Universidad Nacional
Federico Villarreal

Vicerrectorado de
INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MODELAMIENTO DE MACIZO ROCOSO PARA PREVENCIÓN DE MECANISMOS DE FALLA EN LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA MIRADOR

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

AUTOR:

HUAYRA MENA, GRECIA GERALDINE

ASESOR:

Dr. PUMARICRA PADILLA, RAUL VALENTIN

JURADO:

Dr. CANCHO ZUÑIGA, GERARDO ENRIQUE

Ms. BEDIA GUILLÉN, CIRO SERGIO

Ms. TABORI MALPARTIDA, GUSTAVO AUGUSTO

LIMA – PERÚ

2019

A mis padres Francisco y Nora, por su apoyo
Incondicional y guía en cada etapa de mi vida.
A mi abuela Laura y hermana Brisa, por el
Cariño especial que tengo hacia ellas y el que
Ellas tienen hacia mí.

AGRADECIMIENTOS

Al MSc. Ing. Ismael Tupia Mendizabal, por permitir utilizar la data del proyecto SE Mirador en la presente investigación, y por los conocimientos técnicos brindados durante su desarrollo.

Al MSc. Ing. Carlos Huaman Egoavil, por permitirme asistir, como alumna libre, a las clases de "Mecánica de Rocas aplicada a la Ingeniería Civil" dictadas en la Universidad Nacional de Ingeniería.

Al Dr. Raúl Pumaricra Padilla, mi asesor de tesis, por la asesoría brindada para el desarrollo y presentación de esta investigación.

A mi alma máter FIC-UNFV, por los conocimientos que me brindaron durante cinco años de estudio y por mi formación como formación como profesional.

A mi familia y amigos, en general, quienes siempre estuvieron al pendiente del desarrollo de esta investigación.

Al Msc. Ing. Olivier Raymond, por su apoyo incondicional y compañía en el desarrollo de esta meta profesional.

INDICE

CAPITULO I 8
I. INTRODUCCION 8
1.1. Descripción y formulación del problema 11
1.1.1. Problema General 12
1.1.2. Problema Específico 12
1.2. Antecedentes 12
1.2.1. Antecedentes Nacionales 12
1.2.2. Antecedentes Internacionales 13
1.3. Objetivos 14
1.3.1. Objetivo General 14
1.3.2. Objetivos Específicos 14
1.4. Justificación 14
1.5. Hipótesis 14
1.5.1. Hipótesis General 14
1.5.2. Hipótesis Específicas 15
CAPITULO II 16
II. MARCO TEORICO 16
2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación 16
2.1.1. Propiedades Índice de la Roca 16
2.1.2. Clasificación geomecánica RMR 22
2.1.3. Proyección estereográfica 33
2.1.4. Tipos de rotura del macizo rocoso 37
2.1.5. Resistencia al corte del macizo rocoso 47
2.1.6. Modelamiento de Macizo Rocoso mediante software 52
2.1.7. Análisis de Manual de Carreteras 54
CAPITULO III 57
III. METODO 57
3.1. Tipo de investigación 57
3.2. Ámbito temporal y espacial 57
3.3. Variables 57
3.4. Población y muestra 58
3.4.1. Población 58
3.4.2. Muestra 58
3.5. Instrumentos 58
3.6. Procedimiento 58
3.7. Análisis de datos 59
CAPITULO IV 60
IV. RESULTADOS 60
4.1. Aspectos generales 60
4.1.1. Ubicación 60
4.1.2. Geomorfología regional 61
4.1.3. Geología local 62
4.1.4. Geología estructural 63
4.1.5. Peligros Geológicos 63
4.2. Caracterización del macizo rocoso 65
4.3. Propiedades Índice de roca intacta 76
4.3.1. Contenido de Humedad 76
4.3.2. Porosidad 77
4.3.3. Peso Unitario 77

4.3.4. Resistencia 77
4.4. Clasificación geomecánica del macizo rocoso 78
4.4.1. Índice de calidad RMR 78
4.4.2. Índice de resistencia geológica GSI 84
4.5. Modelamiento mediante software 85
CAPITULO V 107
Discusion de resultados 107
CAPITULO VI 110
Conclusiones 110
CAPITULO VII 112
Recomendaciones 112
CAPITULO VIII 113
Referencias 113
CAPITULO IX 115
Anexos 115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1 Tipos de ensayo de Carga Puntual. a) Ensayo diametral, b) ensayo axial, c) ensayo en bloque irregular 20
Figura II.2 Perfiles de rugosidad mostrados de rango I al IX 29
Figura II.3 Medida de orientación de discontinuidades 32
Figura II.4 Proyección azimutal dentro de una esfera 34
Figura II.5 Elementos geométricos en una discontinuidad 35
Figura II.6 Representación de un plano y polo en proyección estereográfica 36
Figura II.7 Superficie de proyección estereográfica o Falsila de Wuff 36
Figura II.8 Tipos de roturas y representación en proyección estereográfica. a) Falla planar, b) Falla tipo cuña, c) Falla por vuelco, d) Falla circular. 38
Figura II.9 Esquema de falla planar de talud de macizo rocoso 39
Figura II.10 Condiciones geométricas para falla tipo cuña: (a) esquema de falla tipo cuña en macizo rocoso; (b y d) representación estereográfica de una falla tipo cuña; (c) esquema de ángulos que comprenden una falla tipo cuña 41
Figura II.11 Tipos de falla por vuelco. (a) Vuelco de bloques por discontinuidades ortogonales; (b) Vuelco por pandeo de macizo rocoso; (c) Vuelco por pandeo y discontinuidades ortogonales. 43
Figura II.12 Esquema de falla por vuelco en talud de macizo rocoso 44
Figura II.13 Esquema de falla circular en talud 45
Figura II.14 Carta de estimación del índice GSI en base a descripciones geológicas 49
Figura II.15 Consideraciones para índice GSI 49
Figura II.16 Valores de la constante m_i de la roca intacta para distintos tipos de roca 50
Figura II.17 Valores de alteración D sugeridos 51
Figura III.1 Procedimiento de metodología de investigación 59
Figura IV.1 Ubicación de Subestación Mirador 60
Figura IV.2 Mapa geomorfológico regional de SE Mirador 61
Figura IV.3 Mapa geológico regional de SE Mirador 62
Figura IV.4 Peligros geológicos en la subcuenca Canto Grande. 64
Figura IV.5 Susceptibilidad por movimientos en masa en la quebrada Canto Grande 64
Figura IV.6 Esquema de zonas geotécnicas 65
Figura IV.7 Área de proyecto de Subestación Mirador 66
Figura IV.8 Evaluación de Estación Geomecánica 1 mediante DIPS 5.0 87
Figura IV.9 Evaluación de Estación Geomecánica 2 mediante DIPS 5.0 88
Figura IV.10 Evaluación de la Estación Geomecánica 3 mediante DIPS 5.0 89
Figura IV.11 Evaluación de la Estación Geomecánica 4 mediante DIPS 5.0 90
Figura IV.12 Distribución de Isoaceleraciones para 10% de Excedencia en 50 años. 91
Figura IV.13 Evaluación de Zona Geotécnica 1 con Slide, método Bishop Simplificado, análisis estático 92
Figura IV.14 Evaluación de Zona Geotécnica 1 con Slide, método Janbu Simplificado, análisis estático 93
Figura IV.15 Evaluación de Zona Geotécnica 1 con Slide, método Bishop Simplificado, análisis pseudo-estático 93
Figura IV.16 Evaluación de Zona Geotécnica 1 con Slide, método Janbu Simplificado, análisis pseudo-estático 94
Figura IV.17 Evaluación de Zona Geotécnica 2 con Slide, método Bishop Simplificado, análisis estático 95
Figura IV.18 Evaluación de Zona Geotécnica 2 con Slide, método Janbu Simplificado, análisis estático 95

Figura IV.19 Evaluación de Zona Geotécnica 2 con Slide, método Bishop Simplificado, análisis pseudo-estático 96
Figura IV.20 Evaluación de Zona Geotécnica 2 con Slide, método Janbu Simplificado, análisis pseudo-estático 96
Figura IV.21 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 10 m, método Bishop Simplificado, análisis estático 97
Figura IV.22 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 10 m, método Janbu Simplificado, análisis estático 98
Figura IV.23 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 10 m, método Bishop Simplificado, análisis pseudo-estático 98
Figura IV.24 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 10 m, método Janbu Simplificado, análisis pseudo-estático 99
Figura IV.25 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 15 m, método Bishop Simplificado, análisis estático 99
Figura IV.26 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 15 m, método Janbu Simplificado, análisis estático 100
Figura IV.27 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 15 m, método Bishop Simplificado, análisis pseudo-estático 100
Figura IV.28 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 15 m, método Janbu Simplificado, análisis pseudo-estático 101
Figura IV.29 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 10 m, método Bishop Simplificado, análisis estático 102
Figura IV.30 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 10 m, método Janbu Simplificado, análisis estático 102
Figura IV.31 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 10 m, método Bishop Simplificado, análisis pseudo-estático 103
Figura IV.32 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 10 m, método Janbu Simplificado, análisis pseudo-estático 103
Figura IV.33 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 14 m, método Bishop Simplificado, análisis estático 104
Figura IV.34 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 14 m, método Janbu Simplificado, análisis estático 104
Figura IV.35 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 14 m, método Bishop Simplificado, análisis pseudo-estático 105
Figura IV.36 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 14 m, método Janbu Simplificado, análisis pseudo-estático 105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II.1 Densidad seca de rocas típicas 18
Tabla II.2 Valores típicos de índice de carga puntual 20
Tabla II.3 Resistencia de la roca según ISRM 21
Tabla II.4 Clasificación geomecánica RMR Bieniawski, 1989 23
Tabla II.5 Clasificación en base a la resistencia de la roca 24
Tabla II.6 Clasificación de la calidad del macizo rocoso según índice RQD 25
Tabla II.7 Descripción del espaciado entre discontinuidades 26
Tabla II.8 Descripción de la continuidad 27
Tabla II.9 Descripción de la abertura 28
Tabla II.10 Clasificación de Rellenos y roca a partir de índices de campo 30
Tabla II.11 Descripción del grado de meteorización 31
Tabla II.12 Descripción de las filtraciones en discontinuidades 33
Tabla II.13 Cuadro 4.12 del Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos 54
Tabla IV.1 Ficha de datos de Estación Geomecánica 1 68
Tabla IV.2 Ficha de datos de Estación Geomecánica 2 70
Tabla IV.3 Ficha de datos de Estación Geomecánica 3 72
Tabla IV.4 Ficha de datos de Estación Geomecánica 4 74
Tabla IV.5 Índice RQD 76
Tabla IV.6 Contenido de Humedad 76
Tabla IV.7 Porosidad 77
Tabla IV.8 Peso Específico y Densidad 77
Tabla IV.9 Is(50) y resistencia a la compresión 78
Tabla IV.10 RMR89 Estación Geomecánica 1 79
Tabla IV.11 RMR89 Estación Geomecánica 2 80
Tabla IV.12 RMR89 Estación Geomecánica 3 81
Tabla IV.13 RMR89 Estación Geomecánica 4 82
Tabla IV.14 Índices RMR de estaciones geomecánicas 83
Tabla IV.15 Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR 84
Tabla IV.16 Índices RMR de estaciones geomecánicas 85
Tabla IV.17 Parámetros geomecánicos para análisis con Slide 91
Tabla IV.18 Índice de resistencia geológica de estaciones geomecánicas 91
Tabla IV.19 Resultados de análisis de estabilidad global de zonas geotécnicas 106

RESUMEN

Los proyectos de baja envergadura que comprenden un estudio de macizo rocoso son frecuentemente analizados mediante metodologías empíricas, o se consideran los parámetros referenciales que se mencionan en el Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos 2014; eludiendo así el desarrollo de un estudio completo de proyecto. Esto sucede debido al presupuesto limitado que un proyecto de baja envergadura presenta en comparación de un proyecto de gran envergadura, realizándose así limitados ensayos in-situ y laboratorio, y estudios de evaluación del macizo rocoso como prevención de mecanismos de falla.

En la presente investigación se desarrolla una metodología analítica, basado en métodos propuestos por diferentes autores, que permita analizar la estabilidad de taludes del macizo rocoso del proyecto Subestación Eléctrica Mirador, con la finalidad de obtener el modelamiento mediante software computacional y los factores de seguridad como prevención de mecanismos de fallas del macizo rocoso. De igual modo, la presente investigación verificó si los taludes de corte mencionados en el Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos 2014, los cuales fueron aplicados en la Subestación Eléctrica Mirador, son convenientes para taludes menores a diez metros. Finalmente, el análisis de estabilidad de taludes permitió comprobar si las grietas encontradas en la edificación construida sobre el macizo rocoso cortado fueron generadas por la inestabilidad del talud generado en el macizo rocoso.

Palabras clave: Macizo rocoso, baja envergadura, metodología, modelamiento.

ABSTRACT

Small projects of rock mass are frequently analyzed using empirical methodologies or some reference parameters that are mentioned in Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos 2014, avoiding the development of a complete geotechnical study. This happens due to the limited budget that a small project presents in comparison to a big project. Therefore, these studies of small projects usually have limited on field and laboratory tests, and a limited assessment study of rock mass as prevention of failure mechanisms.

In this investigation, an analytical methodology is developed, which is based on methods proposed by different authors. This methodology analyze the stability of small cut slopes of rock mass of the Mirador Electric Substation, which is located in San Juan de Lurigancho, with the purpose of modeling by computer software and obtaining safety parameters as prevention of failure mechanisms of the rock mass. Additionally, this investigation verified whether the cutting slopes mentioned in Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos 2014, which were applied in Mirador Electric Substation, are suitable for slopes under ten meters. Finally, stability analysis of slopes allowed to verify if the cracks found in a building, which was built on the cut rock mass, were generated by an instability of the cut rock mass.

Keywords: Rock mass, small Project, methodology, modeling.

CAPITULO I

I. INTRODUCCION

El diseño de taludes es uno de los campos de la geotecnia con más uso en el rubro de la ingeniería civil, debido a la necesidad de realizar cortes de terreno con alturas y pendientes que favorezcan la economía, el área y construcción de proyectos. El diseño de taludes se realiza tanto en suelos como en rocas, pero la dimensión del estudio que se realiza es dependiente de la envergadura de los proyectos. En esta investigación se va a analizar la estabilidad de taludes de corte de macizo rocoso de baja envergadura del proyecto Subestación Eléctrica Mirador.

La problemática de esta investigación es la utilización de metodologías empíricas para estudios de proyectos de baja envergadura de macizos rocosos, es decir, la utilización de tablas de diferentes fuentes bibliográficas que muestran parámetros de diseño de acuerdo a la data que estos estudiaron; sin embargo, la mayoría de estas tablas pertenecen a bibliografía internacional, no utilizándose así data de macizos rocosos peruanos. Asimismo, las reglamentaciones nacionales que regulan su aplicación son limitantes, ya que estandarizan los parámetros de diseño para cortes de taludes de baja envergadura. El Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos recomienda a modo referencial relaciones de corte en talud (V:H) para terrenos de roca fija o suelta, alturas de corte menores a diez metros, con recomendaciones anexas de realizar banquetas o análisis de estabilidad para alturas de cinco a diez metros y análisis de estabilidad de taludes para alturas mayores a diez metros. El utilizar parámetros de diseño estandarizados no permite optimizar el diseño de proyecto y genera incertidumbre de los resultados, ya que la evaluación y modelamiento de mecanismos de fallas podría ser omitida.

Esta investigación propone el desarrollo de una metodología analítica, en base de métodos de diferentes autores, para el análisis de estabilidad de taludes de proyectos de baja envergadura. El propósito es optimizar el diseño de estabilidad de taludes y prevenir los mecanismos de fallas que pudiera sufrir el macizo rocoso mediante el modelamiento con software.

La muestra seleccionada es el proyecto Subestación Eléctrica Mirador, el cual se encuentra localizado en el macizo rocoso limitado por el distrito de Comas y San Juan de Lurigancho pertenencientes a la provincia de Lima, departamento de Lima, Perú. El proyecto se caracteriza por poseer taludes de corte de cuatro a diez metros con pendientes de 6:1 a 10:1 (V:H), los cuales fueron ejecutados con anterioridad, y con el transcurso de los años se generaron grietas en la edificación que se contruyó por encima de un talud de corte de cuatro metros, generando incertidumbre sobre si las grietas en la edificación fueron originadas por fallas del talud del macizo rocoso o fallas constructivas. Adicionalmente, también se han generado desprendimientos en los taludes aledaños de pendientes 10:1 (V:H), generando incertidumbre sobre la existencia de un posible mecanismo de falla del macizo rocoso cortado. Cabe mencionar que los taludes de corte realizados se encuentran dentro de las relaciones de corte referenciales que recomienda el Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos a modo referencial para estabilidad de taludes menores a diez metros. Estas relaciones de corte referenciales son analizadas en la muestra, con la finalidad de corroborar la estabilidad del talud de la subestación, prevenir futuros mecanismos de falla del macizo rocoso y verificar las relaciones de corte referenciales mencionados por el Manual.

