Provincias Fisiográficas del estado de Nayarit, tomada de SPP 28
Figura 14 Columna Geológica Regional 29
Figura 15 Modelo digital de elevación 30
Figura 16 Curvas de nivel 30
Figura 17 Mosaico del talud 31
Figura 18 Suelo residual en la parte superior del corte 32
Figura 19 Toba cristalina fracturada 32
Figura 20 Toba lítica con meteorización 33
Figura 21 Depósito de talud 33
Figura 22 Análisis estructural de la falla tipo plana 35
Figura 23 Análisis estructural de la falla por volteo de bloques 35
Figura 24 Análisis estructural de falla por cuña 36
Figura 25 Representación del concepto de Refracción Sísmica. Tomado de ingeniería y construcciones Grysle, A.S de C.V 37
Figura 26 Golpe a placa en la corona del talud. 38
Figura 27 Colocación del cable sísmico 38
Figura 28 Colocación de geófonos en la cara del talud. 39
Figura 29 Sección geofísica del TRS-1 40
Figura 30 Sección geofísica del TRS-2 40
Figura 31 Estudios alizados para la prueba con martillo Schmid 41

Resumen

En el presente trabajo se realiza el análisis de la estabilidad de un talud ubicado en el municipio de La Yesca, Nayarit, mediante la integración de información geológica, geofísica y geotécnica. La estabilidad de taludes en macizos rocosos representa un aspecto fundamental en obras de infraestructura carretera, ya que factores como la litología, las discontinuidades, la geometría del talud, la presencia de agua y la actividad sísmica pueden influir directamente en su comportamiento y generar condiciones de inestabilidad.

En el capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos que sustentan el estudio de la estabilidad del talud, incluyendo los conceptos necesarios para comprender los mecanismos de rotura y, con ello, la clasificación geomecánica, con el objetivo de establecer las bases del estudio.

El capítulo 3 está destinado al caso de estudio, en el cual se presentan los análisis de estabilidad a partir de la identificación de las discontinuidades presentes, y es por ello por lo que se evalúa el comportamiento de este a través de diferentes condiciones, como lo son el estado actual, la influencia del agua y el efecto donde se presenta actividad sísmica. Con base a los resultados obtenidos, se identifica la condición más desfavorable y se plantean medidas de estabilización que contribuyan a garantizar las condiciones de seguridad del talud.

Como acción complementaria, se elabora un presupuesto estimado de la propuesta de estabilización y un análisis costo-beneficio en el capítulo 4, con el fin de evaluar la viabilidad técnica y económica de las medidas planteadas. De esta manera, el trabajo no solo permite identificar la problemática del talud, sino también proponer una solución integral que considere aspectos técnicos, constructivos y económicos.

Finalmente, la correlación de métodos geológicos, geofísicos y geotécnicos permite establecer una evaluación más completa del comportamiento del talud en un macizo rocoso, contribuyendo a la toma de decisiones para la mitigación de riesgos y la conservación de la infraestructura.

Abstract

This study analyzes the stability of a slope located in the municipality of la Yesca, Nayarit, through the integration of geological, geological, and geotechnical information. Slope stability in rock masses is a fundamental aspect of road infrastructure projects, since factors such as lithology, discontinuities, slope geometry, the presence of water, and seismic activity can directly influence slope behavior and generate conditions of instability.

Chapter 2 presents the theorical foundations that support the study of slope stability, including the concepts necessary to understand failure mechanisms, as well as geomechanical classification, thereby establishing the basis for the analysis.

Chapter 3 is dedicated to the case study, in which the stability analyses are presented based on the identification of the existing discontinuities. Therefore, the behavior of the slope is evaluated under different conditions, including its current state, the influence of water, and the effect of seismic activity. Based on the results obtained, the most unfavorable condition is identified, and stabilization measures are proposed to help ensure the safety conditions of the slope.

As a complementary action, Chapter 4 presents an estimated budget for the proposed stabilization measures, as well as a cost-benefit analysis, in order to evaluate the technical and economic feasibility of the proposed solutions. In this way, the study not only makes it possible to identify the slope-related problem, but also to propose an integrated solution that considers technical, construction, and economic aspects.

Finally, the correlation of geological, geophysical, and geotechnical methods allows for a more comprehensive evaluation of the behavior of the slope within a rock mass, contributing to decision-making for risk mitigation and the preservation of infrastructure.

Capítulo 1

1 Introducción

1.1 Antecedentes

La estabilidad de taludes en macizos rocosos constituye un aspecto fundamental en el desarrollo de obras de infraestructura, como lo son el tipo vial, debido a que diferentes condiciones geológicas, geotécnicas y sísmicas pueden derivar de manera directa en la seguridad de la carretera y de los usuarios. En los macizos rocosos, la construcción de carreteras requiere, con frecuencia, la excavación y corte del terreno natural, lo que, a su vez, genera taludes artificiales donde se modifica el estado de esfuerzos de este, dejando discontinuidades preexistentes y, con ello, favorecer la ocurrencia de mecanismos de falla y la posible circulación de agua. Es por ello por lo que el análisis de la estabilidad de taludes resulta indispensable para identificar las condiciones en las que se puede ver afectado los macizos rocosos y, por ende, establecer medidas de seguridad.

En el municipio de La Yesca, Nayarit, se muestran cortes carreteros en macizos rocosos, en donde aspectos como la litología, el grado de fracturamiento, la geometría del talud y la presencia de agua puede incidir en su estabilidad y, con ello favoreciendo la posible ocurrencia de mecanismos de falla.

La correlación de la información que se obtiene de analizar el talud desde el punto de vista geológico, geofísico y geotécnico proporciona una base fundamental para la interpretación de los resultados que se obtienen al momento de analizar el comportamiento del talud.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Analizar la estabilidad de un talud ubicado en el municipio de La Yesca, Nayarit, mediante la integración de información geológica, geofísica y geotécnica, con el fin de identificar sus condiciones de estabilidad y proponer una alternativa de estabilización acompañada de un presupuesto estimado y un análisis costo-beneficio.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar los principales factores que influyen en la estabilidad del talud, como la litología, las discontinuidades, la geometría, la presencia de agua y el efecto sísmico.
- Definir un modelo geológico-geofísico-geotécnico que presente las condiciones del macizo rocoso.
- Evaluar la estabilidad del talud bajo condiciones estáticas, pseudoestático y saturadas.
- Proponer medidas de estabilización que contribuyan a mejorar la seguridad en el talud.
- Elaborar un presupuesto estimado para la propuesta de estabilización.
- Realizar un análisis costo-beneficio para evaluar la viabilidad económica de las medidas propuestas.

1.3 Alcances y limitaciones

Dentro de los alcances en el trabajo se busca caracterizar el macizo rocoso mediante la integración de información geológica, geofísica y geotécnica disponible, identificar los factores que influyen en su estabilidad y evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de análisis, como lo es a través de un modelo estático, pseudoestático y saturado.

El estudio considera la revisión de las condiciones geológicas y litológicas del talud, la identificación de discontinuidades principales, la interpretación de información geofísica, la definición de unidades geotécnicas. Con base en los resultados obtenidos, se plantea una propuesta de estabilización orientada a mejorar las condiciones de seguridad del talud.

Además, como aportación complementaria, se incluye la elaboración de un presupuesto estimado y un análisis costo-beneficio de la propuesta de estabilización. Estos elementos permiten tener una aproximación económica de las medidas planteadas y, con ello, valorar su viabilidad técnica.

Entre las limitaciones del trabajo se encuentra que el análisis se realiza con base en la información disponible, por lo que los resultados dependen de la calidad y cantidad de los datos geológicos, geofísicos y geotécnicos utilizados. Asimismo, el presupuesto que se presenta tiene carácter estimado, por lo que los costos pueden variar de acuerdo con las condiciones reales de obra, disponibilidad de materiales, rendimientos, ubicación del sitio, maquinaria, mano de obra y actualización de precios.

Finalmente, las propuestas de estabilización se consideran a nivel conceptual y deberán ser complementadas, en caso de ejecutarse, con estudios de detalle, proyecto ejecutivo, revisión estructural, especificaciones constructivas y supervisión especializada en campo.

Capítulo 2

2 Fundamentos teóricos

2.1 Fundamentos del análisis de estabilidad de taludes en macizos rocosos

La mecánica de rocas es una disciplina verdaderamente interdisciplinaria, con aplicaciones en geología y geofísica, minería, ingeniería petrolera e ingeniería civil. Está relacionada con la recuperación y el desarrollo de recursos energéticos, la construcción de infraestructura de transporte, recursos hidráulicos e instalaciones de defensa, la predicción de terremotos y muchas otras actividades de gran importancia (Goodman, 1989). Es por ello que vale la pena definir la siguiente definición: Se denominan rocas a los conjuntos de agregados mono o poliminerales que constituyen la litosfera y que se presentan consolidados, cementados, aglomerados o de cualquier otra forma de modo que dan lugar a un material de cierta resistencia (Ramírez Oyanguren & Alejano Monge, 2004).

El análisis de estabilidad de taludes rocosos permite evaluar las condiciones bajo las cuales un macizo rocoso puede mantenerse estable o presentar algún mecanismo de falla. Para ello, se considera las características geológicas, estructurales, geotécnicas, hidráulicas y sísmicas del sitio ya que todas ellas influyen directamente en el comportamiento del talud.

En los taludes que se encuentran formados por un macizo rocoso, la estabilidad no se encuentra condicionada solamente por las propiedades mecánicas de la roca intacta, sino también por las estructuras que se encuentran en el mismo. La presencia de discontinuidades influye de manera directa en el comportamiento del talud, ya que estas superficies reducen la continuidad del material y, con ello, constituir planos potenciales de deslizamiento. Es por ello que dichas discontinuidades resultan en factores que son determinantes para la identificación de mecanismos de falla.

Para la construcción de vías de comunicación, es necesario realizar numerosos cortes de gran altura en macizos rocosos ubicados en terrenos montañosos. Las restricciones relacionadas con las especificaciones de curvatura hacen que los cortes destinados a canales y vías ferroviarias sean relativamente más altos y numerosos que los requeridos para carreteras (Goodman, 1989).

2.2 Mecanismos de falla en taludes

En macizos rocosos, son las propiedades resistentes de las discontinuidades y de la matriz rocosa las que controlan el comportamiento mecánico. En función de las características y estructura del macizo, de su red de fracturación y de la naturaleza de los materiales y de las discontinuidades, la resistencia vendrá controlada por las propiedades de las discontinuidades, por las propiedades de la matriz rocosa o por ambas (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo , 2002).

En presencia de discontinuidades como diaclasas, foliación o estratificación, se generan espacios vacíos que constituyen poros. Al añadirse un conjunto de esfuerzos a estas zonas, se pueden producir roturas de mayor escala. Dichas discontinuidades originan planos preferenciales de falla, lo que incrementa la probabilidad de ruptura en estas áreas.

Reconocer el tipo de falla resulta fundamental, ya que permite establecer la estrategia más adecuada para determinar el análisis que se llevará a cabo y, con ello, mitigar los posibles daños. Entre las consecuencias más relevantes de no considerar un análisis adecuadamente se encuentran la pérdida de vidas humanas, el incremento en los costos del proyecto y la demora en su ejecución, entre otros.

A lo largo de este capítulo se describen los principales tipos de falla en taludes de roca. En primer lugar, la falla planar, que se desarrolla a lo largo de una superficie plana. En segundo lugar, la falla en cuña, que ocurre cuando dos discontinuidades se interceptan en un ángulo oblicuo con respecto a la superficie del talud. En tercer lugar, la falla por volteo de bloques, producto de giros o rotaciones de bloques de roca alrededor de un macizo más estable. Finalmente, se encuentra la falla circular en rocas alteradas, caracterizada por desarrollarse a lo largo de una superficie circular.

2.2.1 Falla por desplazamiento planar

La falla por deslizamiento planar ocurre cuando se presenta un movimiento a lo largo de un plano de debilidad, el cual puede corresponder a superficies de falla, planos de estratificación u otras discontinuidades estructurales. Este tipo de falla se desarrolla sobre una superficie esencialmente plana y su origen está asociado a la baja resistencia al corte del plano de deslizamiento. Dicho de otra manera, la rotura plana se produce siguiendo una discontinuidad con dirección aproximadamente igual a la del talud pero que buza menos que este, quedando descalzado por tanto un prisma de roca (Ramírez Oyanguren & Alejano Monge, 2004).

El ingeniero geotecnista encargado de analizar la estabilidad del talud deberá identificar la discontinuidad con mayor potencial de generar el deslizamiento, ya que en un mismo macizo pueden coexistir múltiples planos de debilidad. De ahí la importancia de determinar la falla principal, pues esta será la clave para plantear las soluciones de estabilización más adecuadas y garantizar la seguridad de la estructura y su entorno.

La figura 1 muestra las distintas partes de un talud y, con ello, a pie de este nos indica la transición del cambio abrupto de inclinación en la superficie, además de la cara del talud, la cual es parte visible del cambio de inclinación de la superficie. La falla de mayor potencial que se muestra es aquella que tiene la capacidad de generar el deslizamiento. De igual manera, se muestran distintos ángulos. Para el caso del ángulo Φ, se hace mención acerca de la fricción interna que existe dentro del talud rocoso para la superficie de deslizamiento, el ángulo α es aquel que se forma entre dos superficies, la horizontal y el de falla. Por último, el ángulo β es el grado de inclinación de la cara del talud con respecto a la superficie horizontal.

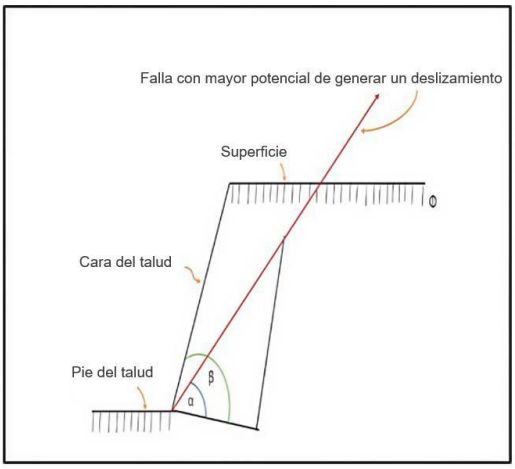


Figura 1 Falla por desplazamiento planar

2.2.2 Falla tipo cuña

Este tipo de falla se presenta comúnmente en taludes excavados con materiales de tipo rocoso, en proyectos de ingeniería, como la construcción de carreteras para el tránsito vehicular e, incluso, en explotaciones mineras a cielo abierto. Son ejemplos donde se pueden encontrar dichas fallas. Es importante destacar que este mecanismo de falla constituye un caso particular de la falla planar y, a su vez, representa un mecanismo de inestabilidad principal en taludes rocosos.

La falla en cuña ocurre cuando la masa de roca se desliza a lo largo de dos discontinuidades que se interceptan en un ángulo oblicuo a la superficie del talud (Suarez, 1988). Generalmente, ocurre en macizos rocosos donde dichas discontinuidades se encuentran claramente definidas y bien desarrolladas. En la Figura 2 se ilustran los elementos que intervienen en el proceso de rotura en cuña de un talud rocoso.

La falla tipo cuña puede subdividirse en dos variantes: directa e inversa. En la primera, la intersección de dos o más discontinuidades se caracteriza porque las superficies tienden a inclinarse en sentidos opuestos. En cambio, la falla inversa ocurre cuando las discontinuidades presentan la misma orientación.

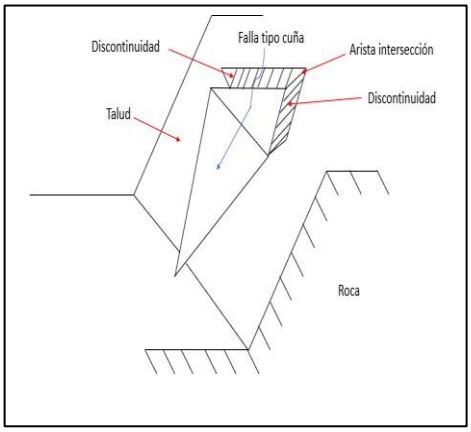


Figura 2 Geometría de la falla tipo cuña

2.2.3 Falla por volteo de bloques

Este tipo de falla se presenta generalmente en macizos rocosos con discontinuidades que tienen una orientación y geometría bien definida, en rocas metamórficas foliadas, así como en bloques de origen granítico fracturado y en rocas máficas, como el basalto de tipo columnar.

Las fallas al volteo ocurren en masas de roca que están subdivididas en una serie de columnas de gran buzamiento y con rumbo aproximadamente paralelo a la superficie del talud (Suarez, 1988).

Para que este mecanismo de inestabilidad se desarrolle, es indispensable la presencia de un conjunto de discontinuidades que intercepten al macizo rocoso y que, además, presenten una inclinación hacia el interior de este.

Este tipo de falla se presenta en taludes de origen rocoso donde los bloques o estratos muestran un buzamiento diferente al ángulo de inclinación del talud, pero con una orientación paralela o casi paralela a este. Esta condición puede observarse en la figura 3.

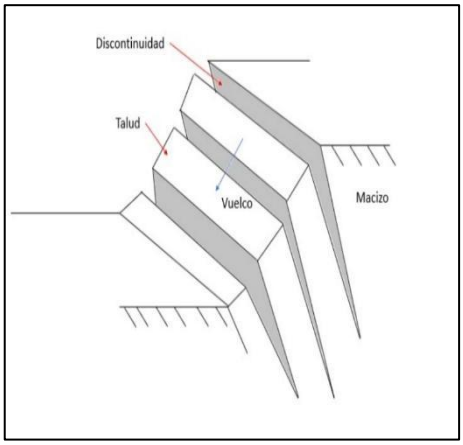


Figura 3 Representación esquemática de la falla por volteo de bloques

2.2.4 Falla circular en rocas alteradas

La forma real de la superficie de deslizamiento "circular" esta influenciada por las condiciones geológicas presentes en el talud. Por ejemplo, en un macizo rocoso homogéneo, débil o meteorizado, o en un relleno de roca, es probable que la falla se desarrolle a lo largo de una superficie poco profunda y de gran radio de curvatura. Esto contrasta con las fallas que se presentan en materiales de alta cohesión y baja fricción, como las arcillas, donde la superficie de deslizamiento puede desarrollarse a mayor profundidad, con un radio de curvatura menor (Wyllie & Mah, 2004).

La falla circular constituye uno de los mecanismos de inestabilidad que pueden desarrollarse con mayor frecuencia en los taludes, en donde el material se desliza a través de una superficie curva, en donde el exceso de pendiente y la presencia de agua son factores determinantes para dicho mecanismo de falla. En la figura 4 se muestra una representación esquemática. Cabe mencionar que los círculos de rotura tienden a interceptar el pie del talud, aunque su desarrollo puede producirse en diferentes zonas de este. La ubicación final depende de las propiedades geomecánicas del material, tales como la pendiente del talud y el ángulo de fricción interna, que condicionan la estabilidad general del macizo

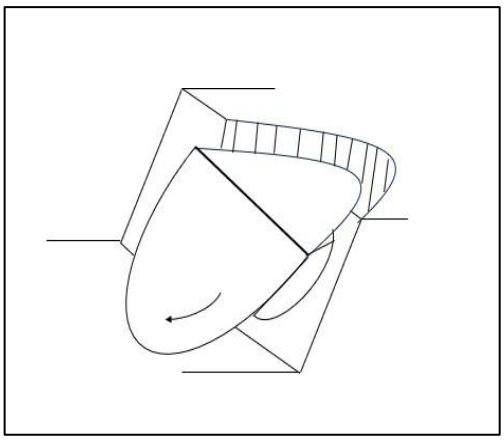


Figura 4 Representación esquemática de una falla circular

2.3 Criterios de rotura

Para establecer un criterio de ruptura general es necesario comprender que existen dos enfoques principales para definir el comportamiento de la rotura en roca: el criterio basado en el estado de tensiones y el criterio basado en la deformación.

En el campo de la mecánica de rocas, el enfoque más utilizado es el de tensiones, en el cual la resistencia de la roca se define como la máxima tensión que esta puede soportar antes de producirse una falla.

En cualquier punto del talud, el tensor de tensiones está definido por 6 componentes: 3 componentes normales y 3 componentes tangenciales, σ_{xi}, σ_{yi}, σ_{zi}, τ_{xyi}, τ_{yzi}, τ_{xzi} en un sistema de coordenadas (x,y,z). En función de la magnitud y dirección de las 6 componentes del tensor, podemos determinar las 3 tensiones principales (σ_{1i},σ_{2i},σ_{3i}), donde σ_{1i} se define como la tensión superior, mientras que σ_{2i} la tensión central y, finalmente, σ_{3i} la tensión inferior.

Una relación matemática fundamental en mecánica de rocas es el criterio de rotura, el cual se expresa en función de las tensiones y permite determinar la resistencia de una roca cuando esta se encuentra sometida a una matriz tensorial de esfuerzos.

En Mecánica de Rocas, los criterios más utilizados son el de Mohr-Coulomb y el de Hoek-Brown. Ambos constituyen modelos que permiten estimar la resistencia del material en función de los esfuerzos aplicados y de sus propiedades resistentes, lo que, a su vez, facilita la predicción de las condiciones bajo las cuales puede producirse la rotura.

2.3.1 Criterio de rotura de Hoek y Brown

Para evaluar la resistencia de la matriz rocosa es más adecuado un criterio no lineal, donde la representación gráfica de la rotura es una curva de tipo cóncavo (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo , 2002).

Se basa en una metodología de carácter empírico e indirecto fundamentada en el índice de calidad del macizo rocoso y respaldada por los trabajos previos del Rock Mass Rating (RMR). Los autores de esta propuesta incorporaron un criterio de rotura con el objetivo de proporcionar parámetros útiles en el análisis y diseño de excavaciones subterráneas.

Dicho criterio se derivó de los aportes realizados por Hoek, a partir del estudio de roturas frágiles en roca intacta, y del modelo de macizos rocosos desarrollado por Brown. Su formulación es de carácter no lineal, lo que facilita la estimación de la rotura en un medio rocoso isotrópico. Gráficamente, este comportamiento se representa mediante una curva de tipo cóncavo.

Entre los principales aspectos que determinan la rotura de un medio rocoso se destacan:

- ✓ La no linealidad respecto al nivel de tensiones.
- ✓ El tipo de roca y las condiciones en las que se encuentra el macizo.
- ✓ La relación entre la resistencia a la compresión y a la tracción.
- ✓ La disminución del ángulo de rozamiento con el incremento de la tensión.

La expresión para el criterio de rotura de Hoek y Brown es la siguiente:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}\left(\frac{m \cdot \sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s\right)^a \qquad (1)$$

σ_1' y σ_3' son las tensiones principales mayor y menor respectivamente en el momento de rotura.

La resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta se representa mediante el parámetro σ_{ci}, mientras que los coeficientes a, m y s corresponden a constantes características del material. Estos parámetros dependen de las propiedades intrínsecas de la roca y de su grado de fracturación, y se determinan a partir de ensayos realizados in situ y/o en laboratorio.

