**FACULTAD DE HÁBITAT, INFRAESTRUCTURA Y CREATIVIDAD**

**Maestría en Geotecnia Aplicada – Segunda Cohorte**

Proyecto de Titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

# Tema: "Análisis de las cavidades de agua en roca y su afección a la cimentación, en el Santuario de la Virgen del Rocío en la ciudad de Biblián, propuesta de solución"

**Autor:** Ing. Sandra Paola Cabrera Medina

**Director:** Ing. Alejandro Irigoyen

Marzo 2026

## Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi tutor Ingeniero Alejandro Irigoyen, por su valiosa orientación, paciencia y dedicación durante el desarrollo de este trabajo de titulación. Sus conocimientos y observaciones me dieren los fundamentos para culminar de forma satisfactoria esta investigación.

De igual manera, deseo agradecer a mi colega y amigo Ingeniero Byron Cordovillo, quien me brindó su apoyo, compartió sus conocimientos y me acompaño durante este proceso académico.

Finalmente agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo y culminación de esta etapa tan importante de mi formación profesional.

## Dedicatoria

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi amado esposo, Fernando, por su amor, apoyo incondicional, paciencia y comprensión durante mi etapa de estudios y a lo largo del desarrollo de este trabajo. Su compañía y confianza fueron fundamentales para alcanzar esta meta.

A mis queridos padres, Fernando y Sandra, por su esfuerzo, sacrificio y apoyo constante en cada paso de este importante ciclo de mi vida. Gracias por creer siempre en mí y por impulsarme a perseguir mis sueños.

A mis hermanos, Luis Fernando y María Dolores, quienes con su ejemplo, cariño y motivación me inspiran cada día a ser una mejor persona y a seguir creciendo tanto personal como profesionalmente.

A mi adorado sobrino, José Julián, quien, a pesar de su corta edad, se ha convertido en una fuente de alegría, inspiración y fortaleza, siendo uno de los motores que me impulsa a seguir adelante.

A mis queridos abuelos, José Luis, Ana Luisa y Esthela, por sus sabios consejos, su amor incondicional y la ternura con la que siempre han guiado mis pasos a lo largo de mi vida.

Y, sobre todo, a Dios, por bendecirme con la fortaleza, la sabiduría y la oportunidad de alcanzar un logro más en mi vida, permitiéndome culminar esta importante etapa con éxito.

Con profundo amor y gratitud, dedico este trabajo a todos ustedes.

Índice de contenido

Resumen....XI

Abstract....XII

Introducción....1

Antecedentes....2

Planteamiento del problema....4

Justificación....4

Objetivos....5

Objetivo General....5

Objetivo Específico....5

Pregunta de investigación....6

Hipótesis....6

Capítulo 1 Fundamentos teóricos....7

Estado del arte....7

Marco Teórico....8

Suelo....8

Los suelos cohesivos y no cohesivos....9

Suelos normalmente consolidado y preconsolidados....9

Orígenes y procesos de formación del suelo....10

Marco conceptual....35

Capítulo 2 Metodología....40

Enfoque de la investigación....40

Tipo de investigación ..... 40

Diseño de la investigación ..... 40

Método de investigación ..... 41

Técnicas e instrumentos de investigación ..... 41

Procedimiento metodológico ..... 42

Análisis de estabilidad de taludes ..... 42

Evaluación del Impacto en la Cimentación ..... 44

Capítulo 3 Desarrollo ..... 46

*Determinación de parámetros geomecánicos* ..... 46

Análisis de Estabilidad de Talud ..... 49

Talud 0+000 ..... 52

Talud 0+015 ..... 53

Talud 0+030 ..... 54

Talud 0+045 ..... 55

Talud 0+060 ..... 56

Talud 0+075 ..... 58

Talud 0+090 ..... 58

Talud 0+105 ..... 59

Capítulo 4 Análisis de Resultados ..... 80

Interpretación de Resultados ..... 80

Implicaciones de los Resultados ..... 81

Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones ..... 83

Conclusiones ..... 83

Recomendaciones ..... 84

Recomendaciones para la Práctica ..... 84

Recomendaciones para Políticas y Normativas ..... 85

Recomendaciones para Futuras Investigaciones ..... 85

Bibliografía ..... 87

Apéndices ..... 91

Apéndice 1. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+000 ..... 91

Apéndice 2. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+015 ..... 91

Apéndice 3. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+030 ..... 92

Apéndice 4. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+045 ..... 92

Apéndice 5. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+060 ..... 93

Apéndice 6. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+075 ..... 93

Apéndice 7. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+090 ..... 94

Apéndice 8. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+105 ..... 94

Apéndice 9. Evaluación de inestabilidad 0+000 ..... 95

Apéndice 10. Evaluación de inestabilidad 0+015 ..... 95

Apéndice 11. Evaluación de inestabilidad 0+030 ..... 96

Apéndice 12. Evaluación de inestabilidad 0+045 ..... 96

Apéndice 13. Evaluación de inestabilidad 0+060 ..... 97

Apéndice 14. Evaluación de inestabilidad 0+075 ..... 97

Apéndice 15. Evaluación de inestabilidad 0+090 ..... 98

Apéndice 16. Evaluación de inestabilidad 0+105 ..... 98

Apéndice 17. Cálculo de muro de pie (abscisa 0+000) ..... 99

Apéndice 18. Formulario de detección visual rápida de vulnerabilidad sísmica para edificaciones de la zona de estudio ..... 101

Apéndice 19. Informe de Evaluación de la cimentación ..... 102

Apéndice 20. Plan de monitoreo ..... 112

Anexos ..... 118

Anexo 1. Recomendación de corte en taludes (MOP boletín técnico N° 002-82) ..... 118

Anexo 2. Ficha Técnica de geomanto reforzado ..... 119

Anexo 3. C11.9.4.2-3 Presumptive Ultimate Unit Bond Stress for Anchors in Rock ..... 120

Anexo 4. Tabla 11.5.7-1 Resistance Factors for Permanent Retaining Walls ..... 120

Anexo 5. 11.9.4.2 Anchor Pullout Capacity ..... 121

# Índice de Figuras

**Figura 1** Tipos de falla en los taludes ..... 27

**Figura 2** Diagrama de la relación causal agua y la resistencia mecánica..... 39

**Figura 3** Puntos de estudio en el talud en la zona de estudio..... 44

**Figura 4** *Fotografía de parte del talud de la zona de estudio*..... 47

**Figura 5** Índice de resistencia del macizo rocoso (GSI) ..... 47

**Figura 6** Parámetros geomecánicos con RocData..... 48

**Figura 7** Evaluación de inestabilidad tramo 0+000 a 0+105 ..... 49

**Figura 8** Talud tramo 0+000 altamente meteorizado..... 53

**Figura 9** Talud 0+015 con presencia de roca altamente meteorizada, fracturas irregulares y cavidades generadas por procesos de erosión.. ..... 54

**Figura 10** Talud 0+030 con macizo rocoso altamente fracturado y evidencia de intersección de discontinuidades..... 55

**Figura 11** alud 0+045 conformado por material coluvial con evidencia de procesos de erosión y deslizamientos superficiales..... 56

**Figura 12** Talud 0+060 con presencia de fracturamiento del macizo rocoso y filtraciones de agua a través de discontinuidades. ..... 57

**Figura 13** Talud 0+075 con fracturamiento intenso del macizo rocoso y evidencia de caída de pequeños bloques. ..... 58

**Figura 14** Talud 0+090 con macizo rocoso fracturado y evidencia de procesos de infiltración de agua. ..... 59

**Figura 15** *Talud 0+105 con fracturamiento del macizo rocoso y presencia permanente de humedad.* ..... 60

**Figura 16** *Especificaciones técnicas para estudios geotécnicos de estabilidad de taludes (Andesita Fracturada)*..... 63

**Figura 17** *Geometría del talud 0+000 con el corte en terrazas*..... 63

**Figura 18** *Cálculo de factor de seguridad con la nueva geometría 0+000* ..... 64

**Figura 19** *Diseño de muro de pie* ..... 65

**Figura 20** *Cálculos de dimensionamiento de anclajes y comprobación de factor de seguridad 0+015* ..... 66

**Figura 21** *Geometría del talud 0+030 con el corte en terrazas* ..... 67

**Figura 22** *Cálculo de factor de seguridad con la nueva geometría 0+030* ..... 67

**Figura 23** *Especificaciones técnicas para estudios geotécnicos de estabilidad de taludes (Arenas limosas y limos)* ..... 68

**Figura 24** *Geometría del talud 0+045 con el corte en terrazas* ..... 69

**Figura 25** *Cálculo de factor de seguridad con la nueva geometría 0+045* ..... 69

**Figura 26** *Cálculos de dimensionamiento de anclajes y comprobación de factor de seguridad 0+060* ..... 71

**Figura 27** *Cálculos de dimensionamiento de anclajes y comprobación de factor de seguridad 0+090* ..... 73

**Figura 28** *Secciones modelo para cunetas* ..... 75

**Figura 29** *Sección tipo para dren francés* ..... 75

**Figura 30** *Interacción columna-roca* ..... 78

**Figura 31** *Capacidad portante admisible* ..... 107

# Índice de tabla

**Tabla 1** Características de la meteorización física, química y biológica..... 11

**Tabla 2** Investigaciones in situ aplicadas al análisis de la estabilidad ..... 24

**Tabla 3** Influencia de factores geométricos en el factor de seguridad ..... 25

**Tabla 4** Influencia hidrogeológica en la estabilidad de los taludes..... 26

**Tabla 5** Comparación de métodos de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes ..... 30

**Tabla 6** Parámetros geomecánicos estimados del macizo rocoso mediante el criterio de Hoek-Brown ..... 48

**Tabla 7** Resultados del análisis de estabilidad de taludes mediante modelación geomecánica ..... 50

**Tabla 8** Parámetros iniciales para diseño de anclajes talud 0+015 ..... 65

**Tabla 9** Parámetros iniciales para diseño de anclajes talud 0+060 ..... 70

**Tabla 10** Parámetros iniciales para diseño de anclajes talud 0+090 ..... 72

**Tabla 11** Características mínimas sugeridas Drenes de alivio ..... 74

**Tabla 12** Características mínimas sugeridas Dren francés en suelo..... 74

**Tabla 13** Características mínimas sugeridas Cuneta de coronación ..... 74

**Tabla 14** Características mínimas sugeridas Cuneta de coronación ..... 74

**Tabla 15** Técnicas de estabilización propuestas para el talud del Santuario de la Virgen del Rocío... 76

**Tabla 16** Parámetros geomecánicos estimados del macizo rocoso de fundación ..... 104

**Tabla 17** Instrumentación geotécnica propuesta y frecuencia de monitoreo ..... 114

**Tabla 18** Sistema de niveles de alerta para el monitoreo geotécnico y estructural ..... 116

**Tabla 19** Valores de referencia para la activación de niveles de alerta..... 117

## Resumen

La presencia de cavidades de agua en los macizos rocosos puede generar procesos de degradación geomecánica lo cual afecta a la estabilidad de los taludes y las condiciones de soporte, por ello la presente investigación tiene como objetivo desarrollar una estrategia integral para la estabilización del talud donde se encuentra el Santuario de la Virgen del Rocío de la ciudad de Biblián afectado por cavidades de agua y evaluar su impacto en la cimentación. Para ello se contempló el análisis de las condiciones geotécnicas e hidrológicas del sitio mediante el levantamiento de la información de campo, la caracterización de las discontinuidades del macizo rocoso y la determinación de los parámetros geomecánicos utilizando el criterio de Hoek-Brown; de igual forma se evaluaron los daños presentes en la cimentación de la edificación con el fin de determinar su relación con las condiciones geotécnicas del sitio. Los resultados evidencian que el macizo rocoso presenta un grado de meteorización, además de discontinuidades estructurales y cavidades asociadas a los procesos de infiltración de agua, factores que contribuyen a la inestabilidad potencial de los taludes y a la alteración de las condiciones de soporte de la roca. Con ello se plantea una propuesta con soluciones que incluyen medidas de estabilización del talud, control del agua mediante sistemas de drenaje, protección superficial y el plan de monitoreo geotécnico que permita gestionar el riesgo de forma preventiva.


Palabras claves: Cavidad de agua; cimentación en roca; estabilidad de taludes; macizo rocoso; monitoreo geotécnico.

## Abstract

The presence of water cavities in rock masses can trigger geomechanical degradation processes that affect slope stability and support conditions. Therefore, the objective of this research is to develop a comprehensive strategy for stabilizing the slope where the Santuario de la Virgen del Rocío in the city of Biblián is located, a site affected by water cavities and to evaluate their impact on the foundation. To this end, the geotechnical and hydrological conditions of the site were analyzed by collecting field data, characterizing the discontinuities in the rock mass, and determining the geomechanical parameters using the Hoek-Brown criterion; similarly, the damage present in the building's foundation was evaluated to determine its relationship with the site's geotechnical conditions. The results show that the rock mass exhibits a degree of weathering, as well as structural discontinuities and cavities associated with water infiltration processes and factors that contribute to the potential instability of the slopes and to changes in the rock's bearing capacity. Accordingly, a proposal is presented with solutions that include slope stabilization measures, water control through drainage systems, surface protection, and a geotechnical monitoring plan to enable preventive risk management.


Keywords: Water cavity; rock foundation; slope stability; rock mass; geotechnical monitoring.

## Introducción

El análisis de la estabilidad de taludes en roca es crucial en la investigación geotécnica, ya que la estabilidad de estos taludes depende de las condiciones particulares de cada sitio. Las condiciones adversas, como la presencia de cavidades de agua en la roca, pueden incrementar significativamente los riesgos asociados. Estas cavidades pueden formarse debido a procesos de erosión natural o actividades hidrogeológicas, debilitando la estructura de la roca. Lo que indica que existe una reducción en la cohesión y se produce un aumento de los riesgos en cuento a los deslizamientos y otros problemas.

El agua presente en las cavidades rocosas puede provocar alteraciones de manera natural al talud y con ello se promueve el proceso de disolución, en donde se debilita el material rocoso, especialmente por estar relacionado con ciclos de congelación y descongelación que produce una fracturación a la roca.

Cuando se construyen edificaciones sobre taludes inestables, el riesgo aumenta exponencialmente. La probabilidad de falla tanto del talud rocoso como de la cimentación de la estructura edificada sobre él se incrementa significativamente. Este contexto presenta un desafío considerable para la estabilidad del talud y la seguridad de la infraestructura en la zona.

Esta investigación busca realizar un análisis de las cavidades de agua en roca y su afección a la cimentación, en el Santuario de la Virgen del Rocío de la ciudad de Biblián, propuesta de solución, en este contexto se realizará una investigación in situ de las condiciones físicas del lugar, con la revisión de los estudios realizados previamente para determinar los parámetros necesarios para completar el análisis y con ello generar una propuesta de solución.

Esta propuesta busca desarrollar una estrategia integral para estabilizar el talud rocoso afectado y evaluar el impacto de la inestabilidad en la cimentación de una estructura existente. La propuesta se basa en una evaluación exhaustiva de las condiciones geotécnicas e

hidrogeológicas del sitio, así como del estado de la cimentación de la estructura construida sobre el talud.

## Antecedentes

La colina del Zhalao se encuentra ubicada en la ciudad de Biblián, provincia del Cañar a una altura de 2821 msnm, presenta una topografía irregular y es bastante conocida por su terreno rocoso. Geológicamente la zona se encuentra en el valle interandino el mismo que está rodeado por la cordillera andina con sus dos ramales, cordillera occidental y real; el desarrollo litoestratigráfico del sitio responde a los diferentes eventos metamórficos continentales, que han dado paso a la formación de grandes cuencas que han sido rellenadas por depósitos de materiales jóvenes específicamente se encuentra entre las formaciones Biblián y Loyola las cuales están conformadas litológicamente por materiales de origen volcánico, como piroclastos y rocas andesitas, depósitos aluviales como conglomerados, paquetes sedimentarios de tipo arcilloso, limoso y arenoso, aglomerados volcánicos, rocas sedimentarias carbonatadas y brechas sedimentarias, siendo estas las principales litologías que han sido identificadas en el sitio.

Esta zona alberga un talud de roca donde se encuentra construido el majestuoso Santuario de la Virgen del Rocío, una estructura con una arquitectura neogótica de imponente belleza y de enormes proporciones, fue construida enclavando en la roca, está constituida por tres naves en varios niveles y soportada por 49 columnas de piedra tallada unidas con mortero de cal, una hermosa y magnífica obra con más de cien años de historia, misma que ha sido declarada patrimonio cultural del Ecuador en el año 2007.

Dados los procesos geológicos producidos en más de un siglo se ha generado cierto movimiento en el talud de la zona de estudio, así como en la estructura que soporta, el cambio ha sido notable tanto por la acción antrópica cuanto por los procesos naturales propios de la

roca, sin embargo en los últimos diez años la situación se ha ido agravando presentando desprendimientos de roca, daños en paredes, escaleras, vías de acceso, etc., existen varias hipótesis en relación a los problemas presentados por lo que la municipalidad del cantón Biblián ha generado algunos proyectos de estudio para detectar las anomalías principales y como se puedan solventar para salvaguardar la integridad de esta joya arquitectónica.

De las investigaciones geofísicas y geotécnicas del sitio se ha revelado que se han producido eventos anteriores, de forma paulatina como deslizamientos, colapsos parciales, en el pasado, lo que sugiere que el talud ya es susceptible a problemas de estabilidad. Los estudios realizados muestran que la roca presenta un alto grado de meteorización y un aspecto crítico que agrava los desafíos de estabilización en este sitio es la presencia de cavidades de agua, localizadas en las grietas de la roca. Estas cavidades, han sido identificadas mediante métodos de detección, como perforaciones, estudios sísmicos y análisis geofísicos, mostrando que existen varios y abundantes flujos de agua superficial y subterránea que naturalmente genera disgregación del material haciéndolo susceptible a la erosión y deslizamiento, reduciendo la capacidad de carga del terreno y comprometiendo su integridad.

A pesar de los estudios realizados en la zona aún no se han generado medidas de estabilización y por el contrario sólo han sido ejecutados correctivos en la estructura que solo muestran una solución temporal a los daños mostrados, en este contexto el avance del movimiento cada vez es más evidente y acelerado por cuanto es urgente generar una propuesta de estabilización eficaz que prevenga de un posible desastre que resulte en la pérdida total del sitio.

El presente estudio tiene como finalidad analizar el impacto de las cavidades de agua en la estabilidad del talud y en la cimentación de la estructura proyectada; para ello se evaluara los métodos de estabilización adaptados a las condiciones geológicas; además del desarrollo

de estrategias para aminorar y eliminar los riesgos asociados con las cavidades de agua; con ello este estudio es crucial para asegurar la estabilidad y la seguridad de la estructura presente, así como implementar de estrategias importantes para la gestión de los riesgos en terrenos similares dentro de la región. La investigación proporcionará información valiosa para diseñar soluciones de ingeniería más efectivas y para establecer directrices que puedan aplicarse en futuros proyectos en áreas con características geotécnicas similares.

## Planteamiento del problema

El Santuario de la Virgen del Rocío, es una construcción cimentada directamente sobre un talud de roca en el cerro del Zhalao y es considerado patrimonio cultural, a lo largo de la vida de esta construcción se ha evidenciado problemáticas que han puesto en riesgo al bien, por cuanto se ha generado algunos estudios hidrogeológicos y geotécnicos, determinando que dentro de la roca existen cavidades de agua que ponen en riesgo a toda la estructura sin embargo no se ha hecho un análisis de cómo esta intrusión del agua puede haber afectado la cimentación de la edificación y a su vez del talud propiamente.

## Justificación

La estabilidad de taludes rocosos es un aspecto crítico en la ingeniería geotécnica, especialmente cuando se construye una estructura sobre ellos. Los taludes, se forman de manera natural o son productos de excavaciones antropogénicas, los cuales pueden presentar riegos de deslizamiento o colapso no gestionado de manera adecuada.

Para la estabilización de los taludes se utilizan diferentes técnicas en el ámbito de la ingeniería, comprendido por los anclajes, refuerzos o sistemas de drenaje, que tienen la necesidad de proporcionar un soporte en el terreno para las cargas constructivas. Sin embargo, uno de los factores críticos que se puede presentar es agua en las cavidades lo que puede comprometer la integridad estructural de las edificaciones y de la infraestructura construida en

el talud. Las deformaciones en la cimentación pueden conducir a problemas como asentamientos diferenciales, fisuración en las estructuras, e incluso colapsos parciales. Estos problemas no solo afectan la seguridad de los ocupantes, sino que también pueden resultar en costosas reparaciones y pérdidas económicas significativas, es fundamental evaluar y gestionar el impacto para prevenir fallos estructurales y garantizar la seguridad a largo plazo.

Para el caso puntual de este estudio el Santuario de la Virgen del Rocío es patrimonio cultural y arquitectónico del Ecuador y desde el punto de vista al ser de interés nacional, también lo es la inversión de todo tipo de proyectos para generar dichas soluciones, por lo que es necesario hacer un análisis técnico especializado, que permita relacionar los estudios previos con la propuesta de estabilización y que de hecho a partir de este se pueden derivar investigaciones posteriores que la completen.

## Objetivos

### Objetivo General

Desarrollar una estrategia integral para la estabilización del talud donde se encuentra el Santuario de la Virgen del Rocío de la ciudad de Biblián afectado por cavidades de agua y evaluar su impacto en la cimentación.

### Objetivo Específico

- Analizar las condiciones geotécnicas e hidrogeológicas del sitio
- Analizar la estabilidad del talud donde se cimentó la edificación
- Analizar los daños presentados en la cimentación de la edificación debidos a la problemática
- Generar una propuesta de solución con la evaluación de los daños

**Pregunta de investigación**

¿Cuáles son los principales factores hidrogeológicos y geotécnicos que contribuyen a la inestabilidad del talud rocoso en el sitio de estudio?

¿Cómo afectan las cavidades de agua dentro de la roca a la cohesión y resistencia del talud rocoso?

¿Qué técnicas de estabilización resultan más efectivas para mejorar la estabilidad de taludes rocosos afectados por cavidades de agua?

¿Cómo ha sido afectada la cimentación de la estructura construida sobre el talud debido a la inestabilidad del terreno?

**Hipótesis**

Las cavidades de agua dentro de una roca pueden afectar significativamente sus propiedades físicas y, en consecuencia, reducir su resistencia. Esta disminución en la resistencia puede tener un impacto directo en la estabilidad de las construcciones ubicadas en este estrato, las investigaciones previas han demostrado la presencia de fracturas en la roca, junto con la acumulación de agua.

Las fracturas permiten que el agua se infiltre y acumule, lo que no solo altera la presión intersticial dentro del material, sino que también facilita la erosión y el debilitamiento de la roca circundante. Estos cambios en la estructura física de la roca pueden conducir a graduales colapsos, lo que puede ser la principal causa de los daños presentados en la edificación.

# Capítulo 1 Fundamentos teóricos

## Estado del arte

En la zona de estudio, las investigaciones geofísicas y geotécnicas disponibles son limitadas y corresponden principalmente a estudios técnicos realizados por el Gobierno Autónomo Descentralizado de la ciudad de Biblián, con el propósito de evaluar las condiciones geológicas y la estabilidad del talud presente en el área. Estos estudios han permitido identificar antecedentes de inestabilidad en el sitio, evidenciados mediante la ocurrencia de eventos progresivos como deslizamientos y colapsos parciales registrados en el pasado, lo que sugiere que el talud presenta una susceptibilidad natural a problemas de estabilidad.

Los análisis efectuados en el área indican que el macizo rocoso presenta un alto grado de meteorización, condición que influye directamente en la disminución de sus propiedades mecánicas y en la resistencia estructural del material. Este proceso de alteración contribuye a la degradación progresiva de la roca, haciéndola más vulnerable a la acción de factores externos que pueden favorecer la ocurrencia de procesos de inestabilidad.

Asimismo, uno de los factores que agrava la problemática corresponde a la presencia de cavidades y fracturas en la roca, las cuales favorecen la acumulación y circulación de agua en el interior del macizo rocoso. A través de diferentes métodos de exploración, entre los que se incluyen perforaciones, estudios sísmicos y análisis geofísicos, se ha logrado identificar la existencia de múltiples cavidades y flujos de agua tanto superficial como subterránea.

La presencia de estos flujos hídricos contribuye a procesos de disgregación del material rocoso y del suelo circundante, incrementando la susceptibilidad del terreno a fenómenos de erosión y deslizamiento. De igual manera, la infiltración de agua en las discontinuidades del macizo rocoso puede provocar la reducción de la resistencia del material y disminuir la capacidad de carga del terreno, comprometiendo la estabilidad general del talud.

A pesar de los estudios técnicos realizados en la zona por parte de las entidades gubernamentales, las intervenciones ejecutadas hasta el momento se han enfocado principalmente en la aplicación de medidas correctivas sobre las estructuras afectadas. Estas acciones han representado soluciones de carácter temporal frente a los daños observados, sin abordar de manera integral las condiciones geotécnicas que generan la inestabilidad del terreno.

En consecuencia, el avance progresivo del movimiento del terreno continúa evidenciándose en el área de estudio, lo que pone de manifiesto la necesidad de desarrollar propuestas de estabilización más eficaces que permitan mitigar los riesgos asociados a posibles eventos de deslizamiento. Cabe destacar que, hasta la fecha, no se han identificado estudios académicos o investigaciones científicas adicionales que aborden de manera específica la problemática geotécnica de este sitio, lo que evidencia un vacío en la literatura técnica y resalta la importancia de desarrollar investigaciones orientadas al análisis y propuesta de soluciones para la estabilización del área.

## Marco Teórico

### *Suelo*

El suelo se comprende como un material que se forma de manera natural, en un medio esencialmente discontinuo, multifase, disgregable y que mantiene una calidad no controlada especialmente cuando se habla de las características geotécnicas de los materiales de una zona. También se lo conoce como un depósito que se encuentra formado por partículas minerales y orgánicas que se encuentran en una superficie terrestre (Das & Sobhan, 2022).

El suelo también se entiende como un cuerpo natural heterogéneo que se ha consolidado de varios procesos en donde las partículas sólidas se han ido sufriendo alteraciones por acciones de otros agentes sean estos el agua, hielo o viento. Cabe mencionar que existe una diferencia bien marcada entre el suelo y la roca ya que los suelos poseen una cohesión y densidad

netamente inferior en comparación con la roca que es un mineral natural sólido con partículas enlazadas fuertemente que presentan grandes masas (Zhu, Peng, Liu, Jiang, & Guo, 2020).

La mecánica de los suelos y conocer sus características suministra de herramientas necesarias para evaluar cómo las propiedades tales como la permeabilidad, compresibilidad, las deformaciones son producidas por fuerzas impuestas al suelo por ello es importante conocer la resistencia y las deformabilidades del suelo (Budhu, 2021). Es de importancia establecer que los suelos se clasifican según su granulometría y su plasticidad, sin embargo, se debe considerar desde su punto de vista en cuanto a la resistencia como los son:

### *Los suelos cohesivos y no cohesivos*

Los suelos cohesivos mantienen características muy marcadas en cuanto a su plasticidad y pueden llegar a ser granulares con una parte de arcilla y limo orgánico en su composición. Cuentas con partículas de arcilla en tamaños como 0.002 mm, haciendo que el corte en este tipo de suelos tenga una complejidad muy marcada, haciendo que su volumen sea mayor a cualquier otro suelo, por ende, cuando ocurre un corte y esta carga es retirada, las fuerzas de las superficies impiden su retorno a la situación anterior dando paso a la cohesión del suelo (Zhu, Peng, Liu, Jiang, & Guo, 2020).

### *Suelos normalmente consolidado y preconsolidados*

Un suelo que se considera consolidado llega a soportar una mayor presión efectiva que la que ha soportado durante toda su existencia; en cambio los suelos sobre consolidados presentan mejores condiciones desde el punto de vista de su funcionalidad; sin embargo, su nombre sus características figuran cuando estos suelos en la actualidad soportan menos esfuerzo que en tiempos anteriores (Boning & Xie, 2013).

### *Orígenes y procesos de formación del suelo*

El suelo se considera un cuerpo natural con formaciones dinámicas que se forman a partir de interacciones prolongadas entre el material parental, el clima, los organismos vivos, el relieve y el tiempo. Estos factores, conocidos como formadores controlan esta evolución y con ello sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Desde el enfoque edáfico el suelo es simplemente conocido como un material suelto sobre la roca, que además se encuentra compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua y aire, cuya estructura se desarrolla progresivamente mediante procesos pedogenéticos (FAO, 2022).

La formación de los suelos comienza con la meteorización de la roca madre, en donde se desintegra y se altera bajo acciones de los agentes físicos, químicos y biológicos; cabe recalcar que la roca y el suelo tienen diferencias significativas, debido a que la roca presenta cohesión estructural fuerte, mientras que el suelo es el producto de la degradación progresiva de los minerales. De acuerdo a las investigaciones realizadas como la de Brady y Weil (2021) la meteorización física es un proceso que comprende procesos como la expansión térmica, la acción del hielo y deshielo los cuales tiene la acción de fragmentación de la roca sin alterar su composición, al contrario de la meteorización química que implica en las transformaciones mediante hidrólisis, oxidación, carbonatación que influyen en la plasticidad y la capacidad de intercambio catiónico.

La combinación de estos mecanismos más la meteorización biológica que resulta de la acción de las raíces, microorganismos y la fauna del lugar (ver tabla 1); logran el desarrollo del perfil del suelo, caracterizado por horizontes con propiedades físicas y químicas, la evolución del perfil edáfico responde a las condiciones ambientales específicas y pueden tardar cientos hasta miles de años para su aparición (Bayu & Li, 2020).