La metodología analítica empleada se basa en métodos experimentales y analíticos, con la finalidad de realizar el análisis y modelamiento del macizo rocoso; así como también, obtener resultados del análisis. El desarrollo de la metodología comprende la

clasificación geomecánica del macizo rocoso, su proyección estereográfica, análisis cinemático y modelamiento del macizo rocoso mediante el software Slide.

La clasificación geomecánica de la muestra se desarrolla en base a la clasificación geomecánica RMR_{89} de Bieniawski, en el cual se tomaron carácterísticas in-situ y muestras de roca intacta para su análisis en laboratorio.

La proyección estereográfica y análisis cinemático se realiza mediante el programa DIPS. La proyección estereográfica permite representar los ángulos de buzamiento y dirección de buzamiento de las discontinuidades en una esfera graficada en un plano. El programa DIPS permite adjuntar la proyección estereográfica y realizar el análisis cinemático de este, permitiendo así identificar los posibles mecanismos de falla que pueda surgir en el macizo rocoso, siendo la falla planar y tipo cuña los mecanismos de fallas que se analizaron con mayor énfasis dentro del programa DIPS debido a la inspección in-situ que se realizó.

El análisis del equilibrio límite se realiza mediante el criterio de Hoek y Brown, el cual es utilizado en el modelamiento del macizo rocoso mediante el software Slide, aplicando así un criterio de rotura no lineal del macizo rocoso.

La finalidad de esta investigación es desarrollar una metodología analítica para proyectos de baja envergadura que permita prevenir mecanismos de falla mediante el modelamiento con software computacional y verificar las relaciones de corte referenciales d el Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, los cuales serán aplicados en la estabilidad de taludes de macizo rocoso de la Subestación Eléctrica Mirador.

1.1. Descripción y formulación del problema

La deficiencia que presenta un proyecto de baja envergadura relacionado a un estudio de estabilidad de taludes de un macizo rocoso es el elevado costo de inversión que solicita el estudio completo, debido a las características de equipos y herramientas necesarios para su realización. Esto genera la utilización de metodologías empíricas basadas en tablas de fuentes bibliográficas internacionales o los cortes de talud referenciales que recomienda el Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos para alturas menores a 10m.

La desventaja de considerar parámetros referenciales es la obtención de diseños con incertidumbre respecto a un modelo óptimo de talud estabilizado y los posibles mecanismos de fallas que podrían surgir en el macizo rocoso luego de ser cortado. Estas desventajas podrían generar pérdidas monetarias en caso de un diseño sobredimensionado u ocurrencia de mecanismos de fallas en un corto a mediano plazo.

La Subestación Eléctrica Mirador es un proyecto que presenta cortes de macizo rocoso de baja envergadura, el cual presenta alturas de corte de cuatro a diez metros y pendientes de 6:1 a 10:1 (V:H), los cuales fueron realizados con anterioridad a esta investigación y se encuentran dentro de las relaciones referenciales de corte que recomienda el Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Por encima del talud de cuatro metros de corte 6:1 (V:H), se realizó una edificación tipo caseta de guardianía de un piso, la cual presenta grietas, generando incertidumbre respecto al tipo de falla que presenta, ya sea por inestabilidad del macizo rocoso o fallas constructivas de la misma. Adicionalmente en los taludes de corte latelares al de cuatro metros, se encuentran taludes de corte de cuatro a diez metros de altura 10:1 (V:H), en los cuales se han generado

desprendimientos, generando incertidumbre sobre la ocurrencia de un mecanismo de falla debido al macizo rocoso cortado.

1.1.1. Problema General

El modelamiento de taludes de macizos rocosos no se realiza en proyectos de baja envergadura, como parte de una metodología, para prevención de mecanismos de falla.

1.1.2. Problema Específico

- La incertidumbre sobre si el talud del macizo rocoso de la Subestación Eléctrica Mirador se encuentra inestable, y si esto es debido a algún mecanismo de falla.
- Las relaciones de corte referenciales mencionadas en el Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos no aplican para todos los macizos rocosos.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Antecedentes Nacionales

El Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos 2014, Manual de Carreteras-Túneles, Muros y Obras Complementarias 2016 y Manual de Ensayo de Materiales 2016, son manuales actuales del Ministerio de Transporte y Comunicaciones que genera normas para los proyectos de infraestructura vial. Cabe mencionar que estos manuales tienen como referencia las siguientes normativas internacionales: American Association of State Highway and Transportation and Materials (AASHTO), American Society for Testing and Materials (ASTM), Norma Técnica Peruana (NTP), entre otras. La normativa internacional tomada como referencia es una norma norteamericana, por lo que algunas consideraciones geográficas no son similares a las que presenta Sudamérica como la Cordillera de los Andes. La Cordillera

de los Andes debería generar el incremento de lineamientos que regular el análisis de taludes, y por ende, corte de macizos rocos.

El Reglamento Nacional de Edificaciones CE.020 Estabilización de suelos y taludes, encargado de regular los estudios relacionados a la estabilización de taludes.

Chura, Wilberth (2016). *Caracterización Geomecánica del macizo rocoso y su aplicación en el diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la unidad económica administrativa Ana María-La Rinconada* (tesis de máster). Universidad Nacional del Altiplano, Perú. El autor enfatiza la importancia de realizar trabajos de descripción y caracterización geomecánica del macizo rocoso como parte de diseño de sostenimiento de un proyecto de gran envergadura.

1.2.2. Antecedentes Internacionales

Gallardo, M (2013). *Cimentaciones en Roca* (tesis de pregrado), Universidad Nacional Autónoma de México, México. El autor desarrolla la recopilación de diferentes teorías y fuentes bibliográficas internacionales relacionadas a descripción, clasificación, análisis y diseño de macizo rocoso para cimentaciones en roca.

Ramos, Abel (2017). *Análisis de Estabilidad de Taludes en Rocas* (tesis de máster), Universidad Politécnica de Madrid, España. El autor realiza un estudio respecto a una mina abierta, proyecto de gran envergadura, realizando un modelamiento con el programa LS-DYNA y SLIDE.

Mohammad A., Haluk A. & Ebrahim A. (2017). Assessment of rock slope stability slope mass rating (SMR): a case study for the gas flare site in Assalouyeh,South of Iran. *Geomechanics and Engineering, 13(4), 571-584*. La investigación muestra la aplicación del método Slope Mass Rating (SMR) en las doce pendientes que presenta el proyecto Gas Flare Site. Asimismo, recomienda la utilización de este método para el análisis de estabilidad de taludes de macizos rocosos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar el modelamiento de talud del macizo rocoso, como parte de una metodología analítica, en proyectos de baja envergadura para prevención de mecanismos de falla.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Demostrar si el talud del macizo rocoso de la Subestación Eléctrica Mirador se encuentra inestable debido a algún mecanismo de falla.
- Verificar si las relaciones de corte referenciales mencionadas en el Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos aplicados en la Subestación Eléctrica Mirador generan inestabilidad en el macizo rocoso cortado.

1.4. Justificación

La aplicación del modelamiento de un macizo rocoso de baja envergadura y como parte de una metodología analítica, basado en métodos utilizados por diferentes autores, optimizará el diseño de estabilidad de taludes y prevendrá los mecanismos de fallas que podría presentar el macizo rocoso, los cuales no se obtienen al aplicar una metodología analítica basados en parámetros estándar de tablas referenciales.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

El modelamiento del macizo rocoso, como parte de la metodología analítica, influye en la prevención de mecanismos de falla de proyectos de baja envergadura.

1.5.2. Hipótesis Específicas

- El talud del macizo rocoso de la Subestación Eléctrica Mirador se encuentra inestable debido a algún mecanismo de falla.
- Las relaciones de corte referenciales mencionadas en el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos aplicados en la Subestación Eléctrica Mirador generan inestabilidad en el macizo rocoso cortado.

CAPITULO II

II. MARCO TEORICO

2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1. Propiedades Índice de la Roca

Son mediciones que describen a la matriz rocosa cuantitativamente. Estás mediciones se basan en propiedades básicas de un material, las cuales se muestran a continuación:

2.1.1.1. Gravedad Específica

Es la proporción entre la densidad y el peso unitario del agua γ_w (9.8 kN/m3). Se puede determinar en una sección delgada con un microscopio binocular, en la cual se estimarían los porcentajes de los minerales que presenta la sección. A continuación se muestran las ecuaciones relacionadas a la Gravedad Específica aprobadas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM).

$$G = \sum G_i V_i \qquad \text{(Ec. 2.1)}$$

Donde:

$G_i =$ Gravedad específica del componente mineral i

$V_i =$ Porcentaje de participación del mineral i en la roca

2.1.1.2. Porosidad

Identifica la relación relativa entre la porción de sólidos y vacíos de la matriz rocosa. En areniscas, la porosidad de la matriz rocosa disminuye con la profundidad respecto a la superficie del macizo rocoso y la edad de esta. A continuación se muestran las ecuaciones relacionadas a la Porosidad aprobadas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM).

$$n = \frac{V_p}{V_t} \qquad \text{(Ec. 2.2)}$$

Donde:

n = Porosidad

V_p = Volumen de vacíos

V_t = Volumen total

2.1.1.3. Peso Unitario

Se considera como peso específico a la proporción entre el peso y volumen de la matriz rocosa. En la Tabla II.1 se muestra un cuadro de resumen de densidades secas de rocas típicas. A continuación se muestran las ecuaciones relacionadas al Peso Unitario aprobadas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM).

$$\gamma_d = \gamma_w G(1-n) \quad \text{(Ec. 2.3)}$$

$$\gamma_{hum} = \gamma_d(1+w) \quad \text{(Ec. 2.4)}$$

$$n = \frac{G.w}{1+G.w} \quad \text{(Ec. 2.5)}$$

Donde:

γ_d = Peso unitario seco de la roca (kN/m3)

γ_w = Peso específico del agua (9.81 kN/m3)

γ_{hum} = Peso unitario húmedo de la roca (kN/m3)

w = Contenido de humedad

Tabla II.1 Densidad seca de rocas típicas

Tipo de roca	Densidad Seca (kN/m3)
Nefelina sienita	26.5
Sienita	25.5
Granito	26.0
Diorita	27.9
Gabro	29.4
Yeso	22.5
Sal de roca	20.6
Esquisto bituminoso 30 gal/ton	21.0
Piedra caliza densa	20.9
Mármol	27.0
Esquisto, Oklahoma 1000 ft de profundidad	22.1
Esquisto, Oklahoma 3000 ft de profundidad	24.7
Esquisto, Oklahoma 5000 ft de profundidad	25.7
Cuarzo, esquisto de mica	27.6
Anfibolita	29.3
Riolita	23.2
Basalto	27.1

Fuente: Tomado de Goodman, 1989.

2.1.1.4. Resistencia

La resistencia de la matriz rocosa se obtiene mediante la correlación del índice de carga puntual, Ecuación 2.7. El índice de carga puntual es medida mediante el ensayo de Carga Puntual formulado por Broch & Franklin y regulado por ASTM D5731. En este ensayo la roca es cargada entre conos de acero endurecido, causando la falla por el desarrollo de grietas de tensión paralelas al eje de carga.

En la Figura II.1 se muestran los tipos de ensayo de carga puntual según el tipo de muestra.

En la Tabla II.2 se muestran los valores típicos de índice de carga puntual.

En la Tabla II.3 se muestra la clasificación de resistencia de la roca según la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM).

$$I_{s(50)} = \frac{F.P}{{D_e}^2} \quad \text{(Ec. 2.6)}$$

$$q_u = 24 I_{s(50)} \quad \text{(Ec. 2.7)}$$

Donde:

$I_{s(50)}$= índice de carga puntual corregido

P= carga que produce la falla, N

${D_e}^2$ = Diámetro de testigo equivalente en mm. D para ensayo diametral. $\frac{4A}{\pi}$ para ensayos axial y en bloque

A=W.D, mínima área de sección transversal que pasa por los puntos de contacto

F= Factor de corrección del diámetro del testigo, $(\frac{D_e}{50})^{0.45}$

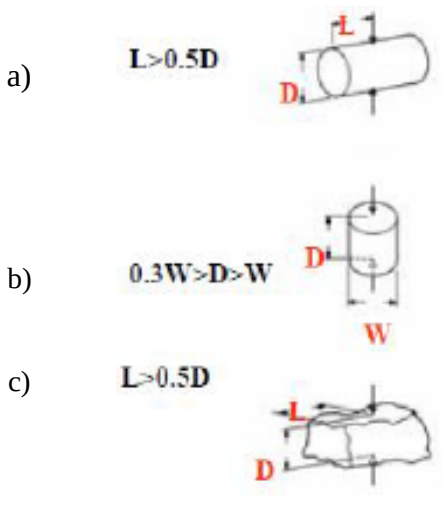


Figura II.1 Tipos de ensayo de Carga Puntual. a) Ensayo diametral, b) ensayo axial, c) ensayo en bloque irregular

Fuente: Tomado de ASTM D5731

Tabla II.2 Valores típicos de índice de carga puntual

Material	Índice de fuerza de carga puntual (MPa)
Arenisca terciaria y limolita	0.05-1
Carbón	0.2-2
Caliza	0.25-8
Esquisto y lutita	0.2-8
Roca de flujo volcánico	3.0-15
Dolomita	6.0-11

Fuente: Tomado de Goodman, 1989.

Tabla II.3 Resistencia de la roca según la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas ($ISRM_{81}$)

Grado	Descripción	Identificación de campo	Valor aproximado de la resistencia a compresión simple en MPa
R0	Extremadamente débil	Se puede penetrar con el dedo pulgar	0.25-1.0
R1	Muy débil	Deleznable bajo golpes fuertes con la parte puntiaguda del martillo geológico; puede cortarse con una navaja.	1.0-5.0
R2	Débil	Puede cortarse con dificultad con una navaja; se pueden hacer marcas poco profundas golpeando fuertemente la roca con la punta del martillo	5.0-25
R3	Media	No se puede cortar con una navaja; las muestras se pueden romper con un golpe firme con el martillo.	25-50
R4	Resistente	Se necesita más de un golpe con el martillo geológico para romper la muestra.	50-100
R5	Muy resistente	Se necesitan muchos golpes con el martillo geológico para romper la muestra.	100-250
R6	Extremadamente resistente	Solo se pueden desprender esquirlas de la muestra con el martillo geológico.	>250

Fuente: Tomado de Gonzales de Vallejo, 2002

2.1.1.5. Durabilidad

El ensayo de durabilidad formulado por Franklin y Chandra mide la degradación de la roca por efectos como la exfoliación, hidratación, decrepitación, solución, oxidación, abrasión, etc, mediante el Índice de Durabilidad, Id. El índice de Durabilidad mide el porcentaje del peso seco de roca retenida en el tambor del aparato de Franklin y Chandra según se muestra en la Ecuación 2.8.

$$I_d = \frac{w_F - C}{B - C}.100 \quad \text{(Ec. 2.8)}$$

Donde:

I_d= índice de durabilidad del segundo ciclo

w_F= Masa de tambor más muestra secada al horno después del segundo ciclo, g

C= Masa de tambor, g

B=Peso de muestra inicial + masa del tambor antes del primer ciclo, g

2.1.1.6. Velocidad del Sonido

El índice de calidad de roca, IQ, puede ser estimado mediante la velocidad del sonido. La determinación de velocidades de pulso y ultrasonidos en el macizo rocoso son regulados por ASTM 2845. En las Ecuaciones 2.9 y 2.10 se muestran los cálculos para obtención de IQ.

$$IQ = \frac{V_1}{V_1{}^*} 100\% \quad \text{(Ec. 2.9)}$$

$$IQ = 100 - 1.6\, n_p(\%) \quad \text{(Ec. 2.10)}$$

Donde:

IQ= índice de calidad de la roca

V_1 = Velocidad longitudinal

$V_1{}^*$ = Velocidad longitudinal de la roca sin fisuras

$n_p(\%)$ = Porosidad de la roca sin fisuras

2.1.2. Clasificación geomecánica RMR

La última actualización del tipo de clasificación geomecánica RMR (Rock Mass Rating) fue desarrollada por Bieniawski en 1989, según se muestra en la Tabla II.4. Este tipo de clasificación toma en cuenta los siguientes parámetros geotécnicos: resistencia de la matriz rocosa, grado de fracturación del macizo rocoso en términos del RQD, espaciado de discontinuidades, condiciones de discontinuidades y condiciones hidrogeológicas. La

clasificación de los parámetros geotécnicos los evalúa mediante índices de calidad RMR, los cuales varían de 0 a 100. Luego de obtener las puntuaciones de los cinco parámetros de clasificación, se efectúa la corrección por orientación de discontinuidades, obteniéndose una clasificación final del macizo rocoso en la cual se asigna un tipo de clase, calidad y puntuación.