2.3.2 Criterio de Barton y Bandis

Determinar la resistencia de la roca en taludes, como lo es objetivo de estudio y cuya estabilidad se encuentra condicionada por discontinuidades geológicas, resulta fundamental. Existen diversos métodos para evaluar las propiedades geomecánicas y caracterizar las discontinuidades presentes en el macizo; sin embargo, aún persisten incógnitas que han motivado un gran número de investigaciones en esta área.

Para llevar a cabo un análisis cinemático confiable, es indispensable el uso de la red estereográfica, pues permite estimar con alta precisión el ángulo de fricción asociado a las juntas o discontinuidades. A partir de este valor, es posible definir el círculo de fricción, herramienta esencial para el estudio de la estabilidad. En este contexto, el criterio de rotura de Barton y Bandis se emplea para obtener dicho círculo, el cual se linealiza con el fin de calcular la fricción instantánea y, con ello, determinar el estado tensorial medio que actúa sobre una discontinuidad con potencial de deslizamiento.

Es importante destacar que este criterio constituye una relación empírica, ampliamente utilizada para la determinación de la resistencia al corte de discontinuidades tales como juntas o fallas.

Originalmente, la formulación se desarrolló a partir del comportamiento de las juntas en macizos intactos. A continuación, se presenta la ecuación que describe lo anterior:

$$\tau = \sigma n \tan\left(\phi b + JRC \cdot \log 10\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)\right) \qquad (2)$$

Donde:

τ = Resistencia al corte

σ_n = Tención efectiva sobre la discontinuidad

ϕ_b = Ángulo básico de fricción de la superficie de rotura

JRC = Coeficiente de rugosidad de juntas

JCS = Resistencia a compresión de las paredes de discontinuidades

2.4 Clasificación Geomecánica

A partir de la segunda mitad del siglo XX se han desarrollado clasificaciones geomecánicas, cuyo interés inicial fue establecer criterios para el diseño de sistemas de sostenimiento en excavaciones subterráneas. Con el tiempo, estas metodologías se han generalizado y hoy en día se aplican tanto en la fase de diseño como en la de ejecución de obras en macizos rocosos. No obstante, es fundamental reconocer las limitaciones que presenta cada sistema de clasificación.

Gran parte de estas metodologías se apoyan en la cuantificación de parámetros característicos del macizo rocoso. Dichos parámetros pueden obtenerse a través de observaciones directas y pruebas sencillas de campo, lo que permite obtener una aproximación razonable del comportamiento del macizo rocoso. En la actualidad, además de los métodos empíricos tradicionales, se dispone de técnicas numéricas avanzadas que permiten incorporar valores de entrada derivados de estas pruebas para obtener resultados más precisos.

Dentro de las clasificaciones más utilizadas podemos encontrar las siguientes:

- ✓ Clasificación RMR de Bieniawski, que proporciona un índice de calidad a partir de la resistencia de la roca intacta, el grado de fracturación y las características de las discontinuidades.
- ✓ Sistema Q de Barton, utilizado para estimar el comportamiento geomecánico del macizo a través de parámetros empíricos derivados de observaciones de campo.
- ✓ Clasificación GSI de Hoek, que permite caracterizar propiedades mecánicas a partir de la evaluación visual de las condiciones geológicas observadas en el macizo.
- ✓ Clasificación de Deere (RQD), que se fundamenta en el índice RQD, parámetro que indica la calidad del macizo rocoso in situ en función del grado de fracturación.

2.4.1 Clasificación geomecánica de Bieniawski

Cuando el ingeniero de diseño y el geólogo especializado en ingeniería se enfrentan al estudio de una roca, deben visualizar el macizo rocoso como un conjunto de bloques de roca intacta separados por diferentes tipos de discontinuidades geológicas. Por lo tanto, deben considerar las características tanto del material intacto como de las discontinuidades (Bieniawski, 1989).

La clasificación geomecánica RMR (Rock Mass Rating), desarrollada por el profesor Z. T. Bieniawski en 1973, fue concebida inicialmente para el estudio y diseño de túneles. Sin embargo, en la actualidad constituye una herramienta indispensable en el análisis de taludes y cimentaciones en macizos rocosos. Su propósito fundamental es proporcionar un índice de calidad del macizo mediante la evaluación de parámetros como la resistencia de la roca intacta, el grado de fracturación y las características de las discontinuidades. De esta forma, el índice RMR permite relacionar la calidad del macizo con parámetros geotécnicos, asignando una ponderación que varía entre 0 y 100 puntos y, con ello sumar, las puntuaciones para obtener un valor total que permite determinar la clase y calidad del macizo rocoso. Esto se muestra en la figura 5.

Los parámetros geomecánicos considerados en esta clasificación son los siguientes:

- Resistencia a la compresión simple de la roca intacta. Se obtiene a partir de ensayos de compresión simple en testigos de roca o mediante ensayo de carga puntual. La puntuación asignada oscila entre 0 y 15 puntos, dependiendo del valor de resistencia obtenido.

- Índice de calidad de la roca (RQD). Determina el grado de fracturación del macizo a partir del análisis de núcleos de perforación. Los valores asignados varían desde 3 puntos (para un RQD < 25%) hasta 20 puntos (para un RQD > 90%).
- Espaciamiento de las discontinuidades. Evalúa la distancia entre ellas, asignando 5 puntos cuando el espaciamiento es < 6 cm y hasta 20 puntos cuando supera los 2 m.
- Condición de las discontinuidades. Considera aspectos como la longitud, la abertura, la rugosidad y la presencia de relleno. Su puntuación puede alcanzar un máximo de 20 puntos o disminuir hasta 0, en función del grado de alteración.
- Condiciones hidrogeológicas. Refleja la influencia del agua en el macizo, valorando filtraciones, humedad y caudales de flujo. El puntaje máximo de 15 corresponde a macizos secos, mientras que un flujo mayor a 125 l/min entre juntas equivale a 0 puntos.
- Corrección por orientación de discontinuidades. Se aplica en función de la relación entre la orientación estructural del macizo y la excavación. El rango de valores varía según el tipo de obra: en túneles (-12 a 0), en taludes (-60 a 0) y en cimentaciones (-25 a 0).

A. Parametro de clasificación y sus valores asignados							
1. Resistencia a la compresión simple en estado intacto en Mpa	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	< 1
Valor asignado	15	12	7	4	2	1	0
2. Calidad del núcleo (RQD) en %	90-100	75-90	50-75	25-50	< 25		
Valor asignado	20	17	13	8	3		
3. Espaciamento entre juntas en m	> 2	0.6 -2	0.2-0.6	0.06-0.2	<0.06		
Valor asignado	20	15	10	8	5		
4. Condiciones de las discontinuidades o juntas	Discontinuas, muy rugosas, no alteradas, cerradas	Ligeramente alteradas y algo rugosas, separación <1 mm	Ligeramente rugosas, muy alteradas, separación < 1mm	Continuas, lisas o pulidas, o rellenas < 5mm de espesor, o abiertas entre 1-5 mm	Continuas, con relleno blando > 5mm o abiertas más 5mm		
Lineamientos para clasificar las condiciones de las discontinuidades							
Longitud de la discontinuidad (persistencia) en m	< 1	1 - 3	3-10	10-20	> 20		
Valor parcial asignado	6	4	2	1	0		
Separación (abertura) en mm	ninguna	< 0.1	0.1-1.0	1-5	>5		
Valor parcial asignado	6	5	4	1	0		
Rugosidad	Muy rugoso	Rugoso	Ligeramente rugoso	Suave	Liso o pulido		
Valor parcial asignado	6	5	3	1	0		
Relleno	Duro			Suave			
Espesor en mm	ninguno	< 5	>5	<5	>5		
Valor parcial asignado	6	4	2	2	0		
Alteración	Ninguna	Ligera	Moderada	Alta	Muy alta		
Valor parcial asignado	6	5	3	1	0		
Valor máximo asignado	30	25	20	10	0		
5. Flujo de agua subterránea							
Por cada 10 m de túnel (litros/minuto)	Ninguno	<10	10-25	25-125	>125		
(Presión del agua) / (esfuerzo mayor in situ), en la junta	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
Condiciones generales	Seco	Humedo	Mojado	Goteo	Flujo		
Valor asignado	15	10	7	4	0		
6. Rumbo y echado de las juntas	Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable		
Valor asignado (túneles)	0	-2	-5	-10	-12		
Valor asignado (cimentaciones)	0	-2	-7	-15	-25		
Valor asignado (taludes)	0	-5	-25	-50	-60		
B. Clasificación del macizo rocoso con los valores totales asignados y valores de los parametros de resistencia							
Clasificación tipo	I	II	III	IV	V		
Clasificación de la roca	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala		
Valor total asignado	100-81	80-61	60-41	40-21	<20		
Cohesión de la masa (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100		
Ángulo de fricción interna de la masa (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15		

Figura 5 Clasificación RMR, Modificada de Abimael Cruz Alavez

2.4.2 Sistema Q-Barton

El sistema Q de Barton fue introducido en 1974 y, desde entonces, ha sido objeto de modificaciones con el fin de incorporar metodologías más modernas en el diseño y soporte de túneles. Cabe resaltar que se trata de un método empírico, sustentado en una base de datos de más de 1000 casos de túneles alrededor del mundo. El valor del índice Q se expresa en una escala logarítmica que varía entre 0.001 y 1000, tal como se muestra en la figura 6. Los seis parámetros seleccionados para describir la calidad del macizo rocoso mediante el índice Q se combinan de la siguiente manera (Barton et al., 1974).

$$Q = \frac{RQD}{J_m} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \qquad (3)$$

Los parámetros que conforman el sistema Q de Barton se describen de la siguiente manera:

- J_m (número de familias de discontinuidad): Este parámetro se refiere a la cantidad de sistemas de discontinuidades presentes en el macizo rocoso.
- J_r (rugosidad de las juntas): Representa las características de rugosidad y ondulación en las superficies de las discontinuidades.
- J_a (alteración de las juntas): Evalúa el grado de alteración y/o relleno existente en las discontinuidades.
- Jw (condiciones de agua en juntas): Corresponde a un factor de corrección asociado a la presencia y efecto del agua en las discontinuidades.
- SRF (factor de reducción por esfuerzo): Es un parámetro que refleja el estado tensional del macizo rocoso y su grado de inestabilidad.

La relación entre estos factores otorga un sentido físico a cada uno de ellos, permitiendo interpretar de manera integral las condiciones del macizo:

- RQD / J_m: Expresa las dimensiones medias de los bloques que conforman el macizo, al relacionar el grado de fracturación con el número de familias de discontinuidades.
- J_r / J_a: Asocia la rugosidad, la fricción y el grado de alteración o relleno de las juntas, representando la resistencia al corte entre los bloques.
- Jw / SRF: Relaciona las condiciones hidrogeológicas con el estado tensional, por lo que puede interpretarse como una medida de la tensión activa que actúa sobre el macizo rocoso.

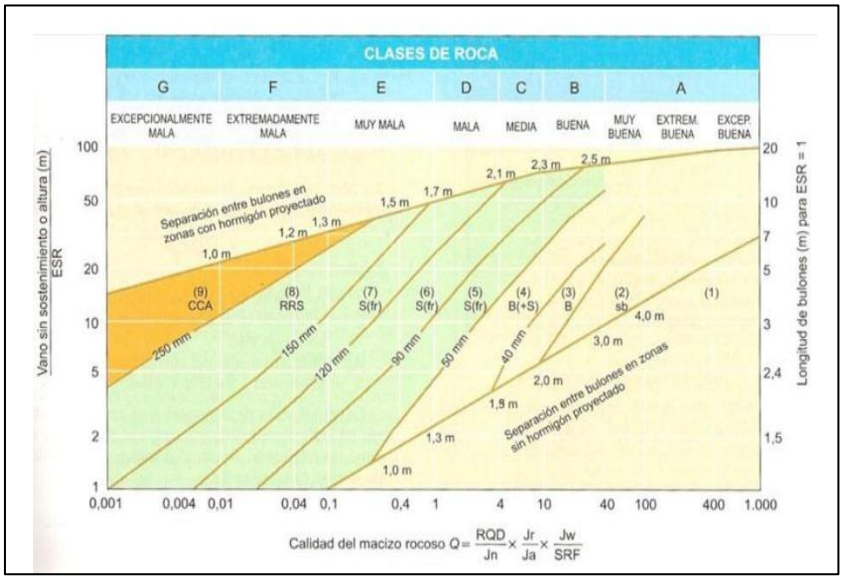


Figura 6 Sostenimiento según el índice Q (Barton, 2000)

2.4.3 Clasificación GSI-Hoek

El índice de resistencia geológica (GSI, Geological Strength Index) constituye una metodología cualitativa para la caracterización de las propiedades mecánicas de los macizos rocosos, basada en la estimación visual de sus características geológicas en campo.

Las observaciones realizadas por el ingeniero a cargo se centran en la apreciación de la estructura del macizo y en la descripción de las discontinuidades presentes. Para ello, es fundamental considerar tanto el grado de meteorización de la roca como su historia geológica, es decir, las condiciones en que se formó.

A diferencia de los sistemas Q-Barton y RMR, que se fundamentan en una evaluación de tipo cuantitativo, el método GSI-Hoek se desarrolla a partir de una evaluación cualitativa. Su creación respondió a la necesidad de contar con una herramienta que permitiera analizar macizos rocosos de baja calidad (por ejemplo, con un RMR < 20) y que, además, facilitara la aplicación del criterio de resistencia de Hoek-Brown. En este sentido, Hoek (1994) diseñó el GSI con el propósito de superar las limitaciones que presentaba el uso del RMR en la estimación de parámetros resistentes de macizos muy fracturados o alterados.

La resistencia de un macizo rocoso con fracturas depende tanto de las propiedades del bloque de roca intacta como de la capacidad de dicho bloque para deslizar bajo diferentes condiciones de esfuerzos. Por ello, el GSI integra estas características en una escala práctica de aplicación.

El índice comprende un intervalo de 1 a 100. Los valores bajos indican un macizo débil y muy fracturado, mientras que los valores altos corresponden a macizos de mayor calidad y resistencia.

La determinación del índice de resistencia geológica (GSI) se realiza mediante la utilización de un diagrama de referencia, como se muestra en la figura 7. En el eje horizontal representa el tipo de estructura y composición del macizo rocoso, considerando principalmente el tamaño de los bloques y el grado de interconexión o unión entre ellos. Por su parte, el eje vertical describe las características de las discontinuidades, tales como su grado de alteración, rugosidad y estado superficial.

La intersección de los valores seleccionados en ambos ejes conduce a la obtención de un valor numérico del GSI, el cual refleja la calidad geomecánica del macizo. Una vez definido este valor, puede emplearse en diversas ecuaciones empíricas, principalmente asociadas al criterio de resistencia de Hoek-Brown, con el fin de estimar las propiedades mecánicas de la masa rocosa, tales como la resistencia al corte y la deformabilidad.

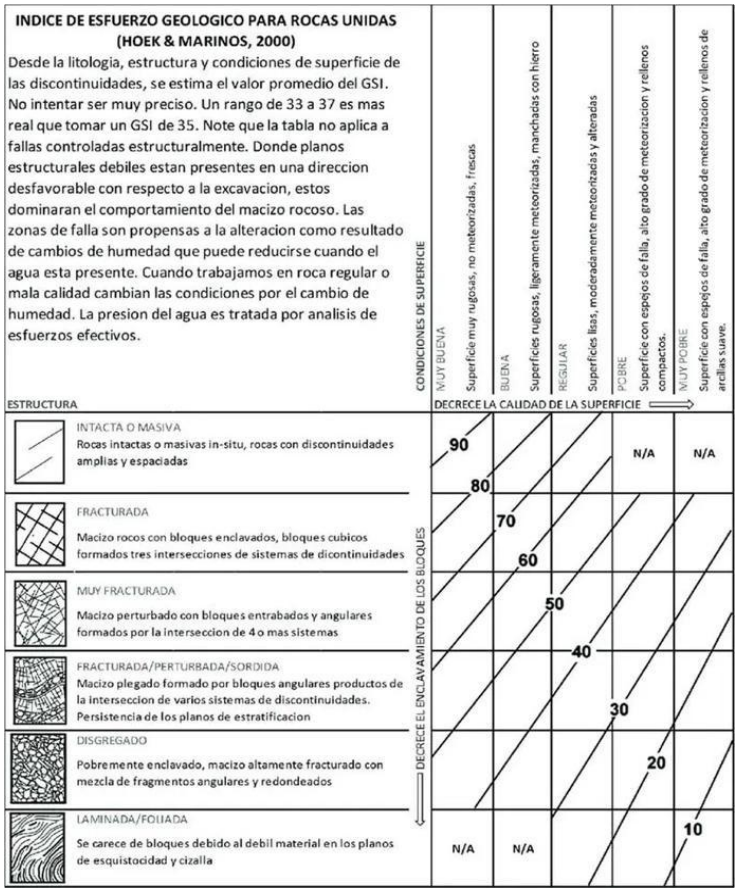


Figura 7 Diagrama GSI, Hoek (2000)

2.4.4 Clasificación de Deere

La clasificación propuesta por Deere se fundamenta en el uso del índice RQD (Rock Quality Designation), desarrollado por Deere como un parámetro destinado a evaluar la calidad del macizo rocoso in situ a partir de su grado de fracturación.

El índice RQD constituye un parámetro utilizado para caracterizar la calidad de los macizos rocosos a partir de la recuperación de testigos de perforación, proporcionando información sobre el grado de fracturamiento de la roca (Hudson & Harrison, 1997).

Se determina mediante la cuantificación de la calidad del macizo rocoso con base en la longitud de los testigos de perforación recuperados durante un sondeo. En este sentido, el índice se define como el porcentaje de la suma de las longitudes de los fragmentos de testigos recuperados con longitudes superiores a 10 cm, respecto a la longitud total de la muestra obtenida en el sondeo y matemáticamente, se expresa de la siguiente manera:

$$RQD = \frac{Longitud\ de\ fragmentos\ de\ testigos > 10cm}{Longitud\ total\ del\ sondeo}(100) \qquad (4)$$

Cabe destacar que el concepto de RQD fue desarrollado entre las décadas de 1960 y 1970, siendo utilizado por primera vez en 1964 como complemento en el diseño de obras de ingeniería, particularmente en túneles. No obstante, fue hasta 1967 cuando D. U. Deere et al., en la Universidad de Illinois, lo presentaron formalmente. A partir de ese momento, el índice comenzó a aplicarse de manera extensa alrededor del mundo debido a su simplicidad y utilidad práctica.

La clasificación de Deere establece cinco categorías principales de calidad de macizo rocoso, basadas en el valor obtenido del índice RQD, tal como se resume en la Tabla 1.

RQD (%)	Calidad de la roca
<25	Muy baja
25 - 50	Baja
50 - 75	Aceptable
75 – 90	Alta
>90	Muy alta

Tabla 1 Clasificación RQD

Capítulo 3

3 Análisis del talud en La Yesca, Nayarit

3.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla el estudio de caso correspondiente al análisis de estabilidad de un talud ubicado en el municipio de La Yesca, Nayarit. El objetivo principal es integrar la información geológica, geofísica y geotécnica disponible para caracterizar el macizo rocoso, definir sus condiciones de estabilidad e identificar los factores que pueden favorecer la ocurrencia de mecanismos de falla.

El análisis del talud considera aspectos como su geometría, litología, grado de fracturamiento, presencia de discontinuidades, análisis de unidades geosísmicas y propiedades geomecánicas. Estos elementos permiten construir un modelo integral considerando la información antes descrita, además, se realiza un análisis de los diferentes modelos, tales como el estático, pseudo-estático y saturado, con la finalidad de identificar las condiciones de inestabilidad del talud para que, con una propuesta de estabilización, las condiciones de seguridad sean mayores.

3.2 Localización y sismicidad del sitio

El municipio de La Yesca, Nayarit abarca una superficie de 4,419.86 km². Este municipio forma parte de la zona sur de la Sierra Madre Occidental. Sus límites geográficos son: al norte con el municipio de Del Nayar; al sur con Ixtlán del Río y Jala; y al oeste con Jala, Santa María del Oro. y con ello, el cadenamiento referido al tramo carretero se localiza en el km 37+910 – 38+120, en la figura 8 se muestra un mapa con la ubicación del talud y con ello señalar que, en el costado izquierdo con dirección al sur se localiza la cortina de la presa hidroeléctrica La Yesca, situada en el km 25+000. De igual manera, en las figuras 9 y 10 se presentan vistas del sitio.