**Tabla 1**

*Características de la meteorización física, química y biológica*

| Característica | Meteorización Física | Meteorización Química | Meteorización Biológica |
|---|---|---|---|
| **Definición** | Fragmentación mecánica de la roca sin cambio en su composición | Alteración mineralógica mediante reacciones químicas | Alteración producida por organismos vivos |
| **Cambio en composición** | No cambia | Sí cambia | Puede cambiar |
| **Agentes principales** | Temperatura, hielo, viento, agua | Agua, oxígeno, $CO_2$, ácidos | Raíces, bacterias, hongos, fauna |
| **Procesos típicos** | Expansión térmica, gelifracción, abrasión | Hidrólisis, oxidación, carbonatación, disolución | Excreción de ácidos orgánicos, presión radicular |
| **Producto resultante** | Fragmentos de menor tamaño | Formación de arcillas y minerales secundarios | Mezcla de fragmentación y alteración química |
| **Influencia geotécnica** | Genera suelos granulares | Favorece suelos cohesivos | Incrementa contenido orgánico |
| **Velocidad del proceso** | Rápida en climas extremos | Más lenta, depende del clima | Variable, depende de actividad biológica |

Nota: la tabla muestra cómo los procesos de meteorización influyen en la formación del suelo.

Fuente: (Dias, Brito, & Nunes, 2023; Brady & Weil, 2021).

**Roca:** “Sé que roca es un agregado natural de granos minerales unidos por grandes y permanentes fuerzas de cohesión” (Peck R., 2004)

## Clasificación de las rocas

Existen tres grandes grupos de rocas en las cuales se pueden clasificar y estas son rocas ígneas, rocas metamórficas y rocas sedimentarias.

"Las rocas ígneas se forman por el enfriamiento y la solidificación de material fundido, magma, proveniente del interior de la Tierra. Según el proceso de formación se clasifican en rocas ígneas intrusivas o plutónicas y rocas ígneas efusivas o volcánicas: las rocas ígneas intrusivas o plutónicas, son aquellas que se forman en zonas profundas de la corteza, bajo presiones que no permiten el escape de gases, presentan cristales grandes y bien formados. Las rocas ígneas efusivas o volcánicas se forman a partir del magma que fluye hacia la superficie terrestre a través de zonas de debilidad o que fue expulsado desde un volcán (Williams, et al., 1982).

Las rocas sedimentarias se pueden formar por la acumulación de sedimentos y partículas, que se forman por la meteorización de otras rocas, ya sean ígneas, metamórficas u otras sedimentarias, o por la acumulación de material de origen biológico, o por la contaminación de sustancias químicas. o bioquímicas, o por la combinación de todas las anteriores.

En cuanto a las rocas metamórficas, son aquellas que han sido sometidas a cambios de presión y temperatura, generalmente en profundidades relativamente grandes con respecto a la superficie, y que en estado sólido han tenido cambios en la mineralogía y las estructuras como respuesta a los diferentes. cambios físicos y químicos que conllevan los cambios de presión y temperatura." (Orozco W., Branch J. y Jiménez J, 2014)

## Meteorización de las rocas

La meteorización es el conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que provocan la desintegración y alteración de las rocas cuando estas se encuentran expuestas a las

condiciones ambientales de la superficie terrestre. Este proceso juega un papel fundamental en la transformación del material rocoso y en la modificación de sus propiedades físicas y mecánicas, lo que puede influir directamente en la estabilidad de los taludes naturales o artificiales (Selby, 1993).

La meteorización física se produce cuando la roca se fragmenta en partículas más pequeñas sin que exista un cambio significativo en su composición química. Este tipo de meteorización puede ser causado por variaciones de temperatura, ciclos de expansión y contracción, congelamiento y descongelamiento del agua, o por la acción mecánica de raíces y otros organismos (Summerfield, 1991).

Por otro lado, la meteorización química implica cambios en la composición mineralógica de la roca debido a reacciones químicas con el agua, el oxígeno o sustancias disueltas en el ambiente. Procesos como la oxidación, la disolución y la hidrólisis pueden provocar la alteración de los minerales que componen la roca, reduciendo su resistencia y favoreciendo su degradación (Blatt, Middleton & Murray, 1980).

La meteorización biológica también contribuye a la alteración de las rocas mediante la acción de organismos vivos, tales como plantas, microorganismos y animales, que pueden generar fracturas o acelerar procesos químicos de degradación. En conjunto, estos procesos contribuyen a debilitar progresivamente el macizo rocoso, generando fracturas, cavidades y zonas de menor resistencia que pueden favorecer la ocurrencia de fenómenos de inestabilidad en taludes (Selby, 1993).

**Macizo rocoso**

El macizo rocoso se define como el conjunto de rocas intactas y las discontinuidades que se encuentran presentes en un determinado volumen de la corteza terrestre. A diferencia de la roca intacta, que se refiere a una muestra individual de material rocoso, el macizo rocoso

incluye además todas las fracturas, fallas, diaclasas y planos de debilidad que influyen en su comportamiento geomecánico (Hoek & Brown, 1980).

El comportamiento del macizo rocoso depende tanto de las propiedades del material que lo compone como de la distribución, orientación y características de las discontinuidades presentes en su estructura. Estas discontinuidades pueden actuar como superficies de debilidad a lo largo de las cuales es posible que se produzcan desplazamientos o fallas cuando las condiciones de esfuerzo superan la resistencia del material (Goodman, 1989).

En estudios geotécnicos y de ingeniería geológica, el análisis del macizo rocoso resulta fundamental para evaluar la estabilidad de taludes, ya que las características estructurales del macizo determinan la forma en que el terreno responderá frente a factores como la gravedad, la infiltración de agua o las cargas externas (Wyllie & Mah, 2004).

Además, el grado de meteorización del macizo rocoso puede influir significativamente en su resistencia y en su capacidad para mantener condiciones estables, especialmente en zonas donde las fracturas permiten la circulación de agua o la acumulación de materiales sueltos (Hoek & Brown, 1980).

**Discontinuidades en macizos rocosos**

Las discontinuidades son superficies o planos de debilidad que interrumpen la continuidad del material rocoso dentro de un macizo. Estas estructuras pueden presentarse en forma de fracturas, diaclasas, fallas, planos de estratificación o juntas, y desempeñan un papel determinante en el comportamiento mecánico del macizo rocoso (Goodman, 1989).

Desde el punto de vista geotécnico, las discontinuidades influyen directamente en la resistencia y estabilidad del macizo rocoso, ya que pueden actuar como planos potenciales de deslizamiento. Las características de estas discontinuidades, tales como su orientación,

espaciamiento, rugosidad, apertura y relleno, condicionan la forma en que el macizo responde frente a esfuerzos externos (Hoek, Carranza-Torres & Corkum, 2002).

La presencia de múltiples discontinuidades puede favorecer la fragmentación del macizo rocoso en bloques de diferentes tamaños, lo que aumenta la susceptibilidad del terreno a fenómenos de inestabilidad. Asimismo, estas estructuras facilitan la infiltración y circulación de agua en el interior del macizo, lo que puede provocar una reducción de la resistencia al corte del material (Wyllie & Mah, 2004).

En el análisis de estabilidad de taludes rocosos, la identificación y caracterización de las discontinuidades es un aspecto fundamental, ya que permite determinar los posibles mecanismos de falla y evaluar los riesgos asociados a movimientos de masa (Goodman, 1989).

**Propiedades mecánicas de la roca**

Las propiedades mecánicas de la roca corresponden al conjunto de características que determinan la forma en que el material rocoso responde frente a la aplicación de fuerzas o esfuerzos. Estas propiedades son fundamentales en los estudios geotécnicos, ya que permiten evaluar la capacidad del macizo rocoso para resistir deformaciones o fallas (Jaeger, Cook & Zimmerman, 2007).

Entre las propiedades mecánicas más importantes se encuentra la resistencia a la compresión, que representa la capacidad de la roca para soportar cargas sin fracturarse. Otra propiedad relevante es la resistencia al corte, la cual describe la capacidad del material para resistir esfuerzos que tienden a provocar el deslizamiento de una masa de roca sobre otra (Goodman, 1989).

Asimismo, parámetros como la cohesión y el ángulo de fricción interna influyen directamente en la estabilidad del macizo rocoso, ya que determinan la resistencia al

deslizamiento a lo largo de planos de discontinuidad o superficies de falla. La cohesión representa la fuerza de unión entre las partículas del material, mientras que el ángulo de fricción interna está relacionado con la resistencia que ofrece el material al desplazamiento relativo entre sus componentes (Hoek & Brown, 1980).

La evaluación de estas propiedades permite comprender el comportamiento del macizo rocoso frente a diferentes condiciones de carga y factores ambientales, siendo un elemento clave para el análisis y diseño de soluciones de estabilización en taludes rocosos (Wyllie & Mah, 2004).

### Influencia del agua en macizos rocosos

La presencia de agua en el interior de los macizos rocosos constituye uno de los factores más importantes que influyen en su comportamiento geomecánico y en la estabilidad de los taludes. El agua puede infiltrarse a través de fracturas, diaclasas, fallas y otras discontinuidades presentes en la roca, generando cambios en las condiciones de esfuerzo del material y reduciendo su resistencia al corte (Wyllie & Mah, 2004).

Uno de los efectos más significativos de la presencia de agua en los macizos rocosos es el incremento de la presión de agua en los poros o discontinuidades, lo que puede disminuir las fuerzas efectivas que mantienen la estabilidad del material. Cuando el agua se acumula en grietas o cavidades dentro de la roca, puede generar presiones internas que favorecen el desplazamiento de bloques rocosos a lo largo de planos de debilidad (Hoek & Brown, 1980).

La meteorización química, especialmente en rocas volcánicas y sedimentarias, implica reacciones de disolución y alteración mineralógica que disminuyen la cohesión interna del material. La circulación de agua subterránea facilita la disolución de componentes solubles y el movimiento de partículas finas, creando vacíos y aumentando la porosidad secundaria (Ur Rahman, et al., 2023).

La erosión interna, se considera un mecanismo significativo en macizos fracturados con flujo concentrado, donde el arrastre de partículas finas causa un debilitamiento estructural gradual. Estos procesos, cuando se mantienen el tiempo suficiente, generan cavidades que afectan la distribución de esfuerzos en el talud (Pan, Wu, Zhao, & He, 2020).

**Criterio de Hoek–Brown para macizos rocosos**

El comportamiento mecánico de los macizos rocosos está fuertemente influenciado por la presencia de discontinuidades como diaclasas, fracturas y planos de estratificación, lo que genera una respuesta heterogénea y generalmente más débil que la de la roca intacta. En este contexto, el criterio de Hoek–Brown, desarrollado por Evert Hoek y E. T. Brown, constituye una herramienta fundamental para estimar la resistencia del macizo rocoso, ya que permite representar su comportamiento mediante una relación no lineal entre los esfuerzos principales (Hoek & Brown, 1980).

A diferencia de criterios lineales como Mohr–Coulomb, el modelo de Hoek–Brown incorpora parámetros que dependen de la calidad del macizo rocoso, principalmente a través del índice GSI (Geological Strength Index). Este índice permite considerar aspectos geológicos como el grado de fracturamiento, la estructura del macizo y las condiciones de las discontinuidades, proporcionando una estimación más realista de la resistencia global (Hoek et al., 2002). Esta capacidad de adaptación convierte al criterio en una herramienta ampliamente utilizada en el análisis de estabilidad de taludes, túneles y excavaciones en roca.

Otra ventaja importante del criterio es que permite obtener parámetros equivalentes de cohesión y ángulo de fricción, los cuales pueden emplearse en métodos tradicionales de equilibrio límite. Esto facilita su integración con normativas y procedimientos de diseño geotécnico, manteniendo al mismo tiempo una base más representativa del comportamiento real del macizo rocoso.

En el presente estudio, la aplicación del criterio de Hoek–Brown se justifica debido a la ausencia de ensayos triaxiales directos en el macizo rocoso. Ante esta limitación, se realizaron múltiples iteraciones del modelo utilizando parámetros representativos del macizo en la zona de estudio, ajustados mediante el índice GSI y propiedades de la roca intacta. Posteriormente, los resultados obtenidos fueron comparados con valores provenientes de estudios geotécnicos realizados en zonas cercanas con el mismo tipo de roca y condiciones geológicas similares. Esta comparación permitió verificar la coherencia de los resultados y validar la aplicabilidad del criterio para estimar la resistencia del macizo rocoso en el área analizada.

A pesar de sus ventajas, el criterio presenta ciertas limitaciones, como la dependencia de estimaciones empíricas del GSI y la necesidad de convertir la envolvente no lineal a parámetros equivalentes lineales en algunos análisis. Asimismo, el modelo considera el macizo como un medio continuo equivalente, por lo que no representa explícitamente la geometría individual de las discontinuidades. Por esta razón, su uso debe complementarse con herramientas de análisis estructural.

**Análisis estereográfico en mecánica de rocas**

El análisis estereográfico es una herramienta gráfica utilizada para representar y analizar la orientación espacial de discontinuidades en macizos rocosos. Mediante proyecciones sobre una esfera, este método permite transformar información tridimensional en un plano bidimensional, facilitando la evaluación de la relación geométrica entre las estructuras geológicas y la orientación del talud (Goodman, 1989).

En la práctica, las discontinuidades medidas en campo mediante rumbo y buzamiento se proyectan en un estereograma utilizando redes como la de Schmidt (área igual). Los planos pueden representarse mediante círculos máximos o, más comúnmente, mediante polos, lo que

permite identificar concentraciones de orientaciones y definir familias estructurales dentro del macizo rocoso. Esta representación constituye la base del análisis cinemático de estabilidad.

El análisis estereográfico permite evaluar la posibilidad geométrica de distintos mecanismos de falla, entre los cuales destacan la falla planar, la falla en cuña y la falla por volcamiento (toppling). Este análisis no determina directamente la estabilidad, sino que identifica si las condiciones geométricas permiten que ocurra un determinado tipo de falla.

**Falla planar**

Para que ocurra una falla planar, la discontinuidad debe cumplir tres condiciones fundamentales:

- Tener una dirección similar a la del talud.
- Presentar un buzamiento menor que el del talud.
- Tener un buzamiento mayor que el ángulo de fricción del material.

En el estereograma, esto se evalúa verificando si los polos de las discontinuidades se ubican dentro de la zona crítica delimitada por el ángulo de fricción y la orientación del talud. Si los polos caen dentro de esta región, existe posibilidad cinemática de deslizamiento planar.

**Falla en cuña**

La falla en cuña se produce por la intersección de dos planos de discontinuidad. El análisis consiste en: Representar ambos planos en el estereograma, determinar la línea de intersección entre ellos se realiza la evaluación de la orientación de dicha línea, para que exista posibilidad de falla se debe cumplir los siguientes parámetros:

- La línea de intersección debe orientarse hacia la cara libre del talud.
- Su buzamiento debe ser mayor que el ángulo de fricción.

- Debe ubicarse dentro de la zona de salida del talud.

Si estas condiciones se cumplen, el bloque definido por ambos planos puede deslizarse a lo largo de la línea de intersección.

**Falla por volcamiento**

La falla por volcamiento ocurre cuando bloques rocosos inclinados hacia el talud tienden a rotar hacia adelante. Este mecanismo se analiza en estereografía evaluando la orientación de los polos de las discontinuidades, siendo las principales condiciones:

- Las discontinuidades deben inclinarse en dirección opuesta al talud.
- Deben presentar buzamientos altos (cercanos a la vertical).
- Los polos deben ubicarse dentro de la zona de volcamiento definida en el estereograma.

En términos geométricos, se analiza si las discontinuidades generan bloques que pierden estabilidad por rotación en lugar de deslizamiento. Este tipo de falla es común en macizos con estructuras columnar o fuertemente inclinadas.

El análisis estereográfico constituye una etapa fundamental en el estudio de estabilidad de taludes rocosos, ya que permite identificar los mecanismos de falla potenciales antes de realizar análisis mecánicos más detallados. Sin embargo, debido a que no considera propiedades resistentes del material, debe complementarse con criterios como Hoek–Brown y métodos geotécnicos adicionales para obtener una evaluación completa de la estabilidad.

**Estabilidad de taludes rocosos**

La estabilidad de taludes rocosos es un aspecto fundamental en la ingeniería geotécnica y la ingeniería geológica, ya que está directamente relacionada con la seguridad de

infraestructuras y asentamientos ubicados en zonas montañosas o en áreas donde existen excavaciones en roca. Un talud se considera estable cuando las fuerzas resistentes del material superan o equilibran las fuerzas que tienden a provocar su desplazamiento, principalmente aquellas asociadas a la gravedad (Wyllie & Mah, 2004).

En macizos rocosos, la estabilidad del talud depende de diversos factores, entre los que se destacan las propiedades mecánicas de la roca, la orientación y características de las discontinuidades, el grado de meteorización del material, la presencia de agua y las condiciones geométricas del talud. Estos elementos determinan la forma en que el macizo rocoso responde frente a los esfuerzos generados por su propio peso y por factores externos (Hoek & Bray, 1981).

Uno de los aspectos más relevantes en el análisis de estabilidad de taludes rocosos es la relación entre la orientación del talud y la orientación de las discontinuidades presentes en el macizo. Cuando las discontinuidades se encuentran orientadas en dirección similar a la pendiente del talud, existe una mayor probabilidad de que se produzcan movimientos de masa a lo largo de estos planos de debilidad (Goodman, 1989).

Asimismo, la presencia de agua en las fracturas y cavidades del macizo rocoso puede reducir la resistencia al corte de los materiales, generando condiciones favorables para la ocurrencia de deslizamientos o desprendimientos de bloques rocosos. La infiltración de agua incrementa el peso del material y puede generar presiones internas que disminuyen la estabilidad del talud (Hoek & Brown, 1980).

Por estas razones, el estudio de la estabilidad de taludes rocosos requiere un análisis detallado de las características geológicas, estructurales e hidrogeológicas del terreno, así como

de los mecanismos de falla que pueden presentarse en el macizo rocoso. Este análisis permite identificar las condiciones de riesgo y establecer medidas de estabilización adecuadas para prevenir movimientos de masa que puedan comprometer la seguridad del área de estudio (Wyllie & Mah, 2004).

### Tipos de fallas en taludes rocosos

Los taludes rocosos pueden experimentar diferentes tipos de fallas o mecanismos de inestabilidad dependiendo de la estructura del macizo rocoso, la orientación de las discontinuidades y las condiciones geomecánicas del terreno. La identificación de estos mecanismos es fundamental para comprender el comportamiento del macizo rocoso y para diseñar medidas de estabilización adecuadas (Hoek & Bray, 1981).

Uno de los mecanismos más comunes es la falla planar, la cual ocurre cuando un bloque de roca se desliza a lo largo de un plano de discontinuidad que presenta una inclinación similar a la pendiente del talud. Para que este tipo de falla ocurra, el plano de discontinuidad debe estar orientado en dirección hacia el talud y presentar un ángulo menor que el ángulo de inclinación del mismo (Wyllie & Mah, 2004).

Otro mecanismo frecuente es la falla en cuña, que se produce cuando dos planos de discontinuidad se interceptan formando un bloque en forma de cuña que puede deslizarse hacia el exterior del talud. Este tipo de falla es común en macizos rocosos altamente fracturados donde existen múltiples sistemas de discontinuidades (Goodman, 1989).

La falla por volcamiento o toppling ocurre cuando bloques de roca se inclinan o rotan hacia adelante debido a la presencia de discontinuidades casi verticales que generan columnas

rocosas inestables. Este tipo de falla suele presentarse en taludes donde las fracturas tienen una orientación desfavorable respecto a la pendiente (Wyllie & Mah, 2004).

Finalmente, también pueden presentarse fallas complejas o combinadas, en las cuales intervienen varios mecanismos de desplazamiento simultáneamente, incluyendo deslizamientos, rotaciones o desprendimientos de bloques. Estas fallas suelen ocurrir en macizos rocosos muy meteorizados o altamente fracturados, donde la resistencia del material se encuentra considerablemente reducida (Hoek & Bray, 1981).

El análisis de los diferentes tipos de fallas permite comprender los procesos de inestabilidad que afectan a los taludes rocosos y constituye una herramienta fundamental para la evaluación de riesgos geotécnicos y el diseño de soluciones de estabilización en obras de ingeniería.

### Análisis y estabilización de taludes

El análisis y la estabilización de los taludes constituye una de las áreas fundamentales de la ingeniería geotécnica, debido a que los deslizamientos representan uno de los principales riesgos geológicos en las obras civiles, minerales y viales. La estabilidad depende de la interacción entre los factores geométricos, propiedades geomecánicas, propiedades geomecánicas del suelo o roca, condiciones hidrogeológicas y acciones externas, por ejemplo, la infiltración inducida por la lluvia, la variabilidad espacial del suelo y la gestión del nivel freático son factores determinantes en la reducción del factor de seguridad en los taludes (Jia, Mao, & Tenorio, 2024).

### Factores que influyen en la estabilidad in situ

Las investigaciones que se realizan en el lugar son conocidas como estudios in situ que se caracterizan por las condiciones reales del macizo rocoso y con ello obtener los parámetros

confiables para el análisis de la estabilidad, se realizan levantamientos topográficos detallados de la geometría del talud, ensayos SPT, CPYu o ensayos presi métricos, instalaciones de piezómetros para el monitoreo del nivel freático y los ensayos de permeabilidad (Al-Hameed, 2025).

La presión intersticial generada por la infiltración en las fisuras que puedan llegar a ocurrir incrementa significativamente las fuerzas de desestabilización, reduciendo con el factor de seguridad (FS) en eventos de lluvia intensa, así mismo se evidencia en estudios que la falta de datos hidrogeológicos detallados pueden conducir a sobre estimaciones del factor de seguridad si no se consideran adecuadamente las fluctuaciones del nivel freático. Por ende, se destaca la importancia de considerar todas las variables espaciales del suelo y las grietas de desecación para el análisis probabilístico de estabilidad (Wang & Li, 2025).

**Tabla 2**

*Investigaciones in situ aplicadas al análisis de la estabilidad*

| Tipo de investigación | Parámetro obtenido | Influencia en la estabilidad |
|---|---|---|
| **Ensayos SPT/CPTu** | Resistencia al corte | Determina cohesión y ángulo de fricción |
| **Piezometría** | Nivel freático | Controla presión de poros |
| **Ensayos de permeabilidad** | Coeficiente k | Define velocidad de infiltración |
| **Instrumentación** | Desplazamientos | Detecta fallas progresivas |

Nota: La caracterización hidrogeológica y geomecánica reduce la incertidumbre en el cálculo del Factor de Seguridad (FS). Fuente: (Wang & Li, 2025; Al-Hameed, 2025).

### Factores influyentes en la estabilidad de los taludes

### Factores geométricos

Estos factores comprende la altura del talud, ángulo de inclinación, la formación sea cóncava, convexa o recta, así como la presencia de bermas; estos factores son de importancia ya que el aumento en la altura o inclinación incrementa las tensiones cortantes actuantes; por ejemplo si un modelado por los elementos finitos demuestra que los taludes con pendientes superiores a 45 grados, se debe considerar realizar una reducción significativa del factor de seguridad en los suelos especialmente si son cohesivos saturados (Jia, Mao, & Tenorio, 2024) como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3**

*Influencia de factores geométricos en el factor de seguridad*

| Factor geométrico | Efecto en el FS | Evidencia científica |
|---|---|---|
| Incremento de altura | Disminuye FS | Al-Hameed, 2025 |
| Mayor pendiente | Disminuye FS significativamente | Wang & Li, 2025 |
| Presencia de bermas | Incrementa estabilidad | Stein et al., 2024 |
| Geometría irregular | Genera concentraciones de esfuerzo | Gao et al., 2025 |

Nota: El FS disminuye proporcionalmente al incremento de la relación altura/pendiente bajo condiciones saturadas.

### Condiciones hidrogeológicas

Estas condiciones constituyen de uno de los factores más críticos en la estabilidad de los taludes, debido a que el aumento de la presión de los poros reduce la resistencia efectiva del suelo según los criterios de evaluación de Mohr.Coulomb. Jia et al. (2024) demostraron en su investigación que la infiltración en los suelos fisurados genera trayectorias preferenciales de flujo, incrementando rápidamente con la presión intersticial; además se ha evidenciado que la

gestión del agua subterránea mediante drenajes horizontales profundos puede aumentar significativa el factor de seguridad en un 25% (Stein et al., 2024), como se muestra en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Influencia hidrogeológica en la estabilidad de los taludes*

| Condición | Efecto mecánico | Impacto en estabilidad | Referencia |
|---|---|---|---|
| **Elevación del nivel freático** | Aumento presión de poros | Reduce FS | Stein et al., 2024 |
| **Lluvias intensas** | Incremento infiltración | Deslizamientos superficiales | Jia et al., 2024 |
| **Variabilidad de humedad** | Degradación resistencia | Fallas progresivas | Wang & Li, 2025 |
| **Grietas de desecación** | Flujo preferencial | Inestabilidad localizada | Gao et al., 2025 |

Nota: La presión intersticial es el factor más determinante en taludes naturales bajo clima tropical o subtropical.

### Presión intersticial y estabilidad del talud

El concepto de esfuerzo efectivo dentro de medios porosos, que incluye suelos y rocas, explica cómo la presión del agua en los poros afecta la resistencia al corte: a medida que aumenta la presión de poro, disminuye la tensión efectiva que el esqueleto mineral puede resistir, lo cual tiende a comprometer la estabilidad total del macizo. Este principio es vital para comprender por qué las áreas saturadas o con niveles freáticos altos son más propensas a

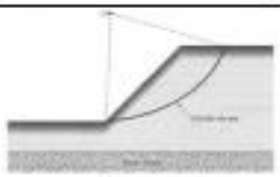
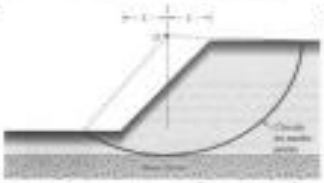
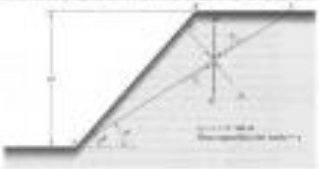
deslizamientos, especialmente en pendientes pronunciadas o taludes con continuidades de fracturas.

### Otras fallas

Se consideran de igual forma otras fallas como lo son la sobrecarga estática y las cargas dinámicas que modifican la distribución de las fuerzas y pueden generar condiciones de inestabilidad entre las estáticas están el peso de las edificaciones, el paso de los vehículos pesados y en el caso de las dinámicas se encuentran las acciones de los desastres naturales como los sismos que son las que más afectan las estructuras (Gao, Wu, & Zeng, 2025), especialmente en el país.

**Figura 1**

*Tipos de falla en los taludes*

| Tipo de falla | Superficie de falla | Gráfico |
|---|---|---|
| Falla de Talud | Círculo de pie |  |
| Falla de Talud | Círculo de talud |  |
| Falla superficial de talud | Círculo de talud |  |
| Falla de base | Círculo de medio punto |  |
| Falla plana | Falla plana |  |

Fuente: (Mesías, 2018).

**Métodos para el análisis de la estabilidad**

La estabilidad de los taludes es una de las áreas fundamentales que se consideran en la ingeniería geotécnica, pues esta determina la probabilidad de las fallas en el talud natural o artificial bajo diferentes condiciones de carga (Arriola, et al., 2025). Se considera que el factor de seguridad es un parámetro utilizado para cuantificar la estabilidad, comparando las fuerzas que resisten el deslizamiento con las que lo promueven. Un talud es considerado estable si el FS > 1 e inestable o crítico cuando FS ≤ 1. Estudios recientes han ampliado este concepto incorporando análisis probabilísticos, efectos sísmicos y variabilidad de los parámetros del suelo (Mesa Lavista, Álvarez Pérez, & Chávez Gómez, 2020).

El Factor de seguridad (FS) se define como:

$$FS = \frac{Resistencia\ total\ (fuerzas\ resistentes)}{Acciones\ que\ promueven\ falla\ (fuerzas\ actuantes)}$$

En términos de momentos o fuerzas:

- Para análisis de fuerzas:

$$FS = \frac{\sum F_{resistentes}}{\sum F_{promotoras}}$$

- Para análisis de momento:

$$FS = \frac{\sum M_{resistentes}}{\sum M_{promotores}}$$

Los métodos que se basan en el equilibrio de fuerzas tanto estáticas como cinemáticas sostienen que un talud se considera estable cuando la suma de los momentos y fuerzas que tienden a deslizar el macizo rocoso es inferior a las que lo contrarrestan. Este principio se apoya en investigaciones que combinan análisis cinemáticos con métodos de equilibrio límite adaptados para suelos y rocas, ofreciendo estimaciones del factor de seguridad en diferentes contextos geológicos y geométricos. Además, las clasificaciones geomecánicas y los criterios de fallas, como el modelo de Hoek-Brown ajustado para taludes, permiten tener en cuenta las discontinuidades estructurales, aspectos que son cruciales para evaluar situaciones de fallo complejas en macizos rocosos discontinuos.

Los métodos modernos combinan enfoques determinísticos, numéricos y probabilísticos en donde se consideran la información geotécnica, geométrica e hidrogeológica. Los métodos de equilibrio límite constituyen una de las herramientas más empleadas en la práctica debido a su aplicabilidad y confiabilidad, los métodos presentados en la tabla 5 se fundamentan principalmente del equilibrio estático, evaluando la relación entre las fuerzas

resistentes y las fuerzas desestabilizadoras a lo largo de una superficie potencial de la falla identificada.