Tabla II.4 Clasificación geomecánica RMR_{89} de Bieniawski

DETERMINACION DEL INDICE RMR									
PARAMETRO			**RANGO DE VALORES**						
1	Resitencia de la Matriz Rocosa (Mpa)	Ensayo de Carga Puntual	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	Compresión Simple (Mpa)		
		Compresión Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
	Puntuación		**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**	**0**
2	RQD		90 % - 100 %	75 % - 90 %	50 % - 75 %	25 % - 50 %	< 25%		
	Puntuación		**20**	**17**	**13**	**8**	**3**		
3	Separación entre discontinuidades		> 2m	0.6 - 2m	0.2 - 0.6m	0.06 - 0.2m	< 0.06m		
	Puntuación		**20**	**15**	**10**	**8**	**5**		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntuación	**6**	**4**	**2**	**1**	**0**		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 -1.0 mm	1 -5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
		Relleno	Ninguno	Relleno Duro < 5mm	Relleno Duro >5 mm	Relleno Blando <5mm	Relleno Blando >5mm		
		Puntuación	**6**	**4**	**2**	**2**	**0**		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
5	Agua Freática	Caudal por 10m de tunel	Nulo	< 10 litros / min	10 - 25 litros / min	25 - 125 litros / min	> 125 litros / min		
		Relación entre presión de agua y la tensión mayor.	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado General	Seco	Lig. Húmedo	Húmedo	Goteando	Agua Fluyendo		
	Puntuación		**15**	**10**	**7**	**4**	**0**		
Correción por la orientación de las discontinuidades									
Dirección y Buzonamiento			**Muy Favorables**	**Favorables**	**Medias**	**Desfavorables**	**Muy Desfavorables**		
Valoración para		**Túneles**	0	-2	-5	-10	-12		
		Cimentación	0	-2	-7	-15	-25		
		Taludes	0	-5	-25	-50	-60		
Clasificación									
Clase			I	II	III	IV	V		
Calidad			Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala		
Puntuación			100-81	80-61	60-41	40-21	<20		

Fuente: Tomado de Gonzales de Vallejo, 2002.

2.1.2.1. Resistencia de la matriz rocosa

Este parámetro puede ser obtenido mediante índices de campo o correlaciones a partir de ensayos de campo como ensayo de carga puntual PLT o martillo Schmidt. La obtención de este parámetro se encuentra de manera detallada en el Ítem 2.1.1.4.

Se pueden clasificar la matriz rocosa según se muestra en la Tabla II.5.

Tabla II.5 Clasificación en base a la resistencia de la roca

Resistencia a compresión simple (MPa)	Descripción
1-5	Muy blanda
5-25	Blanda
25-50	Moderadamente dura
50-100	Dura
100-250	Muy dura
>250	Extremadamente dura

Fuente: Gonzales de Vallejo, 2002

2.1.2.2. Rock Quality Designation (RQD)

El índice RQD permite calcular el grado de fracturación que presenta el macizo rocoso, el cual puede ser calculado por mediciones en sondeos y por correlaciones con el tamaño y frecuencia de discontinuidades.

La medición del índice RQD en sondeos se realiza mediante el grado de fracturación que presentan las perforaciones del macizo rocoso y el grado de fracturación que pueden presentar las laderas de los taludes. El cálculo del índice RQD se realiza mediante la relación de fragmentos de roca mayores a 10 cm y la longitud del tramo analizado, como se muestra en la Ecuación 2.11

$$RQD = \frac{\sum longitud\ de\ los\ trozos\ de\ testigo}{longitud\ total}\ x\ 100 \qquad \text{(Ec. 2.11)}$$

El cálculo del índice RQD mediante correlaciones por tamaño y frecuencia de discontinuidades son realizados para el caso de laderas cortadas artificialmente, no permitiendo así toma una medición in-situ. El cálculo de índice RQD en base al número de juntas en macizo rocoso por m3 (Jv), correlación empírica de Palmstrom, es el siguiente:

$$RQD=115-3.3\ Jv \qquad \text{para } Jv>4.5 \qquad \text{(Ec. 2.12)}$$

$$RQD=100 \qquad \text{para } Jv\leq 4.5 \qquad \text{(Ec. 2.13)}$$

El segundo método de cálculo de índice RQD mediante correlaciones se realiza por la correlación de la cantidad de juntas por metro lineal (λ), formulación de Priest y Hudson.

$$RQD = 100e^{-0.1\,\lambda\,(0.1\lambda+1)} \qquad \text{(Ec. 2.14)}$$

A continuación se muestra la calidad del macizo rocoso según el índice RQD:

Tabla II.6 Clasificación de la calidad del macizo rocoso según índice RQD

RQD %	Calidad
<25	Muy mala
25-50	Mala
50-75	Media
75-90	Buena
90-100	Muy buena

Fuente: Gonzales de Vallejo, 2002.

Las desventajas de este índice son la no consideración de la orientación, separación y rellenos de discontinuidades, ya que el índice RQD analiza de manera objetiva la fracturación del macizo rocoso.

2.1.2.3. Separación entre discontinuidades

Consiste en la distancia media y perpendicular a la orientación de los planos de las discontinuidades de una misma familia. Esta separación entre discontinuidades permite definir el tamaño de los bloques de matriz rocosa, según se muestra en la Tabla II.7.

En macizos rocosos con espaciados grandes, de varios metros, en los procesos de deformación y rotura prevalecerán las propiedades de la matriz rocosa o de los planos de discontinuidad según la escala de trabajo considerada y la situación de la obra de ingeniería con respecto a las discontinuidades; si los espaciados son menores, de varios decímetros a 1 o 2 metros, el comportamiento del macizo lo determinarán los planos de debilidad; por último, si el espaciado es muy pequeño el macizo estará muy fracturado y presentará un comportamiento "isótropo", controlado por las propiedades del conjunto de bloques más o menos uniformes. (Gonzales de Vallejo, 2002, pag. 248)

Tabla II.7 Descripción del espaciado entre discontinuidades

Descripción	Espaciado
Extremadamente junto	<20 mm
Muy junto	20-60 mm
Junto	60-200 mm
Moderadamente junto	200-600 mm
Separado	600-2000 mm
Muy separado	2000-6000 mm
Extremadamente separado	>6000 mm

Fuente: Gonzales de Vallejo, 2002

2.1.2.4. Estado de discontinuidades

Las discontinuidades condicionan de una forma definitiva las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico de los macizos rocosos. La resistencia al corte de las discontinuidades es el aspecto más importante en la

determinación de la resistencia de los macizos rocosos duros fracturados, y para su estimación es necesario definir las características y propiedades de los planos de discontinuidad. (Gonzales de Vallejo, 2002, p. 246)

- **Longitud de discontinuidades** se considera a la distancia en la misma dirección de su orientación que presentan las discontinuidades de una misma familia. La longitud de las discontinuidades se cuantifican en metros y se clasifican según su continuidad. En la Tabla II.8 se describe la descripción de la longitud de discontinuidades. Se debe de tener en cuenta que largas longitudes de discontinuidades son consideradas como las más críticas, ya que estos son los más sensibles a generar planos de falla.

Tabla II.8 Descripción de la continuidad

Continuidad	Longitud
Muy baja continuidad	<1 m
Baja continuidad	1-3 m
Continuidad media	3-10 m
Alta continuidad	10-20 m
Muy alta continuidad	>20 m

Fuente: Tomado de Gonzales de Vallejo, 2002.

- **Abertura** es considerado como es espacio vacío, sin relleno, que existe entre las paredes de las discontinuidades, el cual dependiendo su medición modifica las tensiones efectivas que actúan sobre las paredes de las discontinuidades. Su medición se realiza con una regla milimétrica, con la cual se mide la distancia hueca perpendicular que existe las paredes de las discontinuidades. Esta distancia puede ser variable de acuerdo a la profundidad de las paredes de las discontinuidades, pero el valor de abertura se considera como el promedio de

aberturas en un largo de tres metros en orientación de la discontinuidad. En la Tabla II.9 se muestra la descripción de aberturas planteadas por $ISRM_{81}$.

Tabla II.9 Descripción de la abertura

Abertura	Descripción
< 0.1 mm	Muy cerrada
0.10-0.25 mm	Cerrada
0.25-0.50 mm	Parcialmente abierta
0.50-2.50 mm	Abierta
2.50-10 mm	Moderadamente ancha
> 10 mm	Ancha
1-10 cm	Muy ancha
10-100 cm	Extremadamente ancha
> 1 m	Cavernosa

Fuente: Recopilación de Gonzales de Vallejo, 2002

- **Rugosidad** es considerada como la irregularidad que presenta la superficie de planos de discontinuidad, siendo esta razón de estudio ya que afecta la resistencia al corte de los planos de discontinuidades, τ. "La rugosidad aumenta la resistencia al corte y decrece con el aumento de abertura y, por lo general, con el espesor del relleno" (Gonzales de Vallejo, 2002, pág. 250).

  Existen diversos métodos para realizar la medición de la rugosidad en campo, la más común y simple es la comparación visual de la superficie con la Figura II.1, la cual muestra diferentes descripciones de ondulaciones. Asimismo, existen métodos cuantitativos de medición de rugosidades, entre estos se tienen la escala decimétrica y métrica para la ondulación de superficies y la escala milimétrica y centimétrica para medición de rugosidad.

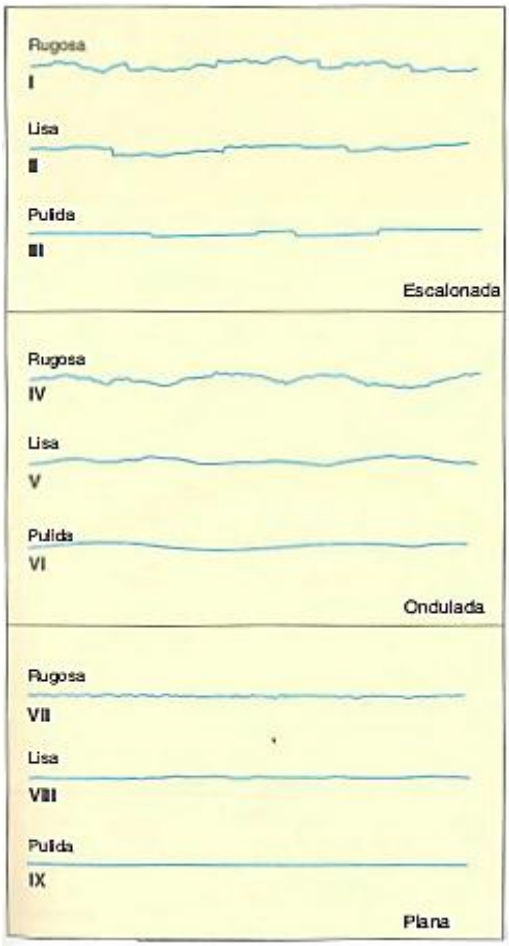


Figura II.2 Perfiles de rugosidad mostrados de rango I al IX

Fuente: Tomada de Gonzales de Vallejo, 2002.

- **Relleno** es el material de suelo y/o degradado de macizo rocoso que se puede encontrar dentro de una abertura. El relleno influencia el comportamiento mecánico de la discontinuidad, por lo que debe ser descrito de manera detallada, siendo las características más importantes la naturaleza, espesor, tamaño del grano, descripción mineralógica, resistencia al corte, grado de humedad y mencionar si se observa desplazamiento por corte del relleno. La medición del relleno se realiza con una regla milimétrica. Los materiales de relleno blando son críticos ya que pueden desaparecer o degradarse fácilmente en presencia de humedad o movimientos del macizo rocoso.

  En la Tabla II.10 se muestra clasificación de rellenos y roca intacta a partir de prospecciones de campo señaladas por ISRM$_{81}$.

Tabla II.10 Clasificación de Rellenos y roca a partir de índices de campo

Clase	Descripción	Identificación de campo	Aproximación al rango de resistencia a compresión simple (MPa)
S_1	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	<0.025
S_2	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0.025-0.05
S_3	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0.05-0.1
S_4	Arcilla rígida	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo.	0.1-0.25
S_5	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña.	0.25-0.50
S_6	Arcilla dura	Se marca con dificultad al presionar con la uña	>0.5
R_0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0.25-1.00
R_1	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con una navaja se talla fácilmente.	1-5
R_2	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5-25
R_3	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25-50
R_4	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla.	50-100
R_5	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes con el martillo para fracturarla.	100-250
R_6	Roca extremadamente dura	Al golpearlo con el martillo solo saltan esquirlas	>250

Fuente: ISRM, 1981

- **Alteración** es conocida también como grado de meteorización. Es un tipo de clasificación cualitativa que permite analizar los cambios físicos y/o químicos que hayan podido sufrir el macizo rocoso por un gran periodo de tiempo. Estos cambios se pueden reflejar en la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del macizo rocoso, ya que al aumentar sus valores generan la disminución de su resistencia. En la Tabla II.11 se muestran la descripción del grado de meteorización del macizo rocoso planteado por ISRM[81]:

Tabla II.11 Descripción del grado de meteorización

Grado de meteorización	Término	Descripción
I	Fresca	No aparecen signos de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	La decoloración indica alteración del macizo rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

Fuente: Tomado de Gonzales de Vallejo, 2002

- **La Orientación** de una discontinuidad en el espacio queda definida por su dirección de buzamiento (dirección de la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad respecto al norte) y por su buzamiento (inclinación respecto a la

horizontal de dicha línea). Su medida se realiza mediante la brújula con clinómetro o con el diaclasímetro. (Gonzales de Vallejo, 2002, p. 246)

La orientación se realiza por familias, es decir aquellas discontinuidades que presentan características similares. La dirección de buzamiento se mide de manera horaria con referencia el norte, el cual varía entre 0° y 360°. El buzamiento varía entre 0° y 90°. En la Figura II.3 se muestra la representación del buzamiento, dirección de buzamiento y dirección del plano.

La representación gráfica de la orientación de las familias se puede realizar mediante proyección estereográfica, diagrama de rosetas, bloques diagrama y/o símbolos en mapas geológicos. Este tipo de representación permitirá analizar los mecanismos de falla que pueda presentar el talud del macizo rocoso.

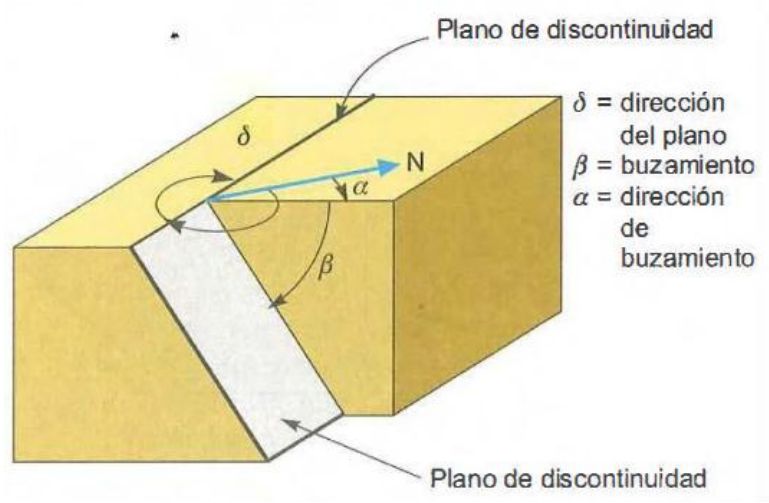


Figura II.3 Medida de orientación de discontinuidades

Fuente: Gonzales de Vallejo, 2002

2.1.2.5. Agua freática

Es considerado como la presencia o circulación de agua en las paredes de las discontinuidades (permeabilidad secundaria) y/o matriz rocosa (permeabilidad primaria) por características de un macizo rocoso poroso. En la Tabla II.12 se muestra la clasificación de agua freática en discontinuidades con y sin relleno, según ISRM.

Tabla II.12 Descripción de las filtraciones en discontinuidades

Clase	Discontinuidades sin relleno	Discontinuidades con relleno
I	Junta muy plana y cerrada. Aparece seca y no aparece posible que circula agua.	Relleno muy consolidado y seco. No es posible el flujo de agua.
II	Junta seca sin evidencia de flujo de agua.	Relleno húmedo pero sin agua libre.
III	Junta seca pero con evidencia de haber circulado agua.	Relleno mojado con goteo ocasional.
IV	Junta húmeda pero sin agua libre.	Relleno que muestras señales de lavado, flujo de agua continuo (estimar el caudal en l/min.).
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo pero sin flujo continuo.	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (estimar caudal y presión).
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en l/min, y la presión).	Rellenos completamente lavados, presionas de agua elevadas.

Fuente: Tomado de Gonzales de Vallejo, 2002.

2.1.3. Proyección estereográfica

Es la representación gráfica de la proyección azimutal de planos y líneas que pasan a través el foco de una esfera hacia una superficie circular tangente a la esfera o proyección ecuatorial.

En la Figura II.4 se muestra la proyección azimutal de una superficie mediante el punto focal F.