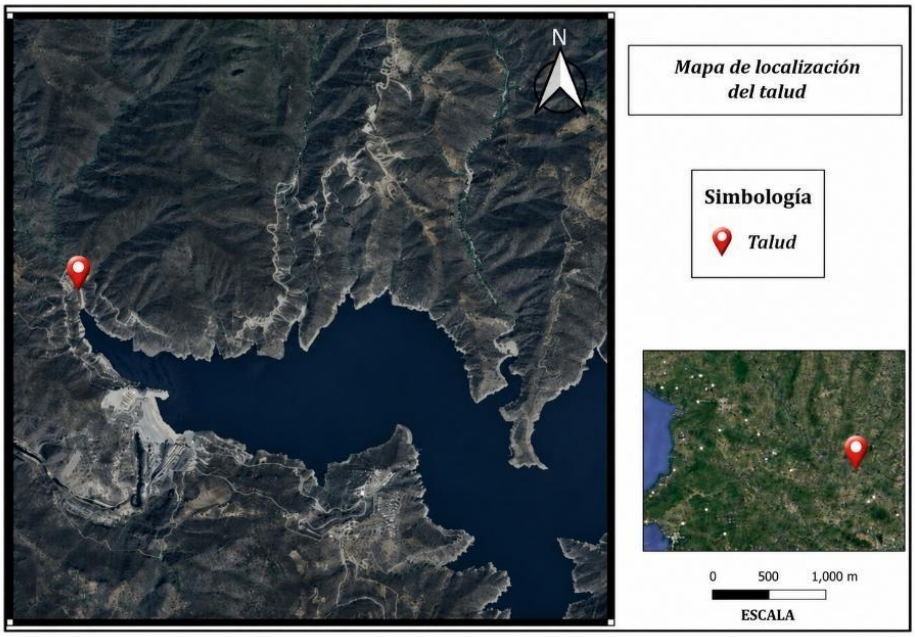


Figura 8 Mapa con la localización del talud

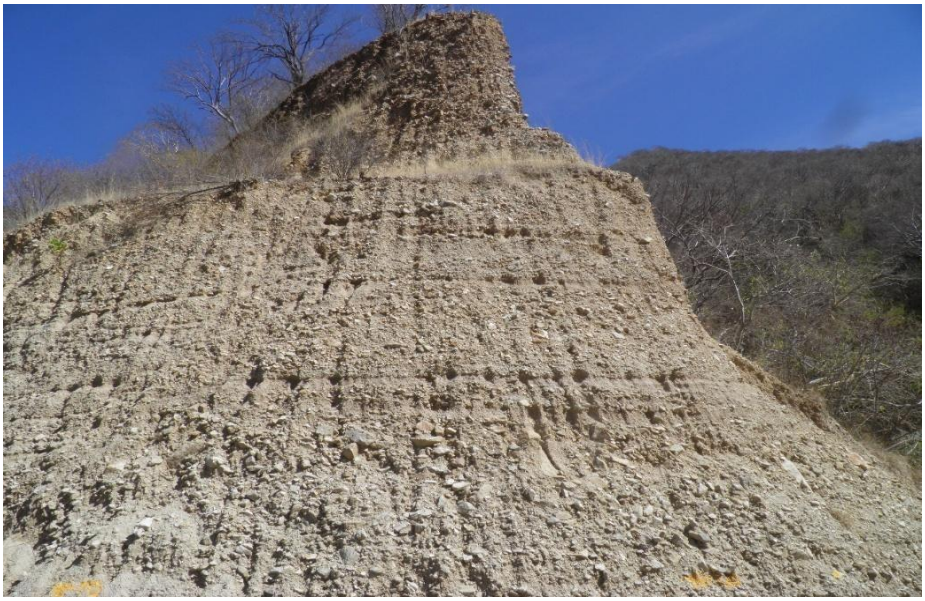


Figura 9 Corte km 37+910 al km 38+120, lado izquierdo

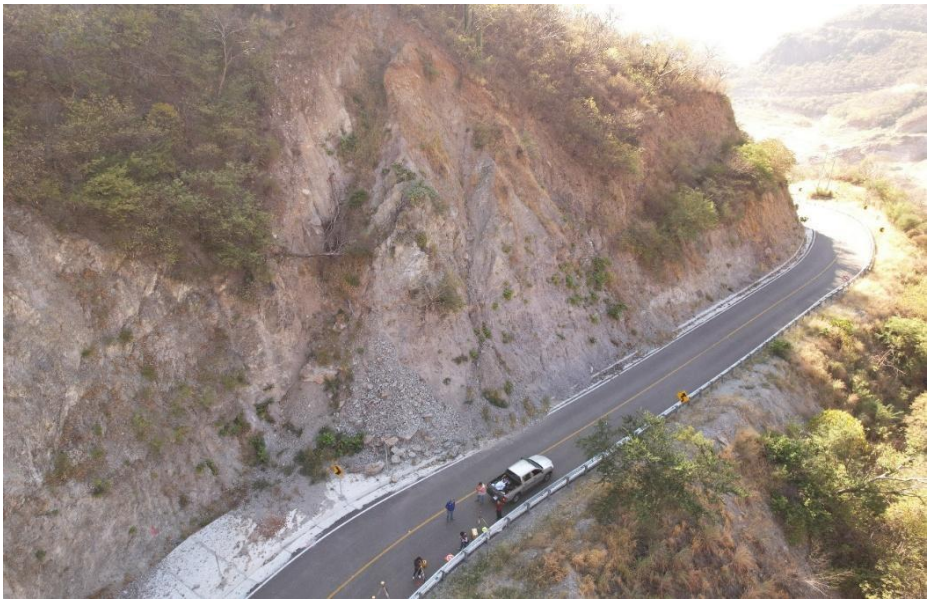


Figura 10 Corte km 37+910 al km 38+120, lado izquierdo

Un sismo es un fenómeno originado por la ruptura repentina de la corteza terrestre. Como consecuencia de dicha fractura, se generan vibraciones que se transmiten en todas direcciones a través de ondas sísmicas, producidas por la liberación de energía acumulada en el subsuelo.

México se caracteriza por registrar numerosos sismos de gran magnitud, debido a que se localiza en una de las regiones con mayor actividad sísmica a nivel mundial. Esto se debe a que su territorio se encuentra en la interacción de cinco placas tectónicas. Desde la instalación del primer instrumento mecánico en el país, en 1904, ha sido posible estudiar los principales eventos sísmicos ocurridos en los diversos límites de placas que lo conforman.

Los sismos de mayor relevancia han sido registrados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN), principalmente en las zonas de interacción entre las placas oceánicas de Cocos y Rivera con la placa continental Norteamericana.

En el caso particular del estado de Nayarit, donde se localizan los estudios de esta investigación, se cuenta con 20 municipios que, de acuerdo con la regionalización sísmica que se muestra en la figura 11, se distribuyen en las zonas B, C y D. La zona B corresponde a una sismicidad baja, definida por la ocurrencia esporádica de eventos sísmicos; la zona C corresponde a una sismicidad alta, con registro frecuente de sismos; y la zona D se caracteriza por una sismicidad muy alta, con presencia de eventos de gran magnitud. El municipio de La Yesca se ubica dentro de las zonas B y C.

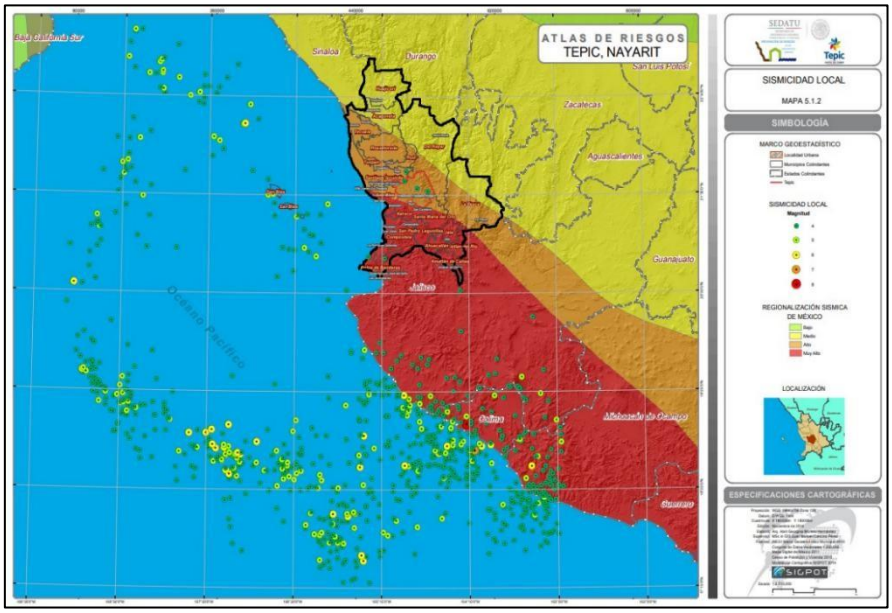


Figura 11 Regionalización Sísmica de Nayarit, modificado de SEDATU

Con el propósito de analizar la sismicidad del área de estudio y establecer su correlación con la geología local, se empleó información del Servicio Sismológico Nacional (SSN), considerando registros desde el año 1900. Los estudios realizados en el talud se encuentran a menos de 20 km respecto a la cortina de la Presa Hidroeléctrica La Yesca. En este contexto, aproximadamente el 85 % de los epicentros sísmicos se localizan dentro de la Fosa Tepic-Chapala, región caracterizada por un régimen tectónico de tipo distensivo, así como por la presencia de patrones estructurales con diferentes orientaciones.

3.3 Marco Geológico

Es fundamental conocer los principales aspectos geológicos de una entidad, ya que esta información resulta de gran utilidad para determinar el desarrollo de diversas actividades económicas vinculadas con la geología del área.

En este caso, el estudio se realizó en el estado de Nayarit, el cual forma parte de cuatro provincias fisiográficas, como se muestra en la figura 12:

- ✓ Sierra Madre Occidental
- ✓ Faja Volcánica Transmexicana

- ✓ La Llanura Costera del Pacífico
- ✓ Sierra Madre del Sur

Las estructuras geológicas predominantes en la región están representadas por fracturas y fallas de carácter regional, así como por extensas coladas de lava y diversos aparatos volcánicos. Es importante destacar que la presencia de fallas y fracturas ha dado lugar a la formación de grandes fosas tectónicas, que constituyen rasgos geológicos de gran relevancia en el estado.

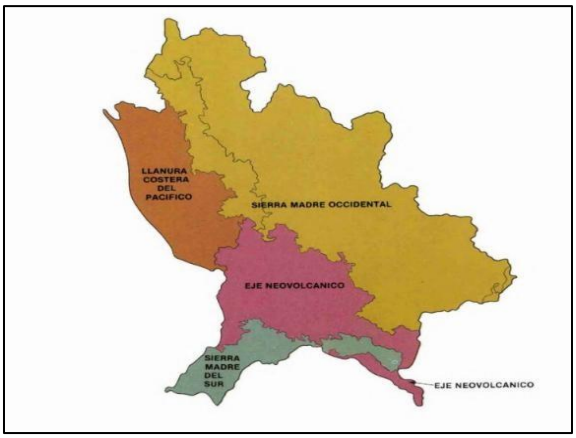


Figura 12 Provincias Fisiográficas del estado de Nayarit, tomada de SPP

El estado de Nayarit está conformado principalmente por rocas ígneas intrusivas y extrusivas del Terciario. Adicionalmente, presenta depósitos aluviales, lacustres, litorales y palustres, los cuales caracterizan la provincia de la Llanura Costera. En menor proporción, también se identifican depósitos sedimentarios clásticos del Terciario, junto con escasos afloramientos de rocas sedimentarias marinas y rocas metamórficas correspondientes al Mesozoico.

En la zona de estudio se encuentran expuestas rocas con edades del Oligoceno hasta el reciente, cuya distribución se muestra en la columna estratigráfica regional de la figura 13.

Andesita – Toba Andesítica: Las rocas más antiguas (Oligoceno) que afloran en la región, la andesita presenta una textura porfídica con estructura masiva, mientras que las tobas andesíticas tienen intercalaciones de cenizas con una textura piroclástica, su estructura es compacta.

Dacita – Riodacita: Las dacitas presentan casi en todos los casos una estructura masiva, mientras que las riodacitas tienen una textura piroclástica con estructura masiva y compacta.

Toba Riolitica – Ignimbrita: Estas rocas tienen su origen a partir de un evento piroclástico, por lo que la toba riolitica presenta una textura clástica con estructura masiva, afectada por oxidación,

mientras que las ignimbritas se encuentran intercalado las secuencia, tiene una textura porfídica con estructura masiva, dentro de la secuencia también se encuentran intercalados cuerpos alargados de andesitas que varían de 20 a 50 m de ancho.

Granito: Los cuerpos de roca granítica se encuentran intrusionando a las unidades de roca antes descritas, presentan una textura porfídica con estructura masiva compacta, en general tienen un intenso fracturamiento.

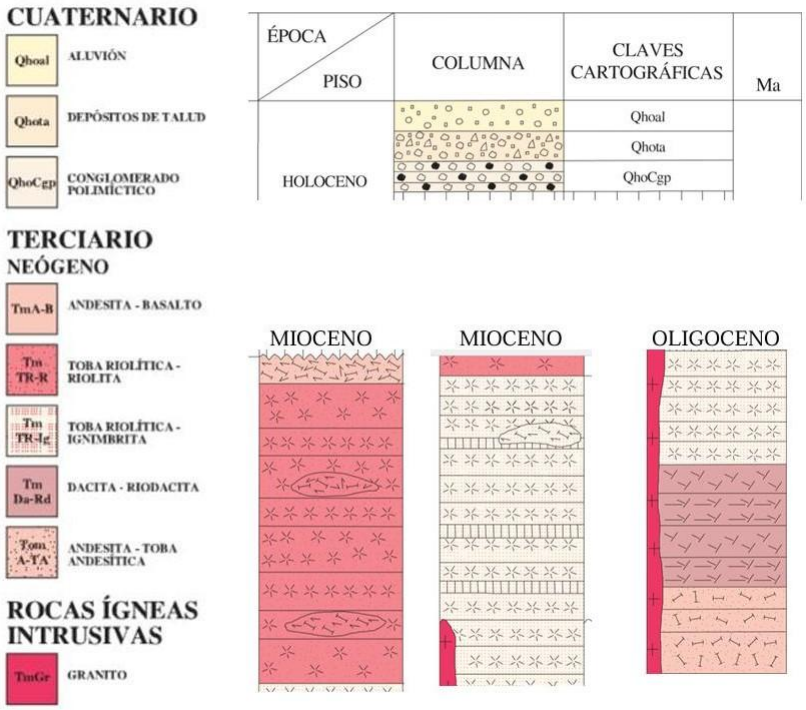


Figura 13 Columna Geológica Regional

3.4 Exploración Geotécnica

3.4.1 Levantamiento topográfico

Se realizó un levantamiento topográfico del talud mediante fotogrametría con dron. Esta metodología permite determinar con precisión la forma, dimensiones y posición espacial del terreno a estudiar, a partir de fotografías aéreas capturadas durante un vuelo planificado. Para ello, se colocan puntos de control sobre estructuras fijas en el área, cuyas coordenadas se registran con un equipo de geolocalización. Posteriormente, dichos puntos se procesan y se referencian a un sistema de coordenadas geográficas con un datum definido.

Una vez obtenidas las fotografías y los puntos de control, la información se procesa en un software especializado, como Agisoft Metashape, el cual permite generar un modelo digital de elevación (MDE) y obtener la configuración topográfica mediante curvas de nivel.

En la figura 14 se presenta la configuración topográfica del corte de dicho talud. En este modelo, las zonas bajas del terreno se representan con tonalidades azules, mientras que las zonas elevadas se muestran en colores rojizos, permitiendo una interpretación visual clara del relieve.

La generación de las curvas de nivel permitió obtener la configuración topográfica de los taludes de corte, así como de la zona circundante, tal como se observa en la figura 15.

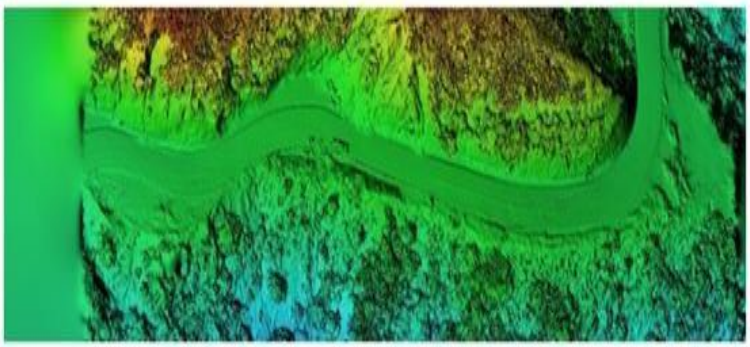


Figura 14 Modelo digital de elevación



Figura 15 Curvas de nivel

Finalmente, en la figura 16 se muestra un conjunto (mosaico) de fotografías en donde se muestra el talud a manera de vista frontal y, con ello, es de gran utilidad para marcar diferentes puntos a lo largo de todo el cadenamiento, la longitud total de este es de 210 m.

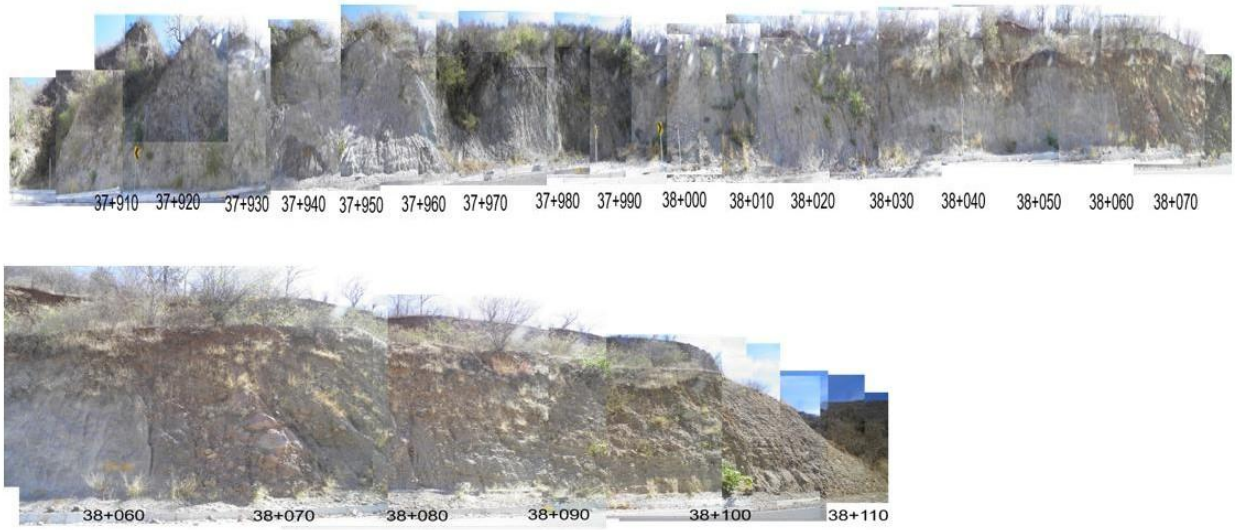


Figura 16 Mosaico del talud

3.4.2 Modelo Geológico

El estudio geológico del talud es fundamental para comprender su comportamiento, ya que el tipo de material, su grado de alteración, resistencia y fracturamiento influyen directamente en las condiciones de estabilidad. En los taludes rocosos, la presencia de materiales con diferentes propiedades mecánicas puede generar zonas de debilidad que favorecen mecanismos de falla.

En el talud de estudio se identifican tres unidades litológicas principales: suelo residual, toba lítica y toba cristalina. Estos se describen a continuación.

- **Suelo Residual (Sr):**

Dicha unidad se presenta en la parte alta del talud, con espesores que varían de 30 a 50 cm. Los colores que se presentan varían de café rojizo a gris y está compuesto de material granular compacto, en la figura 17 se muestra este material.



Figura 17 Suelo residual en la parte superior del corte

- **Toba Cristalina – Toba Lítica (Tb-c) – (Tb-l):**

En la cara del corte del talud, el macizo rocoso muestra al inicio del cadenamiento una toba que varía de cristalina a lítica. Se caracterizan principalmente por su textura. La toba cristalina presenta granos de cuarzo en una matriz microcristalina, mientras que la toba lítica tiene fragmentos de roca con forma angulosa a subangulosa de diferentes medidas, embebidos en una matriz compacta. En general, la estructura de estas unidades es dura y compacta. Son de color gris claro cuando está sana y de color verde claro por alteración argílica-propilítica; se encuentran afectadas tectónicamente por fallas, por lo que tienen un alto grado de fracturamiento en toda la zona, formando zonas escarpadas y masas de material sin cohesión y sin estructura. En las figuras 18 y 19 se muestra dicha roca.



Figura 18 Toba cristalina fracturada

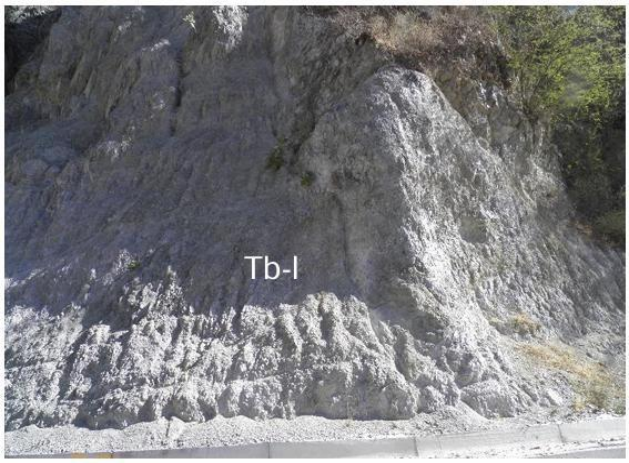


Figura 19 Toba lítica con meteorización

- **Depósito de Talud (dt)**

En el Km 38+063, aproximadamente en la parte media del corte, se muestra un contacto litológico por falla. A partir de dicha zona y hasta el final del corte, se expone un depósito de talud, el cual es de color café claro a ocre debido a la oxidación. Tiene una matriz compacta de composición areno-arcillosa. Los fragmentos de roca presentan un arreglo caótico y su granulometría presenta diferentes tamaños, desde gravas, arenas y limos de color café-amarillo con oxidación. En la figura 20 se muestra este material.



Figura 20 Depósito de talud

3.4.3 Geología Estructural

En el análisis por falla tipo plana se considera que el talud podría ser inestable si los polos de las familias de fracturas se encuentran en la zona rosa, que es la intersección del ángulo o cono de fricción del corte con la zona formada por las orientaciones de las familias de fracturas. Y es por ello por lo que el corte es estable por falla plana, además que se vuelve inestable con una inclinación mayor de 75°, lo anterior se muestra en la figura 21. De igual manera, para la falla por volteo de bloques, en donde los polos de las familias de fracturas deben quedar fuera de la zona de inestabilidad que está formado por una sección del perímetro del estereograma, el límite de deslizamiento formado por la zona donde se presentan las familias de fracturas con menos echado que el ángulo de fricción, como se muestra en la figura 22.

Finalmente, para el análisis por falla tipo cuña, las familias de fracturas F1-F2 forman cuñas con orientación de 294°/48°. El corte es estable con una inclinación máxima de 48° y es inestable con una inclinación mayor de 50°, como se aprecia en la figura 23. En la tabla 2 se muestra los datos del análisis estructural del talud y, con ello, la tabla 3 que también muestra los datos estructurales de la familia de fracturas.