**Tabla 5**

*Comparación de métodos de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes*

| Método | Superficie de falla | Consideraciones principales | Ventajas | Limitaciones | Aplicación del FS |
|---|---|---|---|---|---|
| Bishop simplificado (1955) | Circular | Plantea el equilibrio de fuerzas y momentos en el conjunto de dovelas. Asume que la resultante de fuerzas verticales entre dovelas es nula y resuelve el problema mediante un procedimiento iterativo. | Procedimiento relativamente sencillo, aplicable mediante cálculos manuales o software básico. Proporciona resultados conservadores en la mayoría de los casos prácticos. | Requiere iteraciones sucesivas. Puede presentar menor precisión en suelos estratificados o con condiciones geológicas complejas. | Ampliamente utilizado en la práctica profesional. Recomendado para análisis preliminares y proyectos de baja complejidad. |
| Janbu (1972) | No circular | Satisface el equilibrio de | Adecuado para | Puede subestimar el | De uso frecuente en |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | fuerzas en cada dovela, aunque simplifica el tratamiento de fuerzas verticales entre ellas. Permite modelar superficies de rotura más realistas. | geometrías irregulares. Implementación computacional sencilla. | factor de seguridad en su versión simplificada, especialmente en suelos heterogéneos. | estudios prácticos, considerando las limitaciones propias de cada formulación (simplificada o generalizada). |
| Morgenstern y Price (1965) | No circular | Cumple todas las condiciones de equilibrio estático (fuerzas y momentos), resolviendo el equilibrio global del sistema mediante una función de | Técnica rigurosa y de mayor precisión. Consiente con análisis detallados con mejores aproximaciones la conducta real. | Mayor complicación matemática. Requiere apoyo computacional para su resolución. | Indicado para estudios modernos, análisis detallados y retro análisis de fallas. |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | distribución de esfuerzos entre dovelas. | | | |
| Sarma (1973, 1979) | No circular | Procedimiento riguroso que compensa las condiciones completas de equilibrio. Incluye el evento de reflexionar acciones sísmicas en el análisis. | Reduce el tiempo de cálculo manteniendo la precisión adecuada. Puede resolverse manualmente en su versión original. | Generalmente requiere herramientas computacionales, especialmente en análisis sísmicos. | Alternativa técnica al método de Morgenstern y Price, especialmente en evaluaciones que incluyen cargas sísmicas. |

Nota: Todos los métodos presentados pertenecen al enfoque de equilibrio límite y difieren principalmente en el tratamiento de las fuerzas inter-dovelas y el grado de cumplimiento de las condiciones de equilibrio estático. Fuentes: (Mesías, 2018).

**Capacidad de carga en macizos rocosos**

La capacidad de carga del terreno corresponde a la máxima presión que puede soportar el suelo o la roca sin que se produzca una falla estructural o deformaciones excesivas que comprometan la estabilidad de la estructura. En el caso de cimentaciones sobre roca, esta capacidad depende de las propiedades mecánicas del material, así como de las características estructurales del macizo rocoso (Bowles, 1996).

En rocas intactas y de alta resistencia, la capacidad de carga suele ser considerablemente mayor que en suelos, lo que permite soportar cargas elevadas con deformaciones relativamente pequeñas. No obstante, cuando la roca presenta fracturas, discontinuidades o un alto grado de meteorización, la capacidad portante puede reducirse significativamente debido a la presencia de planos de debilidad dentro del macizo (Goodman, 1989).

La evaluación de la capacidad de carga en macizos rocosos también debe considerar la orientación y espaciamiento de las discontinuidades, ya que estas pueden influir en los mecanismos de falla potenciales. En algunos casos, la falla puede producirse por deslizamiento a lo largo de planos de discontinuidad o por fracturamiento del material rocoso bajo la cimentación (Hoek & Bray, 1981).

Además, la presencia de agua en el interior del macizo rocoso puede afectar la capacidad portante del terreno, debido a que la infiltración reduce la resistencia al corte y puede generar presiones de poro que disminuyen la estabilidad del sistema roca–cimentación. Por esta razón, los estudios geotécnicos suelen incluir análisis detallados de las condiciones hidrogeológicas del terreno (Wyllie & Mah, 2004).

El conocimiento de la capacidad de carga del macizo rocoso es fundamental para el diseño y evaluación de cimentaciones, ya que permite determinar si el terreno puede soportar de manera segura las cargas transmitidas por la estructura.

**Tipos de cimentaciones en roca**

Las cimentaciones son elementos estructurales encargados de transmitir las cargas de una edificación al terreno de manera segura y estable. Cuando las estructuras se construyen sobre macizos rocosos, el diseño de la cimentación debe considerar las características geológicas y geomecánicas del material, así como la presencia de discontinuidades que puedan afectar su comportamiento estructural (Bowles, 1996).

Entre los tipos de cimentaciones más comunes en roca se encuentran las cimentaciones superficiales, como las zapatas aisladas o corridas, las cuales se utilizan cuando el macizo rocoso se encuentra cerca de la superficie y presenta una resistencia suficiente para soportar las cargas de la estructura. En estos casos, la roca actúa como un material de alta capacidad portante que permite transmitir las cargas directamente al terreno (Das, 2010).

En situaciones donde el macizo rocoso presenta fracturas importantes o se encuentra a mayor profundidad, pueden emplearse cimentaciones profundas, como pilotes o micropilotes anclados en roca. Estas estructuras permiten transferir las cargas a estratos más competentes del macizo rocoso, mejorando la estabilidad de la estructura (Wyllie & Mah, 2004).

Asimismo, en algunos proyectos de ingeniería se utilizan anclajes en roca o sistemas de refuerzo que permiten aumentar la estabilidad del macizo rocoso y mejorar la interacción entre la estructura y el terreno. Estos sistemas son especialmente utilizados en taludes rocosos donde existe riesgo de desprendimiento o deslizamiento de bloques (Hoek & Bray, 1981).

La selección del tipo de cimentación adecuada depende de diversos factores, entre los que se incluyen las características del macizo rocoso, las cargas estructurales, la profundidad del estrato competente y las condiciones hidrogeológicas del sitio. Por esta razón, los estudios geotécnicos son fundamentales para determinar la solución de cimentación más apropiada en cada caso.

### Interacción roca y cimentación

La interacción entre las estructuras y el terreno constituye un aspecto fundamental en el análisis geotécnico de obras civiles. En el caso de cimentaciones construidas sobre macizos rocosos, el comportamiento estructural depende en gran medida de las características geomecánicas de la roca y de la presencia de discontinuidades dentro del macizo (Bowles, 1996).

Cuando una estructura transmite cargas al terreno, estas se distribuyen en el macizo rocoso generando esfuerzos que deben ser resistidos por el material sin producir deformaciones excesivas o fallas estructurales. En macizos rocosos intactos y con alta resistencia, la deformación suele ser mínima; sin embargo, cuando el macizo presenta fracturas, diaclasas o zonas meteorizadas, la respuesta del terreno puede ser significativamente diferente, generando asentamientos diferenciales o concentraciones de esfuerzo en determinadas zonas (Goodman, 1989).

La presencia de discontinuidades puede influir notablemente en la forma en que las cargas se transmiten a través del macizo rocoso, ya que estas estructuras actúan como superficies de debilidad que reducen la resistencia global del material. Además, las discontinuidades pueden facilitar la infiltración de agua, lo que puede provocar una disminución adicional de la resistencia al corte del material y afectar la estabilidad de la cimentación (Hoek & Bray, 1981).

Por esta razón, en estudios geotécnicos es fundamental evaluar las características del macizo rocoso sobre el cual se apoya la estructura, considerando factores como el grado de fracturamiento, el nivel de meteorización, la presencia de agua y la orientación de las discontinuidades. Este análisis permite determinar si las condiciones del terreno son adecuadas para soportar las cargas estructurales y si es necesario implementar medidas de reforzamiento o estabilización (Wyllie & Mah, 2004).

## Marco conceptual

**Macizo Rocoso**: Según varios autores lo definen como un conjunto de matriz rocosa y discontinuidades, refiriéndose a matriz como la roca en estado intacto y a la discontinuidad como aquellas secciones donde la roca no es densa (M. FERRER y L. GONZÁLEZ DE VALLEJO, 1999)

**Discontinuidad**: Una discontinuidad es una superficie de debilidad que interrumpe la continuidad del material rocoso dentro de un macizo. Estas estructuras pueden presentarse en forma de fracturas, diaclasas, fallas o planos de estratificación, y desempeñan un papel importante en la estabilidad de taludes rocosos (Goodman, 1989).

**Meteorización:** La meteorización corresponde al proceso de desintegración y alteración de las rocas debido a la acción de factores físicos, químicos y biológicos presentes en el ambiente, lo que provoca una reducción progresiva de la resistencia del material rocoso (Selby, 1993).

**Talud de roca:** se define como una superficie inclinada natural o artificial constituida por material rocoso, cuya estabilidad está condicionada por la geometría del talud, las propiedades mecánicas de la roca y la presencia de discontinuidades como fracturas o planos de estratificación (Melentijević et al., 2025).

**Estabilidad de taludes:** La estabilidad de taludes se refiere a la capacidad de un talud para mantenerse en equilibrio sin experimentar desplazamientos o fallas que comprometan su integridad estructural. Esta condición depende del equilibrio entre las fuerzas que provocan el movimiento y las fuerzas resistentes del material (Hoek & Bray, 1981).

**Tipos de inestabilidad:** hacen referencia a la variación de la geometría del talud, saturación de agua y cargas adicionales como pueden ser excavaciones o sismos que pueden afectar la inestabilidad de los taludes (Melentijević et al., 2025).

**Deslizamiento:** El deslizamiento es un tipo de movimiento de masa que ocurre cuando una porción de suelo o roca se desplaza pendiente abajo a lo largo de una superficie de falla, generalmente debido a la acción de la gravedad y a la reducción de la resistencia del material (Selby, 1993).

**Falla planar:** La falla planar es un mecanismo de inestabilidad que ocurre cuando un bloque de roca se desliza a lo largo de un plano de discontinuidad que presenta una orientación similar a la pendiente del talud (Wyllie & Mah, 2004).

**Falla en cuña:** La falla en cuña se produce cuando dos planos de discontinuidad se interceptan formando un bloque triangular o en forma de cuña que puede deslizarse hacia el exterior del talud bajo la acción de la gravedad (Goodman, 1989).

**Volcamiento:** El volcamiento es un tipo de falla en la cual bloques rocosos se inclinan o rotan hacia adelante debido a la presencia de discontinuidades casi verticales que generan estructuras inestables en el macizo rocoso (Hoek & Bray, 1981).

**Capacidad de carga:** La capacidad de carga corresponde a la presión máxima que puede soportar un suelo o macizo rocoso sin que se produzcan fallas o deformaciones excesivas que afecten la estabilidad de la estructura apoyada sobre él (Bowles, 1996).

**Cimentación:** La cimentación es el elemento estructural encargado de transmitir las cargas de una estructura al terreno de manera segura, distribuyendo los esfuerzos de forma que el suelo o la roca puedan soportarlos sin producir fallas o asentamientos excesivos (Das, 2010).

**Cimentación en roca:** La cimentación en roca se refiere al sistema de apoyo estructural que se construye directamente sobre un macizo rocoso, aprovechando la alta capacidad portante del material cuando este presenta condiciones geomecánicas adecuadas (Bowles, 1996).

**Presión de agua en discontinuidades:**

La presión de agua en discontinuidades se produce cuando el agua se infiltra en grietas o fracturas del macizo rocoso, generando presiones internas que pueden reducir la resistencia al corte del material y favorecer la inestabilidad del talud (Hoek & Bray, 1981).

**Factores de riesgo:** la roca es un elemento sumamente resistente sin embargo no es indestructible y depende en gran medida del tipo de roca, sus propiedades y las condiciones a las que está sometida la misma, por lo que se puede hablar de varios factores que perjudican este tipo estrato y lo pueden llevar a un acontecimiento súbito que cause un desastre.

**Factores ambientales** generalmente llegan a generar altas probabilidades de tener inclusive el colapso de grandes taludes de roca por erosión, específicamente el agua es uno de los elementos de los cuales se han realizado estudios más sin embargo el control y manejo activo, se ha venido viendo solo en los últimos años.

Es importante analizar la forma y la cantidad de agua que se maneja dentro de una cavidad rocosa y esto se puede fundamentar con la ley de Darcy: “En 1856, Henri Philibert Gaspard Darcy publicó una ecuación empírica simple para la velocidad de descarga del agua a través de los suelos saturados. Esta ecuación se basa principalmente en las observaciones que Darcy hace sobre el flujo de agua a través de arenas limpias y se da como: v ki” (Das, 2015).

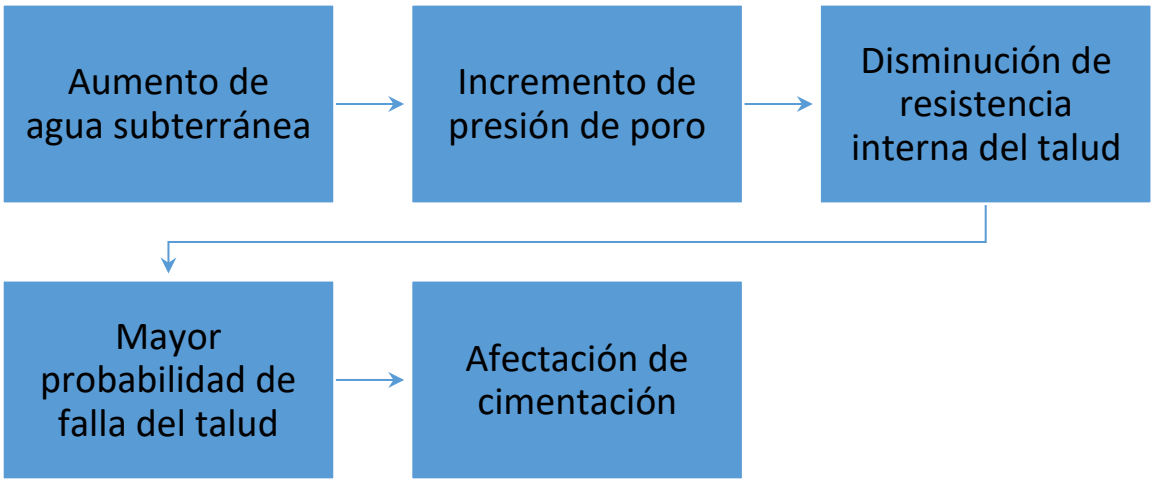
**Interacción agua y roca:** se distribuye dentro de las fisuras y se la conoce como distribución hidráulica; en donde se altera el equilibrio interno del talud e inducir sobre el desarrollo de las fallas (Chaudhary et al., 2024).

**Efectos del agua y la necesidad de drenaje:** uno de los efectos por la infiltración del agua es la resistencia mecánica del talud, lo cual conlleva a la aplicación de drenajes para controlar el nivel freático y reducir la presión del macizo rocoso

**Relación causal**: este tipo de modelo se basa en la evidencia científica de cómo el agua reduce la resistencia mecánica del material y poros de presión interna, así como lo muestra la figura 2

**Figura 2**

*Diagrama de la relación causal agua y la resistencia mecánica*




Fuente: (Chaudhary, Metya, & Sharma, 2024)

# Capítulo 2 Metodología

## Enfoque de la investigación

El estudio cuenta con un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recolección, análisis e interpretación de los datos geomecánicos y geotécnicos, con el fin de evaluar las características del macizo rocoso y su influencia en el comportamiento estructural de la cimentación; con ello se permite medir propiedades físicas y mecánicas a través de características y análisis de parámetros estructurales; facilitando con ello la evaluación del comportamiento del terreno frente a las cargas estructurales (Małkowski et al., 2021).

## Tipo de investigación

El estudio corresponde a una investigación aplicada, con la cual se busca resolver un problema específico relacionado con la evaluación geomecánica del macizo rocoso y con ello su influencia en la estabilidad estructural, las investigaciones aplicadas se orientan a generar soluciones prácticas a problemas reales con el uso de los conocimientos científicos y técnicos. De igual forma, es de tipo descriptiva, ya que se realizó una caracterización detallada de las condiciones geológicas y geotécnicas presentes en el área de estudio, describiendo las propiedades del macizo rocoso, sus discontinuidades y condiciones estructurales (Noori et al., 2023).

## Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es de tipo no experimental, debido a que en el estudio no se manipulan deliberadamente las variable del estudio, sino que se analizan en si las condiciones geológicas y geotécnicas existentes en el área de estudio; comprendiendo que en este tipo de diseño, las personas únicamente se limitan a observar, analizar y describir los fenómenos tal como ocurren en su entorno; lo cual es común en estudios con estas características relacionadas con la estabilidad del terreno y la identificación del macizo rocoso.

## Método de investigación

El método que se aplicó en la investigación fue el científico, ya que este se entiende como un proceso sistemático y ordenado que busca investigar fenómenos, obtener conocimientos que permitan obtener los resultados de manera verificable y reproducible. En el estudio se utilizó un proceso sistemático que incluye la observación del fenómeno, la formulación del problema, recolección de los datos y el análisis e interpretación de los resultados

## Técnicas e instrumentos de investigación

Para la elaboración de esta investigación se emplearon diversas técnicas de recopilación y análisis de la información, en la que se destacan

***Observación directa***. – con ello se realizó una inspección visual detallada del área, con el fin de identificar las características geológicas como las fracturas, discontinuidades, la presencia de agua en el talud, el grado de meteorización y las condiciones del contacto entre la estructura y el macizo rocoso.

***Levantamiento geológico***. – se realizó la identificación principal de los elementos geológicos presentados en el macizo rocoso como el tipo de roca, la orientación de discontinuidades, fracturas en espaciamiento, apertura de juntas.

***Análisis geomecánico***. – se realizó un análisis del macizo rocoso especialmente la parte geomecánica, los parámetros estructurales que influyen en su comportamiento frente a las cargas externas, determinando así la calidad del macizo y evaluando su capacidad de soporte a estructuras o excavaciones.

Los instrumentos usados en el estudio permitieron recopilar la información geológica y geotécnica del área de estudio, en donde se implementó fichas de registro geológico, registro

fotográfico, herramientas tecnológicas para la medición geológica, con lo cual se documentó de manera sistemática las condiciones del macizo rocoso y registrar los datos necesarios para el análisis geomecánico.

## Procedimiento metodológico

### *Análisis de estabilidad de taludes*

Durante el trabajo de campo se realizó la caracterización estructural del macizo rocoso, registrando la orientación de las discontinuidades mediante la medición de buzamiento (dip) y dirección de buzamiento (dip direction). Estas mediciones fueron obtenidas utilizando una brújula geológica, lo que permitió definir los principales sistemas de discontinuidades presentes en el talud.

Posteriormente, la información recopilada fue depurada y organizada con el fin de concentrar el análisis en el sector específico donde se emplaza la edificación. Es importante señalar que la información disponible fue limitada y que, debido a las restricciones de acceso debido a la importancia del bien patrimonial y los permisos requeridos para realizar trabajos de campo también fueron limitados, por lo que en algunos puntos fue necesario estimar ciertos parámetros geomecánicos de forma empírica, apoyándose en observaciones de campo y en el uso de software especializado.

Para la investigación se realizó la estimación del ángulo de fricción y la cohesión de las discontinuidades, los cuales se obtuvieron a partir de las características observadas en la inspección de campo en el macizo rocoso; de igual forma, las propiedades geomecánicas del material rocoso se determinaron según el criterio de Hoek-Brown para establecer los análisis de estabilidad.

En el procesamiento y análisis de los datos se usaron programas geomecánicos; para ello se usó el software RocData para determinar los parámetros de resistencia, el cual permitió

ajustar los parámetros del criterio de la falla de Hoek-Brown; además se realizó el análisis cinemático de la estabilidad mediante los programas de Dips, RocPlane, SWedge y Slide, los cuales permitieron valorar las variaciones en los modos de falla potenciales en el talud.

Mediante estos programas se realizaron los análisis correspondientes a falla planar, falla en cuña, volcamiento y falla rotacional, con el objetivo de determinar las condiciones de estabilidad del talud y estimar los factores de seguridad asociados a cada mecanismo de falla.

Adicionalmente, en el análisis se consideró la influencia de la presencia de agua subterránea, la cual es significativa en la zona de estudio. Para ello se tomaron en cuenta los resultados de estudios de tomografía eléctrica realizados por el GAD Municipal, los cuales permitieron identificar zonas con mayor circulación de agua dentro del macizo rocoso. Este factor fue incorporado en la evaluación de estabilidad debido a su influencia directa en la reducción de la resistencia del macizo rocoso y, por consiguiente, en los resultados obtenidos.

fundación.

Debido a la magnitud del talud sobre el cual se cimenta el Santuario, fue necesario dividir el proceso de toma de datos en ocho puntos de análisis, los cuales fueron establecidos con un espaciamiento aproximado de 15 metros entre sí. De la misma manera, el levantamiento se realizó en los tramos comprendidos entre las abscisas 0+000 y 0+105.

El desarrollo del estudio se realizó en la zona intermedia de la altura del talud, en donde se realizaron observaciones directas del macizo rocoso; en donde se puede recopilar información relevante sobre las condiciones estructuras del talud, como la presencia de juntas fracturas y otras discontinuidades que evidencian el estado del macizo rocoso.

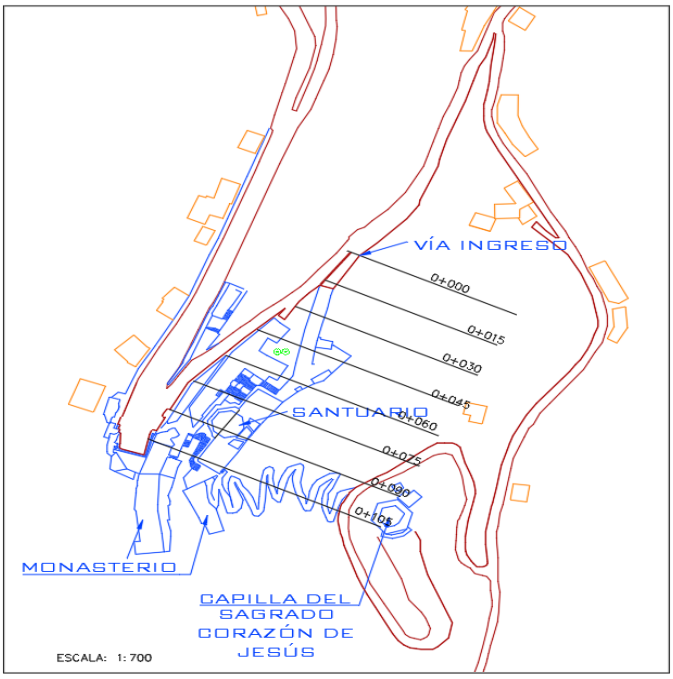
El espaciamiento entre los puntos de análisis fue definido considerando los limitados sectores donde el talud se encuentra expuesto, lo cual permitió realizar la inspección visual y el levantamiento de datos estructurales necesarios para el estudio.

Se consideró como abscisa 0+000 el inicio de la vía de acceso al santuario, mientras que la abscisa 0+105 corresponde al sector donde finaliza la construcción de la capilla. En este último punto se han reportado mayores evidencias de afectaciones estructurales, asociadas tanto a procesos geológicos naturales como a intervenciones antrópicas presentes en la zona.

A continuación, se presenta un mapa de identificación de los puntos de análisis, donde se visualiza la ubicación de las estaciones utilizadas para la recolección de datos.

**Figura 3**

*Puntos de estudio en el talud en la zona de estudio*




Fuente: elaboración propia (2026).

*Evaluación del Impacto en la Cimentación*

Durante la visita técnica se realizó una inspección del sitio, elaborando un reporte de evaluación de daños visuales con el objetivo de comprender mejor los procesos que han generado preocupación respecto a las condiciones estructurales del bien patrimonial. Para el

levantamiento de esta información se utilizó la ficha de inspección proporcionada por la Secretaría de Ordenamiento Territorial, mediante la cual se registraron las principales afectaciones observadas en la edificación.

Posteriormente, se efectuó la inspección de la cimentación en los sectores donde fue posible acceder, evaluando principalmente la posible influencia de la presencia de agua y las condiciones de la roca de fundación sobre el comportamiento de los elementos estructurales.

Es importante destacar que el Santuario no posee un sistema de cimentación convencional basado en zapatas. En su lugar, la edificación presenta un sistema de columnas empotradas en el macizo rocoso, permitiendo transmitir las cargas de la estructura hacia la roca.

# Capítulo 3 Desarrollo

El análisis geotécnico e hidrogeológico del área de estudio se desarrolló mediante el reconocimiento de campo, la caracterización estructural del macizo rocoso y con ello estimar los parámetros geomecánicos mediante el criterio de Hoek-Brown. En una inspección en el sitio se identificó que el talud en donde se encuentra el Santuario del Virgen del Rocío está conformado por rocas de composición andesítica y brechas volcánicas, en las cuales se presenciaron diferentes grados de meteorización y fracturación a lo largo del talud.

La caracterización estructural permitió con ello identificar la presencia de discontinuidades, tales como fracturas, diaclasas y planos de debilidad que controlan el comportamiento geomecánico del macizo rocoso. Asimismo, se identificó una alta presencia de humedad y circulación de agua a lo largo del talud, por la presencia de filtraciones mediante fracturas, escorrentía superficial y zonas de alto grado de meteorización, cabe mencionar que la presencia de agua es uno de los factores más influyentes en la degradación progresiva del macizo rocoso, según los datos presentados en la tabla.

## *Determinación de parámetros geomecánicos*

Para la identificación proceder con el análisis de falla en los taludes, se determinó los parámetros geomecánicos haciendo estimaciones con ayuda del software y los datos que se indican en la bibliografía según el tipo de roca. Los parámetros geomecánicos se determinaron considerando las características estructurales del macizo rocoso, así como la orientación de las discontinuidades, dirección y ángulo de buzamiento, como se observa en la figura 4.

**Figura 4**

*Fotografía de parte del talud de la zona de estudio*

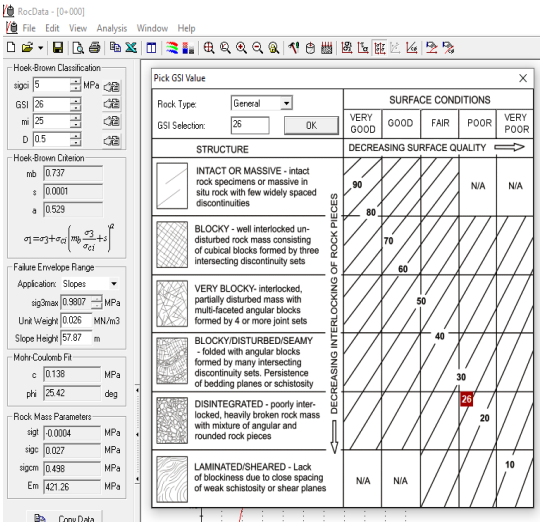


Fuente: elaboración propia (2026).

Con los datos de campo y con la utilización del software y siguiendo el criterio de Hoek-Brown, se determinaron los parámetros geomecánicos del macizo rocoso. De igual forma el uso del software permite generar automáticamente los parámetros geomecánicos requeridos para el análisis de estabilidad de taludes, entre los que se incluyen la cohesión equivalente del macizo rocoso, ángulo de fricción interna y los parámetros de resistencia del macizo rocoso derivados del criterio Hoek-Brown, como se muestra en la figura 5

**Figura 5**

*Índice de resistencia del macizo rocoso (GSI)*

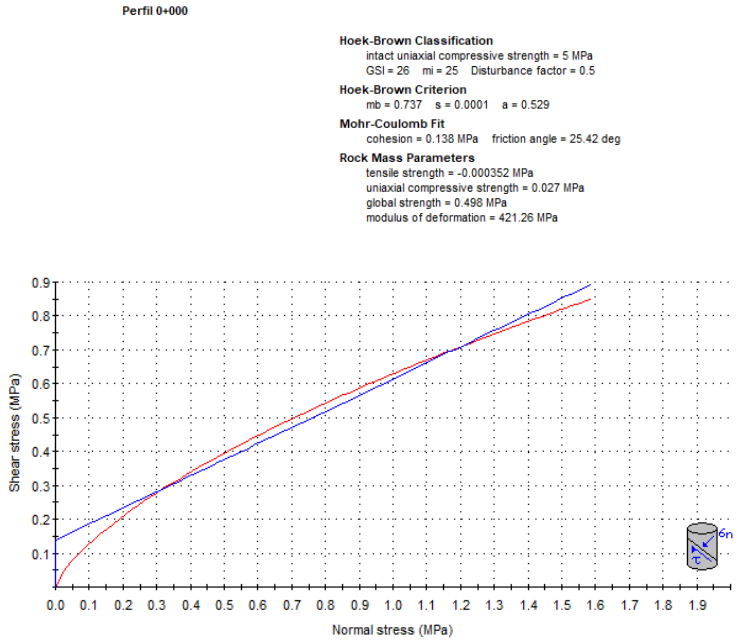



Fuente: elaboración propia (2026).

El uso del software además permitió la generación de los parámetros geomecánicos que se utilizan para el análisis de estabilidad de taludes, cohesión, ángulo de fricción, y demás. Con lo cual estos parámetros constituyen la base para el desarrollo de los modelos de estabilidad de los taludes.

**Figura 6**

*Parámetros geomecánicos con RocData*




Fuente: elaboración propia (2026)

**Tabla 6**

*Parámetros geomecánicos estimados del macizo rocoso mediante el criterio de Hoek-Brown*

| No | Abscisa | GSI | Cohesión (MPa) | Ángulo de fricción (°) |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 0+000 | 26 | 0.130 | 25.42 |
| **2** | 0+015 | 40 | 0.382 | 44.51 |
| **3** | 0+030 | 35 | 0.172 | 29.16 |
| **4** | 0+045 | 10 | 0.001 | 30.00 |
| **5** | 0+060 | 50 | 0.913 | 54.78 |
| **6** | 0+075 | 55 | 0.951 | 54.12 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **7** | 0+090 | 55 | 1.003 | 53.50 |
| **8** | 0+105 | 55 | 0.824 | 51.02 |

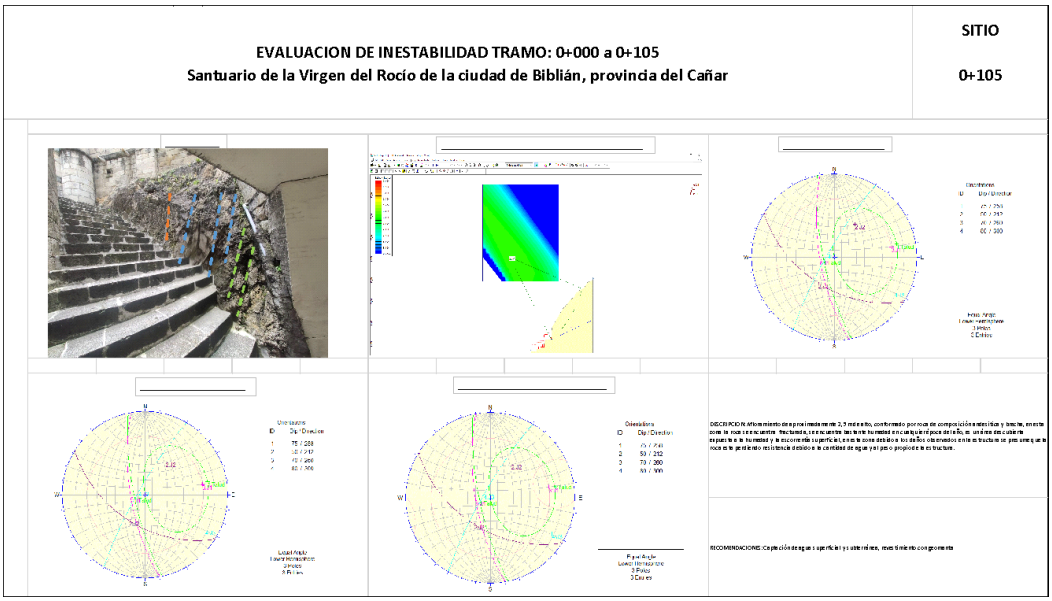
Nota. Parámetros geomecánicos estimados a partir de datos de campo y modelación mediante software geotécnico utilizando el criterio de Hoek-Brown.