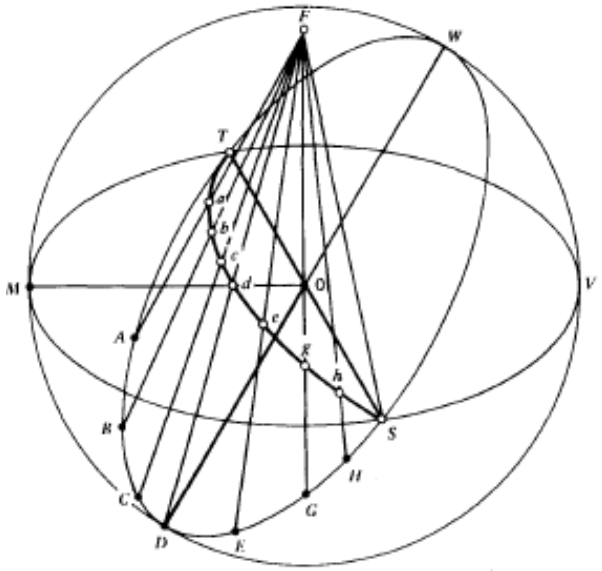


Figura II.4 Proyección azimutal dentro de una esfera

Fuente: Goodman, R. (1989)

En el ámbito geológico, la proyección estereográfica se utiliza para la representación de la orientación (rumbo y buzamiento) de los planos de discontinuidades de los macizos rocosos mediante líneas y luego estas mediante polos, en la superficie de proyección estereográfica. Los elementos geométricos de una discontinuidad señalados en la Figura II.5 son los siguientes:

- **Rumbo** (strike) es el ángulo horizontal formado por la dirección Norte y línea de rumbo como se muestra en la Figura II.5. El ángulo de rumbo se representa como N δ °E, siendo el ángulo de 0° a 90°.
- **Buzamiento** (dip) es el ángulo formado por la línea de máxima pendiente y la proyección horizontal de máxima pendiente como se muestra en la Figura II.5. El ángulo de buzamiento se representa como N β °W, siendo el ángulo de 0° a 90°.
- **Dirección de buzamiento** (dip direction) es el ángulo formado por la dirección Norte y la proyección horizontal de la línea de máxima pendiente como se muestra en la Figura II.5. El ángulo de dirección de buzamiento se representa de 0° a 360°.

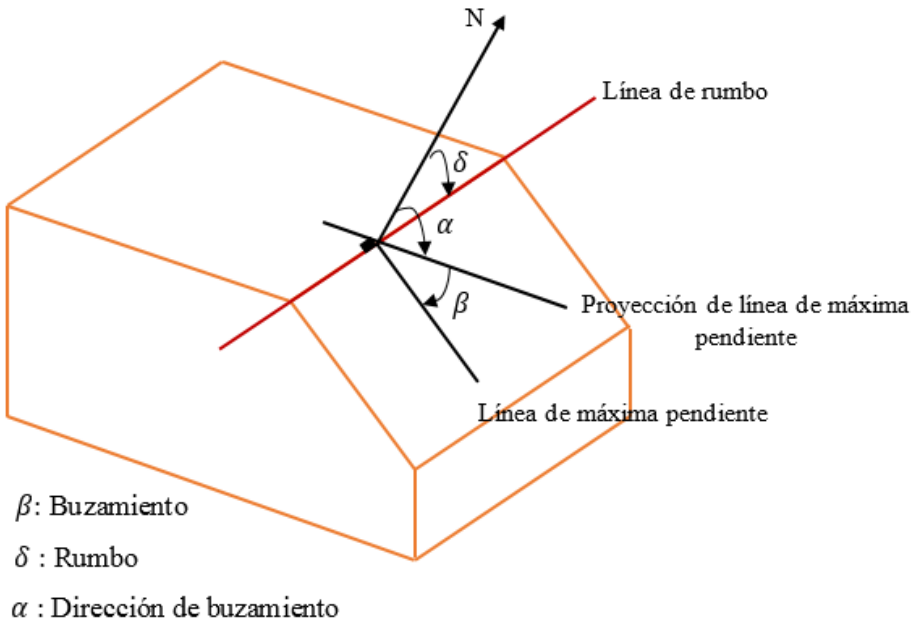


Figura II.5 Elementos geométricos en una discontinuidad

Fuente: Elaboración propia

Existen dos tipos de superficies para proyección estereográfica, estos son las proyecciones equiareales y equiangulares. Las proyecciones equiareales se realizan mediante la Malla de Schmidt o Proyección Lambert, las cuales se caracterizan por representar proyecciones en una superficie plana con igualdad de áreas mediante rumbo y buzamiento del plano de discontinuidad. Las proyecciones equiangulares se realizan mediante la Falsilla de *Wulff* o Proyecciones estereográficas, las cuales se caracterizan por representar proyecciones a través de un cenit en una superficie plana horizontal con igualdad angular como se muestra en la Figura II.6 la representación del arco TABCDEFGHS en el arco horizontal *TabcdefshS* a través del punto focal F. Esta proyección permite resolver problemas geológicos y sirve como herramienta para el cálculo de coeficiente de seguridad de una falla.

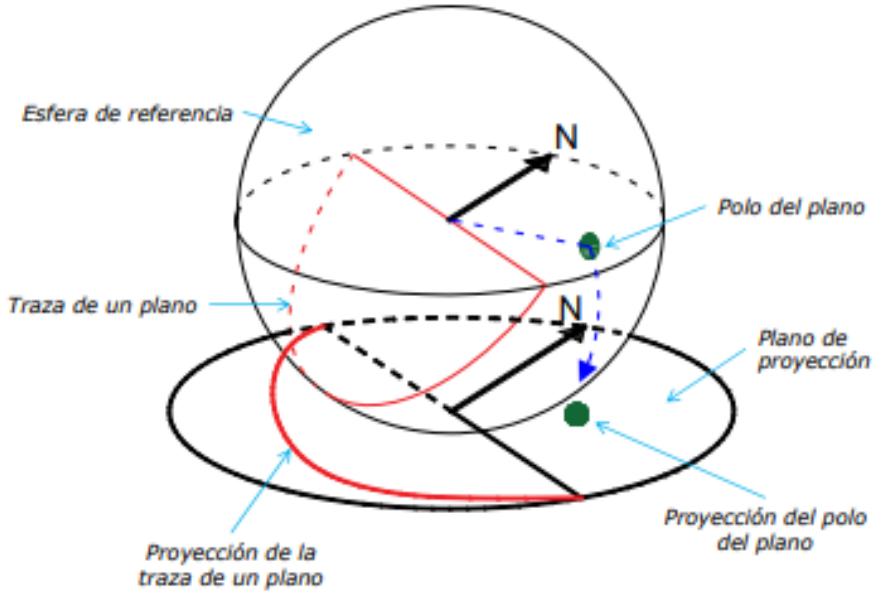


Figura II.6 Representación de un plano y polo en proyección estereográfica

Fuente: Garzón, Julio (Universidad Politécnica de Valencia)

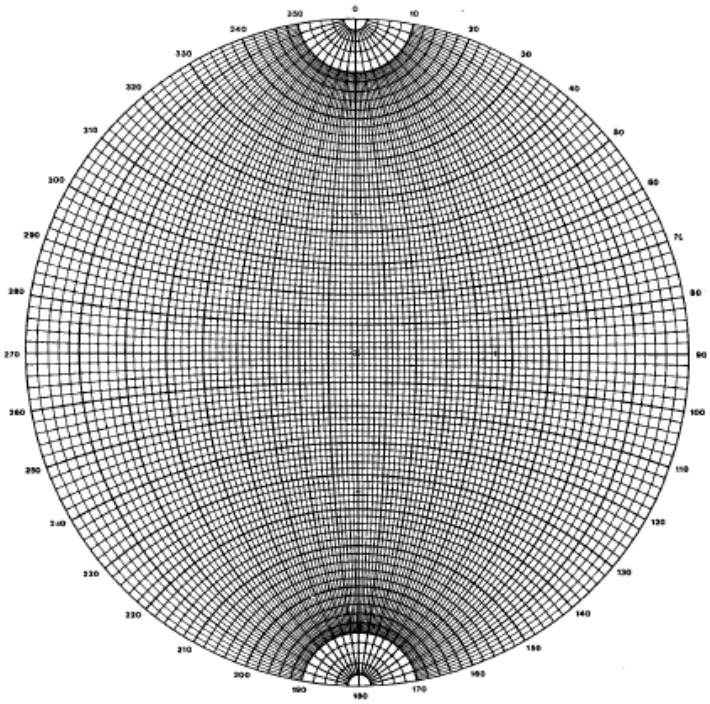


Figura II.7 Superficie de proyección estereográfica o Falsila de Wuff

Fuente: Tomas R. (2002)

2.1.4. Tipos de rotura del macizo rocoso

El talud de un macizo rocoso puede sufrir diferentes tipos de rotura dependiendo de la interacción de la pendiente del talud con la orientación y distribución de discontinuidades, el grado de fracturación del macizo rocoso y características de la matriz rocosa; los cuales son analizados en la proyección estereográfica mediante el análisis cinemático. El Análisis Cinemático es considerado como el análisis estructural de planos de discontinuidades que permite identificar la inestabilidad de taludes del macizo rocoso considerando la orientación desfavorable que puedan presentar las discontinuidades, así como también, se considera al análisis por estabilidad global o falla circular que pudiera sufrir el macizo rocoso. Diversos autores también consideran al análisis cinemático solo como el estudio de fallas planares, cuñas y de vuelco que pueda presentar el macizo rocoso.

Los tipos de rotura analizadas en esta investigación y propuestas por Wyllie D. y Mah C. son las siguientes: falla planar, falla tipo cuña, falla por vuelco y falla circular. Cabe mencionar que diferentes autores no consideran a la falla circular dentro del análisis cinemático, ya que no es considerado como una falla generada por orientación desfavorable de las discontinuidades o una falla que se genera a lo largo de la discontinuidad, sino es considerado como una falla generado por propiedades físicas o fábrica de la matriz rocosa y caracterización del macizo rocoso.

En la Figura II.8 se muestra los tipos de rotura propuestos por Wyllie D. y Mah.

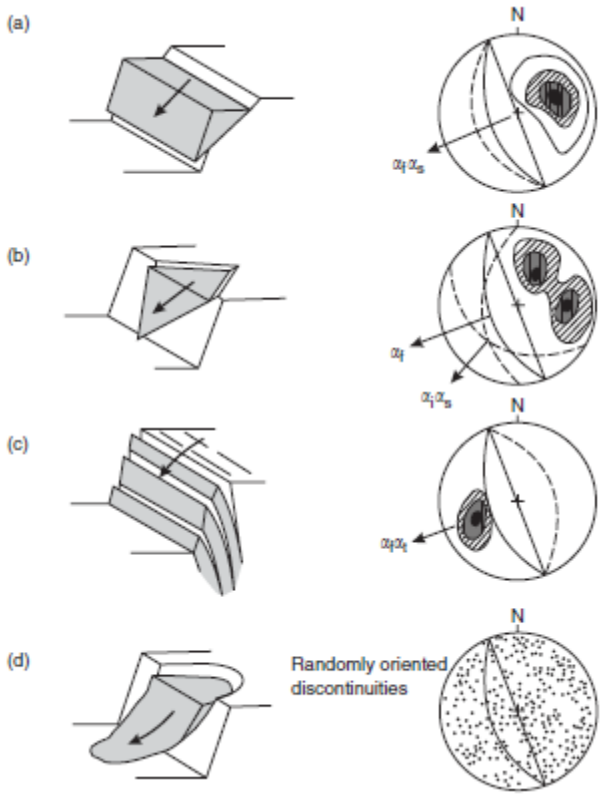


Figura II.8 Tipos de roturas y representación en proyección estereográfica. a) Falla planar, b) Falla tipo cuña, c) Falla por vuelco, d) Falla circular.

Fuente: Wyllie D. y Mah C., 2005.

2.1.4.1.Falla Planar

Es una falla por cizallamiento que se genera por la geometría bidimensional que presentan las discontinuidades del macizo rocoso respecto al talud, según se muestra en la FiguraII.9. Las condiciones geométricas para la ocurrencia de falla planar son las siguientes:

- El plano de falla planar debe encontrarse relativamente paralelo a la inclinación del talud, teniendo como variación angular máxima ±20°.
- El ángulo de buzamiento del plano de falla debe ser mayor que en ángulo de fricción del macizo rocoso, $\psi_p < \emptyset$.
- El ángulo de buzamiento del plano de falla debe ser menor que el buzamiento del plano del talud, $\psi_p < \psi_f$.

- El plano de falla debe de culminar en la pendiente del talud del macizo rocoso o en una grieta generada por la falla planar.

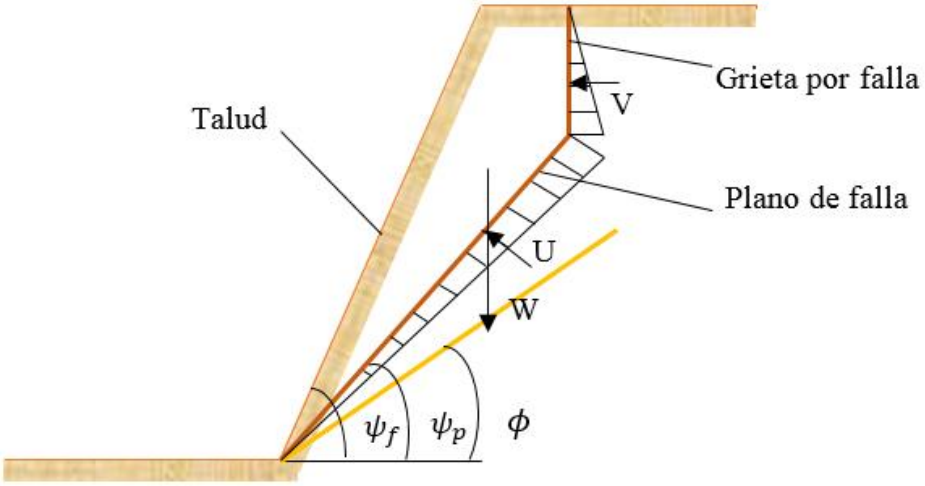


Figura II.9 Esquema de falla planar de talud de macizo rocoso

Fuente: Elaboración Propia

El cálculo del factor de seguridad para una falla planar se calcula según se muestra en la Ecuación 2.15. Siendo c la cohesión, A el área del plano de falla, W el peso del macizo rocoso por encima del plano de falla, V el empuje generado en la grieta por falla y U el empuje hidrostático generado por el plano de falla.

$$FS = \frac{cA+(W\cos\psi_p - U - V\sin\psi_p)\tan\phi}{W\sin\psi_p + V\cos\psi_p} \quad \text{(Ec. 2.15)}$$

2.1.4.2.Falla por cuña

Es una falla generada por el cizallamiento de dos discontinuidades que al intersectarse forman una cuña, según se muestra en la Figura II.10.a. La fuerza de cizallamiento es definido por la cohesión, presión hidrostática y ángulo de fricción de cada plano, pudiendo generarse diferentes fuerzas de cizallamiento en cada plano.

Este tipo de falla se considera más común que la falla planar, por lo que el análisis de esta falla en el talud del macizo rocoso es de vital importancia.

La identificación de una potencial falla por cuña se realiza mediante el análisis cinemático de las proyecciones estereográficas de las discontinuidades del macizo rocoso.

Las condiciones geométricas para la ocurrencia de esta falla son las siguientes:

- Dos planos intersectan en una línea (Figura II.10.a). En la proyección estereográfica, la línea de intersección es representada por el punto donde los dos círculos de los planos se intersectan, y la orientación de esta línea es definida por su tendencia (α_i) y su proyección (ψ_i).
- La proyección de la línea de intersección debe ser más horizontal que el buzamiento del talud, y más empinado que el ángulo de fricción de los planos de las dos discontinuidades intersectadas. Esto significa que $\psi_{fi} > \psi_i > \phi$ (Figura II.10.b y c).
- La línea de intersección de buzamiento de las discontinuidades debe encontrarse dentro del rango de la línea de deslizamiento por falla tipo cuña (Figura II.10.d).