Datos del talud

Dirección del echado	Echado	Color
265°	60°	Negro

Tabla 2 Datos estructurales del talud

Datos de los sistemas de fracturas

Ángulo de fricción	Familia de fracturas (F)	Dirección del Echado	Echado	Color
Toba lítica 48°	F1	349°	57°	Naranja
	F2	239°	57°	Verde
	F3	54°	68°	Azul

Tabla 3 Datos del sistema de fracturas

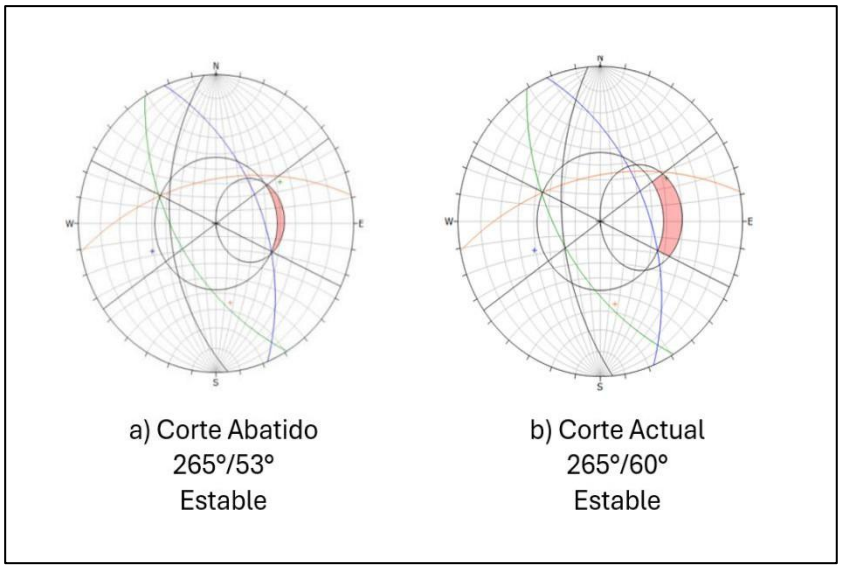


Figura 21 Análisis estructural de la falla tipo plana

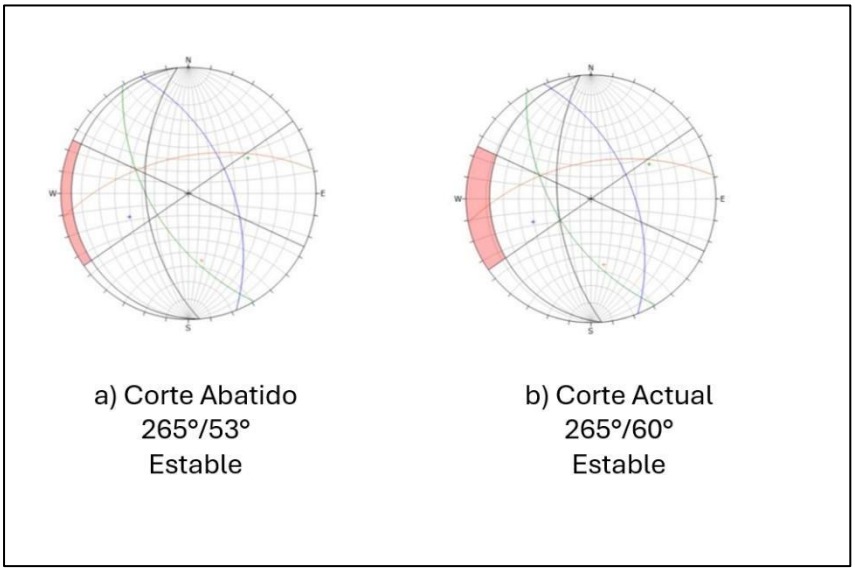


Figura 22 Análisis estructural de la falla por volteo de bloques

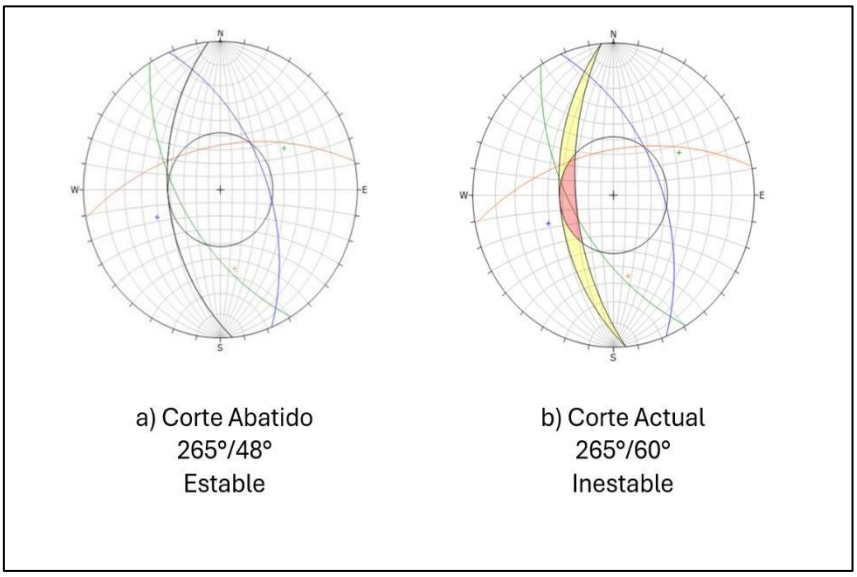


Figura 23 Análisis estructural de falla por cuña

3.5 Exploración Geofísica

Se llevó a cabo una exploración geofísica mediante la técnica de Refracción Sísmica (TRS), dicha metodología se fundamenta en la teoría del tiempo mínimo, la cual describe el recorrido que siguen las ondas elásticas al propagarse desde una fuente en la superficie hasta los diferentes horizontes del subsuelo, caracterizados por distintas velocidades de transmisión sísmica.

La fuente sísmica se generó mediante golpes con marro sobre una placa metálica, lo que permitió producir las ondas necesarias para su propagación a través del terreno. Dichas ondas fueron registradas por una serie de geófonos distribuidos en la superficie, los cuales captaron los tiempos de llegada de las ondas refractadas, posibilitando la detección de capas más profundas y de mayor velocidad. En la figura 24 se muestra esquemáticamente el concepto de refracción sísmica.

TRS	PT	X	Y
TRS-1(Corona)	PT-1	592132	2345582
	PT-3	592115	2345537
TRS-2 (Pared)	PT-1	592106	2345601
	PT-3	592095	2345542

Tabla 4 Coordenadas geográficas de cada TRS

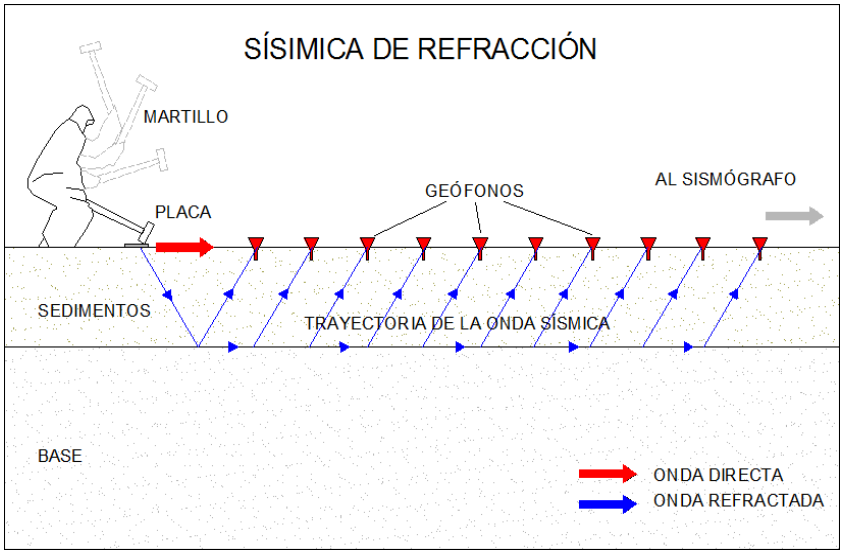


Figura 24 Representación del concepto de Refracción Sísmica. Tomado de ingeniería y construcciones Grysle, A.S de C.V

Con la información obtenida en campo se realizó el modelado geosísmico del subsuelo, determinando espesores y velocidades de onda longitudinal, asociándolos con los diferentes materiales del subsuelo, de tal manera que se obtuvo como resultado los perfiles de integración y, con ello, una correlación y extrapolación de los materiales encontrados en el modelado geosísmico.

3.5.1 Trabajos en campo

Se realizaron 2 Tendidos de Refracción Sísmica (TRS) para conocer la distribución de las unidades geosísmicas; ambas líneas de 60 m de longitud a todo lo largo de la parte superior del talud y al pie de este; con estos tendidos se obtuvieron velocidades de propagación de ondas para la caracterización de los materiales al interior del talud en corte, con el que se alcanzaron profundidades de 15 a 20 m. Para la ejecución de los tendidos, se utilizó como receptor un sismógrafo marca Geometrics ES-3000 de 12 canales, y como detectores se emplearon geófonos de 14 Hz

Para generar las ondas sísmicas se empleó un marro metálico, el cual golpea sobre una placa metálica colocada sobre el terreno natural (puntos de tiro), cada tendido incluye 3 puntos de tiro, uno central y dos en los extremos, las ondas son detectadas por los geófonos y registradas en el sismógrafo.

Para obtener la ubicación exacta de los puntos de tiro, se determinaron las coordenadas geográficas en UTM WGS-84 de cada TRS en la zona Q14 de los puntos de tiro (PT), las cuales se muestran en la tabla 4. En la figura 25 se muestra al operador colocando el cableado sísmico, así como en la figura 26 la representación de un golpe sobre la placa metálica y, finalmente, en la figura 27 la colocación de geófonos en la cara del talud.



Figura 25 Golpe a placa en la corona del talud.



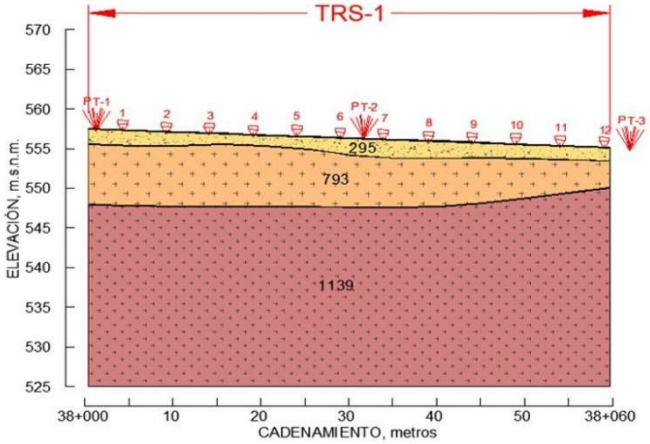
Figura 26 Colocación del cable sísmico



Figura 27 Colocación de geófonos en la cara del talud.

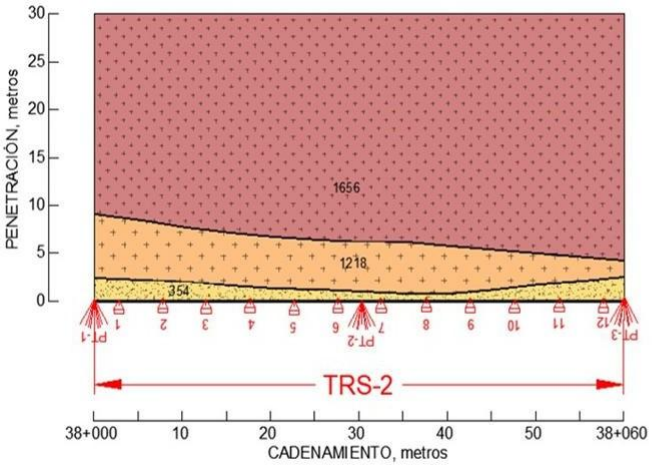
3.5.2 Unidades Geosísmicas

Con la información obtenida en campo se realizó el modelado e interpretación geosísmica del subsuelo, determinando espesores y velocidades de onda longitudinal, asociándolos con los diferentes materiales del subsuelo, obteniéndose como resultado los perfiles de integración. Se elaboraron secciones en donde se integró toda la información obtenida de cada uno de los tendidos de refracción sísmica realizados. En estas se muestran los valores de velocidad de onda y la configuración de las unidades geosísmicas, las cuales fueron definidas con base en el análisis de los rangos de velocidad y su distribución en el subsuelo, así como con la información del modelo geológico del sitio. El procesamiento, análisis e interpretación de los sismogramas obtenidos en campo en esta zona permitió diferenciar tres principales unidades geosísmicas, con sus correspondientes intervalos de valores de velocidad y espesores. En la figura 28 se muestra la sección geofísica del TRS-1, mientras que en figura 29 corresponde a la sección geofísica del TRS-2, en la parte superior del talud y al pie de este, respectivamente.



Unidad Geosísmica	Velocidad Sismica Vp (m/s) Promedio	Espesor Promedio (m)	Caracteristicas de los Materiales
U1	295	2.0	Suelo y Roca muy alterada
U2	793	6.7	Roca muy alterada
U3	1,139	>40	Roca Descomprimida

Figura 28 Sección geofísica del TRS-1



Unidad Geosísmica	Velocidad Sismica Vp (m/s) Promedio	Espesor Promedio (m)	Caracteristicas de los Materiales
U1	354	2.4	Suelo y Roca muy alterada
U2	1,218	7.6	Roca muy alterada
U3	1,656	>40	Roca Descomprimida

Figura 29 Sección geofísica del TRS-2

3.6 Estudios Geomecánicos

El Martillo de Schmidt (esclerómetro) fue usado como parte de la metodología para la interpretación de estudios geomecánicos. Dicho estudio fue establecido conforme a la norma ASTM D5873-05 y las recomendaciones de la ISRM (1978) y su versión revisada por Aydin (2009), tal como se muestra en la figura 30. Esta prueba se efectuó directamente en campo, registrando los

valores de rebote generados por el martillo. Para cada tipo litológico se recolectaron muestras de mano, las cuales fueron posteriormente analizadas en laboratorio para determinar la densidad de la roca. Los resultados que se obtuvieron para dicha prueba se muestran en la tabla 5.



Figura 30 Estudios analizados para la prueba con martillo Schmid

Tipo de roca	Densidad Relativa (KN/m^3)	Resistencia Uniaxial en Superficie Sana (MPa)	Resistencia Uniaxial en Superficie Meteorizada (MPa)	Promedio en Superficie Sana (10 lecturas)	Promedio en Superficie Meteorizada (10 lecturas)	Clasificación de la Resistencia en superficie sana según la Sociedad Geológica de Inglaterra (1970)	Clasificación de la Resistencia en superficie meteorizada según la Sociedad Geológica de Inglaterra (1970)
Toba cristalina	24.42	69	45	39.8	31.6	Dura	Moderadamente dura
Toba lítica	23.54	54	28	34.4	18.7	Moderadamente dura	Moderadamente blanda

Tabla 5 Resultados de la prueba con esclerómetro

Se aplicó la clasificación geomecánica propuesta por Bieniawski (RMR) con el propósito de obtener un índice de calidad del macizo rocoso. Dicha evaluación se basó en la resistencia del material en su estado intacto, el grado de fracturamiento y las características de las discontinuidades presentes, incluyendo el tipo y la morfología de las fisuras e irregularidades observadas. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.

Parametro	Toba cristalina	Toba lítica
Resistencia a la compresión (MPa) con el uso del esclerómetro	7	4
RQD (%) por metro lineal	8	8
Espaciamiento de discontinuidades (cm)	4	8
Persistencia	4	4
Abertura	5	5
Rugosidad	3	3
Relleno	1	1
Alteración	3	3
Condiciones hidrogeológicas	15	15
Orientación de las discontinuidades	-10	-10

Tabla 6 Clasificación geomecánica de Bieniawsky

3.7 Pruebas de Laboratorio

La obtención de los parámetros de resistencia, tanto in situ como en laboratorio, fue un paso fundamental para la definición del modelo geotécnico empleado en la evaluación de la posible inestabilidad del talud. Para ello, se realizaron diversos sondeos mixtos en el talud, a partir de los cuales se efectuaron ensayos de laboratorio con el objetivo de determinar la resistencia a la compresión simple y los valores de densidad del material.

Las propiedades mecánicas obtenidas permitieron establecer los parámetros de resistencia de los materiales sometidos a ensayos geomecánicos y analizar su comportamiento esfuerzo–deformación bajo distintos niveles de carga.

La evaluación de estas propiedades se llevó a cabo mediante ensayos realizados conforme a las siguientes normas técnicas:

- ✓ Compresión simple en rocas: ASTM D 2938–84 (Reapproved 2002) y ASTM D 3148/02.

Se llevó a cabo la prueba de compresión simple en una muestra de toba lítica de color gris claro, en el anexo de pruebas de laboratorio se presenta el formato correspondiente a la prueba, el cual incluye en su inicio los datos generales de identificación de la muestra, seguidos de la información relativa a la probeta y, finalmente, una tabla con las mediciones registradas durante el ensayo.

El parámetro de mayor relevancia para los objetivos de este estudio es la resistencia a la compresión simple, que alcanzó un valor de 511.69 kg/cm² al aplicar una carga de 9000 kg sobre un área de 17.59 cm².

De igual forma, se muestra el gráfico de esfuerzo-deformación, el cual evidencia que la toba lítica presenta un comportamiento con una baja capacidad de deformación antes de la rotura, alcanzando un esfuerzo máximo de 511.69 kg/cm² antes de la falla. La deformación lateral observada fue limitada en comparación con la deformación axial, lo que indica que el material tiende a comprimirse más que a expandirse. En el gráfico se representaron dos curvas: una correspondiente a la deformación axial unitaria-esfuerzo, que refleja el acortamiento del material, y otra a la deformación lateral unitaria-esfuerzo, que indica su extensión.

Asimismo, en el gráfico esfuerzo-deformación permitió determinar los parámetros mecánicos de la roca, entre los que destacan el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y el módulo de corte.

En el mismo anexo también se documenta la prueba realizada a otra muestra de toba lítica de color pardo claro, correspondiente al mismo sondeo que la anterior, aunque tratándose de una muestra distinta. Asimismo, se incluyen los datos principales del ensayo y la tabla de valores obtenidos para la caracterización del material. El valor máximo de carga aplicada fue de 640 kg, en un área de 36.68 cm².

Se muestra el gráfico comparativo entre la deformación lateral unitaria (%) – esfuerzo (kg/cm^2) y la deformación axial unitaria (%) – esfuerzo (kg/cm^2). Dicho gráfico evidencia que la roca tiende a comprimirse con mayor rapidez que a expandirse, lo que es característico de un comportamiento frágil con baja ductibilidad.

De esta prueba se obtuvo una resistencia a la compresión simple de 17.4 kg/cm². Finalmente, se presenta el último gráfico correspondiente a la muestra No. 17 de toba lítica pardo claro, el cual fue empleado para determinar los parámetros del módulo de elasticidad y la relación de Poisson.

Los resultados finales y parámetros geomecánicos determinados para cada una de las litologías del área de estudio se resumen en la tabla 7.

Muestra	Resistencia a la compresión simple, qu	Módulo de elasticidad, E (kg/cm^2)	Relación de Poisson, V	Módulo de corte, G (kg/cm^2)
Toba lítica en color gris claro	511.7	511,690.80	0.20	213,204.5
Toba lítica en color pardo claro	17.4	14,539.6	0.28	5,664.8

Tabla 7 Parámetros geomecánicos

3.8 Unidades Geotécnicas

Una unidad geotécnica es una subdivisión del terreno definida con base en propiedades físicas, mecánicas y estructurales que influyen directamente en su comportamiento frente a obras de ingeniería. A diferencia de las unidades geológicas, que se establecen en función de criterios litológicos y estratigráficos, las unidades geotécnicas se delimitan considerando aspectos como el GSI, velocidades sísmicas (Vp), presencia de discontinuidades, tipo de suelo o roca, y otras propiedades mecánicas como el peso volumétrico.

La correlación entre unidades geológicas y geotécnicas permite integrar información de origen geológico, geofísico y geomecánica para construir modelos del subsuelo más adecuados para el análisis de estabilidad de taludes, así como otras aplicaciones dentro de la ingeniería civil y geotécnica. De esta manera, las unidades geotécnicas representan una herramienta clave para la toma de decisiones seguras y eficientes en proyectos que interactúan con el terreno. En la tabla 8 se muestra el modelo correspondiente a las diferentes litologías que se muestran en el talud. Como se mencionó antes se dispone de tres diferentes tipos de litología, suelo residual, depósito de talud y tobas. Esta integración tiene como finalidad verificar que las observaciones realizadas en campo presenten una relación físicamente razonable.

Modelo Geológico							Modelo Sísmico			Modelo Geotécnico						
UNIDAD	GRADO DE ALTERACIÓN	MECANISMO DE ROTURA	RESISTENCIA AL MARTILLO SCHMIDT (Mpa)	BIENIAWSKI (RMR)			GSI	UNIDAD	VELOCIDAD Vp (m/s)	DESCRIPCIÓN	PROPIEDADES EN MACIZO ROCOSO **			RESISTENCIA EN DISCONTINUIDADES		
				VALOR	CLASE	CLASIFICACIÓN					γ(T/m³)	C (T/m²)	Φ (°)	γ(T/m³)	C (T/m²)	Φ (°)
TOBA CRISTALINA	BAJO A MODERADO	CUÑA	69	40	IV	MALO	45	UG-3	1,139	Presenta una estructura dura y compacta, color gris claro cuando está sana y de color verde claro por alteración argílica-propilítica; en general ha sido afectado tectónicamente por fallas, por lo que adquirió alto fracturamiento en toda la zona, formando zonas escarpadas y masas de material sin cohesión y sin estructura	2.44	8.94	26.8	2.42	2.75	36.5
TOBA LÍTICA	BAJO A MODERADO	CUÑA	54	41	III	MEDIO	35	UG-3	1,139		2.35	8.94	26.8			
DEPÓSITO DE TALUD	ALTERADO	FALLA ROACIONAL CIRCULAR	-	-	-	-	-	UG-2	793	Es de color pardo claro a ocre por oxidación, tiene una matriz compacta de composición areno-arcillosa, su granulometría varía en tamaños de roca de gravas, arenas y limos de color café-amarillo con oxidación	2.35	6	32	-	-	-
SEULO RESIDUAL (Su)	ALTERADO	-	-	-	-	-	-	UG-1	295	Tiene espesores de 30 a 50 cm, es de color pardo rojizo a gris, está compuesto de material granular y compacto	-	-	-	-	-	-

γ= Peso volumétrico de la roca
Φ= Ángulo de fricción
C= Cohesión

Tabla 8 Unidades Geotécnicas

3.9 Análisis de estabilidad

A continuación, se abordarán los diferentes tipos de falla que se presentaron en el talud y, con ello, las distintas condiciones a las cuales puede estar sometido dicho talud.

- Falla tipo cuña

El análisis de estabilidad en condición estática representa el estado inicial de referencia del talud, sin considerar los efectos del agua, así como eventos sísmicos. Para el análisis se empleó la geometría obtenida del propio talud y las propiedades geomecánicas correspondientes a las discontinuidades. En el modelo se consideró una altura de 30m, un peso volumétrico de 2.42 t/m^3, una cohesión de 2.75 t/m^2 y un ángulo de fricción de 36.5°, las discontinuidades consideradas presentan un buzamiento de 57°, con direcciones de buzamiento de 349° y 239°, respectivamente, la cara del talud presenta una inclinación de 60° y una dirección de buzamiento de 265°.

El análisis realizado en el software Swedge permitió identificar un deslizamiento potencial que ocurre sobre la línea de intersección de las discontinuidades (trend), cuyo valor es de 294° y un plunge de 41.45°. Bajo estas condiciones se obtuvo un factor de seguridad de 1.90, indicando que el talud presenta una condición estable en ausencia de agua y de eventos sísmicos.

La condición dinámica se realizó con el objetivo de evaluar la estabilidad de este tipo de falla ante la acción de eventos sísmicos. Para ello, se mantuvieron las mismas características geométricas utilizadas en la condición estática y se añadió un coeficiente sísmico horizontal de 0.06

Por otra parte, se obtuvo un factor de seguridad de FS=1.73, inferior al obtenido en la condición estática, donde se obtuvo un valor de FS= 1.90. Esta disminución evidencia el efecto desestabilizador de las fuerzas sísmicas sobre dicha falla. Finalmente, al aplicar condiciones donde hay presencia de agua, se analizó con diferentes porcentajes de saturación de agua, 25%, 50% y 75%. Se puede observar que, a medida que aumenta dicha saturación, el factor de seguridad disminuye, ya que la presencia de agua es un factor que influye en la estabilidad del talud. La tabla 9 muestra todo lo anterior descrito.