## Análisis de Estabilidad de Talud

Como se indicó en la metodología se procedió con el análisis de estabilidad de taludes, con el uso de software Slide, Dips, Swedge, Rocplane. Cada punto analizado en toda la longitud del talud fue evaluado considerando los diferentes mecanismos potenciales de falla, los cuales corresponden a los tipos de inestabilidad más comunes en el macizo rocoso. Para esta investigación se consideraron cuatro tipos principales, falla planar, en cuña, por volcamiento y rotacional, como se muestra en la figura 7.

**Figura 7**

*Evaluación de inestabilidad tramo 0+000 a 0+105*




Fuente: elaboración propia (2026).

El análisis permitió calcular el factor de seguridad (FS) para cada uno de los mecanismos de falla evaluados, considerando las condiciones actuales del macizo rocoso y de los parámetros geomecánicos ya determinados. A partir de los resultados de cada zona

analizada se ha consolidado los datos en la siguiente tabla que indica el tipo de falla y el factor de seguridad en las condiciones actuales del macizo rocoso, de esta forma quedó determinado los sitios más críticos del talud en donde existe una mayor probabilidad de ocurrencia de los procesos de inestabilidad.

**Tabla 7**

*Resultados del análisis de estabilidad de taludes mediante modelación geomecánica*

| **No** | **Abs.** | **Análisis en Roca** | | | | | **Análisis en suelo** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Falla Planar** | **FS falla planar** | **Falla en cuña** | **FS Falla en cuña** | **Falla Volcamiento** | **Falla Rotacional** | **FS Falla Rotacional (sismo)** |
| **1** | 0+000 | SI | 0,89 | SI | 0,44 | NO | SI | 1 |
| **2** | 0+015 | SI | 1,02 | NO | 2,97 | SI | NO | 2,78 |
| **3** | 0+030 | SI | 0,61 | SI | 0,10 | SI | SI | 0,89 |
| **4** | 0+045 | | | | | | SI | 1,07 |
| **5** | 0+060 | SI | 1,090 | NO | 1,68 | NO | NO | 4,25 |
| **6** | 0+075 | NO | 1,69 | NO | 1,24 | SI | NO | 3,81 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **7** | 0+090 | NO | 4,71 | SI | 0,74 | SI | NO | 2,90 |
| **8** | 0+105 | NO | 2,26 | NO | 1,18 | NO | NO | 2,75 |

**Nota.** Resultados obtenidos mediante análisis de estabilidad utilizando los softwares Slide, Dips, Swedge y RocPlane.

Con los resultados obtenidos se observan que varios puntos presentan factores de seguridad menores a 1, lo que proporciona las condiciones potenciales de inestabilidad del talud bajo las condiciones actuales del macizo rocoso; los sectores correspondientes a las abscisas 0+000, 0+030 y 0+060, contienen factores de seguridad bajos con relación a los mecanismos de falla planar y falla en cuña, lo cual evidencia que existen bloques potencialmente inestables.

Así mismo los sectores ubicados en las abscisas 0+075, 0+090 y 0+105, muestran que los factores de seguridad son mayores, lo cual sugiere condiciones más estables del macizo rocoso. Estos resultados muestran en donde se encuentran los sectores de mayor prioridad para la implementación de medidas de estabilización, especialmente en las zonas en donde los factores de seguridad son inferiores a los valores establecidos en la ingeniería geotécnica.

## Sitios investigados como puntos críticos

En base al reconocimiento del campo, el levantamiento estructural del macizo rocoso y los resultados de en el análisis de la estabilidad, con ello se han identificado los sectores críticos en la longitud del talud; es decir en los puntos en donde las condiciones geológicas, geomecánicas e hidrogeológicas favorecen a los procesos de inestabilidad.

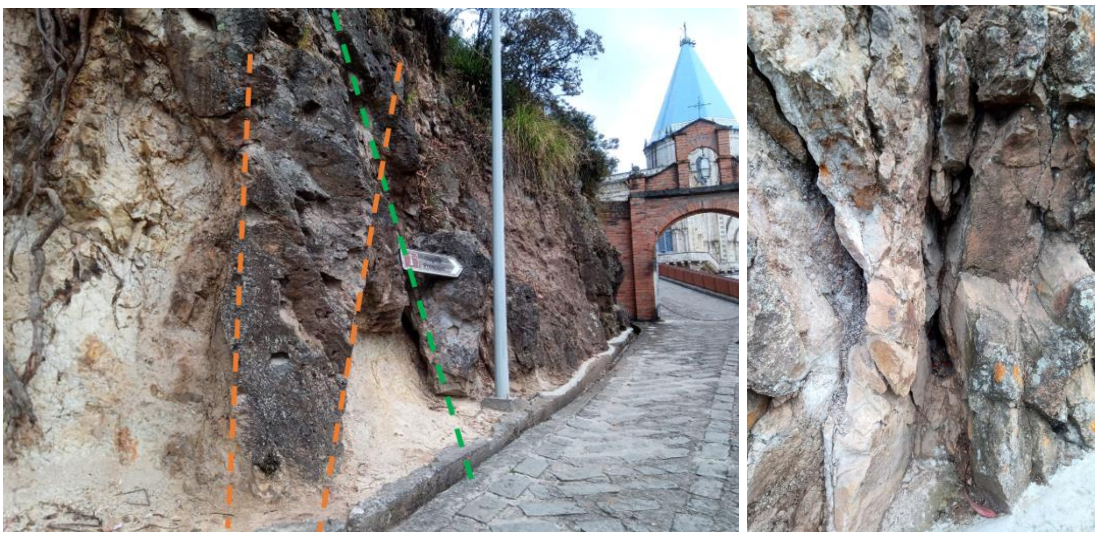
### *Talud 0+000*

Afloramiento de aproximadamente 57 m de alto, conformado por roca de composición andesítica y brecha, en esta zona la roca se encuentra altamente meteorizada y fracturada, de un lado del talud se puede observar la meteorización y del otro una zona de roca en mal estado y muy fracturada, escasamente cubierto por vegetación, es un área descubierta expuesta a la humedad y la escorrentía superficial, además en las pocas partes donde queda vegetación se observa el daño de las raíces al incrustarse en las fracturas de la roca, esta zona tiene constante caída de material y deformación de la vía que está al pie del talud, como se muestra en la figura 8.

Se observan discontinuidades subverticales bien marcadas; al igual que varias juntas paralelas formando bloques alargados. Bajo estas consideraciones, se recomienda implementar medidas de control de agua superficial y subterránea, así como la implementación de un muro de pie que contribuya a la mejora de las condiciones de estabilidad.

**Figura 8**

*Talud tramo 0+000 altamente meteorizado*



Fuente: elaboración propia (2026).

En esta zona se ha identificado que el talud tiene alto riesgo de falla y este punto la probabilidad de la combinación de los tres modos de falla investigados, falla planar, en cuña, por volcamiento y rotacional.

***Talud 0+015***

El talud tiene una dimensión de 57,55 m de alto, conformado por roca de composición andesítica, en esta zona la roca es muy porosa y se ven áreas con oxidación y fracturas, escasamente cubierto por vegetación, es un área descubierta expuesta a la humedad y la escorrentía superficial, esta zona tiene constante caída de material y deformación de la vía que está al pie del talud. De igual forma, se presentan rocas muy meteorizadas con fracturas meteorizadas, como se muestra en la figura 9.

**Figura 9**

*Talud 0+015 con presencia de roca altamente meteorizada, fracturas irregulares y cavidades generadas por procesos de erosión.*



Fuente: elaboración propia (2026).

Según las investigaciones en este sitio se puede dar falla planar y por volcamiento de forma conjunta.

***Talud 0+030***

Afloramiento de aproximadamente 56,36 m de alto, conformado por roca de composición andesítica, en esta zona la roca se encuentra altamente meteorizada y fracturada, de un lado del talud se puede observar la meteorización, escasamente cubierto por vegetación, es un área descubierta expuesta a la humedad y la escorrentía superficial, además las pocas parte donde queda vegetación se observa el daño de las raíces al incrustarse en las fracturas de la roca, esta zona tiene constante caída de material y deformación de la vía que está al pie del talud.

**Figura 10**

*Talud 0+030 con macizo rocoso altamente fracturado y evidencia de intersección de discontinuidades.*



Fuente: elaboración propia (2026).

En este sitio ha identificado falla planar, por volcamiento y rotacional.

***Talud 0+045***

Afloramiento de aproximadamente 62,54 m de alto, conformado por suelo coluvial y residual, cubierto por vegetación en la corona, pero la cara está al descubierto, expuesta a la humedad y la escorrentía superficial, deslizamientos de material con la sobresaturación del suelo, en esta zona hay mucha erosión y afectación por raíces.

**Figura 11**

*Talud 0+045 conformado por material coluvial con evidencia de procesos de erosión y deslizamientos superficiales.*



Fuente: elaboración propia (2026).

En esta área se ha identificado falla rotacional.

***Talud 0+060***

Afloramiento de aproximadamente 76,07 m de alto, conformado por roca de composición andesítica, en esta zona la roca se encuentra fracturada, escasamente cubierto por vegetación, es un área descubierta expuesta a la humedad y la escorrentía superficial, se nota la presencia de agua filtrada por las grietas de la roca.

**Figura 12**

*Talud 0+060 con presencia de fracturamiento del macizo rocoso y filtraciones de agua a través de discontinuidades.*



Fuente: elaboración propia (2026).

En esta zona se ha determinado falla por cuña y planar.

***Talud 0+075***

Afloramiento de aproximadamente 80 m de alto, conformado por roca de composición andesítica, en esta zona la roca se encuentra altamente fracturada, al ser un talud interior afecta a la construcción de la edificación generando agrietamientos en los elementos estructurales, en época invernal se muestra bastante humedad.

**Figura 13**

*Talud 0+075 con fracturamiento intenso del macizo rocoso y evidencia de caída de pequeños bloques.*



Fuente: elaboración propia (2026).

En esta zona se ha determinado falla por volcamiento, en este sitio se reportan caída de pequeños bloques lo que genera daños internos en los acabados de la iglesia y además se ha visto que han generado pequeñas fracturas en los elementos estructurales como columnas y bóvedas que está en la parte baja de la iglesia.

***Talud 0+090***

Afloramiento de aproximadamente 89,96 m de alto, conformado por roca de composición andesítica, en esta zona la roca se encuentra altamente fracturada, al ser un talud

interior afecta a la construcción de la edificación generando agrietamientos en los elementos estructurales, en época invernal se muestra bastante humedad.

**Figura 14**

*Talud 0+090 con macizo rocoso fracturado y evidencia de procesos de infiltración de agua.*



Fuente: elaboración propia (2026).

En esta zona se halló falla en cuña, al igual que en la anterior se presenta caída de pequeños bloques en el área interior.

***Talud 0+105***

Afloramiento de aproximadamente 2,5 m de alto, conformado por roca de composición andesítica y brecha, en esta zona la roca se encuentra fracturada, se encuentra bastante húmeda en cualquier época del año, es un área descubierta expuesta a la humedad y la escorrentía superficial, en esta zona debido a los daños observados en la estructura se presume que la roca está perdiendo resistencia debido a la cantidad de agua y al peso propio de la estructura.

**Figura 15**

*Talud 0+105 con fracturamiento del macizo rocoso y presencia permanente de humedad.*



Fuente: elaboración propia (2026).

En esta zona se ha determinado falla por volcamiento.

### Técnicas de Estabilización Propuestas

Con base en los resultados del análisis de estabilidad del talud y considerando las condiciones geológicas, estructurales e hidrogeológicas del macizo rocoso donde se emplaza el Santuario de la Virgen del Rocío, se proponen varias medidas de estabilización y mitigación orientadas a reducir los procesos de inestabilidad identificados.

Las técnicas propuestas combinan medidas estructurales, hidráulicas y de bioingeniería, las cuales permiten mejorar la estabilidad del talud, reducir la infiltración de agua y minimizar el riesgo de caída de bloques o deslizamientos superficiales.

- Recubrimiento con geomanta reforzada

El uso de geomanta constituye una medida de protección superficial que permite controlar procesos de erosión y favorecer la estabilización del suelo superficial del talud. Este tipo de recubrimiento ayuda a retener partículas finas, reducir el impacto directo de la lluvia sobre el terreno y facilitar el establecimiento de vegetación, en combinación con malla genera

una valla ideal para evitar la caída de pequeños bloques sueltos sin que esto genere un impedimento con el crecimiento de vegetación (revisar características sugeridas en el Anexo 2.)

- Muros de pie

La construcción de muros de contención en el pie del talud permite incrementar la estabilidad general del mismo al proporcionar soporte adicional en la base. Estos elementos estructurales ayudan a reducir el riesgo de desprendimiento de bloques y limitar el movimiento de material hacia la zona inferior, especialmente en sectores donde se evidencian procesos de caída de rocas o acumulación de detritos.

- Revegetación del talud

La revegetación constituye una técnica de bioingeniería que contribuye a mejorar la estabilidad superficial del talud mediante el desarrollo de sistemas radiculares que refuerzan el suelo. Además, la cobertura vegetal reduce la erosión hídrica y superficial, mejora la infiltración controlada del agua y favorece la recuperación ambiental del área intervenida.

- Limpieza y sellado de juntas

La presencia de discontinuidades abiertas en el macizo rocoso puede favorecer la infiltración de agua y el desarrollo de procesos de meteorización. Por esta razón, se recomienda realizar la limpieza de material suelto dentro de las juntas y su posterior sellado, lo cual contribuye a limitar la circulación de agua dentro del macizo y a disminuir la probabilidad de apertura progresiva de las discontinuidades.

- Anclajes para bloques inestables

En sectores donde se identifiquen bloques potencialmente inestables, se recomienda la instalación de barras o pernos de anclaje, los cuales permiten mejorar la cohesión estructural del macizo rocoso al restringir el movimiento relativo entre bloques. Este tipo de refuerzo es ampliamente utilizado en taludes rocosos para prevenir caídas de bloques y mejorar la estabilidad local.

- Construcción de cunetas y subdrenes

El control del agua constituye uno de los factores más importantes en la estabilidad de taludes. Por ello se recomienda la construcción de cunetas superficiales para el manejo del escurrimiento pluvial, así como la implementación de subdrenes que permitan evacuar el agua infiltrada dentro del talud. Estas obras de drenaje ayudan a reducir la presión de poros y evitar la saturación del material, condiciones que pueden disminuir significativamente la resistencia del macizo rocoso, en la tabla se evidencia las propuestas de manera resumida.

**Medidas de estabilización 0+000**

En esta zona se sugiere principalmente la captación de agua superficial y subterránea, que es uno de los detonantes de las condiciones actuales del talud, ya que según las investigaciones realizadas con tomografía eléctrica la presencia de agua a lo largo de todo el talud es una constante; por cuanto es necesario la construcción de subdrenes y cunetas de coronación.

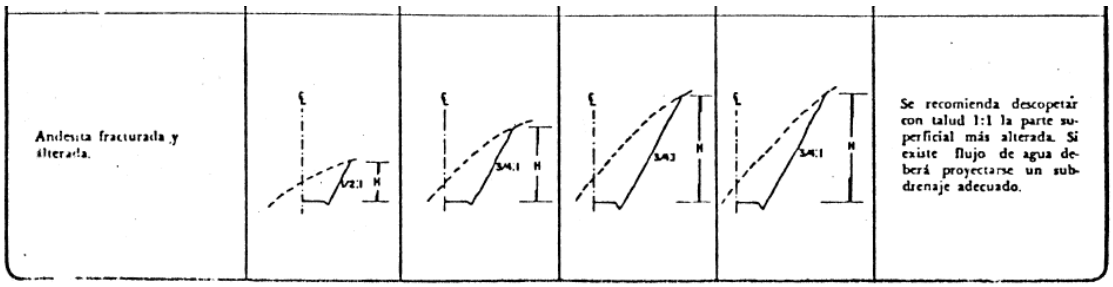
Según la tabla 7 en esta zona la inestabilidad principal se presenta por falla rotacional, y otros tipos de falla, sin embargo, por el grado de meteorización, en estas zonas no se puede hacer uso de otro tipo de medidas como anclajes por la falta de estrato competente para que sean funcionales, por cuanto se considera realizar la construcción de terrazas, recubrir las caras de las terrazas con geomanto reforzado de manera haya contención adecuada de caída de

pequeños bloques, limpieza y corte de bloques inestables y proceder con la revegetación de modo que la mayor cantidad de agua sea captada y reducida por este medio también.

1. Terraceo: Basado en las recomendaciones de corte del MOP Boletín N° 002-82, para el tipo de roca presentada en la zona se toma en consideración la recomendación para roca andesita fracturada:

**Figura 16**

*Especificaciones técnicas para estudios geotécnicos de estabilidad de taludes (Andesita Fracturada)*

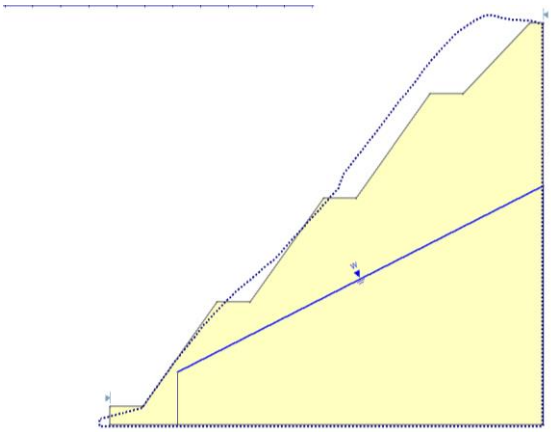



Fuente Ministerio de Obras Públicas (1982)

Con la recomendación indicada se crea terrazas ¾ :1, quedado las terrazas definidas con un alto de 15m y una berma de 8m, en la zona más alta se toma en cuenta la recomendación de generar un talud 1:1 quedado definida la geometría nueva del talud como sigue:

**Figura 17**

*Geometría del talud 0+000 con el corte en terrazas*

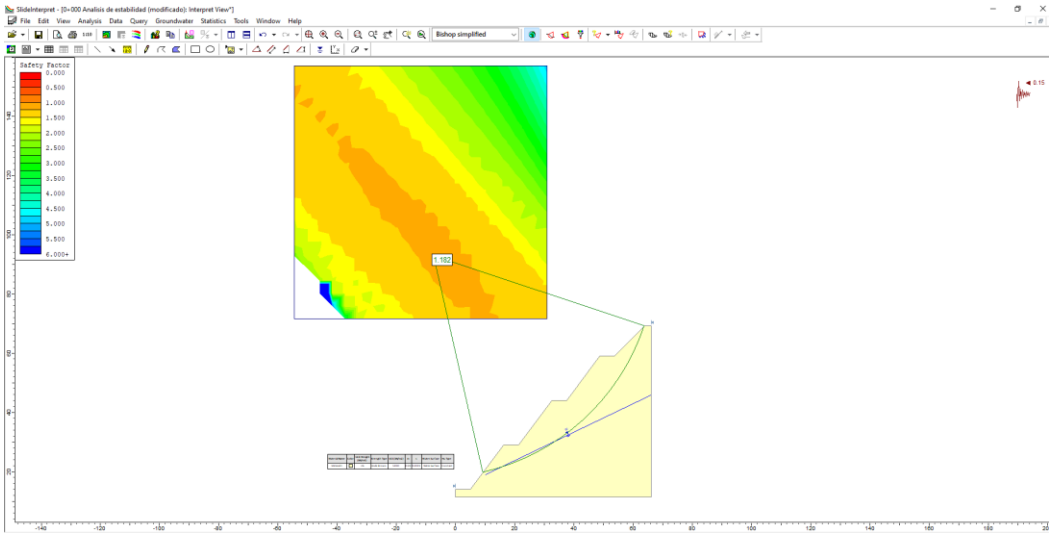


Fuente elaboración propia (2026)

Como se puede ver en la imagen la línea de color azul muestra la geometría anterior del talud y la línea negra es la propuesta para el talud.

**Figura 18**

*Cálculo de factor de seguridad con la nueva geometría 0+000*



Fuente elaboración propia (2026)

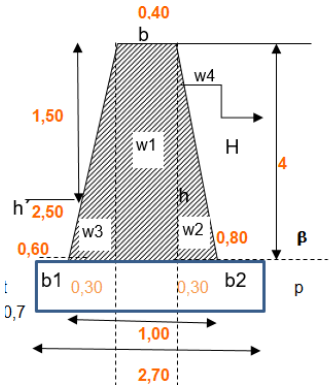
Una vez corrido el análisis se llegó a un factor de seguridad de 1.18 en condiciones de sismo lo que lo hace aceptable, a las recomendaciones de la normativa

2. Muro de pie

Como parte de las medidas de contención y debido al alto porcentaje de caída de pequeños bloques, además de la geomanta reforzada se sugiere colocar un muro de pie, con el fin de permitir correcciones en caso de tener deslizamientos por arrastre de material. Por lo que se ha calculado un muro de pie a gravedad (ver Apéndice 17)

**Figura 19**

*Diseño de muro de pie*




| | |
|---|---|
| γs = | 2650 Kg/m3 |
| Ø = | 25,42 grados |

| INGRESE LAS DIMENSIONES | |
|---|---|
| H = | 4 m |
| b = | 0,40 m |
| a = | 0,60 m |
| b1 = | 0,30 m |
| b2 = | 0,30 m |
| c = | 0,80 m |
| B = | 2,70 m |
| h = | 0,60 m |
| h´ = | 2,50 m |

Fuente elaboración propia (2026)

### Medidas de estabilización 0+015

En esta zona se sugiere; captación de agua superficial y subterránea, al igual en la abscisa 0+000 y lo cual será repetitivos para cada punto de análisis debido a que se ha identificada gran presencia de agua a lo largo de toda la zona estudio, además se sugiere revestimiento con geomanta y revegetación de la cara expuesta del talud

1. Diseño de anclajes

**Tabla 8**

*Parámetros iniciales para diseño de anclajes talud 0+015*

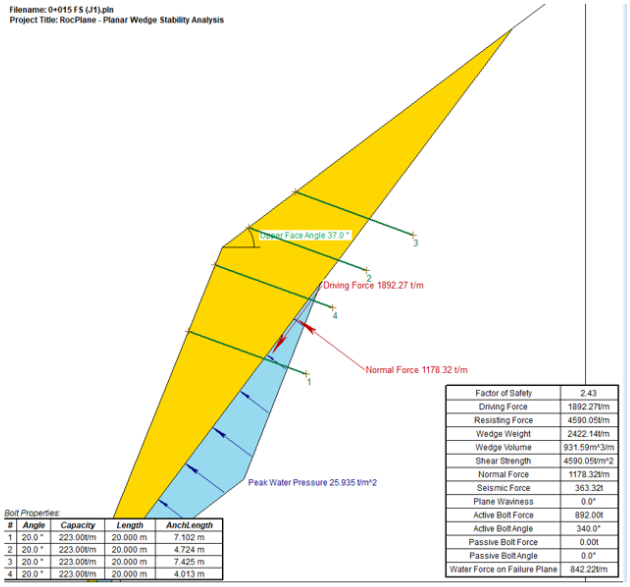
| Datos para cálculo de anclajes | | |
|---|---|---|
| H | 50 | m |
| β | 68 | ° |
| α | 53 | ° |
| c | 382 | kN/m² |
| ϕ | 44,51 | ° |
| γ | 26 | kN/m³ |
| ru | 0,3 | |
| FSs | 1,1 | |
| φ | 0,5 | |
| d | 0,25 | m |
| τn | 1723,68 | kN/m² |
| Lb | 7 | m |
| Sh | 1,5 | m |
| Sv | 1,5 | m |

**Nota.** Los parámetros de inicio para el diseño de anclajes se toman de la geometría del talud y la falla y además con el uso de las tablas sugerida por la normativa AASHTO indicadas en los Anexos 1, 2, 3

**Figura 20**

*Cálculos de dimensionamiento de anclajes y comprobación de factor de seguridad 0+015*

| Parámetros | Fórmula de cálculo | Valor obtenido | Unidad |
|---|---|---|---|
| Longitud de falla | $L = \frac{H}{\sin \alpha}$ | 62,61 | m |
| Área del bloque | $A = L * 1m$ | 62,61 | $m^2$ |
| Volúmen del bloque | $V = \frac{H^2}{2 * \tan \alpha}$ | 941,94 | $m^3$ |
| Peso del Bloque | $W = V * \gamma$ | 24490,51 | kN |
| Componente normal | $N = W \cos \alpha$ | 14738,75 | kN |
| Componente tangencial | $Tg = W \sin \alpha$ | 19558,99 | kN |
| Normal efectiva | $N' = N * (1 - ru)$ | 10817,13 | kN |
| Fuerza actual | $Ra = cA + N' \tan \emptyset$ | 34057,94507 | kN |
| Fuerza requerida | $R_{req} = FSreq * Ra$ | 37463,73958 | kN |
| Fuerza por anclaje | $Q_R = \pi d \varphi L_{br_n}$ | 4738,212872 | kN |
| Número de anclajes | $N = \frac{R_{req}}{Q_R S_h S_v}$ | 4 | kN |




Fuente elaboración propia (2026)

Una vez corrido el análisis se llegó a un factor de seguridad de 2.43 en condiciones de sismo lo que lo hace aceptable, a las recomendaciones de la normativa

**Medidas de estabilización 0+030**

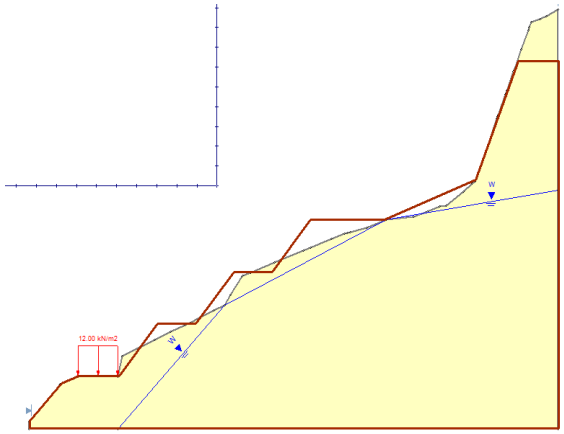
Debido a las condiciones del talud se recomienda al igual que en el talud 0+000 captación de agua superficial y subterránea, revestimiento con geomanta, revegetación de la cara expuesta del talud.

Terraceo: Basado en las recomendaciones de corte del MOP Boletín N° 002-82, para el tipo de roca presentada en la zona se toma en consideración la recomendación para roca andesita fracturada en las mismas consideraciones de la Figura 17.

Con la recomendación indicada se crea terrazas ¾ :1, quedado las terrazas definidas con un alto de 7 m y una berma de 5.25 m, en la zona más alta se considera hacer un corte de 7 metros la corona para bajar un poco el peso del talud y además se toma en cuenta la recomendación de generar un talud 1:1 quedado definida la geometría nueva del talud como sigue:

**Figura 21**

*Geometría del talud 0+030 con el corte en terrazas*

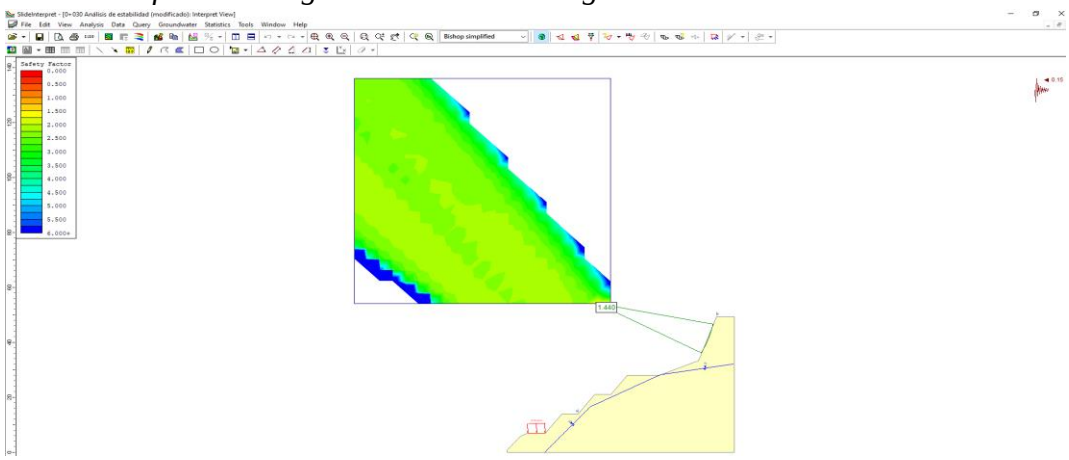



Fuente elaboración propia (2026)

Como se puede ver en la imagen la línea de color rojo muestra la nueva geometría propuesta para el talud.