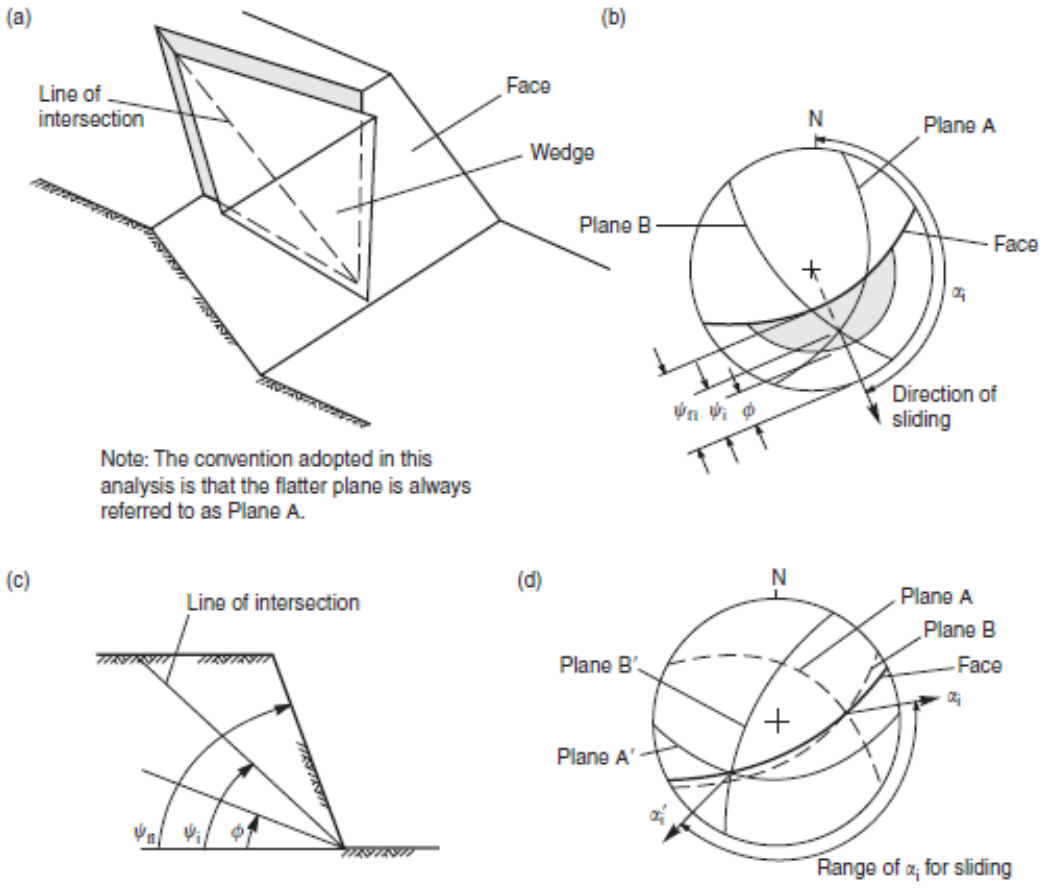


Figura II.10 Condiciones geométricas para falla tipo cuña: (a) esquema de falla tipo cuña en macizo rocoso; (b y d) representación estereográfica de una falla tipo cuña; (c) esquema de ángulos que comprenden una falla tipo cuña

Fuente: Wyllie y. & Mah C. (2005)

El cálculo del factor de seguridad para una falla por cuña se calcula según se muestra en la Ecuación (2.16). Siendo R_A y R_B las reacciones normales generadas en los planos de las discontinuidades que se intersectan. W es el peso del macizo rocoso por encima de la falla, ϕ es el ángulo de fricción del macizo rocoso y ψ_i es el ángulo de buzamiento de la línea de falla.

$$FS = \frac{(R_A + R_B)\tan\phi}{W \sin\psi_i} \qquad \text{(Ec. 2.16)}$$

2.1.4.3.Falla por vuelco

Se produce en taludes de macizos rocosos donde los estratos presentan buzamiento contrario a la inclinación del talud y dirección paralela o subparalela al mismo. En

general, los estratos aparecen fracturados en bloques a favor de sistemas de discontinuidades ortogonales entre sí. Este tipo de rotura implica un movimiento de rotación de los bloques, y la estabilidad de los mismos no está únicamente condicionada por su resistencia al deslizamiento. (Gonzales de Vallejo, 2002, p. 443)

Según Goodman & Bray existen tres tipos de fallas por vuelco, los cuales se ocasionan por diferentes casusas.

El primer tipo de falla por vuelco, conocido como vuelco de bloques, es causado cuando el macizo rocoso presenta columnas individuales generadas por discontinuidades que buzan de manera similar al talud hasta su base y discontinuidades ortogonales a estas. Ver Figura II.11(a).

El segundo tipo de falla por vuelco, conocido como vuelco por flexión, se genera cuando no se presentan discontinuidades ortogonales al talud del macizo rocoso, pero sí columnas de macizo rocoso generadas por discontinuidades paralelas al talud, las cuales sufren vuelco por flexión. Ver Figura II.11(b).

El tercer tipo de falla por vuelco, conocido como vuelco por flexión de bloques. La flexión se genera por el desplazamiento de las juntas de los numerosos bloques que presentan las columnas de macizo rocoso. Debido a la cantidad de pequeños movimientos de este tipo de vuelco, hay menos grietas de tensión que en vuelco por flexión, y menos contactos entre los bordes y caras de bloques. Ver Figura II.11(c).

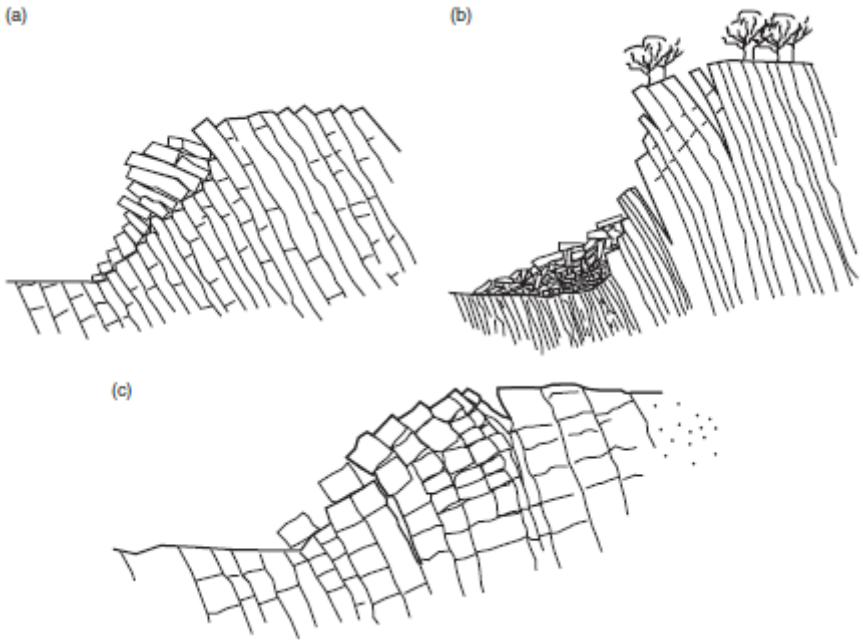


Figura II.11 Tipos de falla por vuelco. (a) Vuelco de bloques por discontinuidades ortogonales; (b) Vuelco por pandeo de macizo rocoso; (c) Vuelco por pandeo y discontinuidades ortogonales.

Fuente: Wyllie D. & Mah C., 2005.

La identificación de potenciales fallas por vuelco se realiza mediante el análisis cinemático de las proyecciones estereográficas y las condiciones geométricas que pueda presentar las columnas de macizos rocosos. A continuación se muestra las condiciones geométricas que originan una falla por vuelco, ver Figura II.12:

- Si el ángulo de fricción entre la base del bloque y el plano es ϕ_p, entonces el bloque será estable contra deslizamiento cuando la inclinación del plano sea menor que el ángulo de fricción $\psi_p < \phi_p$.
- El bloque será inestable contra volcadura cuando el centro de gravedad del bloque esté fuera de la base, es decir, $\frac{\Delta x}{y} < \tan \psi_p$.

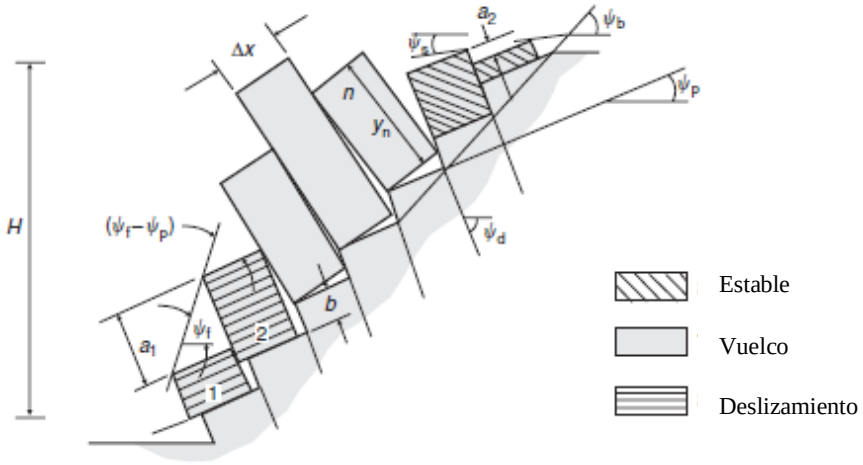


Figura II.12 Esquema de falla por vuelco en talud de macizo rocoso

Fuente: Wyllie D. & Mah C., 2005.

El cálculo del factor de seguridad para una falla por vuelco se calcula según se muestra en la Ecuación 2.17. Siendo c la cohesión, A el área de la base del bloque, W el peso de los bloques del macizo rocoso, ϕ el ángulo de fricción del macizo rocoso, ψ_p el ángulo de buzamiento de plano de falla por vuelco.

$$FS = \frac{cA + W\cos\psi_p.\tan\phi}{W\sin\psi_p} \qquad \text{(Ec. 2.17)}$$

2.1.4.4.Falla circular

Este tipo de falla generalmente se ocasiona en macizos rocosos blandos o alterados, es decir, con gran cantidad de discontinuidades, las cuales generan deslizamiento circular de rocas en dirección de la pendiente del talud.

El análisis de esta falla se realiza mediante el método de las rebanadas mediante equilibrio límite, es decir, se subdivide en talud en varias franjas verticales, analizando el comportamiento de cada una; sin embargo, este de análisis conlleva a manejar más varias que ecuaciones por lo que diferentes autores realizan la solución de este método mediante suposiciones de variables específicas y la iteración de las demás. Los métodos más

utilizados para el análisis de este método son: método de Fellenius, método de Bishop simplificado y método de Janbu simplificado.

En la Figura II.13 se muestra un esquema de falla circular, donde H es la altura del talud, R es el radio del círculo de falla, ΔX es el ancho de la franja o rebanada, W es el peso del macizo rocoso por encima del borde de falla, U es la presión hidrostática que se genera en el borde de falla, δ es el ángulo de falla que abarca la corona del talud hasta la base de la falla.

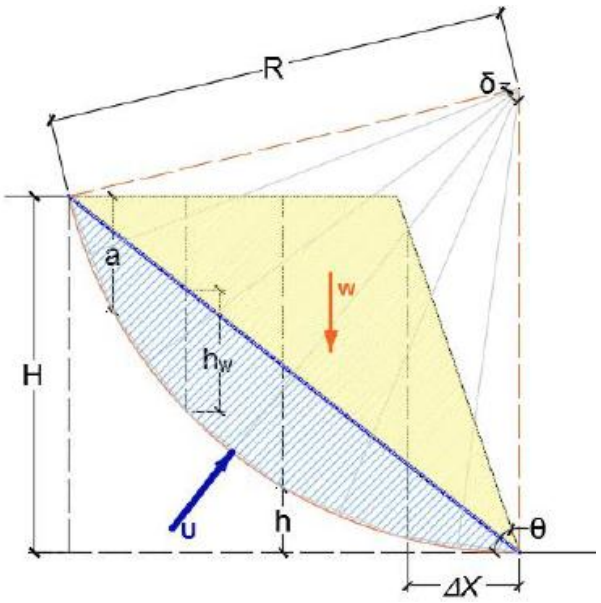


Figura II.13 Esquema de falla circular en talud

Fuente: Ramos, 2017.

El método ordinario o de Fellenius subdivide el área de falla en rebanadas verticales, analizándolas de manera separada las fuerzas actuantes y resultantes. El cálculo del factor de seguridad de Fellenius se realiza mediante el cálculo de momentos respecto al centro del círculo de falla. Dos de las desventajas de este método es que no satisface el equilibrio de fuerza y no se consideran las fuerzas en las caras de las rebanadas; sin embargo, es muy utilizado ya que su procedimiento es simple. La fórmula de factor de seguridad de Fellenius se muestra en la Ecuación 2.18 donde C es la cohesión en la superficie de rotura, φ es el ángulo de rozamiento interno del macizo rocoso, W_i es el peso de la franja i del

macizo rocoso, U_i es el empuje hidrostático en la superficie de falla de la rebanada *i*, *n* es el número de rebanadas, θ_i es el ángulo formado entre el pie del círculo de rotura y el radio del círculo de falla.

$$F_f = \frac{C+\tan\varphi \sum_{i=1}^{n}(W_i \cos\theta_i - U_i)}{\sum_{i=1}^{n} W_i \sin\theta_i} \qquad \text{(Ec. 2.18)}$$

El método de Bishop simplificado es uno de los métodos más utilizados para análisis de falla circular. Al igual que el método de Fellenius, subdivide la falla circular en rebanadas verticales, pero la fórmula de Bishop sí considera las fuerzas actuantes entre rebanadas como fuerzas horizontales y se obtiene el factor de seguridad de Bishop mediante iteraciones. Una de las desventajas de este método es no se consideran las fuerzas cortantes entre rebanadas como fuerzas actuantes, sin embargo, esto permite reducir el número de incógnitas de su ecuación. La fórmula de factor de seguridad de Bishop simplificado se muestra en la Ecuación 2.19 donde c_i es la cohesión en la superficie de rotura de cada rebanada, φ es el ángulo de rozamiento interno del macizo rocoso, W_i es el peso de la franja *i* del macizo rocoso, U_i es el empuje hidrostático en la superficie de falla de la rebanada *i*, *n* es el número de rebanadas, θ_i es el ángulo formado entre el pie del círculo de rotura y el radio del círculo de falla.

$$F_b = \frac{\sum_{i=1}^{n}[c_i+(W_i-U_i)\tan\varphi](\frac{1}{\cos\theta_i}(1+\frac{\tan\theta_i \tan\varphi}{F_b}))}{\sum_{i=1}^{n} W_i \sin\theta_i} \qquad \text{(Ec. 2.19)}$$

El método de Janbu simplificado al igual que el método de Bishop, considera rebanadas verticales en la superficie de falla y las fuerzas actuantes entre rebanadas como horizontales. Este método considera que todas las rebanadas presentan el mismo factor de seguridad, no tomando en cuenta el equilibro el equilibrio de momentos, motivo por el cual las superficies de rotura no son necesariamente circulares. Para compensar la falta de equilibrio de momentos Janbu introduce un factor de corrección al coeficiente de

seguridad de Janbu, generándose un coeficiente de seguridad Janbu simplificado corregido.

La fórmula de factor de seguridad de Janbu simplificado se muestra en la Ecuación (2.20) donde c_i es la cohesión en la superficie de rotura de cada rebanada, φ es el ángulo de rozamiento interno del macizo rocoso, W_i es el peso de la franja *i* del macizo rocoso, U_i es el empuje hidrostático en la superficie de falla de la rebanada *i*, *n* es el número de rebanadas, θ_i es el ángulo formado entre el pie del círculo de rotura y el radio del círculo de falla.

$$F_j = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[c+\frac{1}{\cos\theta_i\left(1+\frac{\tan\theta_i\tan\varphi}{F_j}\right)}\left(W_i\frac{c\sin\theta_i}{F_j}U_i\cos\theta_i\right)\tan\varphi\right]\cos\theta_i}{\sum_{i=1}^{n}(W_i+U_i\sin\theta_i)+\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\cos\theta_i\left(1+\frac{\tan\theta_i\tan\varphi}{F_j}\right)}\left(W_i-\frac{c\sin\theta_i}{F_j}-U_i\cos\theta_i\right)\sin\theta_i} \qquad \text{(Ec. 2.20)}$$

En la Ecuación 2.21 se muestra el factor de seguridad de Janbu simplificado, donde F_{jc} es el nuevo factor de seguridad de Janbu corregido, f_o es el factor de corrección por desequilibrio de momentos y F_j es el factor de seguridad de Janbu simplificado mostrado en la Ecuación 2.20.

$$F_{jc} = f_o F_j \qquad \text{(Ec. 2.21)}$$

2.1.5. Resistencia al corte del macizo rocoso

La resistencia al corte del macizo rocoso puede ser estimada mediante los criterios de Mohr-Coulomb y criterio de rotura generalizado de Hoek y Brown. La diferencia entre estos criterios se basa en la consideración de criterio lineal y no lineal de rotura, respectivamente, siendo el más recomendable el criterio de Hoek y Brown debido a que las envolventes de resistencia de la roca no presentan un comportamiento lineal respecto a la presión normal de confinamiento.

El criterio de rotura de Hoek y Brown Generalizado es la actualización más reciente del criterio, siendo las formulaciones las siguientes:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + S \right)^a \quad \text{(Ec. 2.22)}$$

$$m_b = m_i . e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad \text{(Ec. 2.23)}$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad \text{(Ec. 2.24)}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}})}{6} \quad \text{(Ec. 2.25)}$$

Donde:

σ_1', σ_3' = Tensiones principales mayor y menor en el momento de la rotura

σ_c= Resistencia a la compresión simple de la roca matriz.

m_b= Valor reducido de la constante del material m.

a, s= Constantes del macizo rocoso

D= Factor dependiente del grado de alteración del macizo rocoso debido a efectos externos.