- Falla tipo planar

El análisis de la falla plana en condición estática se realizó considerando únicamente la acción del peso propio del bloque, sin incorporar fuerzas sísmicas ni acción del agua. Para el modelado se consideró al talud con una altura de 30 m, una inclinación (echado) de 60° y un peso volumétrico de 2.42 t/m^3. El plano potencial de falla presenta una inclinación de 57°.

El análisis realizado mediante el software RockPlane arrojo un factor de seguridad de 1.97, correspondiente a una fuerza que se opone al deslizamiento de 138.65 t/m y una fuerza que impulsa el deslizamiento de 70.19 t/m.

Para evaluar el comportamiento del talud ante eventos sísmicos, se realizó un análisis dinámico, manteniendo las propiedades geométricas y geomecánicas utilizadas en la condición estática. En dicho análisis, se incorporó un coeficiente sísmico de 0.06 y, con ello, un valor Fs correspondiente a 1.85.

Posteriormente, al aplicar condiciones donde hay presencia de agua, se realizó un análisis con diferentes porcentajes de saturación de agua, 25%, 38% y 39%. Y, con ello, se puede observar que, a medida que aumenta dicha saturación el factor de seguridad disminuye, ya que la presencia de agua es un factor que influye en la estabilidad del talud. Con un porcentaje de 39 se observa que el factor de seguridad es de cero, debido a que la fuerza que se opone al deslizamiento es igualmente cero. La tabla 9 muestra todo lo anterior descrito.

- Falla rotacional

El análisis de estabilidad ante un mecanismo de falla rotacional se realizó mediante el método de Bishop Simplificado, considerando las propiedades resistentes de las unidades geotécnicas UG-1 y UG-2. Para dicho análisis no se consideran efectos sísmicos ni el efecto del agua, por lo que el efecto Pore Pressure es cero y la cual representa la presión que ejerce el agua dentro de los poros o fracturas del material y, con ello, se obtuvo un Factor de Seguridad de 1.41.

El modelo en condiciones dinámicas se analiza a través del peso de las capas por las cuales fue divido la falla rotacional en su total para su análisis, junto con el coeficiente sísmico. Es por ello por lo que se representa a través de fuerzas que actúa sobre la masa potencialmente inestable y que es proporcional al peso de las capas que conforman la superficie de deslizamiento y el Factor de Seguridad disminuye y, con ello, el valor es de 1.32

Finalmente, para el modelo que involucra el efecto del agua, se añade un parámetro, el cual es Hu, y este corresponde a un factor aplicado a la carga de presión generada por el agua. Su función es modificar la magnitud de la presión de poro considerada en el análisis de estabilidad y ese se encuentra en un rango de entre 0 y 1, un valor de cero significa presión de poros nula, mientras que el valor 1 representa toda la carga hidrostática. Para nuestro caso, se analizó con un valor de 0.5, ya que es un valor intermedio y, con ello, una condición intermedia de presión de poros. El Factor de Seguridad obtenido fue de 1.17. Todo lo anterior se muestra en la tabla 9.

Tipo de falla	Condición estática (FS)	Condición Dinámica (FS)	Condición Saturada (FS)
Plana	1.97	1.85	25% = 1.77 38% = 1.51 39% = 0
Cuña	1.90	1.73	25% = 1.88 50% = 1.71 75% = 1.24
Volteo de bloques	1.249	1.155	Hu value = 0.971

Tabla 9 Factores de seguridad en los diferentes tipos de falla

Capítulo 4

4 Análisis Económico

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta la evaluación económica de la propuesta para la estabilización del talud, considerando las principales actividades necesarias para su ejecución, entre ellas las obras de drenaje, el sistema de anclajes, la protección superficial y los trabajos complementarios.

El objetivo del análisis económico es determinar el costo aproximado de implementación de las medidas propuestas y compararlo con los beneficios asociados a la reducción del riesgo de inestabilidad en el talud.

4.2 Consideraciones generales del presupuesto

El presupuesto para la estabilización del talud se elaboró considerando las actividades necesarias para ejecutar las medidas propuestas a partir de los resultados del análisis geológico, geofísico y geotécnico. Su finalidad es establecer una estimación económica para trabajos sobre el talud y proporcionar una base para evaluar la viabilidad del proyecto.

Los principales trabajos considerados corresponden al saneo y preparación del talud, ejecución de obras de drenaje superficial, así como instalación de drenes sub-horizontales, perforación y colocación de anclajes, protección superficial mediante malla metálica y, en los sectores que lo requieran, aplicación de concreto lanzado.

Las cantidades presentadas representan una estimación basada en las condiciones identificadas en los estudios que se desarrollaron a lo largo del presente proyecto. Durante la ejecución de los trabajos pueden presentarse variaciones derivadas de las condiciones reales del macizo rocoso, principalmente por cambios en el grado de fracturamiento, presencia de bloques inestables, filtraciones de agua y accesibilidad a las diferentes zonas del talud.

Para efectos del presupuesto deberán considerarse también las condiciones particulares de ejecución de los trabajos, debido a que puede que se requiera algún tipo de equipo especializado, sistemas de acceso, protección contra caídas y procedimientos específicos de seguridad. Estos factores pueden incrementar los costos respecto a trabajos realizados a nivel de terreno.

Los precios unitarios utilizados deberán corresponder al periodo de elaboración del presupuesto y a valores representativos de la región donde se localiza el proyecto. Debido a las variaciones en los costos de materiales, combustibles, mano de obra y maquinaria, los importes obtenidos deberán considerarse como valores estimados sujetos a actualización al momento de ejecutar la obra.

La estimación económica no debe interpretarse únicamente como el costo de una obra correctiva, sino como una inversión preventiva destinada a reducir la probabilidad de un evento que ponga en riesgo la vida de las personas que transiten por el sitio. Los análisis de estabilidad mostraron que la presencia de agua puede disminuir considerablemente los factores de seguridad, por lo que las obras de drenaje y reforzamiento adquieren especial importancia dentro de la propuesta.

4.3 Catálogo de conceptos

A continuación, se muestra una lista con todos los trabajos que se proponen para la estabilidad del talud y, con ello, se permite establecer el costo total de los trabajos, así como identificar lo que se ocupará en el proyecto, por ejemplo, materiales, mano de obra, maquinaria, herramientas y equipos auxiliares.

P.E.01

El amacice y perfilado del talud del corte son los trabajos ejecutados en el terreno natural, en ampliación de taludes, en rebajes en la corona de cortes existentes y en derrumbes, con el objetivo de preparar y formar la sección de acuerdo con lo indicado en el proyecto. El amacice y perfilado del talud consistirá en el recorte y retiro de material desprendido, caídos del terreno, con el espesor de las diferentes secciones y pendientes conforme al trabajo solicitado. El precio unitario incluye: ubicación y delimitación topográfica de la zona de amacice y perfilado, corte, excavación, extracción, remoción, afinamiento y amacice de los taludes en cualquier tipo de material, acarreos hasta el banco de tiro, descarga y el tiempo de los vehículos empleados para la carga y descarga del material producto de la excavación; equipos; mano de obra; maquinaria y equipo necesario; limpieza de la zona al final de la obra, así como todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.

P.E.02

Se considera que la solución de estabilización más adecuada es el abatimiento del talud encima de la berma con una pendiente 1:1 de (45º) y, con ello, se puede garantizar que los bloques reduzcan su tamaño e incluso eliminar algunos. Este tratamiento se extenderá del cadenamiento km 38+035 al km 38+120. Este precio incluye: ubicación y delimitación topográfica de la zona de excavación; perfilado, extracción, almacenado y/o desperdicio del material, afinamiento y amacice del corte en cualquier tipo de material, mano de obra, maquinaria y equipo necesario, limpieza de la zona al final de la obra, así como todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos. Para cantidades y precio, se sugiere asistir a campo directamente para que sea confiable los costos y mediciones. Más, sin embargo, se sugiere este concepto como medida de estabilización del talud.

Se propone realizar el abatimiento porque reduce la inclinación del talud y retira parte del material potencialmente inestable, favoreciendo su equilibrio frente a una falla rotacional. Los resultados muestran un aumento del factor de seguridad en las tres condiciones analizadas. En particular, bajo condición saturada, el FS sin tratamiento es inferior a la unidad (0.971873), mientras que con abatimiento aumenta a 1.15393. Esto justifica el abatimiento como una medida de mejora, aunque debe verificarse si requiere obras complementarias para alcanzar el factor de seguridad exigido por el proyecto.

Tipo de condición	FS sin tratamiento	FS con abatimiento
Estática	1.24942	1.43677
Dinámica	1.15594	1.31440
Saturada	0.971873	1.15393

Tabla 10 FS falla rotacional

P.E.03

Se colocará una malla antierosión para proteger la superficie del talud contra los efectos de erosión y, con ello, evitar el graneo. La malla permitirá retener material fino. El precio unitario incluye: preparación y limpieza de la superficie; suministro y colocación de la malla antierosión, traslapes, traslados, cargas, descargas, acarreos de tipo vertical y horizontal, equipo de trabajo, herramientas, mano de obra, traslado de personal, así como todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.

P.E.04

Se colocarán las mallas metálicas triple torsión 8 x 10 para la estabilización superficial y contención de caídos. El tejido de la malla triple torsión impide que se deshile en caso de accidentes o caídos. Por su naturaleza, permite un rápido drenaje del agua que satura el terreno. El precio unitario fijado en el contrato para el m2 incluye: suministro de materiales, adquisición, traslados, cargas, descargas, acarreos verticales y horizontales, equipo, herramientas, fijaciones, mano de obra, traslado de personal, limpieza de la zona, así como todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.

P.E.05 y P.E.06

Las anclas de acero consisten en barras metálicas de acero corrugado que se introducen y fijan dentro de perforaciones realizadas previamente en el talud, inyectado totalmente en su longitud una lechada para su correcta fijación sobre el terreno; las cuales servirán para sujetar la malla metálica triple torsión para protección de la superficie del talud del corte, y con ello evitar el desprendimiento de rocas o material suelto. Las perforaciones se realizarán de 3" pulgadas de diámetro, con el espaciamiento adecuado, las anclas se mantendrán separadas del barreno al momento de inyectar la mezcla fluida, y esto se logra a través de la colocación de centradores, es importante mencionar que los barrenos estarán libres de material que haya colapsado, para que el ancla penetre completamente.

El ancla se preparará con la herramienta necesaria para su correcta aplicación, de acuerdo con los siguientes puntos: el refuerzo interior del ancla estará constituido por una varilla corrugada de una 1" de acero, los cuales deberán estar fuera del plano del corte, y con ello garantizar la fijación de la placa y la tuerca; centradores de acero, placa de apoyo con dimensiones de 30 x 30 cm x 3/8" de espesor y con ello los demás materiales que se puedan ocupar. Los centradores que estarán soldados al ancla tendrán una disposición alternada con separación de 1 m. La inyección del anclaje se realizará a través de una mezcla bombeable de $f'c = 200\ kg/cm^2$, a lo largo de toda la perforación del barreno, cuando la mezcla haya fraguado completamente se atornillará la tuerca hexagonal. El costo total incluye los suministros necesarios para la colocación del anclaje.

P.E.07

Las anclas de acero consisten en barras metálicas de acero corrugado que se introducen y fijan dentro de perforaciones realizadas previamente en el talud, inyectado totalmente en su longitud una lechada para su correcta fijación sobre el terreno; las cuales servirán para sujetar la malla metálica triple torsión para protección de la superficie del talud del corte, y con ello evitar el desprendimiento de rocas o material suelto. Se colocarán al talud con anclas de varilla corrugada de 5/8" de diámetro y 3.0 m de longitud, colocadas en una perforación de 1 1/2" de diámetro perforados en un patrón de 2.5 m separación al tresbolillo en la totalidad del talud. Se colocará un tubo para la inyección de lechada de con el parámetro f´c = 200 kg/cm^2 de 1/2" de diámetro y un tubo de salida de aire, así como centradores de alambrón de 1/4" de diámetro para que con ello se mantenga centrado dentro de la perforación. El costo total incluye los suministros necesarios para la colocación del anclaje.

P.E.08

Las placas tipo "C" son elementos de acero que se colocan en el anclaje de fricción. Estas van colocadas en la parte superficial del talud. Esta placa tipo C estará apoyada sobre la placa de reacción y, de esa manera, sujeta la malla metálica. El suministro de material y la colocación de la placa incluye en su precio lo siguiente: suministro placas, fijación de la misa, traslados de personal, acarreos verticales y horizontales, limpieza de la zona equipo; herramienta, traslado de personal; así como todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.

P.E.09

Para evitar agentes de la erosión, como la lluvia, viento, cambios de humedad, así como evitar desprendimientos superficiales y proteger las discontinuidades de la roca se puede aplicar una mezcla de cemento Portland, agregados pétreos, agua, aditivos y fibras. Todo lo anterior, a través de la fuerza del aire junto con la presión y, a través de una boquilla, se proyectan sobre la superficie de la cara talud con el objetivo de obtener un recubrimiento compacto, homogéneo y, lo más importante, es que sea resistente. Hay dos maneras de aplicar el concreto lanzado y es a través de dos vías, la vía seca en donde la mezcla de gravilla con cemento pasan a una revolvedora y el aditivo, después, se pasa a la bomba de lanzado la cual impulsa en seco a la mezcla, el mezclado con agua se realiza a través de la boquilla de lanzado o una salida mediante una válvula especial, mientras que el concreto lanzado vía húmeda, la mezcla de gravilla, cemento, aditivo y agua, se realizan de manera previa al lanzado, sin embargo se usará esta última debido a los grandes volúmenes de concreto.

El precio unitario incluye el suministro y adquisición de los materiales, traslados de personal, equipo de lanzado, herramienta de mezclado, mano de obra, traslado de personal, así como todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.

P.E.10

Al final de la colocación de los elementos de protección, el concreto lanzado y de las anclas se procederá a la perforación y equipamiento de drenes de penetración, con la finalidad de liberar presiones hidrostáticas del agua de recarga de lluvia que se infiltrará sobre las discontinuidades de la roca, ocasionando una fuerza de empuje desestabilizadora.

Las perforaciones de los drenes serán de 3” de diámetro, con inclinación ascendente de 10° y forrados con una tela geotextil para evitar movimiento de partículas finas, distribuidos en retícula de 2.5 x 2.5 m en el área cubierta de concreto lanzado. Estos barrenos se equiparán con un tubo de PVC liso de 2.5” de diámetro y 0.35 m de largo, calafateado o emboquillado en el brocal y los extremos de dichos drenes estarán 5 cm fuera del talud, para quedar con la siguiente configuración: 20 cm en la cara del talud, 10 cm de espesor de concreto lanzado y finalmente 5 cm fuera del concreto para que drenen correctamente. El tubo únicamente tiene la función de asegurar que el agua que escurre se conduzca al exterior y no se introduzca en el contacto concreto-suelo/roca.

El suministro de material y la colocación de los drenes incluye en su precio los siguientes conceptos: tubo, material para la instalación de drenes y con ello todo lo necesario como la carga y descarga del material, instalación y sellado de tuberías, limpieza, así como todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.

P.E.11

Los drenes de penetración forman parte de un sistema de drenaje, que consiste básicamente en tuberías inclinadas con respecto a la horizontal, ranuradas e insertadas transversalmente en las cara del talud y con el objetivo de aliviar la presión de poro en el interior del macizo rocoso y detrás de la capa de concreto lanzado, se perforarán e instalarán drenes desde la cara de los taludes con un tubo de diámetro 2" PVC hidráulico recubierto con un geotextil de 9 m de longitud en una perforación de 3" de diámetro con una distribución espacial de 5.0 m horizontal y 2.0 m vertical, los extremos de los drenes se dejaran de 10 a 20 cm fuera del talud para que drenen libremente, el suministro de material y la colocación de los drenes de penetración incluye en su precio los siguientes conceptos: costo del tubo y su ranurado, geotextil, sello de mortero, y todo lo necesario para la instalación de los drenes de penetración transversal, limpieza, así como todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.

P.E.12

Los drenes de penetración forman parte de un sistema de drenaje, que consiste básicamente en tuberías inclinadas con respecto a la horizontal, ranuradas e insertadas transversalmente en la cara del talud y con el objetivo de aliviar la presión de poro en el interior del macizo rocoso y detrás de la capa de concreto lanzado. Se perforarán e instalarán drenes desde la cara de los taludes con un tubo de diámetro 2" PVC hidráulico recubierto con un geotextil de 6 m de longitud en una perforación de 3" de diámetro con una distribución espacial de 5.0 m horizontal, los extremos de los drenes se dejaran de 10 a 20 cm fuera del talud para que drenen libremente, el suministro de material y la colocación de los drenes de penetración incluye en su precio los siguientes conceptos: costo del tubo y su ranurado, geotextil, sello de mortero, y todo lo necesario para la instalación de los drenes de penetración transversal, limpieza, así como todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos.

P.E.13

Las cunetas adyacentes al pie del talud se construyen con el objeto de interceptar el agua que escurre sobre la superficie del talud, o del terreno contiguo, conduciéndola a un sitio donde no representa un peligro. La cuneta de concreto hidráulico se rehabilitará con juntas frías a cada dos metros de longitud, mediante el colado de las losas en forma alternada, afinando y compactando el terreno donde se colocará el concreto, dichas cunetas estarán a pie de talud y construirán a base de concreto hidráulico f´c=150 kg/cm2, además el costo total incluye los suministros necesarios para la colocación del anclaje.

P.E.14

Los bordillos de concreto son elementos que interceptan y conducen el agua que, por el efecto de bombeo (pendiente del terreno), se conduce a través de la superficie en la corona del camino, descargándola en los lavaderos para evitar la erosión a los taludes. Estos bordillos serán de concreto, adicionalmente se considera la colocación de un bordillo en la zona de la berma. El suministro de material y la colocación de los bordillos incluye en su precio los siguientes conceptos: preparación de concreto hidráulico, colocación y acomodo de este mismo, cimbrado, armado, limpieza y todo lo necesario para su correcta ejecución.

P.E.15

Los lavaderos son elementos que se construyen sobre la cara de los taludes, con el fin de conducir el agua interceptada por los bordillos, conduciéndola a una caja de captación y a la cuneta directamente, en la base del talud. Se propone utilizar concreto reforzado con f´c=150 kg/cm^2 y un ancho de lavadero de 1.5 m. El costo total incluye los suministros necesarios para la colocación de dichos lavaderos de concreto.

P.E.16

Las cajas de captación adyacentes a la base del talud se construyen con el objetivo de captar el agua que escurre sobre el lavadero construidos sobre la cara del talud, como se mencionó anteriormente, conduciéndola a la cuneta. Se propone utilizar concreto hidráulico con f´c=150 kg/cm^2. Para la determinación del costo unitario se deberá considerar los materiales necesarios para la construcción de la caja de captación, traslados del material, trazo y nivelación, afine, cimbra, elaboración y vaciado del concreto con la especificación antes mencionada, descimbrado y curado de dichas cajas de captación.

Vale la penar considerar visitas de manera periódica del geotecnista de obra durante los trabajos de tratamiento y soporte para observar que estos cumplan con los requerimientos necesarios para la estabilización del talud y, con ello, precisar algunos sitios que requieran trabajos de manera oportuna.

Y con lo anteriormente descrito, se debe vigilarse periódicamente la integridad del talud después de haber sido culminado los trabajos de protección y tratamientos descritos en esta sección, realizando inspecciones físicas y visuales para observar las condiciones del concreto lanzado y zonas donde se haya colocado la malla metálica, para que se puedan detectar zonas erosionadas y descomprimidas, bloques que han perdido apoyo estructural, daños en la malla y demás.

P.E.17

Las anclas pasivas para la fijación del revestimiento de concreto lanzado estarán constituidas por varilla corrugada de acero de 5/8” de diámetro y 3.0 m de longitud, colocadas en perforaciones de 1 ½” de diámetro y distribuidas cada 2.5 m en sentido horizontal y vertical, con arreglo al tresbolillo.

Las perforaciones deberán limpiarse antes de introducir las anclas. La varilla se mantendrá centrada dentro del barreno mediante centradores y se inyectará completamente con lechada de cemento resistencia f´c = 200 kg/cm^2. El extremo exterior contará con una placa de reparto, tuerca y rondana el cual quedará integrado en el revestimiento de concreto lanzado.

El precio unitario incluye, trazo, perforación, limpieza de los barrenos, suministro, corte, habilitado, centrado y colocación de la varilla; tubos de inyección y salida de aire, preparación e inyección de la lechada, placa de reparto, tuerca y rondana, maquinaria, herramienta, acarreos verticales y horizontales, maniobras, líneas de vida, equipo de protección personal, mano de obra especializada, desperdicios y todo lo necesario para su correcta ejecución.

P.E.18

La seguridad y protección durante los trabajos de estabilización del talud comprenderá el suministro, instalación, operación, inspección, mantenimiento y retiro de todos los elementos necesarios para proteger del personal, usuarios y áreas contiguas durante el desarrollo de la obra.

El precio incluye señalización, restrictiva e informativa; delimitación de áreas de trabajo, conos, cinta de seguridad, barreras y dispositivos de protección; suministro, reposición y uso de equipo de protección personal, como casco, chaleco refléjate, guantes, lentes, calzado de seguridad y arnés de cuerpo completo; instalación y utilización de línea de vida, puntos de anclaje certificados y sistemas de protección contra caídas; inspecciones periódicas, mantenimiento, maniobras, herramienta, captación básica y todo lo necesario para garantizar condiciones seguras durante la ejecución de los trabajos.

4.4 Presupuesto estimado de estabilización

El presupuesto estimado para la estabilización del talud se muestra en la tabla 10. Se elaboró a partir de las cantidades de obra obtenidas de las áreas, longitudes y elementos considerados en la propuesta. Los precios unitarios incluyen materiales, mano de obra, maquinaria, herramienta, equipo auxiliar, maniobras y medidas de seguridad necesarias para ejecutar cada actividad.