**Figura 22**

*Cálculo de factor de seguridad con la nueva geometría 0+030*



Fuente elaboración propia (2026)

Corrida del programa con la nueva geometría del talud, haciendo uso del software Slide

Una vez corrido el análisis se llegó a un factor de seguridad de 1.44 en condiciones de sismo lo que lo hace aceptable, a las recomendaciones de la normativa

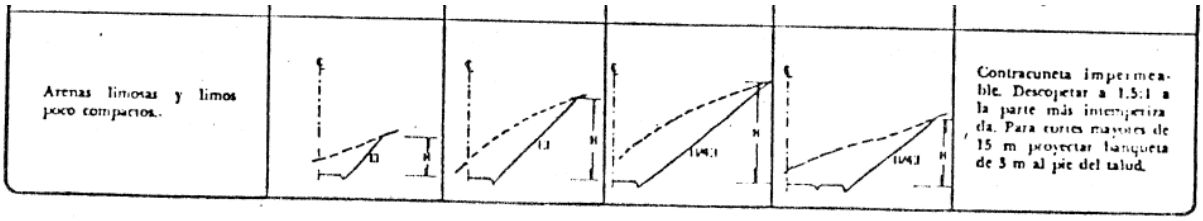
**Medidas de estabilización 0+045**

Se sugiere la captación de agua superficial y subterránea, revestimiento con geomanta reforzada, revegetación de la cara expuesta del talud, disminución de la pendiente.

1. Terraceo: Basado en las recomendaciones de corte del MOP Boletín N° 002-82, para el tipo de roca presentada en la zona se toma en consideración la recomendación para Arenas limosas y limos:

**Figura 23**

*Especificaciones técnicas para estudios geotécnicos de estabilidad de taludes (Arenas limosas y limos)*

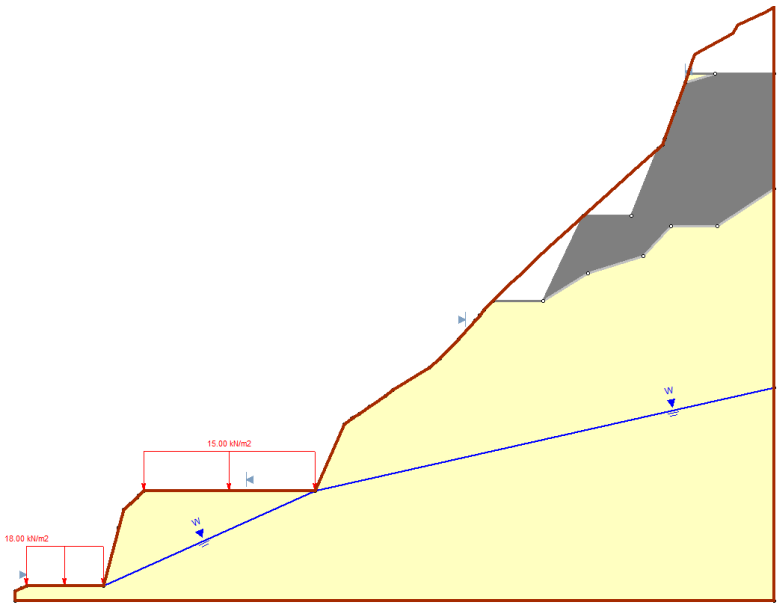



Fuente Ministerio de Obras Públicas (1982)

Con la recomendación indicada se crea terrazas 1:1, quedado las terrazas definidas con un alto de 5 m y una berma de 5 m, en la zona más alta se considera hacer un corte de 7 metros la corona para bajar un poco el peso del quedado definida la geometría nueva del talud como sigue:

**Figura 24**

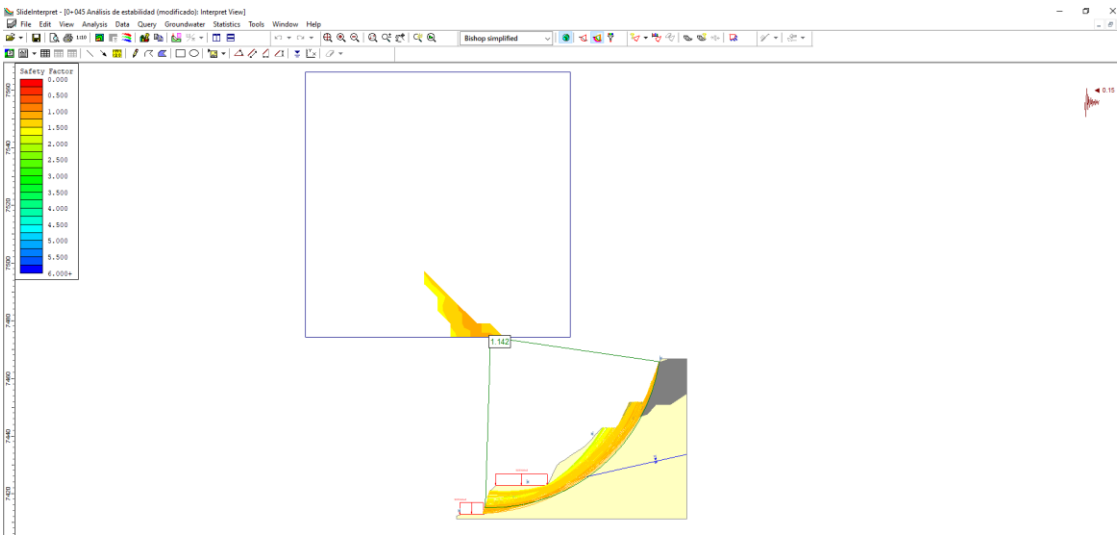
*Geometría del talud 0+045 con el corte en terrazas*




Fuente elaboración propia (2026)

**Figura 25**

*Cálculo de factor de seguridad con la nueva geometría 0+045*




Fuente elaboración propia (2026)

**Medidas de estabilización 0+060**

Se recomienda al igual que los sitios anteriores la captación de agua superficial y subterránea, limpieza y sellado de juntas con lechada de cemento de modo que se reduzca el aforamiento de agua y de esta manera evitar la caída de bloques, es importante indicar que esta zona es limitada los trabajos que se pueden realizar debido a la ubicación del talud y la cercanía de la edificación

Diseño de anclajes

**Tabla 9**

*Parámetros iniciales para diseño de anclajes talud 0+060*

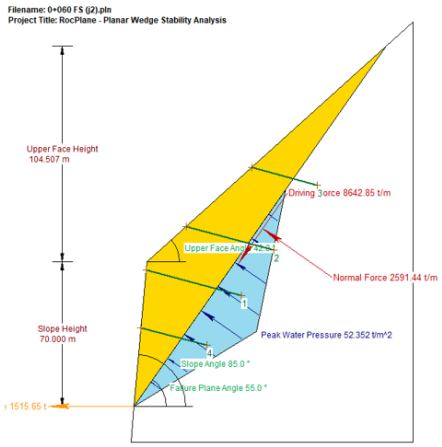
| Datos para cálculo de anclajes | | |
|---|---|---|
| H | 70 | m |
| β | 85 | ° |
| α | 78 | ° |
| c | 913 | kN/m² |
| ϕ | 54,78 | ° |
| γ | 26 | kN/m³ |
| ru | 0,3 | |
| FSs | 1,1 | |
| φ | 0,5 | |
| d | 0,25 | m |
| τn | 1723,68 | kN/m² |
| Lb | 12 | m |
| Sh | 1,5 | m |
| Sv | 1,5 | m |

**Nota.** Los parámetros de inicio para el diseño de anclajes se toman de la geometría del talud y la falla y además con el uso de las tablas sugerida por la normativa AASHTO indicadas en los Anexos 1, 2, 3

**Figura 26**

*Cálculos de dimensionamiento de anclajes y comprobación de factor de seguridad 0+060*

| Parámetros | Fórmula de cálculo | Valor obtenido | Unidad |
|---|---|---|---|
| Longitud de falla | $L = \frac{H}{\sin \alpha}$ | 71,56 | m |
| Área del bloque | $A = L * 1m$ | 71,56 | m² |
| Volúmen del bloque | $V = \frac{H^2}{2 * \tan \alpha}$ | 520,76 | m³ |
| Peso del Bloque | $W = V * \gamma$ | 13539,85 | kN |
| Componente normal | $N = W \cos \alpha$ | 2815,09 | kN |
| Componente tangencial | $Tg = W \sin \alpha$ | 13243,97 | kN |
| Normal efectiva | $N' = N * (1 - ru)$ | 1970,57 | kN |
| Fuerza actual | $Ra = cA + N' \tan \emptyset$ | 68129,17312 | kN |
| Fuerza requerida | $R_{req} = FSreq * Ra$ | 74942,09043 | kN |
| Fuerza por anclaje | $Q_R = \pi d \varphi L_{br_n}$ | 8122,650638 | kN |
| Número de anclajes | $N = \frac{R_{req}}{Q_R S_h S_v}$ | 4 | kN |




Bolt Properties:

| # | Angle | Capacity | Length | AnchLength |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 15.0 ° | 368.00t/m | 48.000 m | 12.691 m |
| 2 | 15.0 ° | 368.00t/m | 44.000 m | 12.807 m |
| 3 | 15.0 ° | 368.00t/m | 33.000 m | 12.016 m |
| 4 | 15.0 ° | 368.00t/m | 33.000 m | 12.641 m |

| | |
|---|---|
| Factor of Safety | 1.62 |
| Driving Force | 8642.85t/m |
| Resisting Force | 14027.21t/m |
| Wedge Weight | 10104.31t/m |
| Wedge Volume | 3742.34m^3/m |
| Shear Strength | 14027.21t/m^2 |
| Normal Force | 2591.44t/m |
| Seismic Force | 1515.65t |
| Plane Waviness | 0.0° |
| Active Bolt Force | 1472.00t |
| Active Bolt Angle | 345.0° |
| Passive Bolt Force | 0.00t |
| Passive Bolt Angle | 0.0° |
| Water Force on Failure Plane | 3345.84t/m |

Fuente elaboración propia (2026)

### Medidas de estabilización 0+075

Por lo limitado de los trabajos en el sitio se sugiere la captación de agua superficial y subterránea en el área superior y exterior al talud de modo que el efecto de la humedad no siga generando el desprendimiento de bloques, ya que según se indica anteriormente no se había presentado este tipo de incidentes, sin embargo, con el aumento de la actividad antrópica estos sucesos han aumentado al largo de los últimos 10 años.

Se sugiere la colocación de malla romboidal para prevención de caída de pequeños bloques, así como el sellado de juntas con lechada de cemento.

### Medidas de estabilización 0+090

Se sugiere al igual que en el sitio anterior la captación de agua superficial y subterránea, esto debe hacerse en la zona exterior alta, además es importante realizar la

limpieza y sellado de juntas, uso de anclajes para contención de bloques de gran su magnitud

Diseño de anclajes

**Tabla 10**

*Parámetros iniciales para diseño de anclajes talud 0+090*

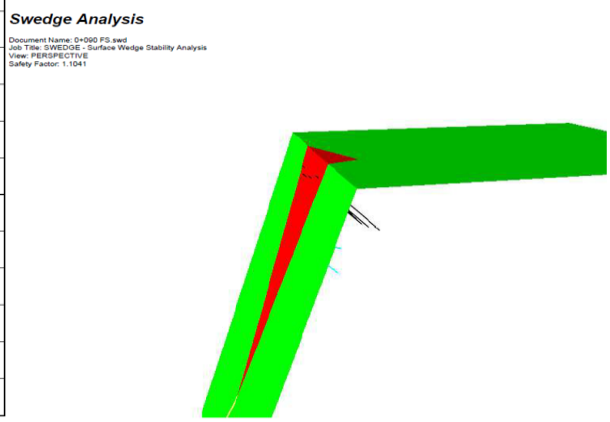
| Datos para cálculo de anclajes | | |
|---|---|---|
| H | 80 | m |
| θ | 89 | ° |
| α1 | 67 | ° |
| α2 | 73 | ° |
| ψ | 72,71 | ° |
| c | 500 | kN/m² |
| ϕ | 50 | ° |
| γ | 26 | kN/m³ |
| γω | 9,81 | kN/m³ |
| FSs | 1,1 | |
| φ | 0,5 | |
| d | 0,2 | m |
| τn | 1723,68 | kN/m² |
| Lb | 5 | m |
| Sh | 6,5 | m |
| Sv | 6,5 | m |

**Nota.** Los parámetros de inicio para el diseño de anclajes se toman de la geometría del talud y la falla y además con el uso de las tablas sugerida por la normativa AASHTO indicadas en los Anexos 1, 2, 3

**Figura 27**

*Cálculos de dimensionamiento de anclajes y comprobación de factor de seguridad 0+090*

| Parámetros | Fórmula de cálculo | Valor obtenido | Unidad |
|---|---|---|---|
| Longitud de falla | $L = \frac{H}{\sin\theta}$ | 80,01 | m |
| Área del bloque | $A_1 = \frac{L}{\sin\alpha_1}$ | 86,92 | m² |
| Área del bloque | $A_2 = \frac{L}{\sin\alpha_2}$ | 83,67 | m 131 |
| Volúmen del bloque | $V = \frac{1}{2}H^2 \tan\frac{\psi}{2}$ | 2355,37 | m³ |
| Peso del Bloque | $W = V * \gamma$ | 61239,52 | kN |
| Componente normal | $N = W\cos\theta$ | 1068,78 | kN |
| Componente tangencial | $Tg = W\sin\theta$ | 61230,20 | kN |
| Normal efectiva | $N' = N - U$ | -65870,80 | kN |
| Fuerza actual | $Ra = cA + N'\tan\emptyset$ | 6793,32 | kN |
| Fuerza requerida | $R_{req} = FSreq * Ra$ | 7472,65 | kN |
| Fuerza por anclaje | $Q_R = \pi d\varphi L_{bond}$ | 2707,55 | kN |
| Número de anclajes | $N = \frac{R_{req}}{Q_R}$ | 4 | kN |




Fuente elaboración propia (2026)

### Medidas de estabilización 0+105

Se sugiere la captación de agua superficial y subterránea, revestimiento con malla, en esta y otras zonas se puede evidenciar la gran cantidad de agua que circula por la zona y los daños que se generan en la edificación.

Se sugiere la colocación de malla romboidal para prevención de caída de pequeños bloques, así como el sellado de juntas con lechada de cemento

### Medidas para reducción del agua superficial y subterránea

Es importante señalar que no es posible realizar un diseño completamente ajustado a la realidad debido a la ausencia de datos fundamentales como; caudal de escorrentía e infiltración, presión de poros, permeabilidad del macizo o suelo, serie histórica de precipitaciones, nivel freático real

Por lo tanto, el diseño presentado corresponde a un criterio conservador de diseño preliminar, basado en la presencia de agua detectada mediante resistividad eléctrica.

**Tabla 11**

*Características mínimas sugeridas Drenes de alivio*

| | | |
|---|---|---|
| Diámetro del taladro | 50 – 100 mm | Alivio de presiones de poro. Intercepción de agua en discontinuidades. Reducción de riesgo de inestabilidad en bloques |
| Longitud | 10 – 30 m | |
| Inclinación | 5° – 10° exterior del talud | |
| Separación entre drenes | 10 – 20 m | |
| Revestimiento | Tubo PVC con ranurado parcial | |
| Protección de la salida | Filtro de grava o geotextil en la boca | |

**Tabla 12**

*Características mínimas sugeridas Dren francés en suelo*

| | | |
|---|---|---|
| Zanja | 0.5 – 1.0 m de ancho | Captar agua subterránea o infiltrada |
| Profundidad | 0.5 – 1.5 m | |
| Material drenante | Grava limpia (20–40 mm) | Reducir saturación del suelo |
| Tubería | PVC perforado Ø 100 – 150 mm | |
| Geotextil | Envolvente total del sistema | Evitar erosión interna |
| Pendiente | Mínimo 1 – 2 % | |

**Tabla 13**

*Características mínimas sugeridas Cuneta de coronación*

| | | |
|---|---|---|
| Sección típica | Tipo trapezoidal | Evitar que el agua superficial ingrese al talud |
| Dimensiones recomendadas | Ancho de fondo: 0.5 – 1.0 m | |
| Profundidad | 0.3 – 0.5 m | |
| Taludes laterales | 1H:1V a 2H:1V | Reducir erosión y socavación en la cresta |
| Pendiente longitudinal | 1 – 2 % | |
| Revestimiento | Hormigón | |

**Tabla 14**

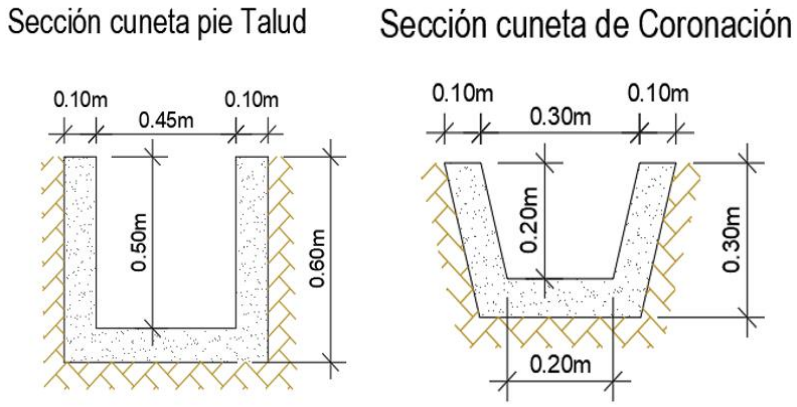
*Características mínimas sugeridas Cuneta de coronación*

| | | |
|---|---|---|
| Sección típica | Tipo trapezoidal | Recibir agua de subdrenes |
| Dimensiones recomendadas | Ancho de fondo: 0.5 – 5 m | |
| Profundidad | 0.5 – 1.0 m | Conducir escorrentía hacia puntos seguros |
| Taludes laterales | 1H:1V a 2H:1V | |
| Pendiente longitudinal | 1 – 3 % | Evitar erosión en el pie del talud |
| Revestimiento | Hormigón | |

El sistema de drenaje debe considerarse integral: Cuneta de coronación + drenes internos + drenaje de pie. El diseño debe ser adaptable en campo por lo que es importante realizar inspecciones visuales de filtraciones, ajustar de número de drenes según comportamiento real, implementación de monitoreo.

**Figura 28**

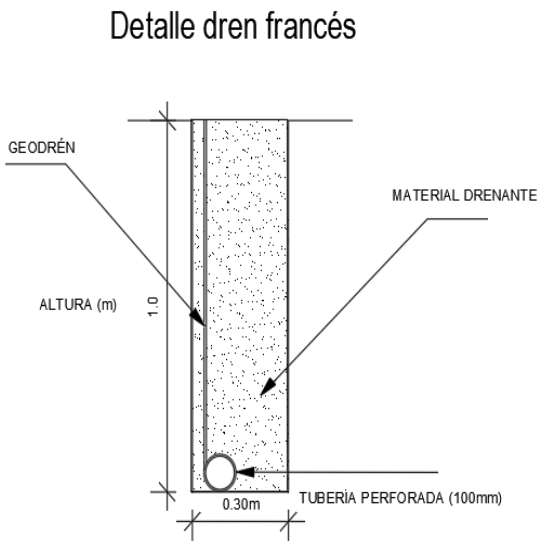
*Secciones modelo para cunetas*




Fuente elaboración propia (2026)

**Figura 29**

*Sección tipo para dren francés*




Fuente elaboración propia (2026)

**Tabla 15**

*Técnicas de estabilización propuestas para el talud del Santuario de la Virgen del Rocío*

| Abscisa | Técnica | Tipo de intervención | Objetivo principal | FS con las medidas |
|---|---|---|---|---|
| 0+000<br>0+015<br>0+030<br>0+045 | Geomanta reforzada | Protección superficial | Control de erosión, estabilización superficial y retención de caída de bloques inestables | |
| 0+000 | Muros de pie | Estructural | Soporte en la base del talud | |
| 0+000<br>0+030<br>0+045 | Terraceo | Geotécnica | Aumenta factor de seguridad y brinda estabilidad | 1.18<br>1.44<br>1.14 |
| 0+000<br>0+015<br>0+030<br>0+045 | Revegetación | Bioingeniería | Refuerzo radicular y control de erosión | |
| 0+060<br>0+075<br>0+090 | Sellado de juntas | Geotécnica | Reducción de infiltración de agua | |
| 0+015<br>0+060<br>0+090 | Anclajes | Estructural | Estabilización de bloques inestables | 2.43<br>1.62<br>1.11 |
| 0+000<br>0+015<br>0+030<br>0+045<br>0+060<br>0+075<br>0+090<br>0+105 | Cunetas y subdrenes | Hidráulica | Control de escorrentía e infiltración | |

**Nota:** Elaboración propia con base en los resultados del análisis de estabilidad del talud.

**Evaluación de la Cimentación y su Afectación por Presencia de Agua en la Roca de Fundación**

La evaluación se realizó mediante una inspección técnica de una estructura ubicada en el Cerro Zhalao, con el objetivo de analizar el estado de la cimentación y su interacción con el macizo rocoso, así como identificar posibles afectaciones asociadas a la presencia de agua. Debido a la ausencia de planos estructurales, memoria de cálculo y ensayos geotécnicos, el análisis se basó en observación visual, reconocimiento geológico y estimaciones técnicas conforme a la normativa vigente. La estructura está conformada por elementos de piedra tallada como arcos, columnas y muros portantes, los cuales transmiten las cargas directamente a un macizo rocoso andesítico que actúa como fundación natural.

El macizo rocoso presenta fracturas, discontinuidades y un grado de meteorización variable, con evidencia de escorrentía superficial e infiltración de agua. A partir de parámetros geomecánicos estimados, se determinó que la capacidad portante admisible es superior a las cargas transmitidas por la estructura, lo que sugiere un comportamiento adecuado en condiciones actuales. No se identificaron asentamientos diferenciales ni desplazamientos significativos en las bases de las columnas; sin embargo, se observó humedad y zonas con mayor alteración, lo que podría favorecer procesos de degradación progresiva del macizo. El comportamiento del sistema depende principalmente de la calidad del macizo rocoso, la integridad de las discontinuidades y las condiciones de contacto roca–estructura.

El principal factor de riesgo identificado es la presencia de agua, la cual puede inducir procesos de meteorización, reducción de resistencia, apertura de discontinuidades y posibles mecanismos de falla como deslizamiento, desprendimiento de bloques o degradación progresiva. Aunque no se evidencian fallas activas, estos procesos podrían desarrollarse a largo plazo si no se controlan las condiciones de infiltración. En este sentido, se recomienda

implementar sistemas de drenaje, mantenimiento periódico y un plan de monitoreo estructural y geotécnico que permita detectar cambios en el comportamiento del sistema, así como considerar estudios más detallados en el futuro para evaluar con mayor precisión la estabilidad de la cimentación.

**Figura 30**

*Interacción columna-roca*



Fuente: elaboración propia (2026).

### Propuesta de plan de monitoreo

El plan de monitoreo tiene como objetivo evaluar de manera continua el comportamiento geotécnico y estructural del sistema talud–estructura, mediante la instalación de instrumentación que permita detectar desplazamientos, variaciones en el nivel piezométrico y deformaciones estructurales. Este seguimiento facilita la identificación de cambios en la estabilidad del talud, permitiendo generar alertas tempranas y tomar decisiones oportunas para implementar medidas preventivas o correctivas. Para ello, se propone un sistema integral compuesto por puntos GPS, deformímetros, extensómetros y piezómetros, que permiten

analizar de forma conjunta el comportamiento del terreno, las discontinuidades del macizo rocoso y la influencia del agua.

La instrumentación incluye cuatro puntos de monitoreo GPS para medir desplazamientos superficiales, dos deformímetros para evaluar fisuras y deformaciones en la estructura, seis extensómetros instalados en discontinuidades del macizo rocoso para detectar movimientos relativos entre bloques, y ocho piezómetros destinados a controlar el nivel piezométrico y la presión de poros. Estos instrumentos serán ubicados estratégicamente en zonas críticas del talud y la estructura, con frecuencias de medición que varían entre quincenal y mensual, incrementándose en función del comportamiento observado o durante periodos de lluvia. La información obtenida será registrada en una base de datos técnica para su análisis comparativo y evaluación por especialistas.

El sistema de monitoreo se complementa con un esquema de gestión basado en niveles de alerta (verde, amarillo y rojo), definidos según umbrales de desplazamiento, deformación y condiciones hidrogeológicas. El nivel verde indica estabilidad, el amarillo señala cambios moderados que requieren mayor vigilancia, y el rojo corresponde a condiciones críticas que demandan acciones inmediatas como inspecciones técnicas, implementación de medidas de estabilización o incluso evacuación preventiva. Este enfoque permite una gestión eficiente del riesgo, asegurando una respuesta oportuna ante posibles procesos de inestabilidad del talud o afectaciones estructurales.

# Capítulo 4 Análisis de Resultados

## *Interpretación de Resultados*

Los resultados obtenidos durante la evaluación del sitio permiten identificar una relación directa entre las condiciones geológicas del macizo rocoso, los procesos de meteorización y las condiciones actuales de estabilidad de los taludes que rodean la edificación.

El análisis de campo evidenció que el macizo rocoso presenta un grado significativo de meteorización, lo cual ha reducido progresivamente sus propiedades mecánicas originales, tales como la resistencia al corte y la cohesión. Este proceso es particularmente evidente en los taludes expuestos a la intemperie y que no han recibido mantenimiento o protección superficial, lo que ha favorecido la desintegración del material y el desarrollo de discontinuidades más abiertas.

Asimismo, se identificó que los taludes presentan inclinaciones elevadas, las cuales en su momento fueron diseñadas considerando la aparente competencia del macizo rocoso. Sin embargo, con el paso del tiempo y bajo la influencia de factores externos como la pérdida de cobertura vegetal, la infiltración de agua y la intervención humana, las condiciones iniciales han cambiado, generando escenarios potenciales de inestabilidad.

Los resultados de la inspección también indican que el agua desempeña un papel fundamental en la degradación del sistema talud–cimentación, ya que la infiltración de aguas superficiales y subterráneas contribuye a acelerar los procesos de meteorización y a disminuir la capacidad resistente del macizo rocoso. Esta condición puede favorecer el desarrollo de mecanismos de falla asociados a deslizamientos superficiales, desprendimientos de bloques o fallas estructurales controladas por discontinuidades.

En relación con la edificación, los resultados muestran que existen daños en algunos elementos estructurales, los cuales pueden estar asociados a esfuerzos inducidos por

movimientos diferenciales del terreno o por cambios en las condiciones de soporte de la cimentación. No obstante, la evaluación realizada indica que estos daños aún se encuentran en una etapa en la que es posible implementar medidas correctivas que permitan recuperar la seguridad estructural.

Finalmente, la evaluación de la cimentación evidencia que la roca de fundación ha sido afectada por procesos de meteorización y condiciones de humedad, lo cual ha generado alteraciones en sus propiedades geomecánicas. A pesar de ello, los daños observados no comprometen de manera crítica la estabilidad global de la estructura, lo que indica que aún es posible aplicar medidas de estabilización y reforzamiento para preservar la integridad del sistema.

**Implicaciones de los Resultados**

Los resultados obtenidos en esta evaluación tienen importantes implicaciones desde el punto de vista geotécnico, estructural y de gestión del riesgo.

En primer lugar, las condiciones identificadas en los taludes sugieren que la estabilidad del macizo rocoso podría verse comprometida en el mediano o largo plazo si no se implementan medidas adecuadas de control y mantenimiento. La presencia de meteorización avanzada, combinada con pendientes pronunciadas y procesos de infiltración de agua, constituye un conjunto de factores que pueden favorecer la ocurrencia de eventos de inestabilidad.

Desde el punto de vista estructural, las afectaciones observadas en la edificación indican que existe una interacción directa entre el comportamiento del terreno y la respuesta estructural del inmueble. Si bien los daños actuales no representan una condición crítica, su evolución podría generar problemas de mayor magnitud si no se implementan acciones de estabilización del entorno geotécnico.

Otra implicación relevante es la necesidad de gestionar adecuadamente el agua superficial y subterránea, ya que este factor representa uno de los principales agentes que contribuyen a la degradación del macizo rocoso y a la reducción de su capacidad portante. Por lo tanto, la implementación de sistemas de drenaje adecuados constituye una medida fundamental para mejorar las condiciones de estabilidad del sitio.

Los resultados también evidencian la importancia de establecer programas de monitoreo continuo, que permitan evaluar la evolución de los procesos de deterioro y detectar oportunamente posibles cambios en el comportamiento del talud o de la estructura. El monitoreo periódico facilitará la toma de decisiones informadas y la aplicación de medidas preventivas antes de que se desarrollen fallas de mayor magnitud.

Finalmente, desde una perspectiva más amplia, los resultados ponen de manifiesto la necesidad de integrar criterios geológicos y geotécnicos en la gestión y conservación de infraestructuras ubicadas en zonas de ladera, particularmente en contextos donde los procesos naturales y la intervención humana pueden alterar las condiciones de estabilidad del terreno.

# Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones

## Conclusiones

Los taludes evaluados presentan un alto grado de meteorización, particularmente en las zonas exteriores, los cuales no reciben ningún tipo de mantenimiento o intervención periódica. Con las condiciones presentadas se ha favorecido a la degradación progresiva del macizo rocoso y la pérdida de sus propiedades.

En la investigación se han identificado limitaciones relacionadas a la información técnica y a las restricciones de entrada a ciertos sectores para evaluar. Estas condiciones limitaron el alcance de algunas evaluaciones y la implementación inmediata de medidas de estabilización más profundas, por lo que las propuestas planteadas se enfocan principalmente en medidas preventivas y de mitigación compatibles con las condiciones actuales del sitio.

De los resultados se ha obtenido que uno de los principales factores que genera y degrada el macizo rocoso es la infiltración de agua y acumulación de humedad en las discontinuidades y cavidades presentes en la roca. Con ello se propone la ejecución de las cuentas de coronación para el manejo de las aguas superficiales y la instalación de los sistemas de subdrenaje para reducir la presión del agua dentro del talud.