Las formulaciones planteadas para el criterio de rotura de Hoek y Brown Generalizado consideran como referencia de observaciones geológicas en campo al Índice de Resistencia Geológica, GSI; ya que el autor considera que el criterio RMR de Bieniawski no tiene consideraciones para macizos rocosos débiles. Los criterios señalados en el GSI se muestran a continuación:

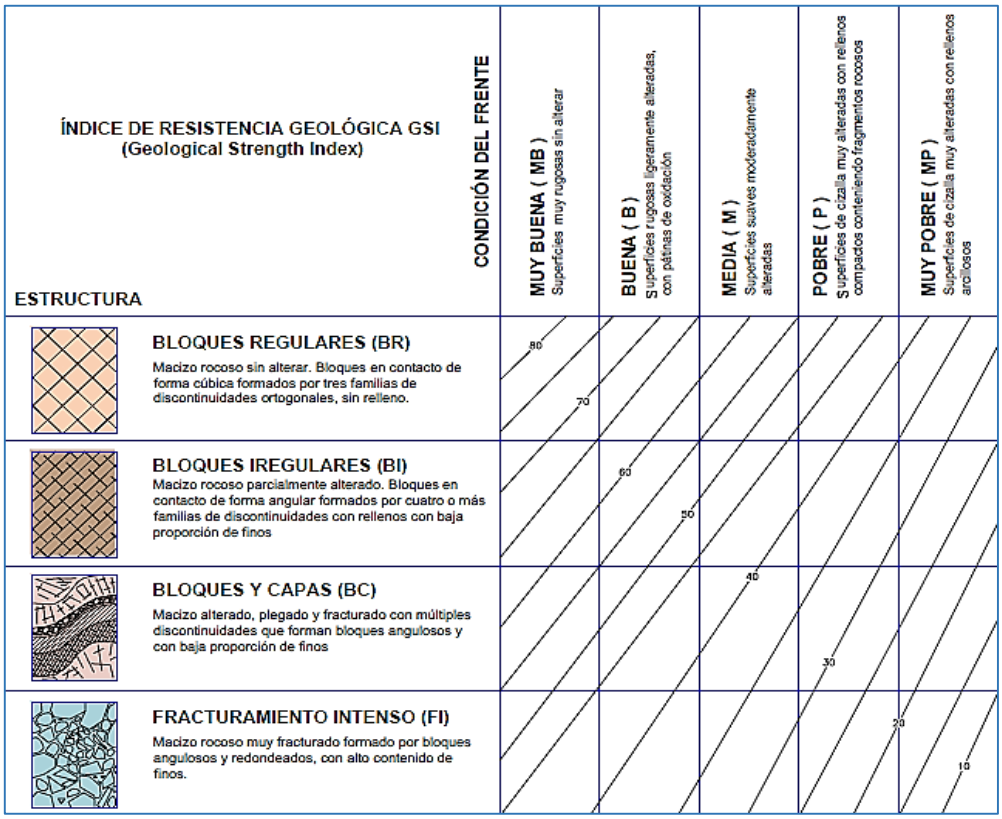


Figura II.14 Carta de estimación del índice GSI en base a descripciones geológicas
Fuente: Hoek, y Brown, 1997

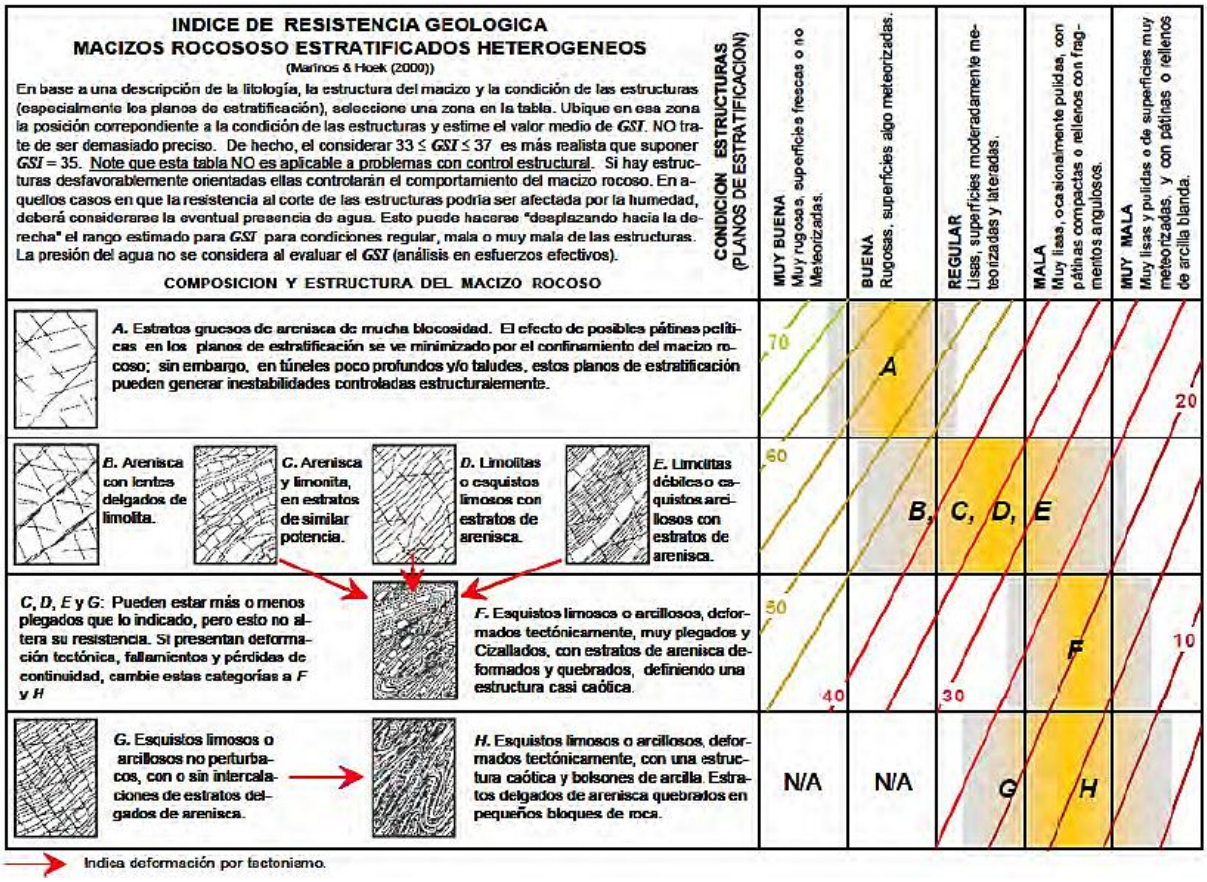


Figura II.15 Consideraciones para índice GSI
Fuente: Marinos y Hoek, 2000

Las variables m_b y m_i son constantes adimensionales dependientes del tipo de macizo rocoso. A continuación se muestran las constantes de material m_i para diferentes tipos de roca:

Tipo de Roca	Clase	Grupo	Textura			
			Gruesa	Media	Fina	Muy Fina
SEDIMENTARIAS	Clásticas		Conglomerado (22)	Arenisca 19	Limolita 9	Arcillolita 4
				←---------- Grauwaca ----------→ (18)		
	No Clásticas	Orgánicas		←---------- Creta ----------→ 7		
				←---------- Carbón ----------→ (8 – 21)		
		Carbonatos	Brechas (20)	Caliza Esparítica (10)	Caliza Micrítica 8	
		Químicas		Yeso 16	Anhidrita 13	
METAMORFICAS	No Foliadas		Mármol 9	Rocas Córneas (19)	Cuarcita 24	
	Levemente Foliadas		Migmatita (30)	Anfibolita 25 - 31	Milonitas (6)	
	Foliadas		Gneiss 33	Esquistos 4 – 8	Filitas (10)	Pizarras 9
IGNEAS	Intrusivas	Claras	Granito 33		Riolita (16)	Obsidiana (19)
			Granodiorita (30)		Dacita (17)	
			Diorita (28)		Andesita 19	
		Oscuras	Gabbro 27	Dolerita (19)		
			Norita 22		Basalto (17)	
	Extrusivas Pioroclásticas		Aglomerados (20)	Brechas (18)	Tobas (15)	

Figura II.16 Valores de la constante m_i de la roca intacta para distintos tipos de roca

Fuente: Hoek, E., et al., 1995

El factor de alteración *D* es un factor que permite cuantificar el grado de alteración que presenta el macizo rocoso en base a los efectos externos que se hayan producido en este, como por ejemplo voladuras y/o excavaciones. El factor D se puede cuantificar desde 0 hasta 1, siendo 0 para macizos rocosos inalterados y 1 para macizos rocosos alterados. A continuación se muestran valores sugeridos para tipos de alteración:

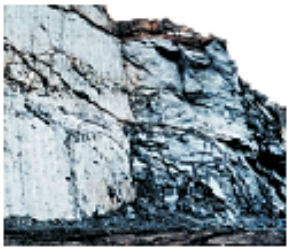
Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel	$D = 0$
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala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

Figura II.17 Valores de alteración D sugeridos

Fuente: Hoek, E., Carranza-Torres, C. & Corkum, B. (2002)

El cálculo de módulo de deformación (E) se realiza de acuerdo a los siguientes casos:

- Si $\sigma_{ci} \leq 100\ MPa$, entonces:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right)\sqrt{\frac{\sigma_c}{100}}.10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (GPa) \qquad \text{(Ec. 2.26)}$$

- Si $\sigma_{ci} > 100\ MPa$, entonces:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) . 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (GPa) \qquad \text{(Ec. 2.27)}$$

2.1.6. Modelamiento de Macizo Rocoso mediante software

Existe una gran variedad de programas computacionales para el modelamiento del macizo rocoso, de los cuales se mencionará los que se utilizaron en los antecedentes. Para el análisis de macizos rocosos existen dos ramas de software, la primera rama se utiliza para proyecciones estereográficas de discontinuidades y visualización de características para análisis cinemático de orientación de discontinuidades, y la segunda rama se utiliza para el análisis del talud de macizo rocoso considerando propiedades del macizo rocoso para cálculo de falla crítica mediante el método de reducción de resistencia al corte. Dentro de la primera rama, DIPS es el software más utilizado debido a las funciones que presenta y su practicidad para introducir datos. Dentro de la segunda rama, se subdividen programas de acuerdo al método de análisis (elementos finitos, elementos discretos y equilibrio límite) y tipo de visualización que presentan (2D y 3D). El software Slide realiza el análisis 2D de estabilización de taludes por método de equilibro, pero sin considerar el fracturamiento del macizo rocoso, ni parámetros elásticos. El software Phase realiza el análisis 2D de estabilización de taludes por método de elementos finitos, considerando el fracturamiento del macizo rocoso y parámetros elásticos. El software S-DYNA realiza el análisis 2D y 3D de estabilización de taludes por método de elementos finitos, considerando el fracturamiento del macizo rocoso y parámetros elásticos. El software UDEC realiza el análisis de estabilización de taludes por método de elementos discretos, considerando el fracturamiento del macizo rocoso y propiedades del macizo rocoso.

Los programas computacionales a utilizar en la presente investigación son DIPS y Slide, los cuales se describen detalladamente a continuación:

- **DIPS** es un programa computacional que permite visualizar la proyección estereográfica de las familias de discontinuidades y realizar el análisis cinemático en una red estereográfica. El análisis estructural de discontinuidades permite descartar o definir los mecanismos de falla que un macizo rocoso podría sufir en base a la geometría de sus discontinuidades, ángulo de fricción y su talud. El programa permite interpretar las fallas planares, de cuña y volcamiento mediante la proyección de discontinuidades en la Falsilla de Wulff o Malla de Schmidt. Asimismo, DIPS permite colocar las características y propiedades que presentan las discontinuidades con la finalidad de facilitar estadísticas o diagramas de barra para el reconocimiento de familias.
- **Slide** es un programa computacional de análisis de estabilidad de taludes de suelos y rocas en 2D. Este software, diseñado por la empresa Roscience, realiza el cálculo del factor de seguridad, superficie de falla crítica (circular y no circular) y centro de giro que pueda presentar el talud del macizo rocoso debido a la resistencia por corte; considerando los siguientes métodos de equilibrio límite para criterios de rotura: Hoek y Brown, Mohr-Coulomb, Hoek y Brown generalizado.

  Una de las ventajas del software Slide es la practicidad para insertar datos y la geometría del talud, ya que pueden realizarse manualmente o mediante importación de datos. Los métodos de análisis de superficie de rotura son los siguientes: Fellenius, Bishop simplificado, Janbu generalizado y corregido, entre otros.

2.1.7. Análisis de Manual de Carreteras

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones es un órgano peruano encargado de generar normas correspondientes para la gestión de infraestructura vial.

El *literal 4.5.3 Cortes y terraplenes* del *CAPÍTULO IV SUELOS* del Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos (MTC, 2014) menciona lo siguiente: "Los taludes de corte dependerán de la naturaleza del terreno y de su análisis de estabilidad (Estudio Geotécnico), pudiendo utilizarse (a modo referencial) las siguientes relaciones de corte en talud (V:H), que son apropiados para los tipos de materiales (rocas y suelos) indicados en el cuadro 4.12". (MTC, 2004, pag. 39)

En la tabla II.13 se muestra el Cuadro 4.12 mencionado.

Tabla II.13 Cuadro 4.12 del Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos

CLASE DE TERRENO	TALUD (V: H)		
	V ≤ 5m	5m < V ≤ 10m	V >10m
Roca Fija	10 : 1	10 : 1 (*)	(**)
Roca Suelta	6 : 1 - 4 : 1	4:1 – 2 : 1 (*)	(**)
Conglomerados Cementados	4 : 1	(*)	(**)
Suelos Consolidados Compactos	4 : 1	(*)	(**)
Conglomerados Comunes	3 : 1	(*)	(**)
Tierra Compacta	2 : 1 - 1 : 1	(*)	(**)
Tierra Suelta	1 : 1	(*)	(**)
Arenas Sueltas	1 : 2	(*)	(**)
Zonas blandas con abundante arcillas o zonas humedecidas por filtraciones	1 : 2 hasta 1 : 2	(*)	(**)

(*) Requiere Banqueta o análisis de estabilidad
(**) Requiere Análisis de Estabilidad
Nota: La relación V: H, indica que V corresponde a la altura vertical del talud y H la distancia horizontal.

Fuente: Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos (MTC, 2014)

El Glosario de Términos de uso de frecuente en proyectos de infraestructura vial del Manual de Carreteras presenta los siguientes significados de roca Fija y roca Suelta:

- **Roca fija:** Masas de rocas medianas o fuertemente litificadas que, debido a su cohesión y consolidación, requieren necesariamente el empleo sistemático de explosivos para su disgregación. (Glosario de Términos de Uso Frecuente en Proyectos de Infraestructura Vial, 2018, pag. 20)
- **Roca suelta:** Masas de rocas cuyos grados de fracturamiento, cohesión y consolidación, necesiten el uso de maquinaria y/o requieran explosivos, siendo el empleo de este último en menor proporción que para el caso de roca fija. (Glosario de Términos de Uso Frecuente en Proyectos de Infraestructura Vial, 2018, pag. 20)

El Manual de Carreteras-Túneles, muros y obras complementarias (MTC, 2016) presenta en su manual capítulos relacionados al diseño geométrico, estudios geológicos-geotécnicos, clasificación geomecánica y diseño empírico, cálculos de túneles, excavación de túneles, sostenimiento de túneles, seguimiento y control de obra en túneles, entre otros. Dentro de este Manual se encuentran bases teóricas de mecánicas de rocas y su aplicación a túneles. La base teórica en base a otras fuentes bibliográficas se muestra en el Capítulo II de esta investigación y a continuación se mostrarán ecuaciones y teorías resaltantes del Manual mencionado.

Para macizos rocosos de buena calidad el índice GSI (GSI>35) y sin presencia de agua, el Manual de Carreteras-Túneles, Muros y Obras Complementarias 2016 muestra la siguiente correlación:

$$GSI = RMR\ básico\ (1989) - 5 \qquad \text{(Ec. 28)}$$

Respecto al método de Hoek y Brown aplicado para equilibrio límite, el Manual de Carreteras-Túneles, muros y obras complementarias menciona lo siguiente: “El criterio suele aplicarse para definir el estado tensional bajo el cual el macizo rocoso se deformará

inelásticamente y colapsará si no tiene un sostenimiento adecuado". (Manual de Carreteras-Túneles, muros y obras complementarias, 2016, pag. 107).

El Reglamento Nacional de Edificaciones CE.020 Estabilización de suelos y taludes meciona: "Para el análisis de estabilidad de los taludes en roca y suelos será necesario realizar estudios geotécnicos, que permitan caracterizar materiales y evaluar parámetros de diseño que el Profesional Responsable considere necesario, a fin de obtener la estabilidad del talud (...) Determinada la condición de estabilidad del talud, el Profesional Responsable seleccionará y aprobará el método o la combinación de métodos de estabilización que, acuerdo a su análisis, muestren potencialidades suficientes para estabilizar y remediar el talud. Dichos métodos deberán mostrar su eficacia y eficiencia, teniendo que nuevamente ser verificada la conición de estabilidad del talud para condiciones estáticas y seudo estáticas. Asimismo, el Profesional Responsable desarrollará y recomendará si es necesario incorporar a la solución integral un método de control contra la erosión, a fin de otorgarle sostenibilidad a la solución de estabilización de talud" (CE.020, pag. 6).

CAPITULO III

III. METODO

3.1. Tipo de investigación

- Tipo: descriptivo-causal
- Método: Deductivo
- Enfoque: Correlacional

3.2. Ámbito temporal y espacial

El proyecto Subestación Eléctrica Mirador se encuentra en los cerros que atraviesa el Anillo Vial, el cual une el distrito de Comas y San Juan de Lurigancho.