PRESUPUESTO ESTIMADO DE ESTABILIZACIÓN – TALUD					
Clave	Concepto	Unidad	Cantidad	P.U. estimado	Importe
P.E.01	Suministro de mano de obra, materiales, herramientas y quipo para relizar el amacice y perfilado del talud.	m²	5,250.00	$ 1,100.00	$5,775,000.00
P.E.02	Suministro de mano de obra, maquinaria, equipo y materiales para realizar el batimiento del talud ubicado por encima de la berma.	lte.	1	$ 75,500.00	$75,500.00
P.E.03	Suministro e istalación de malla antierosión tridimensional sobre la superficie del talud.	m²	2073	$ 650.00	$1,347,450.00
P.E.04	Suministro e instalación de malla metálica de triple torsión 8x10.	m²	2073	$ 1,200.00	$2,487,600.00
P.E.05	Suministro e instalación de anclas pasivas de sujeción al pie del talud.	PZA	14	$ 24,200.00	$338,800.00
P.E.06	Suministro e instalación de anclas pasivas de sujeción en la parte superior del talud.	PZA	24	$ 5,500.00	$132,000.00
P.E.07	Suministro e instalación de anclas pasivas de fijación sobre la malla metálica del talud.	PZA	230	$ 2,400.00	$552,000.00
P.E.08	Suministro e instalación de placa de sujeción tipo "C" sobre malla metálica del talud.	PZA	38	$ 1,200.00	$45,600.00
P.E.09	Suministro y aplicación de concreto lanzado por vía húmeda con fibras metálicas	m²	3057	$ 1,150.00	$3,515,550.00
P.E.10	Suministro e instalación de drenes superficiales de PVC hidráhulicos liso de 2" de diámetro y .35 m de longitud.	PZA	527	$ 600.00	$316,200.00
P.E.11	Suministro e instalación de drenes subhorizontales de penetración de 9m de logitud.	PZA	82	$ 4,500.00	$369,000.00
P.E.12	Suministro e instalación de drenes subhorizontales de penetración de 6m de longitud.	PZA	16	$ 3,500.00	$56,000.00
P.E.13	Suministro y construcción de cuneta de concreto hidráhulico al pie del talud.	m	213	$ 800.00	$170,400.00
P.E.14	Suministro y construcción de bordillo de concreto hidráulico.	m	290	$ 350.00	$101,500.00
P.E.15	Suministro y construcción de lavadero de concreto hidráulico reforzado sobre la superficie del talud.	m	69	$ 900.00	$62,100.00
P.E.16	Suministro y construcción de caja de captación de cocreto hidráulico reforzado.	PZA	3	$ 9,500.00	$28,500.00
P.E.17	Suministro e instalación de anclas pasivas para fijación del revestiento de concreto lanzado	PZA	594	$ 4,200.00	$2,494,800.00
P.E.18	Suministro, colocación, operación y mantenimiento de elementos de seguridad para los trabajos de estabilización del talud.	lote	1	$ 145,200.00	$145,200.00
				SUBTOTAL	$ 18,013,200.00
				IVA 16%	$ 2,882,112.00
				TOTAL	$ 20,895,312.00

Tabla 11 Presupuesto del talud

4.5 Análisis costo-beneficio

La propuesta de estabilización del talud requiere una inversión estimada de $18,013,200.00 antes de IVA, equivalente a $20,895,312.00 con IVA. Esta inversión permitirá reducir desprendimientos, erosión, filtración de agua y afectaciones carreteras mediante trabajos de amacice, mallas de protección, anclas, concreto lanzado y obras de drenaje.

Los beneficios económicos corresponden principalmente a los costos que se evitarían por retiro de derrumbes, reparaciones de la carretera, cierres temporales, movilización de maquinaria, mantenimiento correctivo y atención de emergencias. Para un periodo de evaluación de 20 años, una tasa de descuento del 10% y beneficios anuales estimados de $3,000,000.00, se obtiene un valor presente de beneficios de $25,540.691.16.

La relación costo-beneficio es:

$$B/C = \frac{\$25{,}540{,}691.16}{\$18{,}013{,}200.00} = 1.42$$

Esto significa que por cada peso invertido se obtendrían aproximadamente $1.42 de beneficios, debido a que la relación es mayor que 1 y el valor presente es positivo en $7,527,491.16, la propuesta se considera técnica y económicamente viable.

Capítulo 5

5 Conclusiones

A través de un análisis integral en la estabilidad de un talud en el municipio de la Yesca, Nayarit permitió identificar y evaluar factores geológicos, geofísicos, y geotécnicos que determinan su comportamiento y estabilidad. Con dicha información se permitió establecer un modelo de las condiciones del sitio y con ello valorar su comportamiento ante diferentes circunstancias como puede ser los efectos por consecuencia de eventos sísmicos y la presencia de agua, con el fin de plantear una alternativa técnica y económicamente viable.

En función de los factores que influyen en la estabilidad del talud se concluyó que la litología que se presenta en la zona, la presencia de fallas, geometría de este, junto con los escenarios mencionados anteriormente como el efecto sísmico y la presencia de agua constituyeron elementos fundamentales para analizar su comportamiento. A través de la información que se obtuvo de la geología, geofísica y geotécnica fue posible obtener un modelo con la representación de sus unidades geotécnicas que resulta de gran valor para poder tener una correlación de los datos ya que tener información aislada puede provocar errores en la toma de decisiones para el tema principal de esta tesis que fue la estabilización para que pueda considerarse seguro. Con base en todos estos resultados fue posible establecer medidas de estabilidad y con ello mejorar las condiciones del talud y para ello se presentó un presupuesto y junto con ello su anexo como parte del catálogo de conceptos en donde se describe que trabajos que se proponen para dicho talud, desde el amacice y perfilado del corte con el objetivo de preparar y formar la sección de acuerdo con lo indicado en el proyecto hasta la aplicación de concreto lanzado en la zona donde se encuentra las tobas, que dichas representan al macizo rocoso para que con ello se pueda obtener un análisis costo-beneficio.

En términos generales, el cumplimiento de los objetivos planteados muestra la importancia de abordar la estabilidad de taludes a través de una metodología integral, por lo que el estudio proporciona una base técnica y económica para la toma de decisiones y constituye una referencia para futuros estudios en donde se requiera profundizar en la caracterización del macizo rocoso, el estudio de sus condiciones y la verificación de este después de culminados los trabajos.

GLOSARIO

A continuación, se presenta un glosario de terminología empleada en el trabajo de investigación con el fin de proporcionar las definiciones de los conceptos que fueron utilizados a lo largo de dicho trabajo y con ello facilitar la compresión al lector.

- Talud: Superficie de origen natural o artificial, la cual tiene un grado de inclinación con respecto a la horizontal, los materiales pueden ser de tipo rocoso, de suelo o mixtos. Los de origen artificial son hechos para la construcción de carreteras, elementos de una presa y demás. Finalmente, un ejemplo de talud natural es el de una ladera.

- Estabilidad de taludes: Esta terminología hace mención acerca de la resistencia que presenta un talud al colapso o deslizamiento de este. Los factores que influyen en la estabilidad puede ser el tipo de material con el cual está hecho, la presencia de agua ya que incrementa el peso del propio talud y finalmente la presencia de cargas externas (construcciones hechas por el hombre) en las que si no se realiza un correcto análisis al talud este puede colapsar.

- Macizo rocoso: Conjunto de bloques rocosos que presentan discontinuidad, estos pueden ser homogéneos o heterogéneos, además de ser materiales anisotrópicos.

- Deformación en roca: Las rocas generalmente están sometidos a cargas (esfuerzos) y estás pueden cambiar de forma y tamaño dependiendo del tipo y magnitud de la carga, es importante este parámetro geo mecánico ya que forma parte de los estudios indispensables de mecánica de rocas.

- Resistencia en roca: Capacidad que tiene la roca a deformarse ante la presencia de cargas (esfuerzos). La resistencia se puede categorizar en tres tipos: uniaxial, tracción y de corte. La composición de la roca, su textura y estructura son las causas que afectan la resistencia y deformabilidad de una roca.

ANEXOS

Pruebas de laboratorio

COMPRESIÓN SIMPLE DE NÚCLEOS DE ROCA

Proyecto: Elaboración de Estudios y Proyectos para la Estabilización de Taludes en el camino Presa La Yesca - Plan del Muerto- La Yesca de km 34+240 al km 71+400, en el Municipio de La Yesca, en el Estado de Nayarit.

Localizacion:

Sondeo: SM-1 Prof (m): 0.75 Operador: Ramiro Molina M.

Muestra: 1 Fecha: 03-abr-23 Calculó:

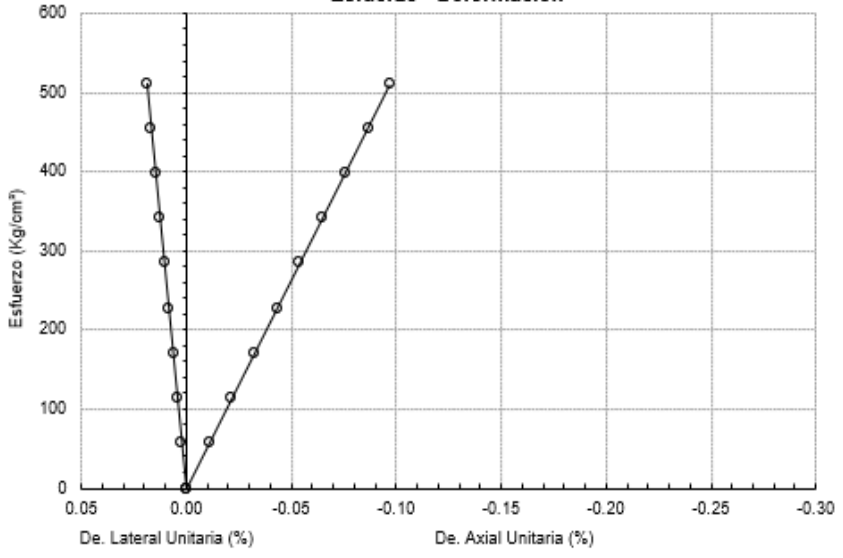
Descripción: Toba litica gris claro

DATOS DE PROBETA

Ø (cm): 4.73 Área (cm²): 17.57 Wp (gr): 485.00

H (cm): 11.10 Vol (cm³): 195.05 ɣ (T/m³): 2.49

Carga (Kg)	Def. Vetical (mm)	Def. Vetical Unitaria	1-Def. Vertical Unitaria	Area Corregida (cm²)	Esfuerzo (Kg/cm²)	Def. Horizontal (mm)	Def. Horizontal Unitaria	Esquema de Falla	Def. Vetical Unitaria
0	0	0.000	1.000	17.57	0.00	0	0.000		0.000
1,000	0.012	0.011	1.000	17.57	56.90	0.001	0.002		-0.011
2,000	0.024	0.022	1.000	17.58	113.80	0.002	0.004		-0.022
3,000	0.036	0.032	1.000	17.58	170.67	0.003	0.006		-0.032
4,000	0.048	0.043	1.000	17.58	227.54	0.004	0.008		-0.043
5,000	0.060	0.054	0.999	17.58	284.40	0.005	0.011		-0.054
6,000	0.072	0.065	0.999	17.58	341.24	0.006	0.013		-0.065
7,000	0.084	0.076	0.999	17.58	398.07	0.007	0.015		-0.076
8,000	0.096	0.086	0.999	17.59	454.89	0.008	0.017		-0.086
9,000	0.108	0.097	0.999	17.59	511.69	0.009	0.019		-0.097



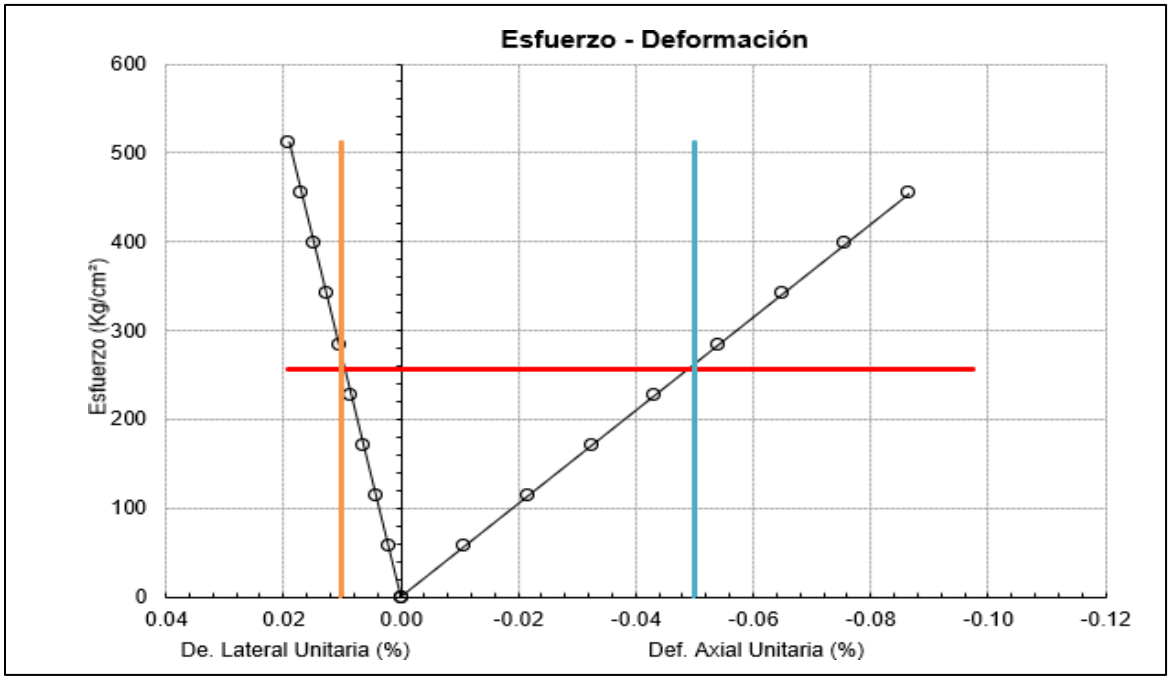
Resistencia a la compresión simple, qu
511.7

M. de elasticidad, E (Kg/cm²)
511,690.8

Relación de Poisson, ν
0.20

Modulo de corte, G (Kg/cm²)
213,204.5

Observaciones



COMPRESIÓN SIMPLE DE NÚCLEOS DE ROCA

Proyecto: Elaboración de Estudios y Proyectos para la Estabilización de Taludes en el camino Presa La Yesca - Plan del Muerto- La Yesca de km 34+240 al km 71+400, en el Municipio de La Yesca, en el Estado de Nayarit.

Localizacion:

Sondeo: SM-1 Prof (m): 17.25 Operador: Ramiro Molina M.

Muestra: 17 Fecha: 03-abr-23 Calculó:

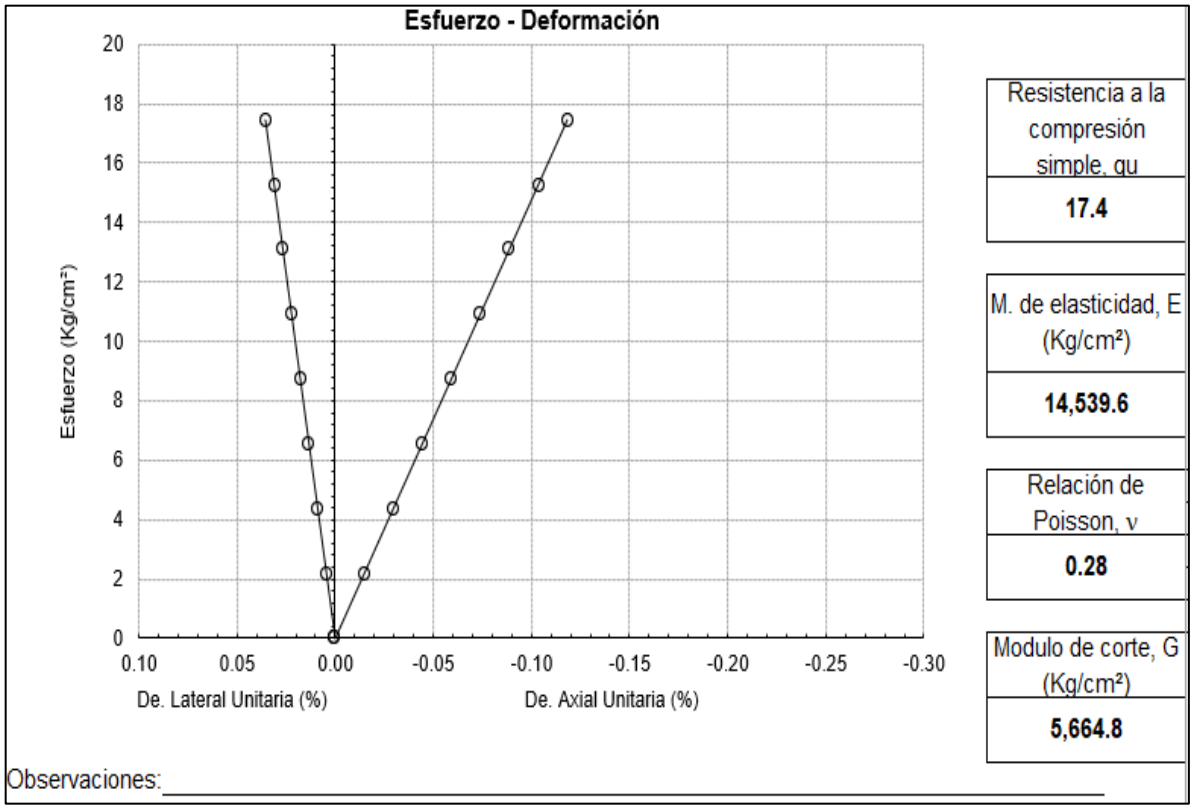
Descripción: Toba litica café claro

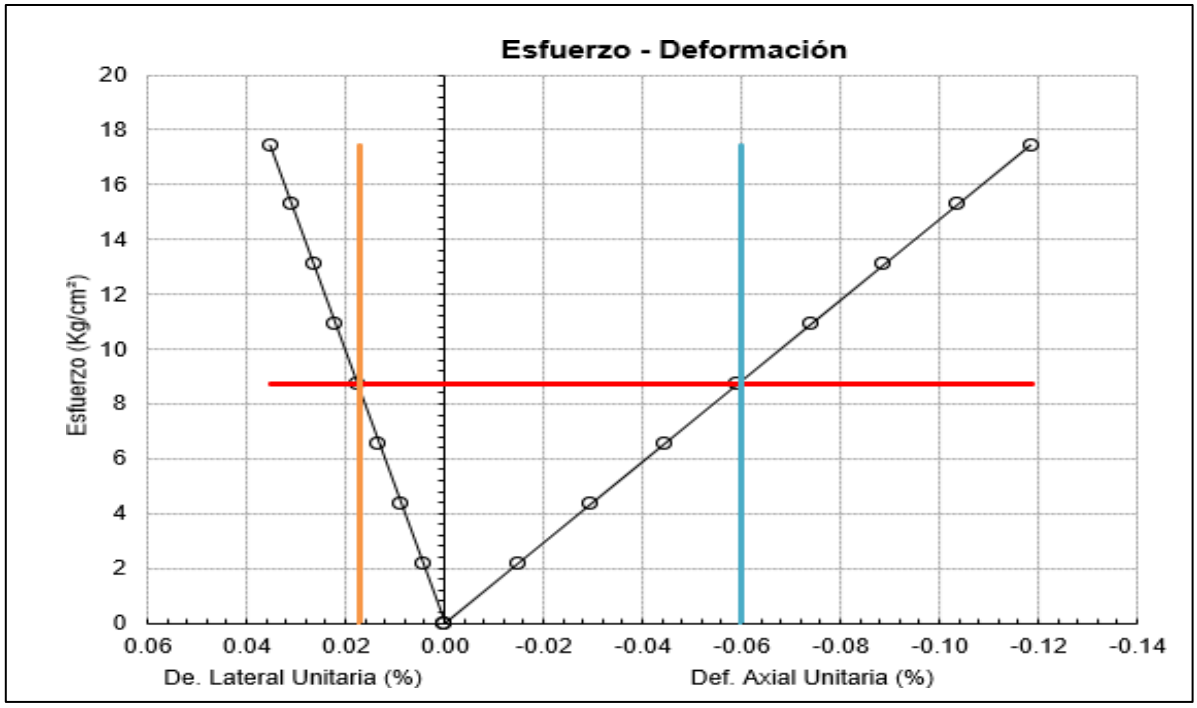
DATOS DE PROBETA

Ø (cm): 6.83 Área (cm²): 36.64 Wp (gr): 918.00

H (cm): 13.50 Vol (cm³): 494.61 ɣ (T/m³): 1.86

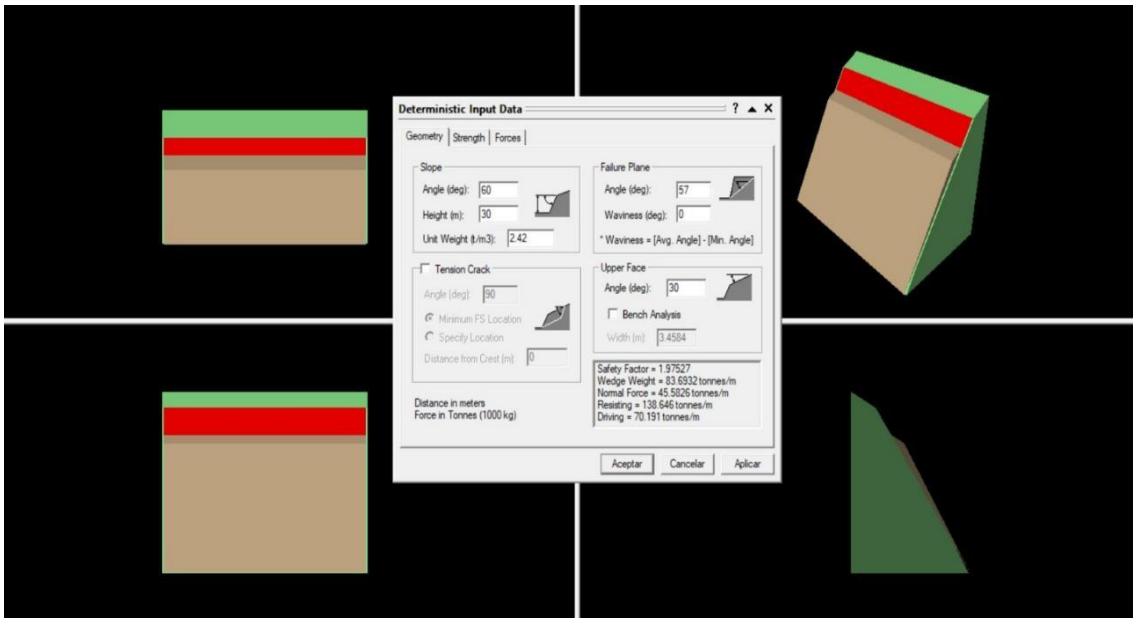
Carga (Kg)	Def. Vetical (mm)	Def. Vetical Unitaria (%)	1-Def. Vertical Unitaria	Area Corregida (cm²)	Esfuerzo (Kg/cm²)	Def. Horizontal (mm)	Def. Horizontal Unitaria (%)	Esquema de Falla	Def. Vetical Unitaria
0	0	0.000	1.000	36.64	0.00	0	0.000		0.000
80	0.020	0.015	1.000	36.64	2.18	0.003	0.004		-0.015
160	0.040	0.030	1.000	36.65	4.37	0.006	0.009		-0.030
240	0.060	0.044	1.000	36.65	6.55	0.009	0.013		-0.044
320	0.080	0.059	0.999	36.66	8.73	0.012	0.018		-0.059
400	0.100	0.074	0.999	36.67	10.91	0.015	0.022		-0.074
480	0.120	0.089	0.999	36.67	13.09	0.018	0.026		-0.089
560	0.140	0.104	0.999	36.68	15.27	0.021	0.031		-0.104
640	0.160	0.119	0.999	36.68	17.45	0.024	0.035		-0.119


Esfuerzo - Deformación
Esfuerzo (Kg/cm²)
De. Lateral Unitaria (%)
De. Axial Unitaria (%)
Resistencia a la compresión simple, qu
17.4
M. de elasticidad, E (Kg/cm²)
14,539.6
Relación de Poisson, ν
0.28
Modulo de corte, G (Kg/cm²)
5,664.8
Observaciones:

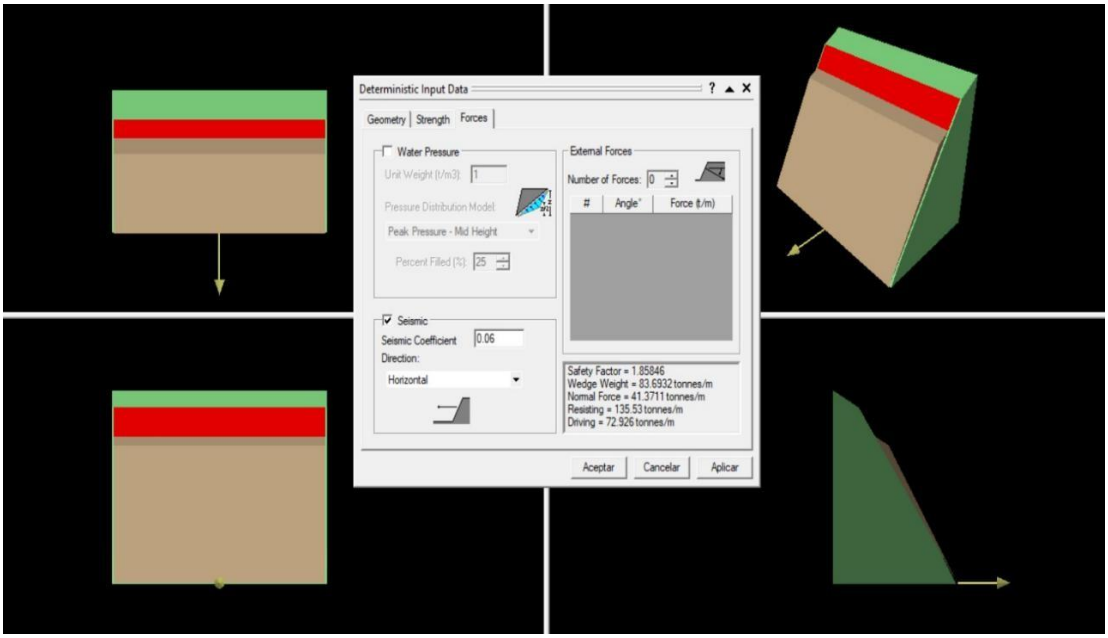

Esfuerzo - Deformación
Esfuerzo (Kg/cm²)
De. Lateral Unitaria (%)
Def. Axial Unitaria (%)

Análisis de estabilidad

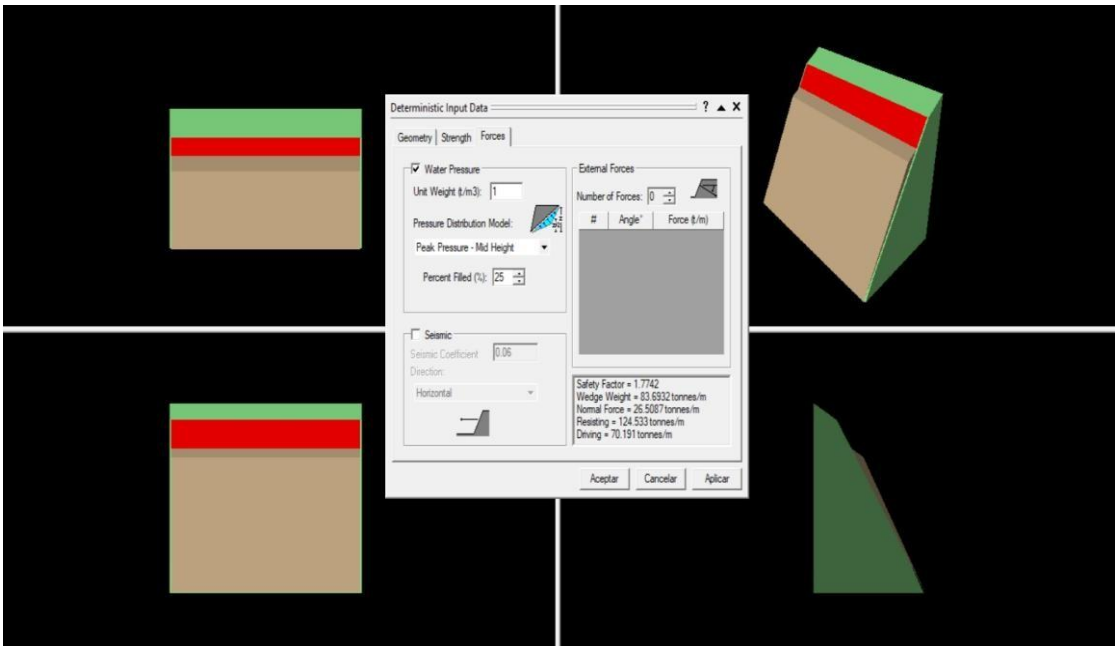
- Modelo estático en falla plana



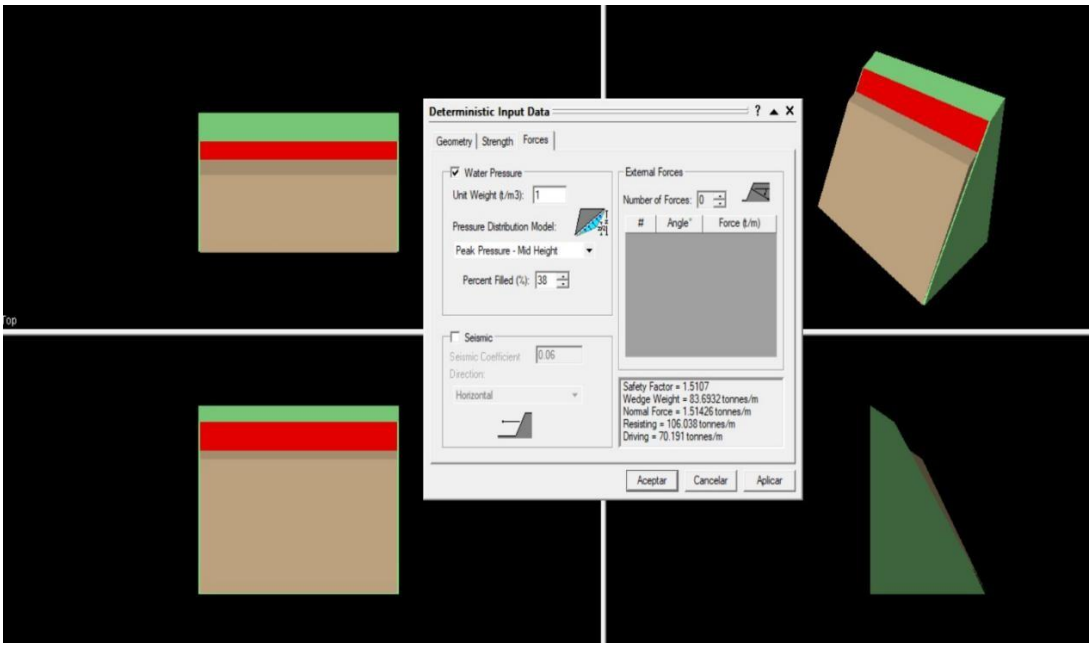
- Modelo dinámico en falla plana



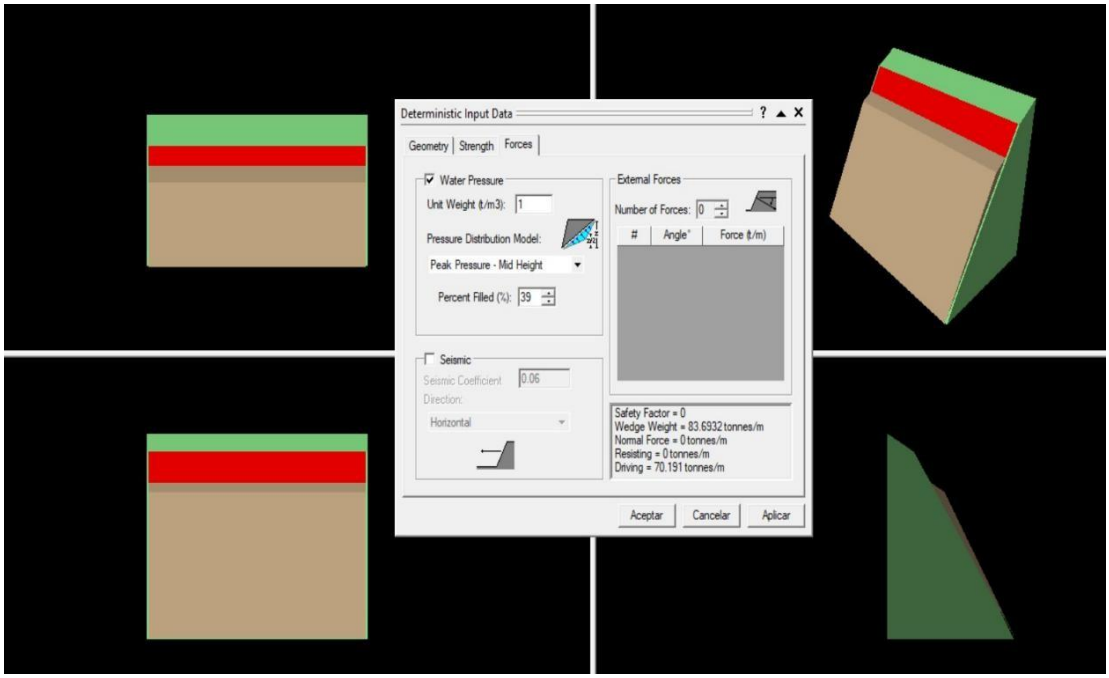
- Modelo saturado al 25% en falla plana



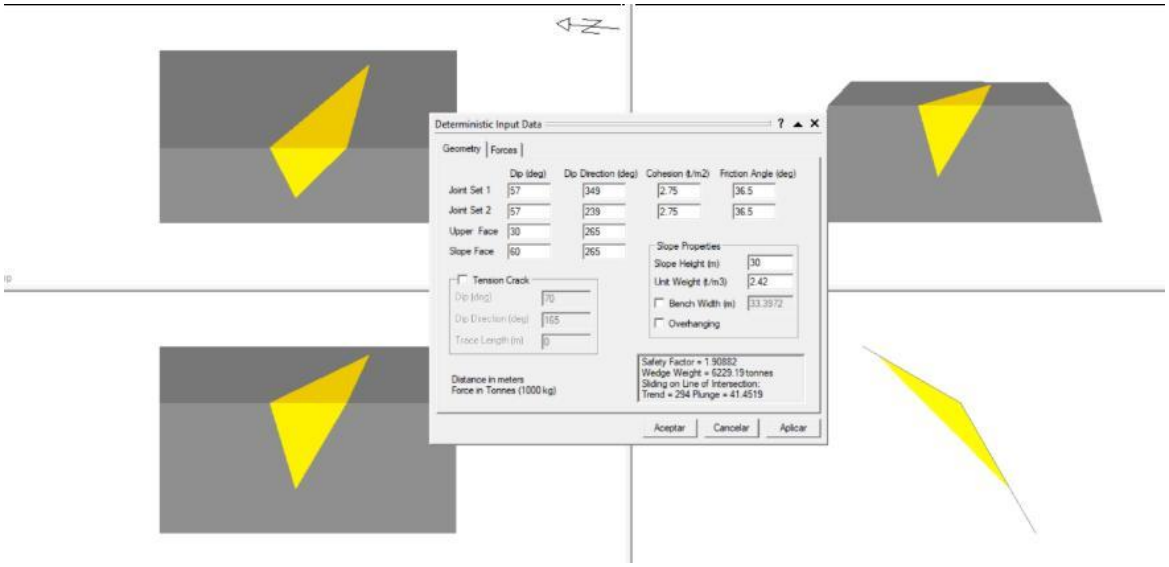
- Modelo saturado al 38% en falla plana



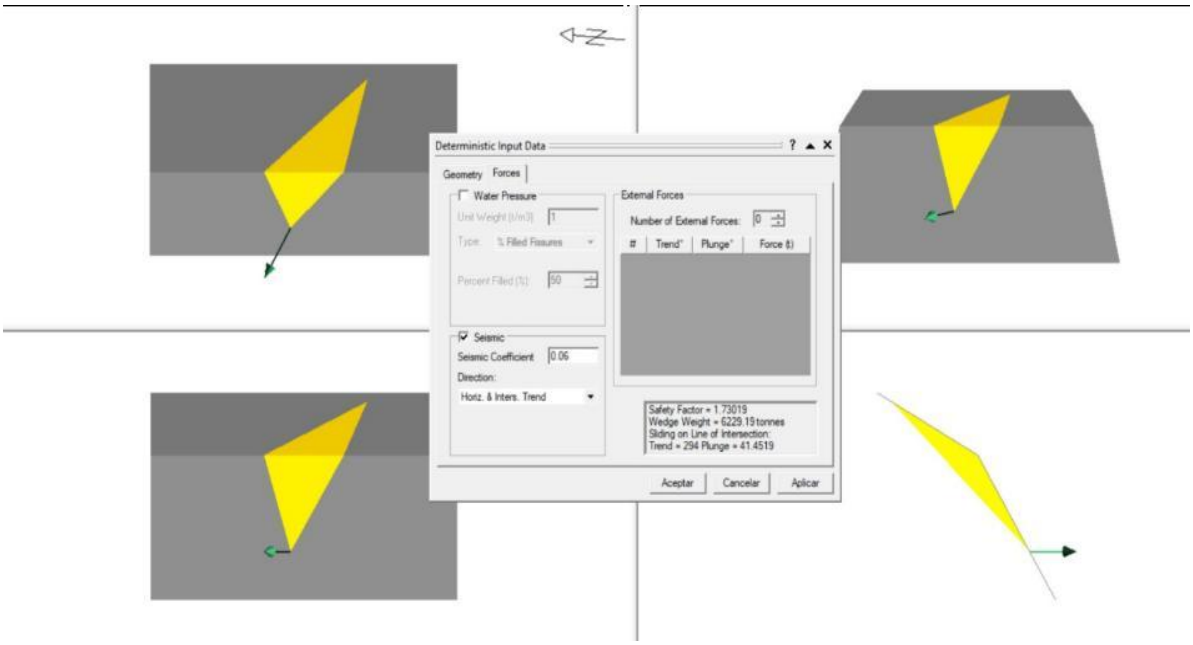
- Modelo saturado al 39% en falla plana



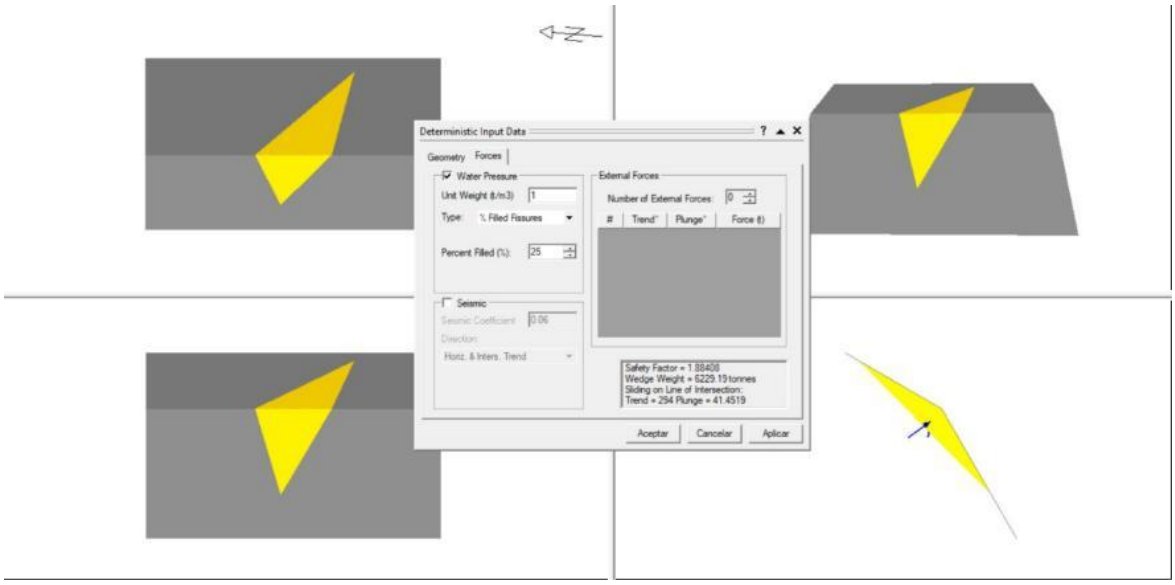
- Modelo estático en falla tipo cuña



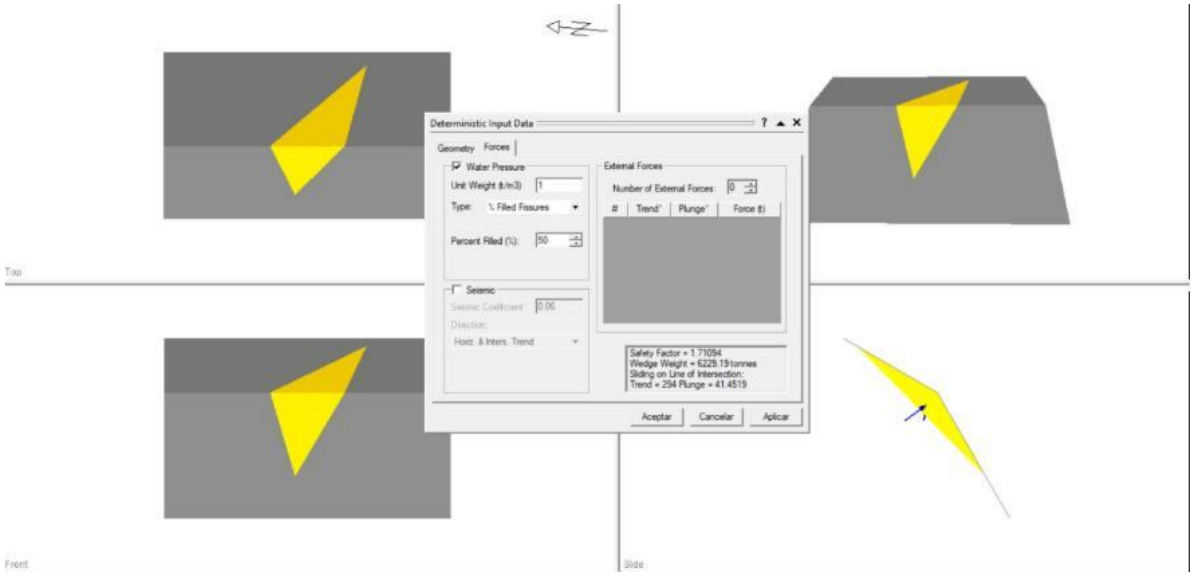
- Modelo dinámico en falla tipo cuña



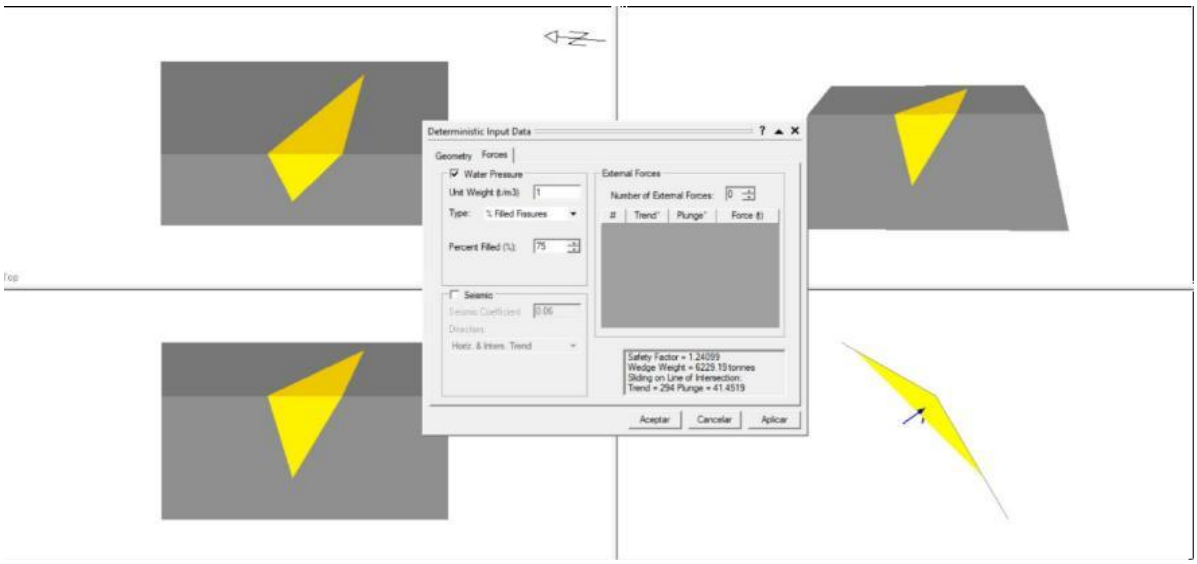
- Modelo saturado al 25% en falla tipo cuña



- Modelo saturado al 50% en falla tipo cuña



- Modelo saturado al 75% en falla tipo cuña



- Rotacional

FALLA ROTACIONAL:
CONDICIÓN ESTÁTICA, SOFTWARE SLIDE

Material Properties

Property	UG-2
Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight [kN/m3]	23.73
Cohesion [kPa]	58.84
Friction Angle [deg]	32
Water Surface	Water Table
Hu Value	0

Global Minimums
Method: bishop simplified
FS: 1.249420
Center: 56.205, 49.096
Radius: 48.380
Left Slip Surface Endpoint: 9.519, 36.404
Right Slip Surface Endpoint: 36.538, 4.893
Resisting Moment=242402 kN-m
Driving Moment=194012 kN-m