Se considero con ello la construcción de los muros de contención al pie de los taludes, con el único objetivo de proporcionar el soporte adicional y así disminuir el riesgo de desprendimiento del macizo rocoso; de igual forma, se plantea el recubrimiento o protección de las caras expuestas evitando la erosión superficial

Además, se elaboró un plan de monitoreo y con ello una evaluación hacia los daños, el cual permitirá realizar un seguimiento del comportamiento de los taludes; con ello se contribuirá a la generación de alertas tempranas, facilitando con ello la ejecución de las actividades planteadas de manera preventiva y correctiva.

En cuanto a la edificación que se encuentra en el área de estudio, se puedo observar que existen diferentes daños dentro de algunos elementos estructurales, lo que puede estar asociado a los esfuerzos para dar respuesta estructural a la edificación presente. Del mismo modo, se identificó con el estudio que la cimentación presentó una afectación en los procesos de meteorización de la roca; no obstante, cabe mencionar que no existe una gravedad crítica y aun se pueden implementar medidas de intervención para salvar la estabilidad y la funcionalidad de la estructura.

## Recomendaciones

### Recomendaciones para la Práctica

Se recomienda realizar estudios geotécnicos complementarios que permitan caracterizar con mayor precisión las propiedades mecánicas del macizo rocoso, así como el estado actual de las discontinuidades presentes en los taludes.

Es importante implementar un sistema adecuado de drenaje superficial, mediante la construcción y mantenimiento periódico de cunetas de coronación, con el fin de evitar la infiltración de agua hacia el interior de los taludes.

Es aconsejable instalar sistemas de drenaje, con el fin de reducir la presión del agua que se encuentra en el macizo rocoso y con ello disminuir el riesgo en la inestabilidad. Además, se sugiere la construcción de las estructuras para su contención en el pie de los taludes, como por ejemplo los muros de contención, gravedad que puedan proporcionar de soporte en el talud.

Es recomendable considerar la protección superficial de los taludes, a través de técnicas como la revegetación, geomalla lanzado o el recubrimiento protector que depende de las condiciones geológicas y del grado de meteorización. Así mismo, se debe ejecutar un programa permanente del monitoreo geotécnico, en donde se incluya las inspecciones periódicas

**Recomendaciones para Políticas y Normativas**

Se sugiere incorporar dentro de los instrumentos de planificación territorial programas de monitoreo y mantenimiento de taludes en áreas urbanas y patrimoniales, con el fin de reducir riesgos asociados a deslizamientos o caída de rocas.

Asimismo, se recomienda que las instituciones encargadas de la gestión del riesgo promuevan protocolos de inspección periódica de infraestructuras ubicadas en zonas susceptibles a inestabilidad geológica.

Se considera importante fortalecer las políticas públicas orientadas a la conservación de la cobertura vegetal en zonas de ladera, dado que la vegetación cumple un papel fundamental en la estabilidad superficial de los taludes y en el control de procesos erosivos.

**Recomendaciones para Futuras Investigaciones**

Con base en los resultados obtenidos durante la evaluación del sitio, se considera pertinente desarrollar investigaciones adicionales que permitan profundizar en el conocimiento de las condiciones geológicas, geotécnicas y estructurales del área de estudio, con el fin de mejorar la comprensión de los procesos que influyen en la estabilidad de los taludes y en el comportamiento de la edificación asociada.

Con esta investigación se recomienda realizar más estudios geotécnicos en donde se realice una mayor exploración del macizo rocoso, a través de la perforación, la toma de muestras y ensayos de laboratorio; ya que estos estudios contribuirán una mayor precisión de los parámetros geomecánicos fundamentales como la resistencia de corte, cohesión y el ángulo de fricción.

Es necesario realizar un análisis de las estructuras con mayor profundidad del macizo rocoso, a través de la caracterización detalla de las discontinuidades presentes en donde se

incluye su orientación, espaciamiento, persistencia, apertura y rellenado; con ello se permite evaluar a mayor presión los mecanismos de fallas que podrían presentarse en los taludes.

Además, se considera realizar investigaciones que comprendan la modelación geotécnica avanzada, usando herramientas de análisis número o herramientas que permitan simular los diferentes escenarios de estabilidad del talud en diversas condiciones, así como los cambios en los taludes, fallas planares, en cuñas o por volcaciones.

## Bibliografía

Al-Hameed, S. (2025). Stability analysis of earth slopes using finite element modeling techniques. *International Journal of Civil Engineering and Construction.*

Arriola, C., Aronés, E., Vega, V., Esenarro, D., Salas, G., Romero, A., & Raymundo, V. (2025). Physical Slope Stability: Factors of Safety Under Static and Pseudo-Static Conditions. *Infrastructures, 10*(3). doi:10.3390/infrastructures10030053

Bayu, T., & Li, F. (2020). Review on contribution of integrated soil fertility management for climate change mitigation and agricultural sustainability. *Cogent Environmental Science, 6*. Retrieved from https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311843.2020.1823631

Boning, B., & Xie, X. (2013). Stress history effects on 1-D consolidation of soft soils: a rheological model. *Internacional Journal for Numerical and analytical methods in geomechanics, 37*(16), 2671-2689. Retrieved from https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nag.2156

Brady, N., & Weil, R. (2021). *The nature and properties of soils.* 15th ed. Pearson.

Budhu, M. (2021). *Soil mechanics fundamentals.* (3rd ed.). Wiley.

Chaudhary, N., Metya, S., & Sharma, K. (2024). Influence of Hydraulic Distribution Pattern on the Rock Slope Stability under Block Toppling Failure. *KSCE Journal of Civil Engineering, 28*(4), 1253-1266. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226798824003696

Das, B., & Sobhan, K. (2022). *Principles of geotechnical engineering.* 9th ed Cengage Learning.

Dias, C., Brito, L., & Nunes, L. (2023). Soil Carbon Sequestration in the Context of Climate Change Mitigation: A Review. *Soil Systems, 7*(3). doi:10.3390/soilsystems7030064

FAO. (2022). *Soil formation and classification: World reference base for soil resources 2022 update.*

Gao, Q., Wu, X., & Zeng, L. (2025). Reliability analysis of soil slope stability considering spatial variability of desiccation cracks. *Computers and Geotechnics, 179*. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X24009169?via%3Dihub

Jia, J., Mao, C., & Tenorio, V. (2024). Slope stability considering multi-fissure seepage under rainfall conditions. *Scientific Reports, 1*(2). Retrieved from https://www.nature.com/articles/s41598-024-62387-3

Kumar, S. S., Yadav, R., Yadav, S., & Yadav, A. (2024). Design and Analysis of Shallow Foundation Constructed on Soil Slope Through Finite Element Modelling. *Chandigarh University*, 6-92. Retrieved from https://es.scribd.com/document/990586565/Design-and-Analysis-of-Shallow-Foundation-Constructed-on-Soil-Slope-Through-Finite-Element-Modelling

Małkowski, P., Niedbalski, Z., & Balarabe, T. (2021). A statistical analysis of geomechanical data and its effect on rock mass numerical modeling: a case study. *Internacional Science y Technology*, 312-323. Retrieved from https://link.springer.com/article/10.1007/s40789-020-00369-2

Melentijević, S., Gutiérrez, J., Berisavljević, Z., Graterol, E., & Berisavljević, D. (2025). Application of LEM, FEM and DEM in Stability Analysis of Highly Jointed Rock

Slopes. *Springer Nature Link, 12*(135). Retrieved from https://link.springer.com/article/10.1007/s40515-025-00588-7

Mesa Lavista, Á., Álvarez Pérez, R., & Chávez Gómez, J. (2020). Evaluación del factor de seguridad en taludes de terraplenes carreteros altos ante carga sísmica. *SMI*. Retrieved from https://www.redalyc.org/journal/618/61878887001/

Mesías, D. (2018). *Estabilizacion de taludes aplicando el programa geotécnico GEO&SOFT y aplicacion práctica en el talud de la vía Pifo.* Quito: Pontificia UNiversidad Católica del Ecuador.

Noori, Y., Alshkane, Y., & Rashed, K. (2023). Geotechnical and Geophysical Investigations of Estimating Rock Mass Properties. *Iraqi Geological Journal, 56*(2D). doi: https://doi.org/10.46717/igj.56.2D.4ms-2023-10-10

Nur, M., Mulenga, F., & Sui, H. (2024). Slope Stability Analysis Using Limit Equilibrium and Numerical Modeling. *RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik, 2*(3), 117-124. doi: https://doi.org/10.70716/reswara.v2i3.391

Pan, Y., Wu, G., Zhao, z., & He, L. (2020). Analysis of rock slope stability under rainfall conditions considering the water-induced weakening of rock. *Computers and Geotechnics, 128*, 103806. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X20303694

Ramilo, R., Revell, T., & Grant, J. (2025). SLOPE STABILITY GEOTECHNICAL GUIDANCE SERIES. *New Zealand Geotechncal Society INC*, 60-121. Retrieved from https://www.nzgs.org/wp-content/uploads/2025/06/Unit-4-NZGS-Slope-Stability-Guidance-DRAFT.pdf

Stein, S., Dugan, B., Gonzales Zenteno, E., Ticona, J., & Minaya, A. (2024). Slope stabilization through groundwater management with limited hydrogeological data: a case study from Majes, southern Peru. *Environmental Earth Sciences.*, *83*(231). Retrieved from https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-024-11509-1

Ullah, S., Ullah, M., & Rehman, G. (2020). A brief review of the slope stability analysis methods. *Researchgate*, *4*(2), 73-77. doi: https://doi.org/10.26480/gbr.02.2020.73.77

Ur Rahman, A., Zhang, G., AlQahtani, S., Tarig, H., Hussain, I., Ur Rahman, H., & Ali, L. (2023). Geotechnical Assessment of Rock Slope Stability Using Kinematic and Limit Equilibrium Analysis for Safety Evaluation. *Water, 15*(10). Retrieved from https://www.mdpi.com/2073-4441/15/10/1924

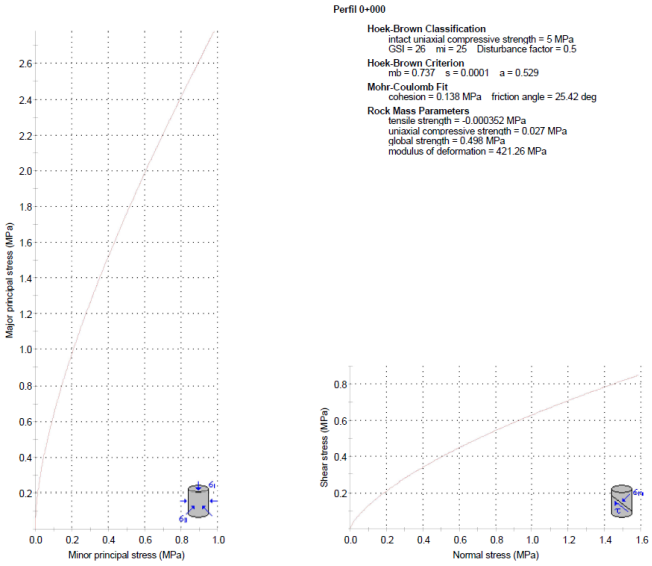
Wang, M., & Li, L. (2025). Slope stability analysis considering degradation of soil properties induced by intermittent rainfall. *Water, 17*(6), 814. Retrieved from https://www.mdpi.com/2073-4441/17/6/814

Yu, X., Zhao, T., & Tang, C. (2024). The water weakening effect on the progressive slope failure under excavation and rainfall conditions. *Springer nature link, 83*(316). Retrieved from https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-024-03809-4

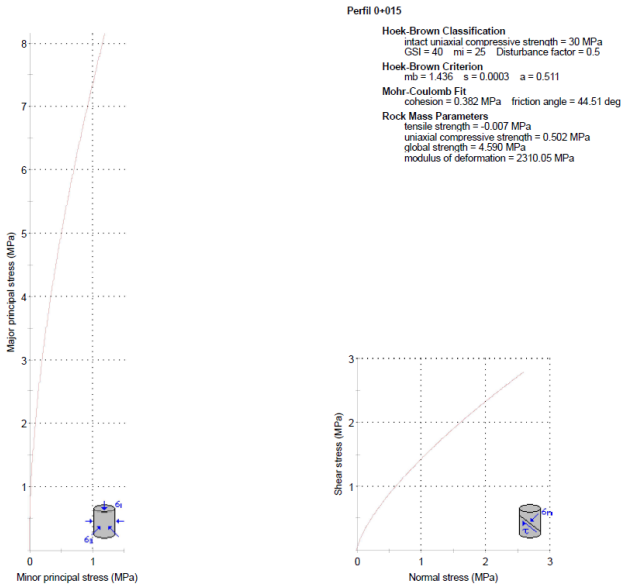
Zhu, X., Peng, J., Liu, B., Jiang, C., & Guo, J. (2020). Influence of textural properties on the failure mode and process of landslide dams. *Engineering Geology, 271*, 105613. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001379521931734X?via%3Dihub

# Apéndices

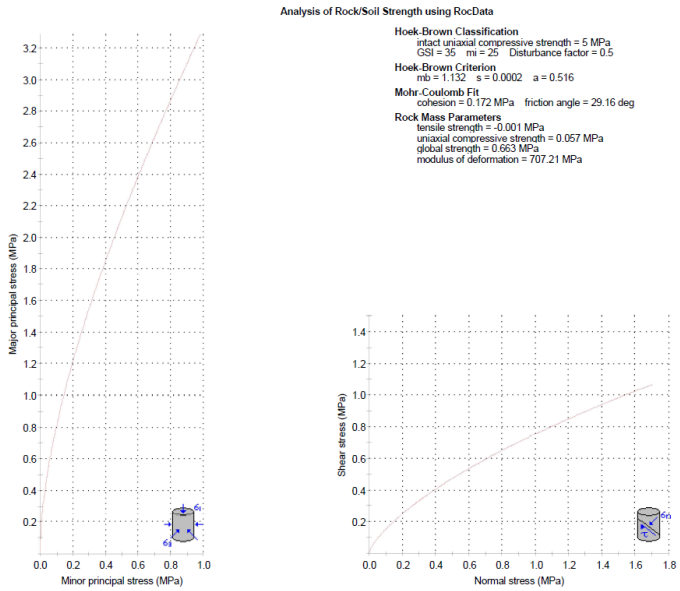
## Apéndice 1. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+000



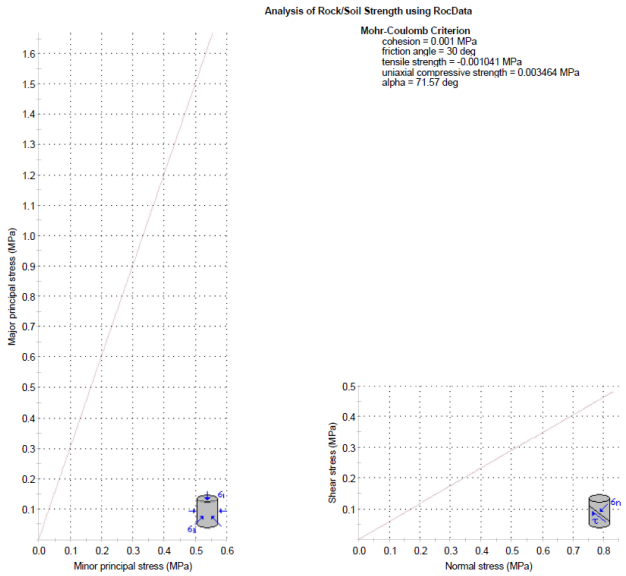

## Apéndice 2. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+015



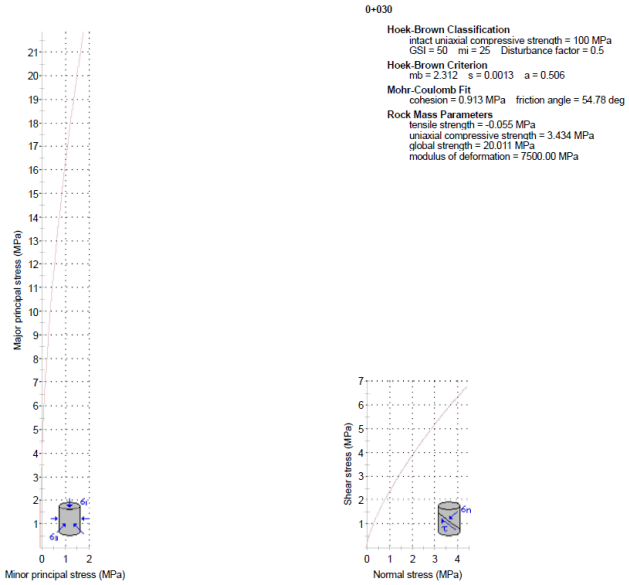
## Apéndice 3. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+030



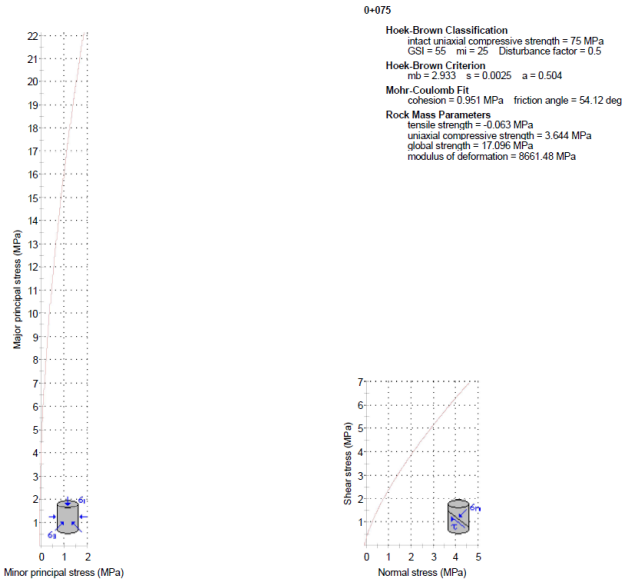

## Apéndice 4. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+045



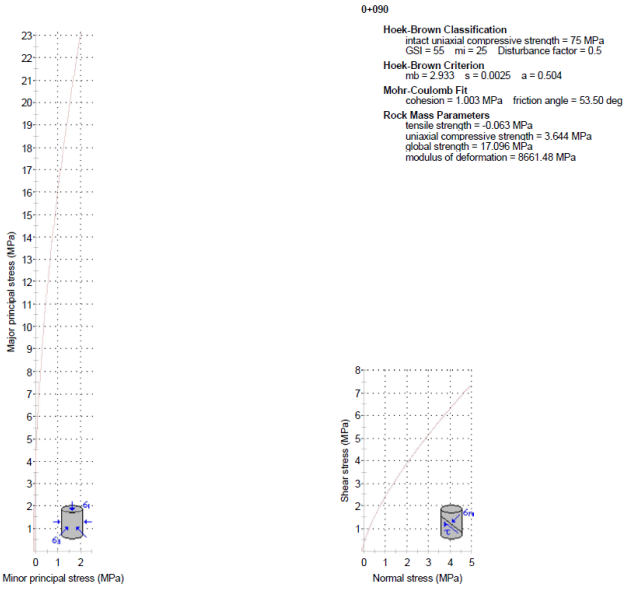
## Apéndice 5. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+060



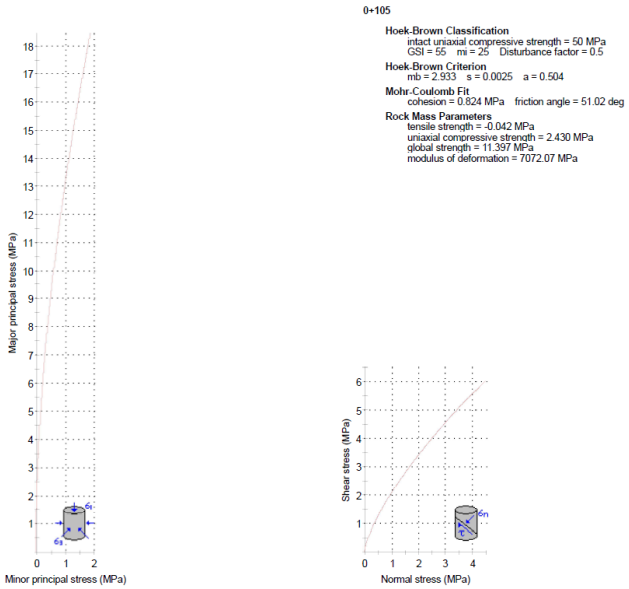

## Apéndice 6. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+075



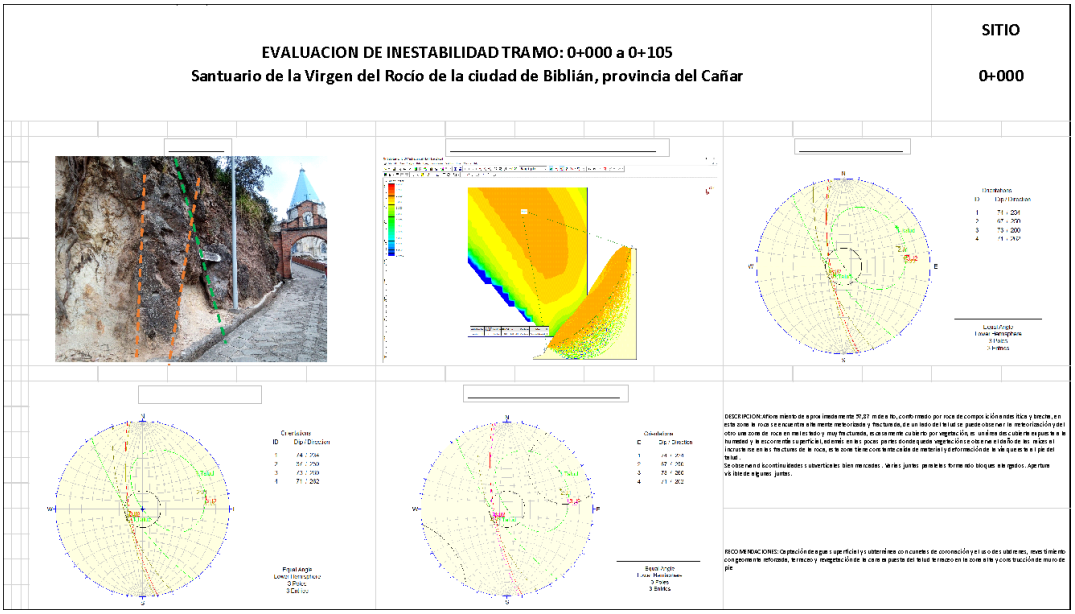
## Apéndice 7. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+090



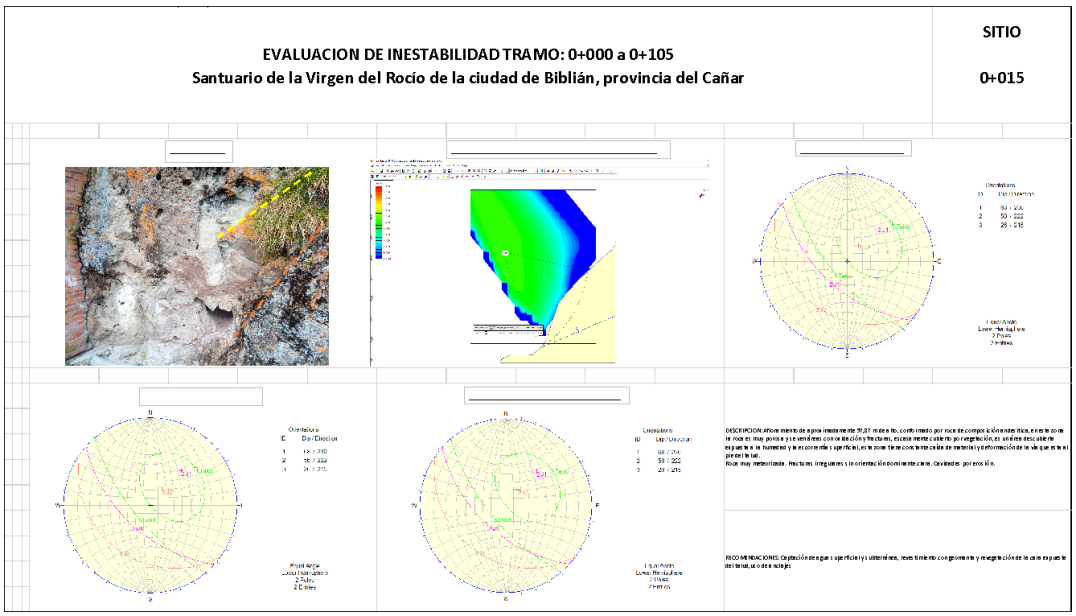

## Apéndice 8. Determinación de parámetros geomecánicos abscisa 0+105



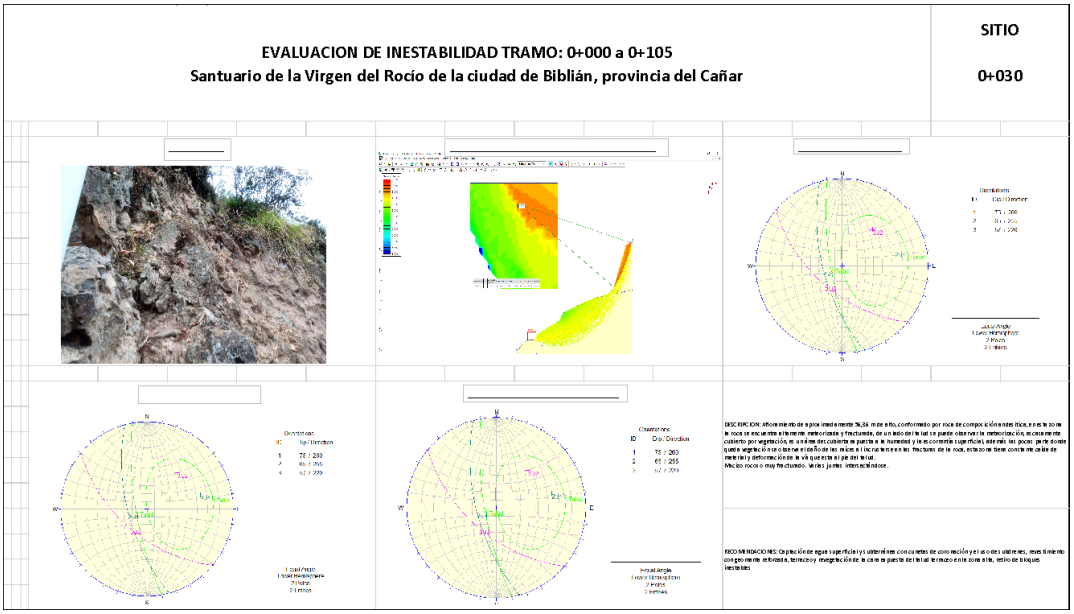
## Apéndice 9. Evaluación de inestabilidad 0+000



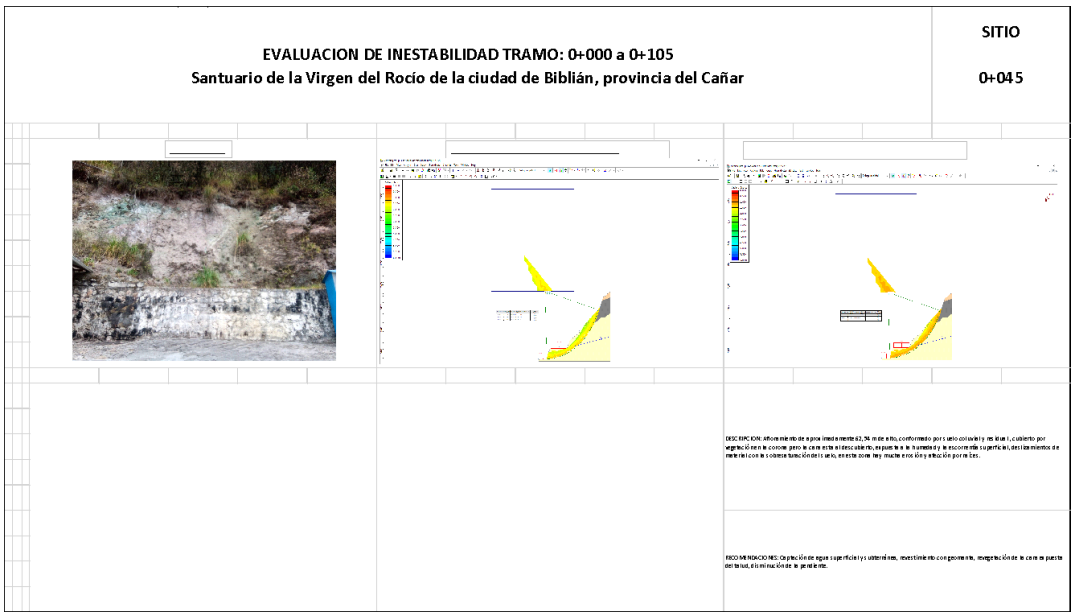

## Apéndice 10. Evaluación de inestabilidad 0+015



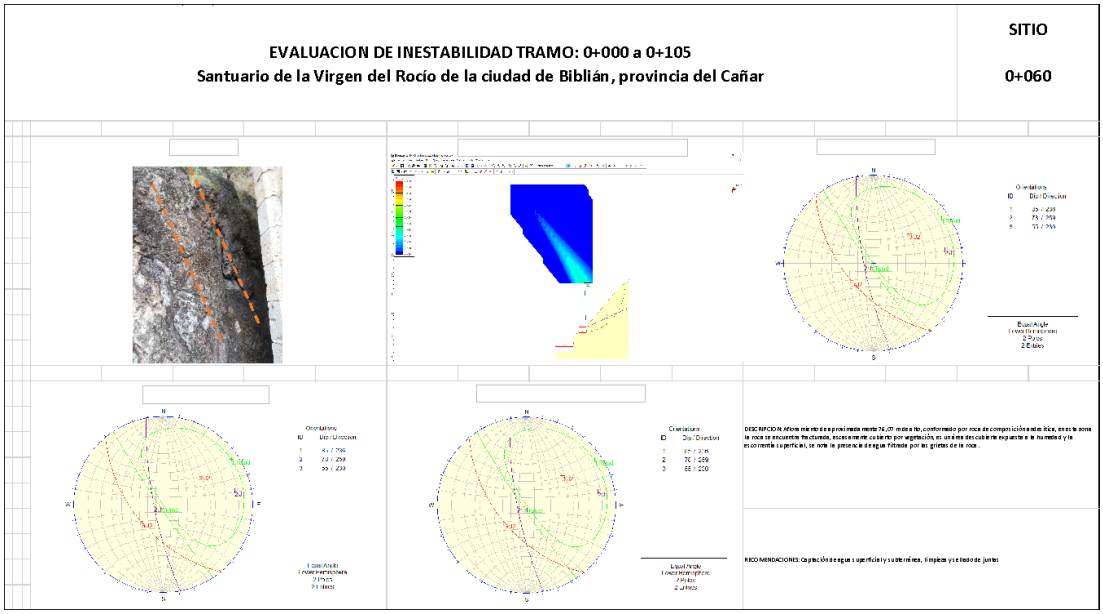
## Apéndice 11. Evaluación de inestabilidad 0+030