La prospección en campo y ensayos de laboratorio se han realizado entre los meses de Mayo y Junio del año 2018.

3.3. Variables

Variable Independiente:

- Modelamiento del macizo rocoso

Indicadores:

- RMR (adimensional)
- GSI (adimensional)
- Resistencia de compresión axial (MPa)

Variable Dependiente:

- Mecanismos de falla

Indicadores:

- Carga de servicio (kN)

- Altura de talud (m)

- Factor de seguridad (adimensional)

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

Se considera como población al macizo rocoso localizado en los cerros del Anillo Vial que unen los distritos de San Juan de Lurigancho y Comas.

3.4.2. Muestra

La zona de estudio correspondiente al macizo rocoso cortado localizado en la Subestación Eléctrica Mirador.

3.5. Instrumentos

Los instrumentos utilizados son las fichas de trabajo en campo, fichas de análisis de laboratorio y fichas de resultados; las cuales están basadas en la recopilación de información y análisis de datos.

3.6. Procedimiento

El procedimiento utilizado para el desarrollo del método de investigación se muestra en la Figura III.1, el cual se caracteriza por ser un diagrama de flujo. Se ha considerado el diagrama de flujo como representación gráfica del procedimiento, ya que esta permite representar la secuencia de actividades que se realizaron para la obtención de conclusiones.

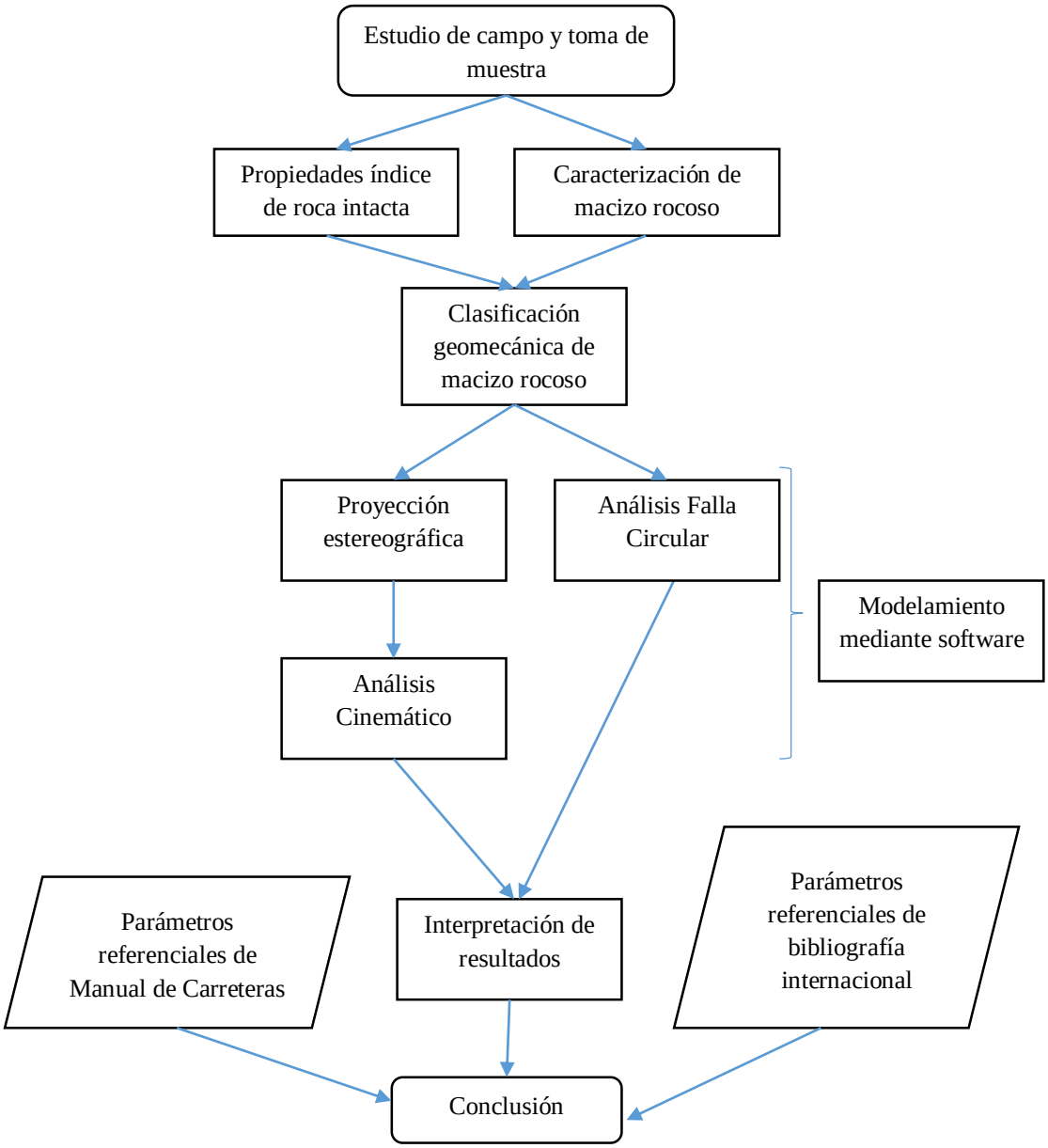


Figura III.1 Procedimiento de metodología de investigación

Fuente: Elaboración propia

3.7. Análisis de datos

Se realiza el análisis de datos cuantitativos obtenidos de las fichas de trabajo en campo, fichas de análisis de laboratorio y fichas de resultados, las cuales caracterizan y miden las fallas del macizo rocoso generados por los parámetros del Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos 2014, con la finalidad de obtener conclusiones precisas e interpretar sus resultados.

CAPITULO IV

IV. RESULTADOS

4.1. Aspectos generales

4.1.1. Ubicación

La Subestación Eléctrica Mirador se encuentra en las coordenadas UTM-WGS84 283629E 8683129N, ubicada en la margen lateral del distrito de San Juan de Lurigancho del anillo vial que une los distritos de San Juan de Lurigancho y Comas, departamento de Lima, con una altitud media promedio de 762 msnm.

La Subestación eléctrica Mirador se desarrolla sobre la hoja 24-j, Lima, base de la información publicada por el INGEMMET en sus cuadrángulos geológicos a escala 1:100 000.



Figura IV.1 Ubicación de Subestación Mirador

Fuente: Google Earth 2018 & Tupia Ingenieros SAC 2018

4.1.2. Geomorfología regional

A nivel regional como unidades geomorfológicas predominantes se encuentran: Planicies costeras y conos deyectivos, lomas y cerros testigos, valles y quebradas, estribaciones andinas occidentales y zona andina. (Boletín N°43 Geología de los cuadrángulos de Lima, Lurin, Chancay y Chosica, 1992, pág. 5)

A nivel local el proyecto en estudio se encuentra situado en la unidad geomorfológica denominada Montaña en Roca Intrusiva perteneciente a Estribaciones andinas Occidentales, según se muestra en la Figura IV.2, la cual se caracteriza por poseer una topografía abrupta con crestas aproximadas de 900 msnm y pendientes variables entre los 25° y 55°.

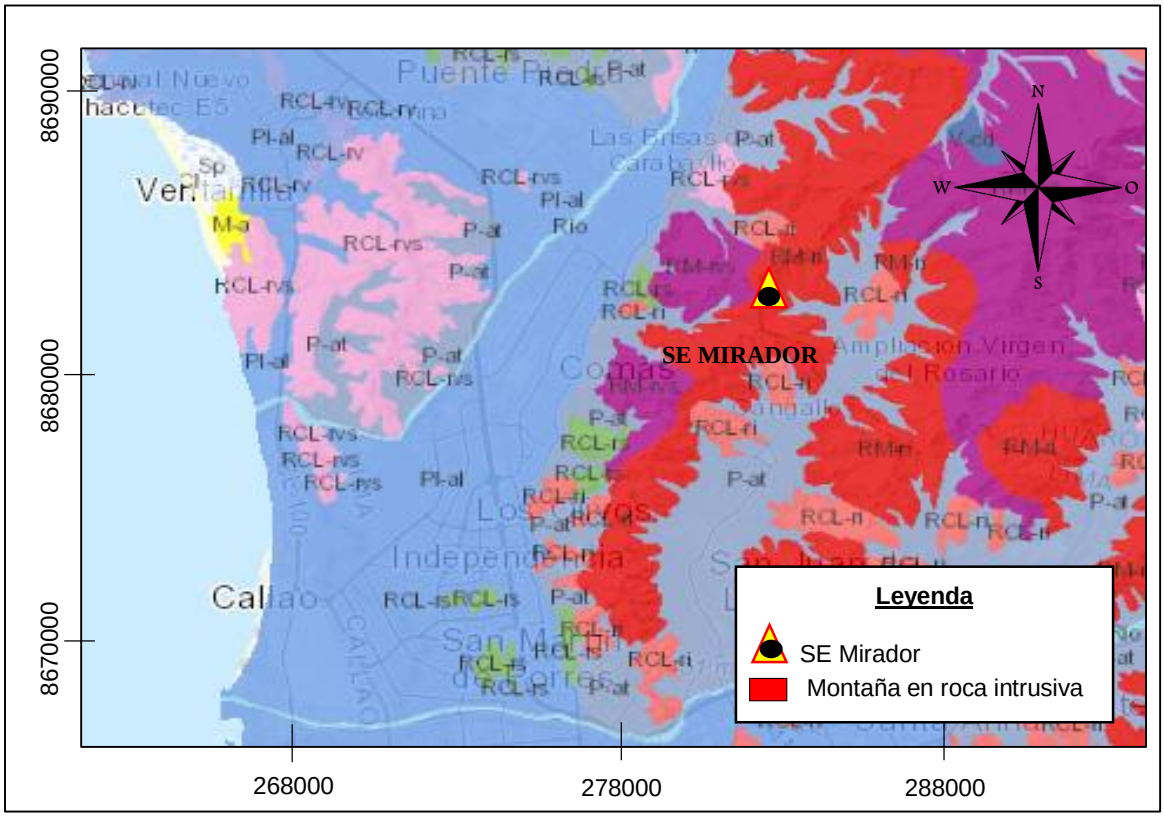


Figura IV.2 Mapa geomorfológico regional de SE Mirador

Fuente: Geocatmin 2018

4.1.3. Geología local

El área del proyecto de la Subestación Mirador se encuentra entre las unidades litoestratigráficas denominadas Volcánico Santa Rosa y Patap. La unidad Volcánico Santa Rosa, el cual pertenece al grupo regional Puente Piedra y edad Jurásico Superior, está geológicamente constituido por roca volcánica tonalita-diorita, conocido como Santa Rosa oscuro ya que los macizos rocosos presentan un color grisáceo oscuro de grano medio a grueso. La superunidad Patap, considerada como una de las familias más antiguas del Batolito de la Costa, se caracteriza por poseer roca volcánica gabro-diorita la cual presenta grano medio a grueso y coloración grisácea.

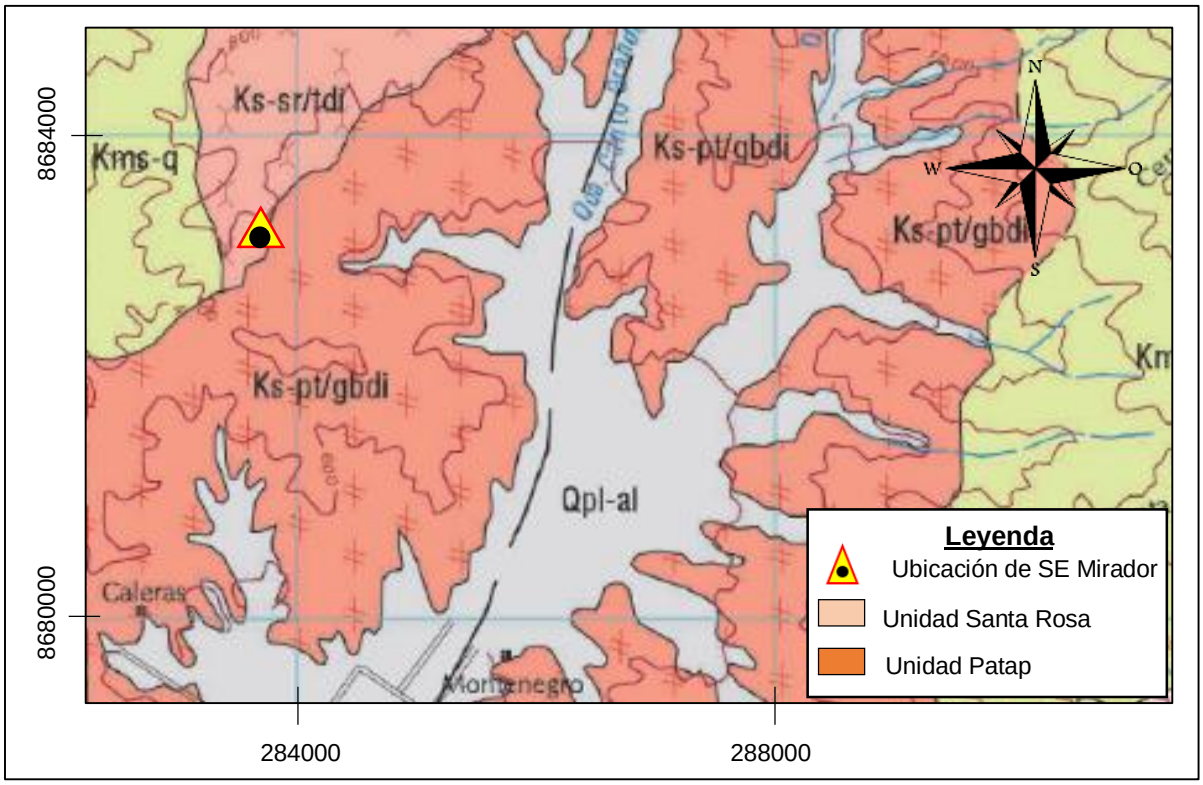


Figura IV.3 Mapa geológico regional de SE Mirador

Fuente: Ingemmet 1998

4.1.4. Geología estructural

Se han desarrollado sistemas de fallamiento que presentan rumbo NE-SW, cuya litología proviene de las rocas intrusivas del Batolito de la Costa y de las Cadenas Andinas. Los macizos rocosos presentan discontinuidades ligeramente meteorizadas y con aberturas de varían de milímetros a centímetros, lo que podría generar peligros geológicos.

4.1.5. Peligros Geológicos

Son fenómenos naturales terrestres generados por procesos de origen tectónico y/o externos. Dentro de los procesos externos se tiene en cuenta a los movimientos de masa de roca ladera abajo como fenómeno natural, considerándose a los factores condicionantes (litología y pendiente) y factores detonantes (sismicidad y precipitación) como las condiciones geológicas que generan desastres.

El proyecto subestación eléctrica Mirador pertenece a la subcuenca Canto Grande.

Los principales peligros geológicos en la subcuenca Canto Grande son: caídas de rocas, flujos de detritos (huaycos), erosión de laderas y erosión fluvial. En la parte media y alta de la quebrada, la desestabilización de las laderas se produce a consecuencia de los cortes para construir viviendas y carreteras de acceso. (INGEMMET, 2010, pág. 12)

De la Figuras IV.4 y IV.5 se puede apreciar que la zona de proyecto presenta alta susceptibilidad a los movimientos de masas de rocas, siendo la caída de rocas el peligro geológico con mayor probabilidad, pudiendo generar riegos a la población y viviendas localizadas en las laderas y parte baja de la subcuenca Canto Grande.