Slice Data
Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.24942

Slice Number	*Width [m]*	*Weight [kN]*	*Base Material*	*Base Cohesion [kPa]*	*Base Friction Angle [degrees]*	*Shear Stress [kPa]*	*Shear Strength [kPa]*	*Base Normal Stress [kPa]*	*Pore Pressure [kPa]*	*Effective Normal Stress [kPa]*
1	1.08078	44.4001	UG-2	58.84	32	26.0391	32.5338	-42.0989	0	-42.0989
2	1.08078	125.379	UG-2	58.84	32	46.0441	57.5284	-2.09894	0	-2.09894
3	1.08078	192.371	UG-2	58.84	32	65.0622	81.29	35.9275	0	35.9275
4	1.08078	247.01	UG-2	58.84	32	82.375	102.921	70.5443	0	70.5443
5	1.08078	296.559	UG-2	58.84	32	99.1332	123.859	104.052	0	104.052
6	1.08078	340.134	UG-2	58.84	32	114.87	143.521	135.518	0	135.518
7	1.08078	379.414	UG-2	58.84	32	129.827	162.209	165.424	0	165.424
8	1.08078	417.979	UG-2	58.84	32	144.876	181.011	195.514	0	195.514
9	1.08078	400.72	UG-2	58.84	32	144.184	180.146	194.13	0	194.13
10	1.08078	277.598	UG-2	58.84	32	111.738	139.607	129.255	0	129.255
11	1.08078	200.353	UG-2	58.84	32	91.1335	113.864	88.057	0	88.057
12	1.08078	192.196	UG-2	58.84	32	90.6412	113.249	87.0726	0	87.0726
13	1.08078	185.968	UG-2	58.84	32	90.5479	113.132	86.8861	0	86.8861
14	1.08078	200.827	UG-2	58.84	32	97.0558	121.263	99.8981	0	99.8981
15	1.08078	244.8	UG-2	58.84	32	113.171	141.398	132.12	0	132.12
16	1.08078	272.837	UG-2	58.84	32	124.418	155.45	154.608	0	154.608
17	1.08078	289.865	UG-2	58.84	32	132.187	165.157	170.142	0	170.142
18	1.08078	294.961	UG-2	58.84	32	135.983	169.9	177.733	0	177.733
19	1.08078	287.168	UG-2	58.84	32	135.292	169.037	176.352	0	176.352
20	1.08078	256.715	UG-2	58.84	32	126.481	158.028	158.734	0	158.734
21	1.08078	189.707	UG-2	58.84	32	104.257	130.261	114.298	0	114.298
22	1.08078	142.719	UG-2	58.84	32	88.6172	110.72	83.0255	0	83.0255
23	1.08078	97.3837	UG-2	58.84	32	73.1202	91.3579	52.0395	0	52.0395
24	1.08078	59.4405	UG-2	58.84	32	59.9357	74.8849	25.6772	0	25.6772
25	1.08078	20.0687	UG-2	58.84	32	45.8554	57.2926	-2.47632	0	-2.47632

FALLA ROTACIONAL:
CONDICIÓN DINÁMICA, SOFTWARE SLIDE

Material Properties

Property	UG-2
Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight [kN/m3]	23.73
Cohesion [kPa]	58.84
Friction Angle [deg]	32
Water Surface	Water Table
Hu Value	0

Global Minimums
Method: bishop simplified
FS: 1.155940
Center: 50.212, 49.096
Radius: 46.317
Left Slip Surface Endpoint: 6.016, 35.238
Right Slip Surface Endpoint: 36.570, 4.833
Resisting Moment=291004 kN-m
Driving Moment=251746 kN-m

Slice Data

Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.15594

Slice Number	*Width [m]*	*Weight [kN]*	*Base Material*	*Base Cohesion [kPa]*	*Base Friction Angle [degrees]*	*Shear Stress [kPa]*	*Shear Strength [kPa]*	*Base Normal Stress [kPa]*	*Pore Pressure [kPa]*	*Effective Normal Stress [kPa]*
1	1.22216	56.5367	UG-2	58.84	32	30.2327	34.9472	-38.2364	0	-38.2364
2	1.22216	161.02	UG-2	58.84	32	54.8924	63.4524	7.38132	0	7.38132
3	1.22216	245.039	UG-2	58.84	32	77.8729	90.0164	49.8926	0	49.8926
4	1.22216	312.536	UG-2	58.84	32	98.6002	113.976	88.2358	0	88.2358
5	1.22216	371.106	UG-2	58.84	32	118.08	136.493	124.271	0	124.271
6	1.22216	422.62	UG-2	58.84	32	136.413	157.686	158.186	0	158.186
7	1.22216	466.086	UG-2	58.84	32	153.101	176.975	189.056	0	189.056
8	1.22216	507.894	UG-2	58.84	32	169.658	196.114	219.684	0	219.684
9	1.22216	543.906	UG-2	58.84	32	184.889	213.721	247.862	0	247.862
10	1.22216	580.749	UG-2	58.84	32	200.58	231.859	276.889	0	276.889
11	1.22216	533.149	UG-2	58.84	32	191.562	221.434	260.205	0	260.205
12	1.22216	370.21	UG-2	58.84	32	146.755	169.64	177.318	0	177.318
13	1.22216	296.667	UG-2	58.84	32	127.228	147.068	141.195	0	141.195
14	1.22216	283.366	UG-2	58.84	32	125.642	145.234	138.26	0	138.26
15	1.22216	280.011	UG-2	58.84	32	127.001	146.806	140.775	0	140.775
16	1.22216	319.588	UG-2	58.84	32	142.305	164.496	169.085	0	169.085
17	1.22216	354.571	UG-2	58.84	32	156.476	180.877	195.301	0	195.301
18	1.22216	369.758	UG-2	58.84	32	164.282	189.9	209.74	0	209.74
19	1.22216	369.154	UG-2	58.84	32	166.77	192.776	214.342	0	214.342
20	1.22216	344.967	UG-2	58.84	32	160.959	186.059	203.593	0	203.593
21	1.22216	283.123	UG-2	58.84	32	141.476	163.538	167.551	0	167.551
22	1.22216	204.35	UG-2	58.84	32	115.201	133.166	118.946	0	118.946
23	1.22216	137.23	UG-2	58.84	32	92.3391	106.739	76.654	0	76.654
24	1.22216	82.9552	UG-2	58.84	32	73.5269	84.9927	41.8531	0	41.8531
25	1.22216	28.0776	UG-2	58.84	32	53.9109	62.3177	5.56555	0	5.56555

FALLA ROTACIONAL:
CONDICIÓN SATURADA, SOFTWARE SLIDE

Material Properties

Property	UG-2
Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight [kN/m3]	23.73
Cohesion [kPa]	58.84
Friction Angle [deg]	32
Water Surface	Water Table
Hu Value	0.5

Global Minimums
Method: bishop simplified
FS: 0.971873
Center: 50.212, 49.096
Radius: 46.317
Left Slip Surface Endpoint: 6.016, 35.238
Right Slip Surface Endpoint: 36.570, 4.833
Resisting Moment=232117 kN-m
Driving Moment=238835 kN-m

Slice Data

Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.17034

Slice Number	*Width [m]*	*Weight [kN]*	*Base Material*	*Base Cohesion [kPa]*	*Base Friction Angle [degrees]*	*Shear Stress [kPa]*	*Shear Strength [kPa]*	*Base Normal Stress [kPa]*	*Pore Pressure [kPa]*	*Effective Normal Stress [kPa]*
1	1.2221	56.5367	UG-2	58.84	32	30.062	29.2164	-37.8954	9.51235	-47.4077
2	1.2221	161.02	UG-2	58.84	32	51.9313	50.4706	13.8996	27.2935	-13.3939
3	1.2221	245.039	UG-2	58.84	32	72.4844	70.4456	60.0869	41.5139	18.573
4	1.2221	312.536	UG-2	58.84	32	91.2091	88.6437	100.54	52.8439	47.6958
5	1.2221	371.106	UG-2	58.84	32	108.891	105.829	137.962	62.7644	75.1973
6	1.2221	422.62	UG-2	58.84	32	125.593	122.061	172.787	71.6127	101.174
7	1.2221	466.086	UG-2	58.84	32	141.014	137.048	203.95	78.7908	125.159
8	1.2221	507.894	UG-2	58.84	32	156.277	151.881	234.841	85.9443	148.897
9	1.2221	543.906	UG-2	58.84	32	170.47	165.675	262.944	91.9718	170.972
10	1.2221	580.749	UG-2	58.84	32	185.089	179.883	291.906	98.1966	193.71
11	1.2221	533.149	UG-2	58.84	32	177.749	172.749	272.635	90.3414	182.293
12	1.2221	370.21	UG-2	58.84	32	139.233	135.316	183.563	61.1751	122.388
13	1.2221	296.667	UG-2	58.84	32	121.907	118.478	145.284	49.8428	95.4414
14	1.2221	283.366	UG-2	58.84	32	120.833	117.435	141.696	47.9251	93.7711
15	1.2221	280.011	UG-2	58.84	32	122.566	119.119	143.722	47.2557	96.4665
16	1.2221	319.588	UG-2	58.84	32	136.035	132.208	173.013	55.5998	117.414
17	1.2221	354.571	UG-2	58.84	32	149.989	145.77	199.085	59.9678	139.117
18	1.2221	369.758	UG-2	58.84	32	157.489	153.059	213.433	62.6514	150.782
19	1.2221	369.154	UG-2	58.84	32	160.244	155.737	217.637	62.5687	155.068
20	1.2221	344.967	UG-2	58.84	32	155.298	150.93	206.236	58.8609	147.375
21	1.2221	283.123	UG-2	58.84	32	137.491	133.624	169.256	49.5772	119.679
22	1.2221	204.35	UG-2	58.84	32	114.625	111.401	119.11	34.9947	84.1154
23	1.2221	137.23	UG-2	58.84	32	94.295	91.6428	75.8399	23.3444	52.4955
24	1.2221	82.9552	UG-2	58.84	32	77.4632	75.2844	40.4156	14.099	26.3166
25	1.2221	28.0776	UG-2	58.84	32	59.8209	58.1384	3.62584	4.74871	-1.12287

FALLA ROTACIONAL:
CONDICIÓN ESTÁTICA CON ABATIMIENTO, SOFTWARE SLIDE

Material Properties

Property	UG-2
Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight [kN/m3]	23.73
Cohesion [kPa]	58.84
Friction Angle [deg]	32
Water Surface	Water Table
Hu Value	0

Global Minimums
Method: bishop simplified
FS: 1.436770
Center: 51.616, 56.208
Radius: 53.320
Left Slip Surface Endpoint: 3.312, 33.630
Right Slip Surface Endpoint: 36.434, 5.095
Resisting Moment=335244 kN-m
Driving Moment=233332 kN-m

Slice Data
Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.43677

Slice Number	*Width [m]*	*Weight [kN]*	*Base Material*	*Base Cohesion [kPa]*	*Base Friction Angle [degrees]*	*Shear Stress [kPa]*	*Shear Strength [kPa]*	*Base Normal Stress [kPa]*	*Pore Pressure [kPa]*	*Effective Normal Stress [kPa]*
1	1.32491	59.3689	UG-2	58.84	32	32.4104	46.5663	-19.6421	0	-19.6421
2	1.32491	164.783	UG-2	58.84	32	53.9512	77.5155	29.887	0	29.887
3	1.32491	247.077	UG-2	58.84	32	72.5328	104.213	72.612	0	72.612
4	1.32491	321.118	UG-2	58.84	32	90.3699	129.841	113.625	0	113.625
5	1.32491	344.41	UG-2	58.84	32	98.2709	141.193	131.792	0	131.792
6	1.32491	355.07	UG-2	58.84	32	103.447	148.63	143.694	0	143.694
7	1.32491	361.73	UG-2	58.84	32	107.62	154.625	153.289	0	153.289
8	1.32491	364.892	UG-2	58.84	32	110.872	159.298	160.766	0	160.766
9	1.32491	364.947	UG-2	58.84	32	113.272	162.746	166.284	0	166.284
10	1.32491	362.209	UG-2	58.84	32	114.875	165.049	169.97	0	169.97
11	1.32491	356.934	UG-2	58.84	32	115.729	166.276	171.934	0	171.934
12	1.32491	349.331	UG-2	58.84	32	115.873	166.483	172.264	0	172.264
13	1.32491	339.579	UG-2	58.84	32	115.34	165.717	171.038	0	171.038
14	1.32491	327.827	UG-2	58.84	32	114.158	164.019	168.321	0	168.321
15	1.32491	314.203	UG-2	58.84	32	112.351	161.423	164.167	0	164.167
16	1.32491	315.757	UG-2	58.84	32	114.338	164.277	168.734	0	168.734
17	1.32491	340.16	UG-2	58.84	32	122.305	175.724	187.054	0	187.054
18	1.32491	363.181	UG-2	58.84	32	130.037	186.833	204.832	0	204.832
19	1.32491	384.035	UG-2	58.84	32	137.308	197.28	221.55	0	221.55
20	1.32491	354.373	UG-2	58.84	32	130.889	188.058	206.792	0	206.792
21	1.32491	292.819	UG-2	58.84	32	115.437	165.857	171.264	0	171.264
22	1.32491	229.927	UG-2	58.84	32	99.1958	142.522	133.919	0	133.919
23	1.32491	165.739	UG-2	58.84	32	82.1732	118.064	94.778	0	94.778
24	1.32491	100.296	UG-2	58.84	32	64.3761	92.4936	53.857	0	53.857
25	1.32491	33.6328	UG-2	58.84	32	45.8079	65.8154	11.163	0	11.163

FALLA ROTACIONAL:
CONDICIÓN DINÁMICA CON ABATIMIENTO, SOFTWARE SLIDE

Material Properties

Property	UG-2
Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight [kN/m3]	23.73
Cohesion [kPa]	58.84
Friction Angle [deg]	32
Water Surface	Water Table
Hu Value	0

Global Minimums
Method: bishop simplified
FS: 1.314400
Center: 51.616, 56.208
Radius: 53.320
Left Slip Surface Endpoint: 3.312, 33.630
Right Slip Surface Endpoint: 36.434, 5.095
Resisting Moment=327112 kN-m
Driving Moment=248868 kN-m

Slice Data
Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.3144

Slice Number	*Width [m]*	*Weight [kN]*	*Base Material*	*Base Cohesion [kPa]*	*Base Friction Angle [degrees]*	*Shear Stress [kPa]*	*Shear Strength [kPa]*	*Base Normal Stress [kPa]*	*Pore Pressure [kPa]*	*Effective Normal Stress [kPa]*
1	1.32491	59.3689	UG-2	58.84	32	33.9457	44.6182	-22.7597	0	-22.7597
2	1.32491	164.783	UG-2	58.84	32	56.6675	74.4837	25.0351	0	25.0351
3	1.32491	247.077	UG-2	58.84	32	76.3683	100.379	66.4755	0	66.4755
4	1.32491	321.118	UG-2	58.84	32	95.3492	125.327	106.401	0	106.401
5	1.32491	344.41	UG-2	58.84	32	103.88	136.541	124.347	0	124.347
6	1.32491	355.07	UG-2	58.84	32	109.539	143.978	136.249	0	136.249
7	1.32491	361.73	UG-2	58.84	32	114.135	150.02	145.918	0	145.918
8	1.32491	364.892	UG-2	58.84	32	117.755	154.778	153.532	0	153.532
9	1.32491	364.947	UG-2	58.84	32	120.468	158.343	159.237	0	159.237
10	1.32491	362.209	UG-2	58.84	32	122.33	160.79	163.154	0	163.154
11	1.32491	356.934	UG-2	58.84	32	123.389	162.183	165.383	0	165.383
12	1.32491	349.331	UG-2	58.84	32	123.686	162.573	166.008	0	166.008
13	1.32491	339.579	UG-2	58.84	32	123.255	162.006	165.1	0	165.1
14	1.32491	327.827	UG-2	58.84	32	122.123	160.519	162.72	0	162.72
15	1.32491	314.203	UG-2	58.84	32	120.316	158.144	158.919	0	158.919
16	1.32491	315.757	UG-2	58.84	32	122.567	161.102	163.654	0	163.654
17	1.32491	340.16	UG-2	58.84	32	131.238	172.499	181.892	0	181.892
18	1.32491	363.181	UG-2	58.84	32	139.669	183.581	199.628	0	199.628
19	1.32491	384.035	UG-2	58.84	32	147.619	194.031	216.35	0	216.35
20	1.32491	354.373	UG-2	58.84	32	140.851	185.134	202.113	0	202.113
21	1.32491	292.819	UG-2	58.84	32	124.337	163.429	167.377	0	167.377
22	1.32491	229.927	UG-2	58.84	32	106.941	140.563	130.784	0	130.784
23	1.32491	165.739	UG-2	58.84	32	88.6693	116.547	92.3506	0	92.3506
24	1.32491	100.296	UG-2	58.84	32	69.5277	91.3872	52.0864	0	52.0864
25	1.32491	33.6328	UG-2	58.84	32	49.518	65.0864	9.99642	0	9.99642

FALLA ROTACIONAL:
CONDICIÓN SATURADA CON ABATIMIENTO, SOFTWARE SLIDE

Material Properties

Property	UG-2
Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight [kN/m3]	23.73
Cohesion [kPa]	58.84
Friction Angle [deg]	32
Water Surface	Water Table
Hu Value	0

Global Minimums
Method: bishop simplified
FS: 1.153930
Center: 46.614, 48.745
Radius: 45.056
Left Slip Surface Endpoint: 3.963, 34.223
Right Slip Surface Endpoint: 36.576, 4.822
Resisting Moment=235844 kN-m
Driving Moment=204383 kN-m

Slice Data
Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 1.15393

Slice Number	*Width [m]*	*Weight [kN]*	*Base Material*	*Base Cohesion [kPa]*	*Base Friction Angle [degrees]*	*Shear Stress [kPa]*	*Shear Strength [kPa]*	*Base Normal Stress [kPa]*	*Pore Pressure [kPa]*	*Effective Normal Stress [kPa]*
1	1.30454	66.2783	UG-2	58.84	32	30.3032	34.9678	-27.586	10.6175	-38.2035
2	1.30454	178.815	UG-2	58.84	32	51.3282	59.2292	28.8791	28.2563	0.622846
3	1.30454	273.882	UG-2	58.84	32	71.4348	82.4308	81.2462	43.4932	37.753
4	1.30454	334.553	UG-2	58.84	32	86.7905	100.15	119.165	53.0546	66.1101
5	1.30454	355.011	UG-2	58.84	32	95.1246	109.767	137.751	56.2502	81.5005
6	1.30454	369.002	UG-2	58.84	32	102.002	117.703	152.667	58.4671	94.2003
7	1.30454	377.938	UG-2	58.84	32	107.661	124.233	164.533	59.883	104.65
8	1.30454	382.609	UG-2	58.84	32	112.23	129.506	173.712	60.6231	113.089
9	1.30454	383.599	UG-2	58.84	32	115.811	133.638	180.481	60.7799	119.701
10	1.30454	381.352	UG-2	58.84	32	118.48	136.718	185.055	60.4239	124.631
11	1.30454	376.216	UG-2	58.84	32	120.301	138.819	187.604	59.6101	127.993
12	1.30454	368.47	UG-2	58.84	32	121.325	140	188.266	58.3828	129.883
13	1.30454	358.34	UG-2	58.84	32	121.591	140.308	187.154	56.7778	130.376
14	1.30454	346.014	UG-2	58.84	32	121.135	139.781	184.358	54.8247	129.533
15	1.30454	332.198	UG-2	58.84	32	120.154	138.649	180.27	52.5485	127.722
16	1.30454	342.229	UG-2	58.84	32	124.907	144.134	190.724	54.225	136.499
17	1.30454	364.544	UG-2	58.84	32	132.882	153.337	208.987	57.7607	151.227
18	1.30454	385.159	UG-2	58.84	32	140.577	162.216	226.464	61.027	165.437
19	1.30454	399.864	UG-2	58.84	32	146.563	169.124	240.528	64.0372	176.49
20	1.30454	356.876	UG-2	58.84	32	137.72	158.919	216.706	56.5458	160.16
21	1.30454	295.064	UG-2	58.84	32	123.043	141.983	179.807	46.7518	133.056
22	1.30454	231.822	UG-2	58.84	32	107.425	123.96	140.946	36.7313	104.214
23	1.30454	167.198	UG-2	58.84	32	90.8673	104.855	100.13	26.4918	73.6384
24	1.30454	101.232	UG-2	58.84	32	73.3681	84.6616	57.363	16.0398	41.3232
25	1.30454	33.9589	UG-2	58.84	32	54.9197	63.3735	12.6357	5.38067	7.25507

BIBLIOGRAFIA

- Añazco, L. (2017). *Caracterización geomecánica y diseño de taludes en la cantera Calizas Huayco* [Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica del Litoral].

- Ayala, F. J., Andreu, F. J., Fe, M., Ferrer, M., De Simón, A., Fernández, I., Olalla, C., Gómez, J., Sampedro, J., & Cienfuegos, F. J. (1987). *Manual de taludes*. Instituto Geológico y Minero de España.

- Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics, 6*(4), 189–236. https://doi.org/10.1007/BF01239496

- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons. https://es.scribd.com/document/487507068/Bieniawski-1989-Engineering-Rock-Mass-Classifications

- Blanco, R., Cartaya, M., & Watson, R. (2000). Criterios para estimar la resistencia en macizos rocosos de la zona oriental del país. *Minería y Geología, 16*(2), 37. https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/28

- Ccente, B. C. G. (2015, 30 de septiembre). *Clasificación Q de Barton* [Diapositivas]. SlideShare. https://es.slideshare.net/slideshow/clasificacion-q-barton/53355835

- Coates, D. F. (1970). *Fundamentos de mecánica de rocas* (3.ª ed.). Blume.

- Comisión Federal de Electricidad. (2015). *Manual de diseño de obras civiles: Capítulo C.1.3. Diseño por sismo*.

- Cruz, A. (2019). *Introducción a la geotecnia*. MORLIS.

- Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (s. f.). *Criterios de rotura y clasificaciones geomecánicas*. Universitat Politècnica de Catalunya. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6529/06.pdf

- García Sánchez, F. (2013). *Análisis retrospectivo para la determinación de las propiedades geomecánicas y revisión de la estabilidad del talud izquierdo del vertedor de la C. H. La Yesca* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México].

- Garzón Roca, J., & Torrijo Echarri, F. J. (2018). *Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por rotura cuneiforme*. Universitat Politècnica de València. https://riunet.upv.es/handle/10251/103669

- Geotecnia Fácil. (2019, 15 de noviembre). *Índice de resistencia geológica GSI (Geological Strength Index)*. https://geotecniafacil.com/gsi-indice-resistencia-geologica/

- Geotecnia Fácil. (2021, 13 de noviembre). *Clasificación geomecánica: Índice Q de Barton. ¿Para qué sirve y cómo calcularlo?* https://geotecniafacil.com/clasificacion-geomecanica-indice-q-barton/

- Geotecnia Fácil. (2022, 18 de febrero). *Clasificación geomecánica de Bieniawski: Cálculo en línea del RMR*. https://geotecniafacil.com/clasificacion-geomecanica-rmr-bieniawski-1989/

- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Pearson Educación. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%202.pdf

- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics*. John Wiley & Sons.

- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering* (3rd ed.). Institution of Mining and Metallurgy.

- Melentijevic, S. (2005). *Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de

Madrid]. Archivo Digital UPM. https://oa.upm.es/722/1/04200507.pdf

- Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. Red DESIR. https://oa.upm.es/14183/

- Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/662_19MemExPl_373_Las_Acacias/Documento/pdf/Anexo1_InveRecoBibl/Su%C3%A1rez%20(1998).%20Deslizamientos%20y%20estabilidad%20de%20taludes%20en%20zonas%20tropicales.pdf

- Valiente Sanz, R., Sobrecases Martí, S., & Díaz Orrego, A. (2016). Estabilidad de taludes: Conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo. *Civilízate*, (7), 50–54. https://riunet.upv.es/handle/10251/76781

- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock slope engineering: Civil and mining* (4th ed.). Spon Press.