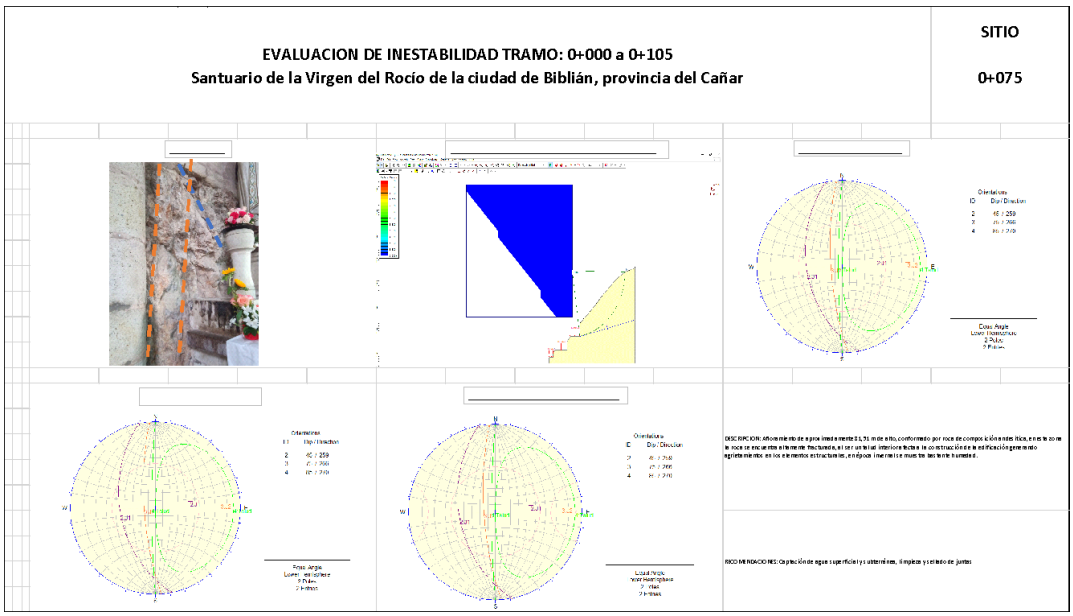

## Apéndice 12. Evaluación de inestabilidad 0+045



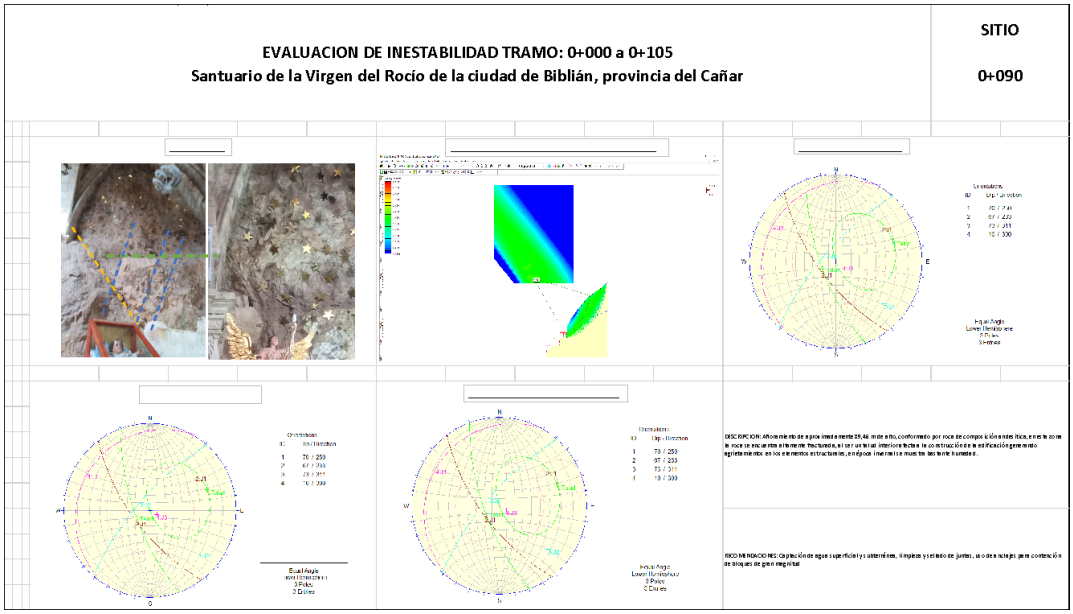
## Apéndice 13. Evaluación de inestabilidad 0+060



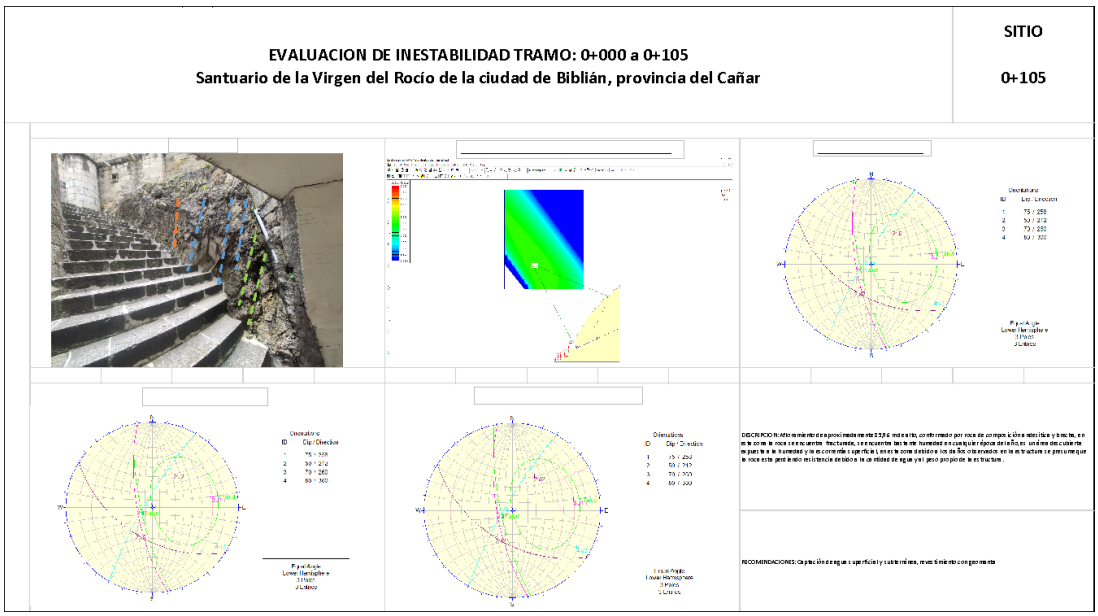

## Apéndice 14. Evaluación de inestabilidad 0+075



## Apéndice 15. Evaluación de inestabilidad 0+090




## Apéndice 16. Evaluación de inestabilidad 0+105

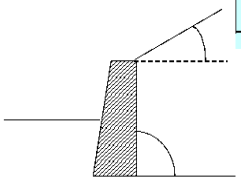


# Apéndice 17. Cálculo de muro de pie (abscisa 0+000)

1. DATOS DEL TIPO DE SUELO

| | | |
|---|---|---|
| $\gamma^s$ = | 2650 | Kg/m3 |
| Ø = | 25,42 | grados |
| qu = | 10000 | Kg/m2 |

2. DATOS DE LA GEOMETRIA DEL RELLENO



| | |
|---|---|
| $_d$ = | angulo del relleno |
| f = | angulo entre el suelo y la pared del muro |
| f | generalmente 90grados |

INGRESE LOS VALORES DE LA GEOMETRIA DEL RELLENO

| | | |
|---|---|---|
| $_d$ = | 0 | grados |
| f = | 90 | grados |

3. CALCULO DE LOS COEFICIENTES ACTIVO Y PASIVO

SEGÚN RANKING

| | |
|---|---|
| COS $_d$ = | 1 |
| COS Ø = | 0,903 |
| SENO Ø = | 0,429 |
| **Kha =** | **0,399** |
| **Khp =** | **2,507** |

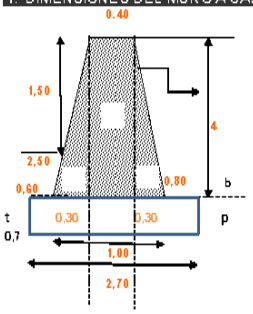
SEGÚN COULOMB

| | |
|---|---|
| SENO (f - Ø) = | 0,903 |
| z = | 16,947 |
| SENO f = | 1 |
| SENO (f + z) = | 0,957 |
| SENO (Ø - $_d$) = | 0,429 |
| SENO (Ø + z) = | 0,674 |
| SENO (f - $_d$) = | 1 |
| **Kha =** | **0,355** |
| **Khp =** | **2,817** |
| **Kha =** | **0,399** |
| **Khp =** | **2,506** |

**NOTA: Para $_d$ = 0° y Ø = 90°**

## ANALISIS Y DESEÑO DE UN MURO A GRAVEDAD

1. DIMENSIONES DEL MURO A CALCULAR




| | |
|---|---|
| $\gamma^t$ = | 2650 Kg/m3 |
| Ø = | 25,42 grados |

INGRESE LAS DIMENSIONES

| | |
|---|---|
| H = | 4 m |
| b = | 0,40 m |
| a = | 0,60 m |
| b1 = | 0,30 m |
| b2 = | 0,30 m |
| c = | 0,80 m |
| B = | 2,70 m |
| h = | 0,60 m |
| h' = | 2,50 m |

RESUMEN DE RESULTADOS

| | | |
|---|---|---|
| FSv = | 3,24 | Bien |
| FSd = | 4,87 | Bien |
| BETA EN EL TERCIO MEDIO | | |
| FScp = | 0,433525329 | Bien |

TRATAR DE MEDIAR LOS ESF.

| | | |
|---|---|---|
| f1 = | 23.066,70 | 2,31 |
| f2 = | 1.975,56 | 0,20 |

| | | |
|---|---|---|
| Kha = | 0,399 | RANKING |
| Khp = | 2,507 | |
| Kha = | 0,355 | COULOMB |
| Khp = | 2,817 | |
| Kha = | 0,399 | COULOMB |
| Khp = | 2,506 | $_d$ = 0° y Ø = 90° |

| | |
|---|---|
| b = | 4,3 ° |
| m = | 0,889 m |

b = angulo de la fuerza de empuje con la tierra y la horizontal

m = posicion de la fuerza de empuje en la horizontal

INGRESE LOS VALORE DE Kha y Khp QUE DESEA USAR

| | |
|---|---|
| Kha = | 0,399 |
| Khp = | 2,507 |

2. CALCULO DE LOS EMPUJES ACTIVO Y PASIVO

SOBRECARGA DEBIDA A LA PRESENCIA DE VIAS, VIVIENDAS, ETC

200 Kg/m

| | | HORIZ. | VERT. |
|---|---|---|---|
| EMPUJE ACTIVO = | 8458,8 Kg/m | 3213,521 | 12651,629 |
| EMPUJE SOBRECARGA = | 319,2 Kg/m | 121,265 | 477,42 |
| EMPUJE PASIVO = | 20761,09375 Kg/m | | |

3. CALCULO DEL MOMENTO DESESTABILIZANTE

| | |
|---|---|
| BRAZO EMPUJE ACTIVO = | 1,333 m |
| BRAZO SOBRECARGA = | 2 m |
| BRAZO EMPUJE PASIVO = | 0,133 m |
| MOMENTO DES = | 14678,025 Kg m |

## 4. CALCULO DEL MOMENTO ESTABILIZANTE

| | Wi | xi | Mi |
|---|---|---|---|
| 1 | 3840 Kg/m | 0,800 | 3072,00 |
| 2 | 1440 Kg/m | 1,1 | 1584,00 |
| 3 | 1440 Kg/m | 0,7 | 1008,00 |
| 4 | 3888 Kg/m | 1,35 | 5248,80 |
| 5 | 10070 Kg/m | 1,30 | 13091,00 |
| Es vertic. | 12661,629 Kg/m | 1,79 | 22633,76 |
| Es sobr. | 477,42 Kg/m | 1,79 | 854,10 |
| | | TOTAL = | 47491,67 |

| | |
|---|---|
| Σ Fv = | 33807,05 Kg/m |

| | |
|---|---|
| MOMENTO EST = | 47491,67 Kg m |

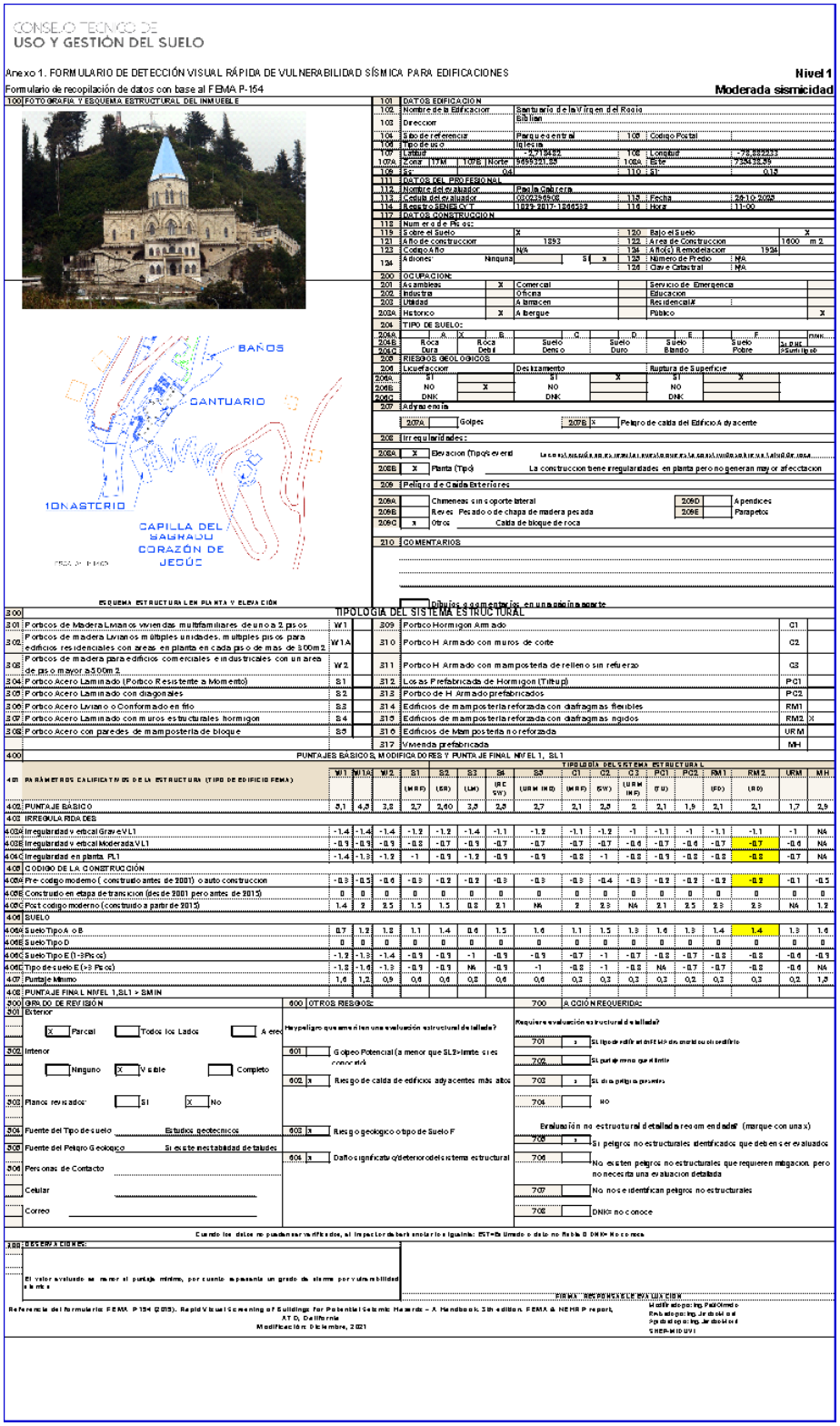
## 5. FACTORES DE SEGURIDAD

| COEFICIENTES DE FRICCION | |
|---|---|
| MATERIAL | f |
| Arena o grava gruesa sin limo | 0,5 - 0,7 |
| Materiales granulares gruesos con limo | 0,45 |
| Arena o grava fina | 0,4 - 0,6 |
| Arcillas densas | 0,3 - 0,5 |
| Arcillas blandas o limo | 0,2 - 0,3 |

| SELECCIONE UN VALOR DE f | |
|---|---|
| f= | 0,66 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| F. S. VOLCAMIENTO = | | 8,24 | BIEN |
| F. S. DESLIZAMIENTO = | | 4,87 | BIEN |
| 1 Bien Izq<br>1 Bien der | Xa = | 0,871 m | ESTA EN EL TERCIO MEDIO |
| | e = | 0,878 m | BIEN |
| f1 (Izq) = | 28068,708 Kg/m2 | | |
| f2 (der) = | 1876,668 Kg/m2 | 2,307 | BIEN |

# Apéndice 18. Formulario de detección visual rápida de vulnerabilidad sísmica para edificaciones de la zona de estudio



CONSEJO TECNICO DE
USO Y GESTIÓN DEL SUELO

Anexo 1. FORMULARIO DE DETECCIÓN VISUAL RÁPIDA DE VULNERABILIDAD SÍSMICA PARA EDIFICACIONES — **Nivel 1**

Formulario de recopilación de datos con base al FEMA P-154 — **Moderada sismicidad**

100 FOTOGRAFIA Y ESQUEMA ESTRUCTURAL DEL INMUEBLE

101 DATOS EDIFICACION

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 102 | Nombre de la Edificacion | Santuario de la Virgen del Rocio Biblian | | | |
| 103 | Direccion | | | | |
| 104 | Sitio de referencia | Parque central | 105 | Codigo Postal | |
| 106 | Tipo de uso | Iglesia | | | |
| 107 | Longitud | 9719432 | 108 | Longitud | 9758235 |
| 107A | Zona 17M | 107B Norte | 9495211.39 | 108A Este | 758235.35 |
| 109 | Ss: | 0.4 | 110 | S1 | 0.15 |

111 DATOS DEL PROFESIONAL

| | | | |
|---|---|---|---|
| 112 | Nombre del evaluador | Paola Cabrera | |
| 113 | Cedula del evaluador | 0503934806 | 115 Fecha 26-10-2021 |
| 114 | Registro SENESCYT | 1023-2017-1865522 | 116 Hora 11:00 |

117 DATOS CONSTRUCCION

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 118 | Numero de Pisos: | | | | | | |
| 119 | Sobre el Suelo | X | | 120 | Bajo el Suelo | | X |
| 121 | Año de construccion | 1893 | | 122 | Area de Construccion | 1600 | m2 |
| 123 | Codigo Año | N/A | | 124 | Año(s) Remodelacion | 1934 | |
| 124 | Adiones: | Ninguna | SI X | 125 | Numero de Predio | NA | |
| | | | | 126 | Clave Catastral | NA | |

200 OCUPACION:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 201 | Asambleas | X | Comercial | | Servicio de Emergencia | | |
| 202 | Industria | | Oficina | | Educacion | | |
| 203 | Unidad | | Almacen | | Residencial# | | |
| 203A | Historico | X | Albergue | | Publico | | X |

204 TIPO DE SUELO:

| | A | B | C | D | E | F | DNK |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 204A | X | | | | | | |
| 204B | Roca Dura | Roca Debil | Suelo Denso | Suelo Duro | Suelo Blando | Suelo Pobre | Si DNK Asumir tipo |
| 204C | | | | | | | |

208 RIESGOS GEOLOGICOS

| | Licuefaccion | | Deslizamiento | | Ruptura de Superficie | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 206A | SI | | SI | X | SI | X |
| 206B | NO | X | NO | | NO | |
| 206C | DNK | | DNK | | DNK | |

207 Adyacencia

207A [ ] Golpes — 207B [X] Peligro de caida del Edificio Adyacente

208 Irregularidades:

208A [X] Elevacion (Tipo/Severidad) — La construccion tiene irregularidades en elevacion pero no generan mayor afectacion

208B [X] Planta (Tipo) — La construccion tiene irregularidades en planta pero no generan mayor afectacion

209 Peligro de Caida Exteriores

| | | | |
|---|---|---|---|
| 209A | [ ] | Chimeneas sin soporte lateral | 209D [ ] Apendices |
| 209B | [ ] | Reves Pesado o de chapa de madera pesada | 209E [ ] Parapetos |
| 209C | [X] | Otros: Caida de bloque de roca | |

210 COMENTARIOS

[ ] Dibujos o comentarios en una página aparte

ESQUEMA ESTRUCTURAL EN PLANTA Y ELEVACIÓN



300 TIPOLOGIA DEL SISTEMA ESTRUCTURAL

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 301 | Porticos de Madera Livianos viviendas multifamiliares de uno a 2 pisos | W1 | | 309 | Portico Hormigon Armado | C1 | |
| 302 | Porticos de madera Livianos multiples unidades, multiples pisos para edificios residenciales con areas en planta en cada piso de mas de 500m2 | W1A | | 310 | Portico H. Armado con muros de corte | C2 | |
| 303 | Porticos de madera para edificios comerciales e industriales con un area de piso mayor a 500m 2 | W2 | | 311 | Portico H. Armado con mamposteria de relleno sin refuerzo | C3 | |
| 304 | Portico Acero Laminado (Portico Resistente a Momento) | S1 | | 312 | Losas Prefabricadas de Hormigon (Tilt-up) | PC1 | |
| 305 | Portico Acero Laminado con diagonales | S2 | | 313 | Portico de H. Armado prefabricados | PC2 | |
| 306 | Portico Acero Liviano o Conformado en frio | S3 | | 314 | Edificios de mamposteria reforzada con diafragmas flexibles | RM1 | |
| 307 | Portico Acero Laminado con muros estructurales hormigon | S4 | | 315 | Edificios de mamposteria reforzada con diafragmas rigidos | RM2 | X |
| 308 | Portico Acero con paredes de mamposteria de bloque | S5 | | 316 | Edificios de Mamposteria no reforzada | URM | |
| | | | | 317 | Vivienda prefabricada | MH | |

400 PUNTAJES BASICOS, MODIFICADORES Y PUNTAJE FINAL NIVEL 1, SL1

| 401 PARÁMETROS CALIFICATIVOS DE LA ESTRUCTURA (TIPO DE EDIFICIO FEMA) | TIPOLOGIA DEL SISTEMA ESTRUCTURAL | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | W1 | W1A | W2 | S1 (MRF) | S2 (BR) | S3 (LM) | S4 (RC SW) | S5 (URM INF) | C1 (MRF) | C2 (SW) | C3 (URM INF) | PC1 (TU) | PC2 | RM1 | RM2 (FD) | URM (RD) | MH |
| 402 PUNTAJE BASICO | 3,1 | 4,8 | 3,8 | 2,7 | 2,60 | 2,8 | 2,8 | 2,7 | 2,1 | 2,8 | 2 | 2,1 | 1,9 | 2,1 | 2,1 | 1,7 | 2,9 |
| 403 IRREGULARIDADES | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 403A Irregularidad vertical Grave V L1 | -1,4 | -1,4 | -1,4 | -1,2 | -1,2 | -1,4 | -1,1 | -1,2 | -1,1 | -1,2 | -1 | -1,1 | -1 | -1,1 | -1,1 | -1 | NA |
| 403B Irregularidad vertical Moderada V L1 | -0,9 | -0,9 | -0,9 | -0,8 | -0,7 | -0,9 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -0,7 | -0,6 | -0,7 | -0,6 | -0,7 | -0,7 | -0,6 | NA |
| 404C Irregularidad en planta PL1 | -1,4 | -1,3 | -1,2 | -1 | -0,9 | -1,2 | -0,9 | -0,9 | -0,8 | -1 | -0,8 | -0,9 | -0,8 | -0,8 | -0,8 | -0,7 | NA |
| 405 CODIGO DE LA CONSTRUCCIÓN | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 405A Pre-codigo moderno ( construido antes de 2001) o auto construccion | -0,3 | -0,5 | -0,6 | -0,3 | -0,2 | -0,2 | -0,3 | -0,3 | -0,3 | -0,4 | -0,3 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,1 | -0,5 |
| 405B Construido en etapa de transicion (des de 2001 pero antes de 2015) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 405C Post codigo moderno (construido a partir de 2015) | 1,4 | 2 | 2,5 | 1,5 | 1,5 | 0,8 | 2,1 | NA | 2 | 2,8 | NA | 2,1 | 2,5 | 2,8 | 2,8 | NA | 1,2 |
| 406 SUELO | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 406A Suelo Tipo A o B | 0,7 | 1,2 | 1,2 | 1,1 | 1,4 | 0,6 | 1,5 | 1,6 | 1,1 | 1,5 | 1,3 | 1,6 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,3 | 1,6 |
| 406B Suelo Tipo D | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 406C Suelo Tipo E (1-3 Pisos) | -1,2 | -1,3 | -1,4 | -0,9 | -0,9 | -1 | -0,9 | -0,9 | -0,7 | -1 | -0,7 | -0,8 | -0,7 | -0,8 | -0,8 | -0,6 | -0,9 |
| 406D Tipo de suelo E (>3 Pisos) | -1,8 | -1,6 | -1,8 | -0,9 | -0,9 | NA | -0,9 | -1 | -0,8 | -1 | -0,8 | NA | -0,7 | -0,7 | -0,8 | -0,6 | NA |
| 407 Puntaje Mínimo | 1,6 | 1,2 | 0,9 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 1,0 |
| 408 PUNTAJE FINAL NIVEL 1, SL1 > SMIN | | | | | | | | | | | | | | | | | |

500 GRADO DE REVISION

501 Exterior

[X] Parcial [ ] Todos los Lados [ ] Aereo

502 Interior

[ ] Ninguno [X] Visible [ ] Completo

503 Planos revisados: [ ] SI [X] No

504 Fuente del Tipo de suelo: Estudios geotecnicos

505 Fuente del Peligro Geologico: Si existe inestabilidad de taludes

506 Personas de Contacto:

Celular:

Correo:

600 OTROS RIESGOS:

Hay peligros que ameriten una evaluación estructural detallada?

601 [ ] Golpeo Potencial (a menor que SL2=Limite si es conocido)

602 [x] Riesgo de caida de edificios adyacentes más altos

603 [x] Riesgo geologico o tipo de Suelo F

604 [x] Daños significativos/deterioro del sistema estructural

700 ACCIÓN REQUERIDA:

Requiere evaluación estructural detallada?

701 [ ] SI, tipo de edificio FEMA no mencionado en este edificio

702 [ ] SI, por ambos criterios

703 [ ] SI, otros peligros presentes

704 [ ] NO

Evaluación no estructural detallada recomendada? (marque con una x)

705 [ ] SI, peligros no estructurales identificados que deben ser evaluados

706 [ ] No existen peligros no estructurales que requieren mitigacion, pero no necesita una evaluacion detallada

707 [ ] No se identifican peligros no estructurales

708 [ ] DNK= no conoce

Cuando los datos no puedan ser verificados, el inspector debe anotar lo siguiente: EST=Estimado o dato no fiable, D DNK= No conoce

800 OBSERVACIONES:

El valor evaluado se menor al puntaje mínimo, por cuanto representa un grado de alerta por vulnerabilidad sísmica

FIRMA RESPONSABLE EVALUACION

Referencia del formulario: FEMA P-154 (2015). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards – A Handbook, 3th edition. FEMA & NEHRP report, ATC, California
Modificación: Diciembre, 2021

Modificado por: Ing. Paola Ximena Cabrera Rodriguez, Jefa del area de Riesgos y Ingeniería del CTUGS-M.I.D.U.V.I

**Apéndice 19. Informe de Evaluación de la cimentación**

1. Antecedentes

Se realizó una inspección técnica en la estructura emplazada en el sector del Cerro Zhalao, se desarrolló una evaluación del estado de la cimentación y su interacción con el macizo rocoso donde se encuentra apoyada.

La inspección tuvo como finalidad identificar posibles afectaciones asociadas a la presencia de agua en el macizo rocoso, así como determinar si existen indicios de deterioro o pérdida de capacidad portante de la roca de fundación.

Cabe indicar que durante la evaluación no se dispuso de planos estructurales ni memoria de cálculo, y no fue posible realizar ensayos geotécnicos o estructurales en sitio, por lo que el análisis se basa en inspección visual, reconocimiento geológico y estimaciones técnicas, en concordancia con los lineamientos de evaluación de estructuras existentes contemplados en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15).

2. Objetivos

Objetivo general

Evaluar el estado de la cimentación y determinar la posible afección del agua en el macizo rocoso que sirve de fundación a la estructura.

Objetivos específicos

Identificar visualmente el tipo de contacto entre la cimentación y la roca.

Evaluar el estado de meteorización del macizo rocoso.

Identificar filtraciones o circulación de agua en la roca.

Analizar posibles procesos de degradación o pérdida de capacidad de soporte.

3. Alcance y limitaciones del estudio

El presente estudio corresponde a una evaluación preliminar basada en inspección visual, por lo que se establecen las siguientes limitaciones:

No se dispone de planos estructurales ni memoria de cálculo.

No se realizaron ensayos geotécnicos ni estructurales en campo.

Los parámetros geotécnicos utilizados corresponden a valores estimados según literatura técnica para macizos rocosos similares.

La evaluación se limita a los sectores accesibles de la cimentación. Por lo tanto, los resultados deben interpretarse como una evaluación cualitativa del estado actual de la cimentación.

4. Metodología

Para realizar el análisis se procedió con la visita al sitio generando un levantamiento de información que compete al tipo de estructura, tipo de cimentación, visita al sitio más cercano donde se puede observar la cimentación y además se realizó un levantamiento de riesgo sísmico según al Apéndice 1 (análisis visual de riesgo sísmico)

Los parámetros geomecánicos fueron asumidos de los datos obtenidos en el apartado de análisis de estabilidad de taludes

5. Descripción del sistema estructural

La estructura se encuentra conformada principalmente por elementos construidos con piedra de granito tallada, incluyendo:

- Arcos estructurales
- Columnas
- Muros portantes

- Losas de cubierta

Las columnas se encuentran directamente ancladas al macizo rocoso, lo que indica que la roca actúa como fundación directa del sistema estructural.

6. Caracterización del macizo rocoso de fundación

Durante la inspección se identificó que la estructura se encuentra cimentada sobre un macizo rocoso de tipo andesítica expuesto, el cual presenta las siguientes características generales:

Presencia de fracturas naturales y discontinuidades. Grado de meteorización variable, mayor en sectores expuestos a la intemperie. Evidencia de escorrentía superficial y posibles filtraciones de agua a través de las discontinuidades. Las discontinuidades presentes en el macizo rocoso pueden favorecer la circulación de agua, lo cual a largo plazo puede generar procesos como el incremento del grado de meteorización, apertura progresiva de fracturas, reducción local de la resistencia del macizo rocoso.

Para los parámetros geomecánicos se toma en consideración los que fueron determinados en el apartado de análisis de estabilidad de taludes (solo se consideran las abscisas 0+075 hasta las 0+105) y se resumen en el siguiente cuadro:

**Tabla 16**

*Parámetros geomecánicos estimados del macizo rocoso de fundación*

| No | Abscisa | GSI | c' (MPa) | φ' (°) |
|---|---|---|---|---|
| 6 | 0+075 | 55 | 0.941 | 54.24 |
| 7 | 0+090 | 55 | 0.999 | 53.54 |
| 8 | 0+105 | 55 | 0.209 | 68.92 |

**Nota:** Parámetros estimados a partir del análisis de estabilidad de taludes utilizando el criterio de resistencia de Hoek–Brown.

Este rango corresponde a macizos rocosos moderadamente fracturados, con capacidad adecuada para cimentaciones directas, aunque susceptibles a degradación progresiva si existen procesos de infiltración de agua.

## 7. Evaluación de la cimentación

### 7.1 Tipo de cimentación

La estructura presenta un sistema de cimentación directa sobre roca, donde las columnas se encuentran ancladas directamente al macizo rocoso.

Este tipo de cimentación generalmente presenta altas capacidades portantes, siempre que el macizo rocoso mantenga condiciones adecuadas de integridad estructural.

Modelo conceptual de interacción roca y estructura. El comportamiento estructural del sistema analizado depende de la interacción entre la estructura de piedra y el macizo rocoso que actúa como fundación natural.

En este caso, el modelo conceptual de transferencia de cargas puede describirse de la siguiente manera: Losas y cubiertas transmiten las cargas gravitacionales hacia los arcos y muros portantes.

Arcos estructurales redistribuyen las cargas hacia los apoyos laterales, reduciendo la concentración de esfuerzos y transformando parte de las cargas verticales en empujes laterales. Muros y columnas de piedra actúan como elementos portantes principales, conduciendo las cargas hacia la base de la estructura.

Cimentación directa en roca las columnas y muros transmiten las cargas directamente al macizo rocoso, el cual funciona como una fundación rígida natural. En este sistema

estructural, la estabilidad depende principalmente de: la resistencia del macizo rocoso, la integridad de las discontinuidades, la calidad del contacto roca–estructura, la presencia o ausencia de agua en las juntas.

Dado que la roca posee generalmente alta capacidad portante, el comportamiento estructural suele estar controlado por la calidad del macizo rocoso y su estado de meteorización, más que por la resistencia intrínseca del material.

7.2 Estado de contacto roca–estructura

Durante la inspección visual se observaron los siguientes aspectos el contacto directo entre elementos de piedra y roca natural, entre las observaciones del sitio no se encontró desplazamientos significativos visibles en las bases de las columnas, no se identificaron hundimientos diferenciales evidentes, sin embargo, en algunos sectores se observó: presencia de humedad en la superficie de la roca, escorrentía superficial durante eventos de lluvia, zonas localizadas con mayor grado de meteorización.

En ausencia de ensayos de resistencia de la roca, se utilizaron valores típicos reportados en literatura geotécnica para macizos rocosos con calidad geomecánica media.

Para macizos rocosos con las características observadas, la capacidad portante admisible estimada puede encontrarse dentro de la figura 31

**Figura 31**

*Capacidad portante admisible*

| Tipo de Material | ρ (kg/cm$^2$) |
|---|---|
| Roca, dura y sana (granito, basalto) | 40 |
| Roca, medio dura y sana (pizarras y esquistos) | 20 |
| Roca, blanda o fisurada | 7 |
| Conglomerado compacto bien graduado | 4 |
| Gravas. Mezcla de arena y grava | 2* |
| Arena gruesa. Mezcla de grava y arena | 2* |
| Arena fina a media. Arena media a gruesa, mezclada con limo o arcilla. | 1.5* |
| Arena fina. Arena media a fina mezclada con limo o arcilla. | 1.0* |
| Arcilla inorgánica, firme. | 1.5 |
| Arcilla inorgánica, blanda. | 0.5 |
| Limo inorgánico, con o sin arena. | 0.25 |

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la figura se obtiene que la capacidad portante admisible estimada: 7 Kg/cm2 y la carga estimada que soporta cada columna es de 3.7 kg/cm2, considerando el tipo de estructura observada (piedra tallada con distribución de cargas a través de arcos y muros portantes), es probable que las cargas transmitidas a la roca se encuentren muy por debajo de la capacidad portante estimada del macizo, lo que reduce la probabilidad de fallas por capacidad de soporte.

Sin embargo, la estabilidad local podría verse afectada si la meteorización progresa o si se incrementa la infiltración de agua en las discontinuidades.

7.3 Evaluación del riesgo asociado al agua en la roca de fundación

Durante la inspección se identificaron indicios de presencia de agua y humedad en la superficie del macizo rocoso, principalmente asociados a escorrentía superficial y posibles filtraciones a través de discontinuidades.

La presencia de agua en macizos rocosos puede generar varios procesos que afectan su comportamiento geomecánico.

El agua favorece procesos de alteración química y desintegración física de la roca, especialmente en sectores expuestos a ciclos de humedad y secado.

Este proceso puede producir la pérdida gradual de resistencia del macizo rocoso desprendimiento de fragmentos y la ampliación de discontinuidades existentes

Las discontinuidades presentes en el macizo rocoso constituyen planos potenciales de debilidad. La presencia de agua en estas superficies puede provocar la reducción del ángulo de fricción de las juntas, la disminución de la resistencia al corte y el incremento de desplazamientos potenciales

En condiciones de infiltración significativa, el agua puede generar presión dentro de las discontinuidades, lo que favorece su apertura y puede contribuir a la degradación del macizo.

8. Mecanismo de falla

Aunque las cimentaciones sobre roca suelen presentar un comportamiento favorable, existen ciertos mecanismos potenciales de falla que deben considerarse durante la evaluación. Falla por deslizamiento sobre discontinuidades Si existen planos de debilidad en la roca (fracturas, diaclasas o estratificación), las cargas transmitidas por la estructura podrían inducir deslizamientos a lo largo de estas superficies. Este mecanismo depende principalmente de: orientación de las discontinuidades, ángulo de fricción de las juntas y presencia de agua, peso de la estructura. Durante la inspección visual no se observaron desplazamientos evidentes, lo que sugiere que este mecanismo no se encuentra activo actualmente.

Falla por desprendimiento de bloques en macizos rocosos fracturados, pueden formarse bloques delimitados por discontinuidades que podrían desprenderse si pierden confinamiento o si la meteorización avanza. Este fenómeno puede ser favorecido por: infiltración de agua, procesos de meteorización y apertura progresiva de fracturas. Sin embargo, en la inspección realizada no se observaron bloques inestables directamente asociados a las bases de las columnas.

Falla por degradación progresiva del macizo rocoso. - uno de los mecanismos más comunes en estructuras cimentadas sobre roca expuesta es la degradación gradual del macizo debido a la meteorización. Este proceso puede generar entre sus consecuencias la reducción de la resistencia de la roca, aumento del fracturamiento y pérdida de contacto efectivo entre roca y cimentación.

La presencia de agua constituye uno de los principales factores que pueden acelerar este proceso.

Asentamientos diferenciales. - aunque poco comunes en cimentaciones sobre roca, pueden ocurrir asentamientos si: existen zonas localizadas de roca altamente meteorizada, se producen desprendimientos o cavidades bajo los apoyos. Durante la inspección realizada no se identificaron evidencias de asentamientos diferenciales significativos.

9. Evaluación del riesgo sísmico de la estructura

Para el análisis de riesgo sísmico se usó el Apéndice 1. Formulario de detección visual rápida de vulnerabilidad sísmica para edificaciones.

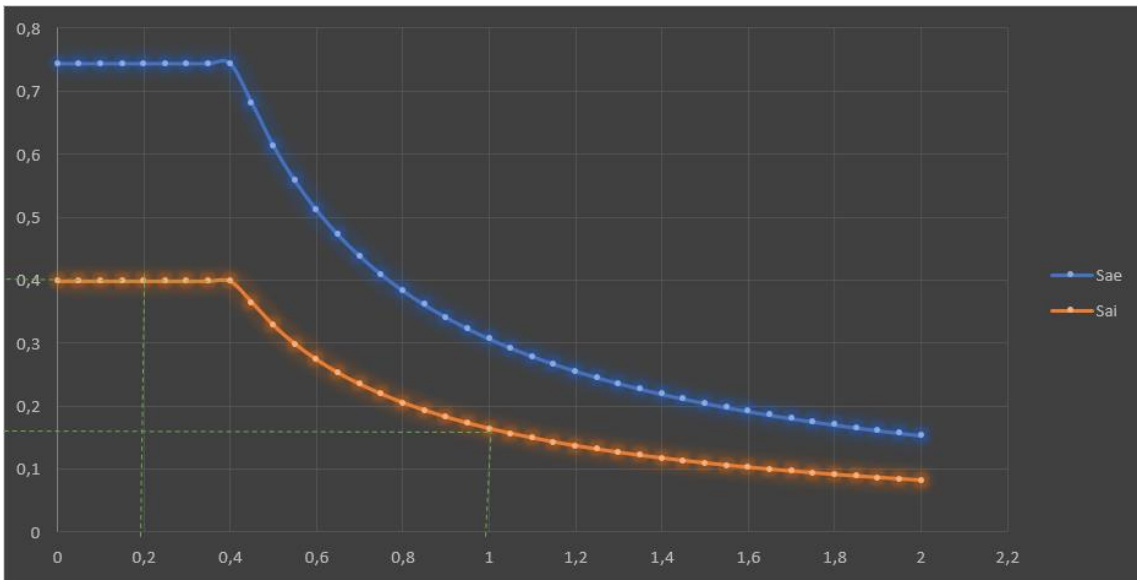
**Figura 32.**

*Determinación del espectro de respuesta estimado para la zona de estudio*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Factor Z | | | 0,3 |
| Suelo | Tipo C | Fa | 1 |
| | | Fd | 1 |
| | | Fs | 0,75 |
| Tablas NEC | | η | 2,48 |
| | | r | 1 |
| | | I | 1,3 |
| | | Φp | 0,9 |
| | | Φe | 0,9 |
| | | R | 3 |

III

| Solución de Ecuaciones de la gráfica | |
|---|---|
| To | 0,075 |
| Tc | 0,4125 |




Fuente: elaboración propia (2026)

## 10. Conclusiones

La estructura se encuentra cimentada directamente sobre un macizo rocoso que actúa como fundación natural.

El sistema estructural está compuesto por elementos de piedra tallada que transmiten las cargas hacia la roca mediante columnas y muros portantes.

## 11. Recomendaciones

Implementar sistemas de drenaje superficial que permitan reducir la infiltración de agua hacia la roca de fundación.

Realizar mantenimiento periódico para evitar acumulación de agua cerca de las bases de las columnas.

Implementar un plan de monitoreo estructural, que incluya:

control de fisuras, medición de posibles desplazamientos, inspecciones periódicas del macizo rocoso.

Evaluar la posibilidad de realizar en el futuro estudios geotécnicos complementarios, tales como: levantamiento geológico detallado, caracterización del macizo rocoso, análisis de discontinuidades.

En caso de evidenciarse incremento en la infiltración de agua o deterioro progresivo de la roca, se recomienda realizar un estudio geotécnico especializado que permita evaluar con mayor precisión la estabilidad del sistema de cimentación.

**Apéndice 20. Plan de monitoreo**

1. Objetivo del monitoreo

El presente plan de monitoreo tiene como objetivo realizar el seguimiento y control del comportamiento geotécnico y estructural del área de estudio, mediante la instalación de instrumentos que permitan detectar desplazamientos del macizo rocoso, variaciones en el nivel piezométrico y posibles deformaciones en la estructura existente.

La implementación de este sistema de monitoreo permitirá identificar cambios en las condiciones de estabilidad del talud y de la estructura, facilitando la generación de alertas tempranas y la toma de decisiones oportunas para la implementación de medidas preventivas o correctivas.

2. Instrumentación propuesta

Con el fin de evaluar el comportamiento del sistema talud–estructura, se propone la instalación de diferentes instrumentos geotécnicos que permitan monitorear los principales factores que influyen en la estabilidad del sitio.

La instrumentación propuesta incluye:

4 Puntos de monitoreo mediante GPS

2 Deformímetros estructurales

6 Extensómetros

8 Piezómetros

Cada uno de estos instrumentos permitirá evaluar distintos parámetros asociados al comportamiento del terreno y de la estructura.

3. Descripción del monitoreo

- Monitoreo mediante GPS

Se propone la instalación de cuatro puntos de control geodésico mediante tecnología GPS, ubicados estratégicamente en sectores representativos del talud y del entorno de la edificación.

- Monitoreo estructural mediante Deformímetros

Para evaluar el comportamiento de la estructura, se propone la instalación de dos deformímetros, los cuales permitirán registrar posibles desplazamientos, aperturas de fisuras o deformaciones en elementos estructurales relevantes.

Los deformímetros deberán ubicarse en zonas donde se hayan identificado daños estructurales o presencia de fisuras, con el fin de monitorear la evolución de estas discontinuidades a lo largo del tiempo.

Las mediciones deberán registrarse de forma periódica, permitiendo evaluar si las deformaciones observadas presentan un comportamiento estable o si evidencian una tendencia progresiva que pueda comprometer la seguridad estructural.

- Monitoreo del macizo rocoso mediante extensómetros

Se propone la instalación de seis extensómetros, los cuales permitirán medir posibles desplazamientos o aperturas en las discontinuidades presentes en el macizo rocoso.

Los extensómetros deberán instalarse en juntas o fracturas representativas del sistema estructural del talud, especialmente en aquellas que presenten orientación favorable para el desarrollo de mecanismos de falla.

Este tipo de instrumentación permitirá evaluar la evolución del movimiento relativo entre bloques del macizo rocoso, lo cual resulta fundamental para identificar posibles procesos de inestabilidad asociados a fallas estructurales.

Las lecturas deberán realizarse con una frecuencia inicial quincenal o mensual, dependiendo del comportamiento observado durante las primeras etapas del monitoreo.

- Monitoreo hidrogeológico mediante piezómetros

Con el fin de evaluar la influencia del agua en la estabilidad del talud, se propone la instalación de ocho piezómetros, los cuales permitirán medir el nivel piezométrico y la presión de poro en el interior del macizo rocoso o en los materiales presentes en el talud.

4. Frecuencia de monitoreo

Se recomienda establecer la siguiente frecuencia inicial de medición, según las indicaciones de la tabla 13

**Tabla 17**

*Instrumentación geotécnica propuesta y frecuencia de monitoreo*

| **Instrumento** | **GPS** | **Deformímetros** | **Extensómetros** | **Piezómetros** |
|---|---|---|---|---|
| Cantidad | 4 | 2 | 6 | 8 |
| Frecuencia | Mensual | Mensual | Quincenal o mensual | Mensual (mayor frecuencia en época lluviosa) |

Fuente: elaboración propia (2026)

Esta frecuencia podrá ajustarse en función de los resultados obtenidos durante las primeras etapas del monitoreo.

5. Gestión de la información y alertas

Los datos obtenidos mediante el sistema de monitoreo deberán registrarse y almacenarse en una base de datos técnica, que permita realizar el análisis comparativo de las mediciones a lo largo del tiempo.

El análisis de esta información permitirá identificar tendencias de desplazamiento, variaciones en el nivel piezométrico o deformaciones estructurales, facilitando la generación de niveles de alerta temprana que permitan activar protocolos de inspección o intervención.

Se recomienda que los resultados del monitoreo sean evaluados periódicamente por especialistas en geotecnia y estructuras, quienes podrán interpretar los datos obtenidos y establecer medidas de gestión del riesgo cuando sea necesario.

6. Ubicación conceptual de la instrumentación

La ubicación de los instrumentos de monitoreo se define considerando las zonas donde existe mayor probabilidad de movimiento del terreno, presencia de discontinuidades o afectaciones estructurales. La distribución propuesta busca cubrir tanto el comportamiento del talud como de la estructura existente.

- Puntos de monitoreo GPS: Se propone la instalación de cuatro puntos GPS, distribuidos estratégicamente para evaluar
- Deformímetros estructurales: Se propone instalar dos deformímetros en la estructura con el fin de monitorear deformaciones o aperturas de fisuras. Estos dispositivos permitirán evaluar la evolución de las deformaciones estructurales a lo largo del tiempo.
- Extensómetros en el macizo rocoso: Se plantea la instalación de seis extensómetros, ubicados en juntas o discontinuidades representativas del

macizo rocoso. Estos instrumentos permitirán monitorear el desplazamiento relativo entre bloques del macizo rocoso.

- Piezómetros: Se propone instalar ocho piezómetros, distribuidos en diferentes sectores del talud para evaluar el comportamiento del agua subterránea.

7. Sistema de niveles de alerta

Para la gestión del monitoreo se propone establecer un sistema de alerta temprana, basado en la interpretación de los datos obtenidos por los instrumentos instalados.

**Tabla 18**

*Sistema de niveles de alerta para el monitoreo geotécnico y estructural*

| **Nivel** | **Descripción** | **Indicadores** | **Acciones** |
|---|---|---|---|
| Nivel de alerta verde (condición estable) | Este nivel corresponde a condiciones normales de comportamiento del talud y de la estructura. | Desplazamientos mínimos o inexistentes en puntos GPS.<br>Sin cambios significativos en extensómetros.<br>Niveles piezométricos dentro de rangos normales.<br>Ausencia de incremento en deformaciones estructurales. | Continuar con el monitoreo según la frecuencia establecida.<br>Mantener el registro sistemático de datos. |
| Nivel de alerta amarillo (condición de vigilancia) | Este nivel se activa cuando se detectan cambios moderados en los parámetros monitoreados. | Lanzamientos leves en puntos GPS.<br>Iniciación gradual de juntas monitoreadas por extensómetros.<br>Incremento del nivel piezométrico asociado a eventos de lluvia.<br>Visión o crecimiento de fisuras estructurales. | Aumentar la frecuencia del monitoreo.<br>Ejecutar inspecciones de campo adicionales.<br>Valorar la necesidad de implementar |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | medidas preventivas. |
| Nivel de alerta rojo (estado crítico) | Este nivel corresponde a condiciones en las que se descubren movimientos significativos o acelerados, que podrían enseñar la posibilidad de una falla del talud o afectación estructural importante. | Desplazamientos significativos detectados por GPS. Apertura acelerada de discontinuidades en extensómetros. Incremento considerable de presión de poros. Deformaciones estructurales relevantes o aparición de fisuras críticas. | Activación inmediata de protocolos de emergencia. Evaluación técnica urgente del sitio. Implementación de medidas de estabilización o evacuación preventiva si fuese necesario |

Fuente: elaboración propia (2026)

8. Tabla de parámetros críticos para activación de alertas

Para una adecuada gestión del monitoreo se propone establecer valores de referencia que permitan activar distintos niveles de alerta en función del comportamiento registrado por los instrumentos.

**Tabla 19**

*Valores de referencia para la activación de niveles de alerta*

| **Parámetro monitoreado** | **Desplazamiento GPS** | **Apertura de juntas (extensómetros)** | **Deformación estructural** | **Nivel piezométrico** | **Presión de poros** |
|---|---|---|---|---|---|
| Alerta verde | < 2 mm/mes | < 1 mm | Sin cambios | Condiciones normales | Estable |
| Alerta amarilla | 2 – 5 mm/mes | 1 – 3 mm | Fisuras con crecimiento leve | Incremento moderado | Incremento gradual |
| Alerta roja | > 5 mm/mes | > 3 mm | Apertura significativa de fisuras | Incremento significativo o saturación | Incremento acelerado |

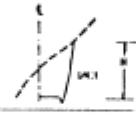
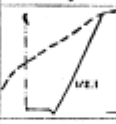
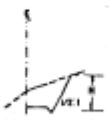
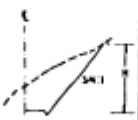
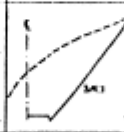
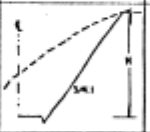
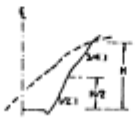
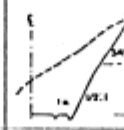
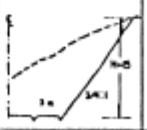
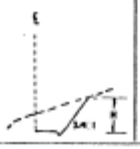
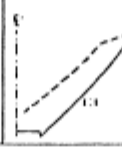
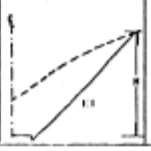
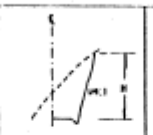
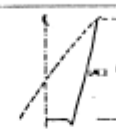
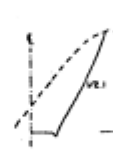
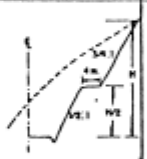
Fuente: elaboración propia (2026)

**Anexos**

*Anexo 1. Recomendación de corte en taludes (MOP boletín técnico N° 002-82)*

10

Taludes recomendados en cortes

| TIPO DE MATERIAL | TALUD RECOMENDABLE | | | | OBSERVACIONES |
|---|---|---|---|---|---|
| | Hasta 5 m | De 5 a 10 m | De 10 a 15 m | Mayor de 15 m | |
| Granito sano y masivo. |  |  |  |  | Descopetar a 1/2:1 la parte intemperizada si la hay. |
| Granito sano fisurado en bloques. |  |  |  |  | Amacizar taludes según la disposición de los bloques. |
| Granito exfoliado, grandes bloques empacados en arena. |  |  |  |  | No se considera recomendable la construcción de berma en el cambio de talud. |
| Granito exfoliado, grandes bloques empacados en arcilla arenosa. |  |  |  |  | Se recomienda construir banquera con el objeto de recibir en ella los pequeños desprendimientos que normalmente se presentan. |
| Granito totalmente intemperizado (tucuruguay). |  |  |  |  | Si el producto de la intemperización del granito es arena fina, limosa o arcillosa, se recomienda proyectar banqueta de 1 m para cortes hasta de 15 m y de 3 m para cortes mayores. |
| Dioritas. | Se recomienda tomar en cuenta las mismas observaciones que se hacen para los granitos, dependiendo del grado de intemperismo de la roca. | | | | |
| Andesita fisurada, sin alteración. |  |  |  |  | Se recomienda amacizar siguiendo los planos de fisuramiento. |
| Andesita fracturada y poco alterada. |  |  |  |  | Se puede construir berma de 4 m al cambiar talud si la parte inferior del corte no contiene arcilla en las fracturas y éstas están cerradas. |
| Andesita fracturada y alterada. |  |  |  |  | Se recomienda descopetar con talud 1:1 la parte superficial más alterada. Si existe flujo de agua deberá proyectarse un subdrenaje adecuado. |

*Anexo 2. Ficha Técnica de geomanto reforzado*

# Geomanto Reforzado





## Usos y Ventajas:

1. Geomanto de polipropileno con malla hexagonal triple torsión para protección de la erosión y caida de rocas.
2. La unión de los dos componentes permite mejorar características mecánicas e incrementar desempeño.
3. Mejora la resistencia superficial de los suelos ayudando al crecimiento de la vegetación.
4. Estabilización de bloques rocosos con anclajes superficiales o profundos.
5. Protege la superficie del terreno y los taludes de la fuerza erosiva del viento y del agua.
6. Facil traslado e instalación.
7. Representa una alternativa amigable con el ambiente versus el hormigón proyectado.



## Geomanto Reforzado

| Componente 1 | Abertura Malla (mm) | Alambre Malla (mm) | Alambre Borde (mm) | Recubrimiento Metálico + PVC | Vida Útil (años) | Observación |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Malla Hexagonal Triple Torsion | 60X80 | 2.0-3.0 | 2.7-3.4 | Alu5% Zinc95% PVC | 40-70 | Años de servicio y vida útil dependen del tipo de ambiente |
| | 80X100 | | | Galvanizado PVC | 1-15 | |
| Componente 2 | | Punto Fusión (C°) | Índice Vacios (%) | Polimero | Gramaje (gr/m2) | Resistencia UV |
| GeoMat | | 150 | ≥90 | Polipropileno | 450 | Estable |
| Presentación | | Color | | Largo(m) | Ancho(m) | Area(m2) |
| Geomanto Reforzado | | Verde / Negro | | 25 | 2 | 50 |



7

*Anexo 3. C11.9.4.2-3 Presumptive Ultimate Unit Bond Stress for Anchors in Rock*

**Table C11.9.4.2-3—Presumptive Ultimate Unit Bond Stress for Anchors in Rock**

| Rock Type | Presumptive Ultimate Unit Bond Stress, $\tau_n$ (ksf) |
|---|---|
| Granite or Basalt | 36 to 65 |
| Dolomitic Limestone | 29 to 44 |
| Soft Limestone | 21 to 29 |
| Slates & Hard Shales | 17 to 29 |
| Sandstones | 17 to 36 |
| Weathered Sandstones | 15 to 17 |
| Soft Shales | 4.2 to 17 |

*Anexo 4. Tabla 11.5.7-1 Resistance Factors for Permanent Retaining Walls*

**Table 11.5.7-1—Resistance Factors for Permanent Retaining Walls**

| Wall-Type and Condition | | Resistance Factor |
|---|---|---|
| Nongravity Cantilevered and Anchored Walls | | |
| Axial compressive resistance of vertical elements | | Article 10.5 applies |
| Passive resistance of vertical elements | | 0.75 |
| Pullout resistance of anchors (1) | • Cohesionless (granular) soils<br>• Cohesive soils<br>• Rock | 0.65 (1)<br>0.70 (1)<br>0.50 (1) |
| Pullout resistance of anchors (2) | • Where proof tests are conducted | 1.0 (2) |
| Tensile resistance of anchor tendon | • Mild steel (e.g., ASTM A615 bars)<br>• High strength steel (e.g., ASTM A722 bars) | 0.90 (3)<br>0.80 (3) |
| Flexural capacity of vertical elements | | 0.90 |
| | | |
| Mechanically Stabilized Earth Walls, Gravity Walls, and Semigravity Walls | | |
| Bearing resistance | • Gravity and semigravity walls<br>• MSE walls | 0.55<br>0.65 |
| Sliding | | 1.0 |
| Tensile resistance of metallic reinforcement and connectors | Strip reinforcements (4)<br>• Static loading<br>Grid reinforcements (4) (5)<br>• Static loading | <br>0.75<br><br>0.65 |
| Tensile resistance of geosynthetic reinforcement and connectors | • Static loading | 0.90 |
| Pullout resistance of tensile reinforcement | • Static loading | 0.90 |
| | | |
| Prefabricated Modular Walls | | |
| Bearing | | Article 10.5 applies |
| Sliding | | Article 10.5 applies |
| Passive resistance | | Article 10.5 applies |

(1) Apply to presumptive ultimate unit bond stresses for preliminary design only in Article C11.9.4.2.

(2) Apply where proof test(s) are conducted on every production anchor to a load of 1.0 or greater times the factored load on the anchor.

(3) Apply to maximum proof test load for the anchor. For mild steel apply resistance factor to $F_y$. For high-strength steel apply the resistance factor to guaranteed ultimate tensile strength.

(4) Apply to gross cross-section less sacrificial area. For sections with holes, reduce gross area in accordance with Article 6.8.3 and apply to net section less sacrificial area.

(5) Applies to grid reinforcements connected to a rigid facing element, e.g., a concrete panel or block. For grid reinforcements connected to a flexible facing mat or which are continuous with the facing mat, use the resistance factor for strip reinforcements.

*Anexo 5. 11.9.4.2 Anchor Pullout Capacity*

**11.9.4.2—Anchor Pullout Capacity**

Prestressed anchors shall be designed to resist pullout of the bonded length in soil or rock. The factored pullout resistance of a straight shaft anchor in soil or rock, $Q_R$, is determined as:

$$Q_R = \phi Q_n = \phi \pi d \tau_a L_b \qquad (11.9.4.2\text{-}1)$$

where:

$\phi$ = resistance factor for anchor pullout (dim.)

$Q_n$ = nominal anchor pullout resistance (kips)

$d$ = diameter of anchor drill hole (ft)

$\tau_n$ = nominal anchor bond stress (ksf)

$L_b$ = anchor bond length (ft)