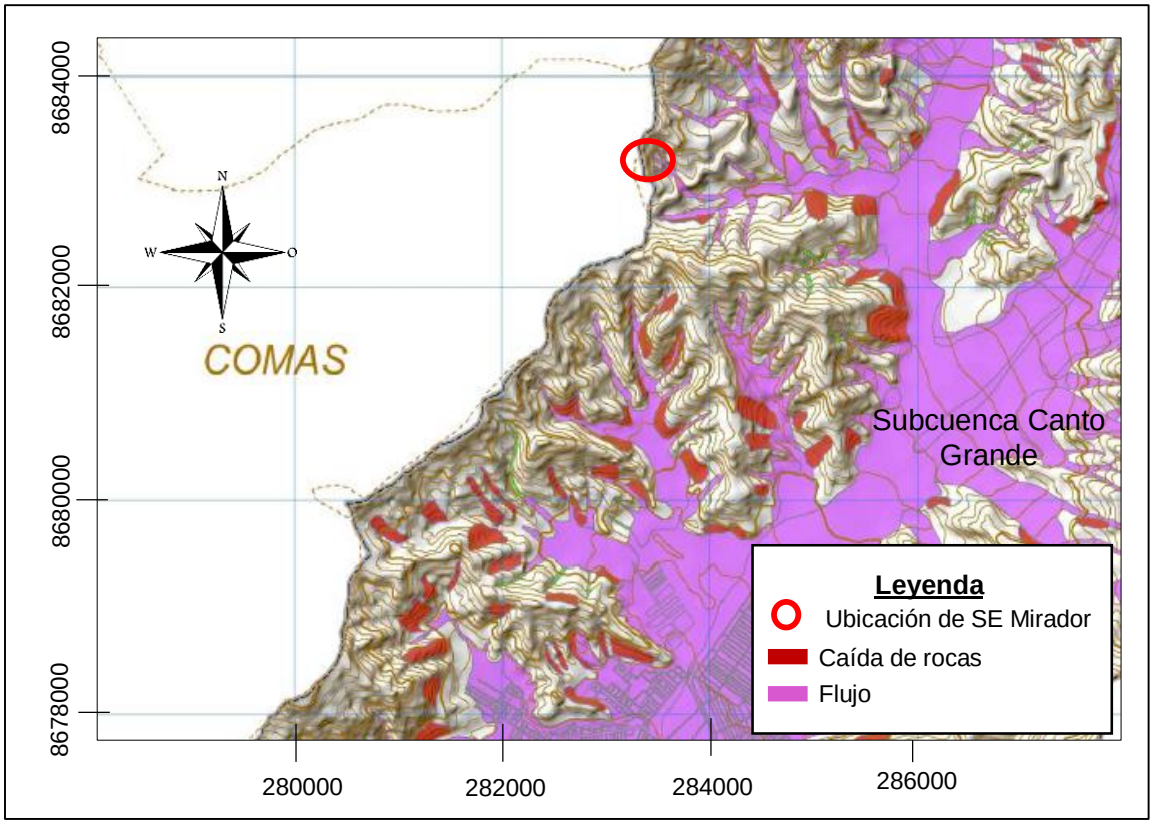


Figura IV.4 Peligros geológicos en la subcuenca Canto Grande.

Fuente: INGEMMENT (2010) y Vasquez, J (2009)

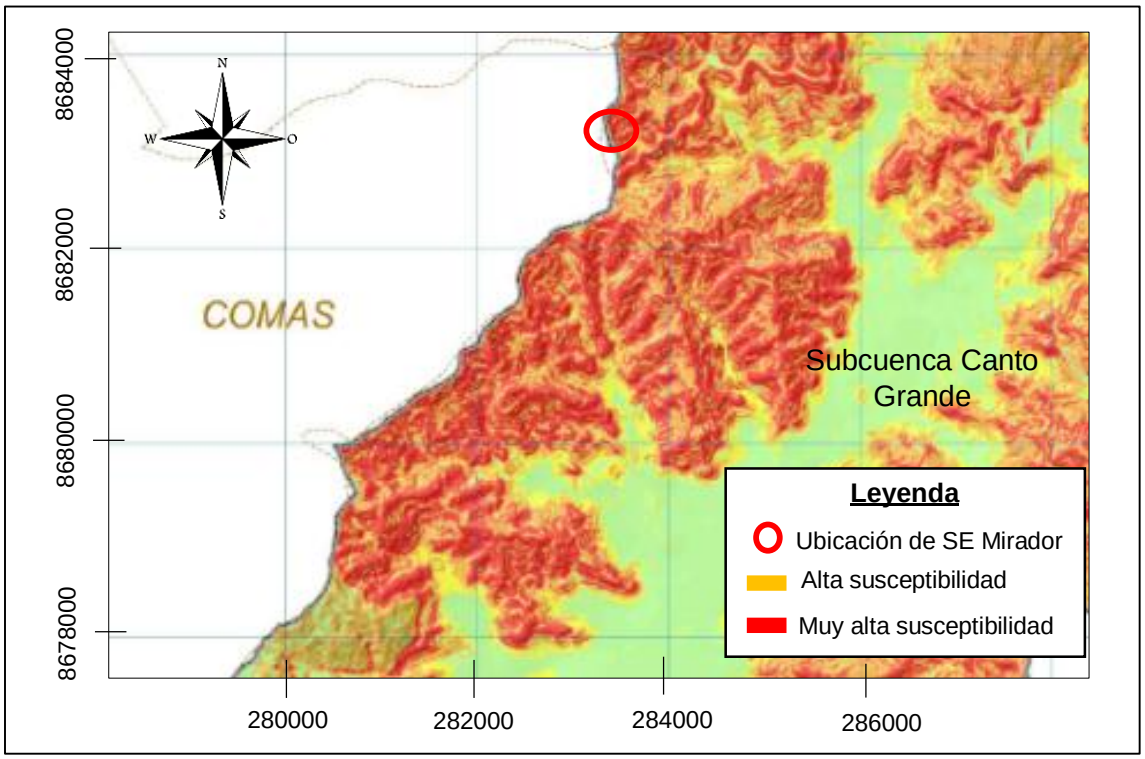


Figura IV.5 Susceptibilidad por movimientos en masa en la quebrada Canto Grande

Fuente: INGEMMENT (2010) y Vasquez, J (2009)

4.2. Caracterización del macizo rocoso

La caracterización de macizo rocoso es realizado en campo mediante la toma de datos, los cuales se realizan por estaciones geomecánicas. Las características geomecánicas tomados en campo son los siguientes: separación entre discontinuidades, longitud de discontinuidades, abertura entre discontinuidades, rugosidad, relleno, alteración o meteorización, orientación de discontinuidades, presencia de agua freática y Rock Quality Designation (RQD).

4.2.1. Ubicación de estaciones geotécnicas

La ubicación de estaciones geotécnicas (ver Figura IV.6) se ha realizado en base a la dirección de las discontinuidades, dirección de talud de corte y altura de talud de corte que presenta área de proyecto (ver Figura IV.7).

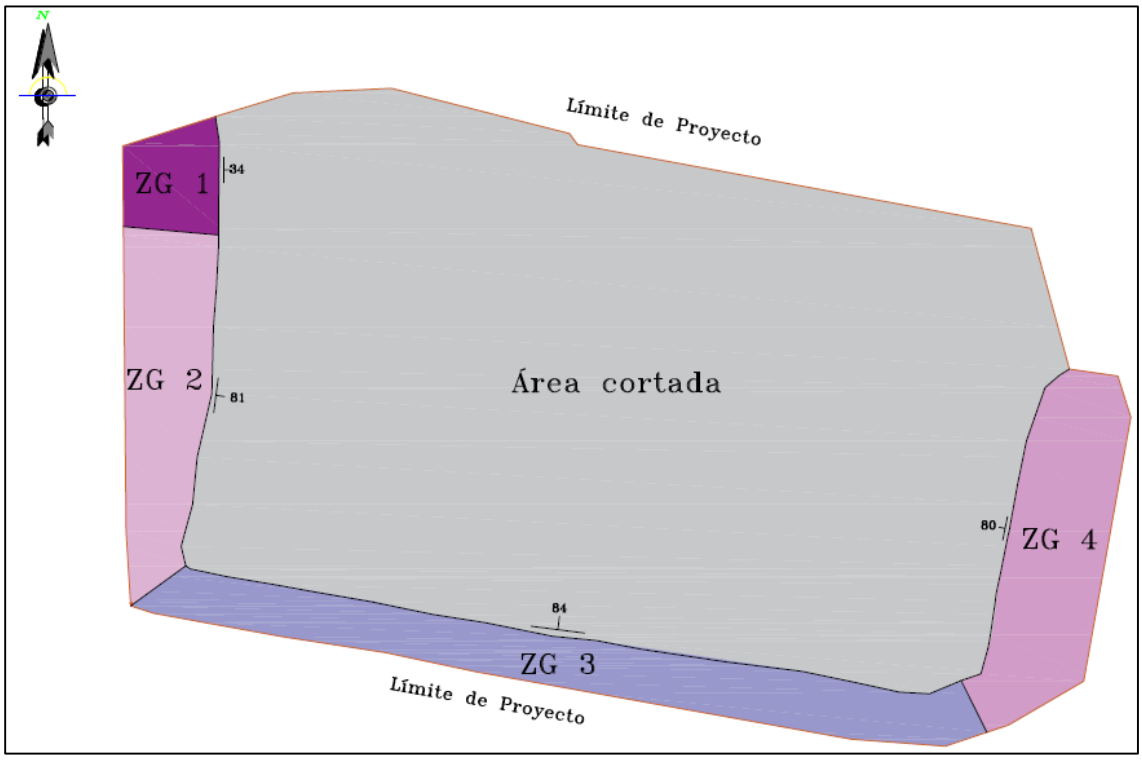


Figura IV.6 Esquema de zonas geotécnicas

Fuente: Elaboración propia

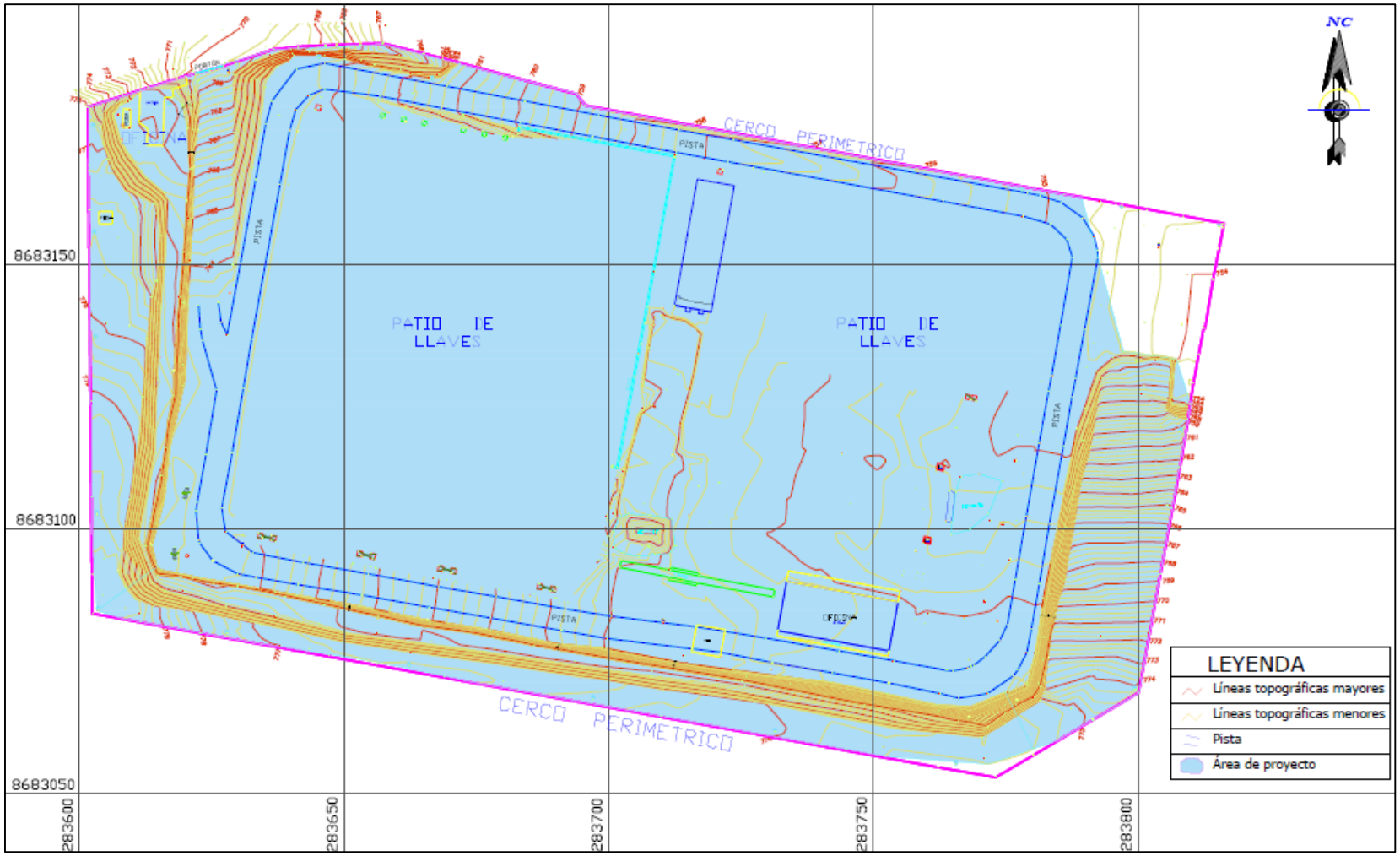


Figura IV.7 Área de proyecto de Subestación Mirador

Fuente: Elaboración propia

La zona geotécnica 1 (ZG 1), ubicada en el área NO de la subestación Mirador, presenta roca diorita y un talud de dos a cuatro metros de altura, el cual presenta un buzamiento de 34°. Se utilizó la zona del talud de corte de la ZG 1 para ubicar a la Estación Geomecánica 1 y realizar la caracterización de la Zona.

La zona geotécnica 2 (ZG 2), ubicada en el área SO de la subestación Mirador, presenta roca diorita y un talud de 7 a 9.5 metros de altura, el cual presenta un buzamiento de 81°. Se utilizó la zona del talud de corte de la ZG 2 para ubicar a la Estación Geomecánica 2 y realizar la caracterización de la Zona.

La zona geotécnica 3 (ZG 3), ubicada en el área Sur de la subestación Mirador, presenta roca diorita y un talud de 9 a 15 metros de altura, el cual presenta un buzamiento de 84°. Se utilizó la zona del talud de corte de la ZG 3 para ubicar a la Estación Geomecánica 3 y realizar la caracterización de la Zona.

La zona geotécnica 4 (ZG 4), ubicada en el área SE de la subestación Mirador, presenta roca diorita y un talud de 5 a 14 metros de altura, el cual presenta un buzamiento de 80°. Se utilizó la zona del talud de corte de la ZG 4 para ubicar a la Estación Geomecánica 4 y realizar la caracterización de la Zona.

Para los criterios de modelamiento de taludes de corte se analizarán las alturas máximas de talud menores a 10 metros con la finalidad de realizar comparaciones directas con lo propuesto en el Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos 2014 referente a taludes menores a 10 m, finalidad de la investigación; es decir, para la Zona ZG 1 se evaluará el talud de 4 m de altura, en la zona ZG 2 se evaluará el talud de 9.5 m de altura, en la zona ZG 3 se evaluará el talud de 10 m de altura y en la zona ZG 4 se evaluará el talud de 10 m de altura.

4.2.2. Caracterización geomecánica por estaciones

La caracterización geomecánica consiste en toma de datos in-situ con la finalidad de caracterizar el macizo rocoso, obtener parámetros que permitan realizar la clasificación geomecánica RMR e identificar la calidad del macizo rocoso.

La caracterización geomecánica se realizó por estaciones, considerándose cada estación como muestra representativa de las zonas geotécnicas. La caracterización se muestra en la Tabla IV.1, Tabla IV.2, Tabla IV.3, Tabla IV.4.

Tabla IV.1 Ficha de datos de Estación Geomecánica 1

ESTACIÓN GEOMECÁNICA 1									
Cordenadas:		X: 274123			Y: 8668850			Z: 1526	
Litología:		Diorita			Fecha:			06.02.18	
Estratigrafía:		Volcánico Santa Rosa			Orientación de talud:			34°	
Condiciones hidrogeológicas:		Sin presencia de precipitaciones							
CARACTERIZACIÓN		**LECTURAS**							
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Tipo de plano		J	J	J	J	J	J	J		
Dip. Buz (DIP-DIR)		177	170	331	330	329	329	328		
Buzamiento (DIP)		14	7	70	68	66	65	67		
DE MATRIZ ROCOSA	**METEORIZACIÓN**									
	Fresca (I)									
	Ligero (II)		X			X	X	X		
	Moderado (III)									
	Alto (IV)	X		X	X					
	Completo (V)									
	Suelo residual (VI)									
	RESISTENCIA CON MARTILLO									
	Extremadamente blanda (R0)									
	Muy blanda (R1)									
	Blanda (R2)									
	Moderadamente dura (R3)	X		X	X	X				
	Dura (R4)		X				X	X		
	Muy dura (R5)									
	Extremadamente dura (R6)									
	SEPARACION ENTRE DISCONTINUIDADES									
	< 20 mm									
	≥ 20, < 60 mm									
	≥ 60, < 200 mm					X				

DE JUNTAS Y DISCONTINUIDADES	≥ 200, < 600 mm		X	X							
	≥ 600, < 2000 mm				X	X		X	X		
	≥ 2000, < 6000 mm										
	≥ 6000 mm										
	LONGITUD DE DISCONTINUIDAD										
	< 1 m										
	≥ 1, < 3 m		X		X	X	X	X	X		
	≥ 3, < 10 m			X							
	≥ 10, < 20 m										
	≥ 20 m										
	ABERTURA										
	< 0.1 mm										
	≥ 0.10, < 0.25 mm										
	≥ 0.25, < 0.50 mm			X		X			X		
	≥ 0.50, < 2.50 mm				X						
	≥ 2.50, < 10 mm		X				X	X			
	≥ 1, < 10 cm										
	≥ 10, < 100 cm										
	≥ 1 m										
	RUGOSIDAD										
	Escalonada	Rugosa (I)									
		Lisa (II)	X	X	X	X	X	X	X		
		Pulida (III)									
	Ondulada	Rugosa (IV)									
		Lisa (V)									
		Pulida (VI)									
	Plana	Rugosa (VII)									
		Lisa (VIII)									
		Pulida (IX)									
	HUMEDAD										
	Clasif. con relleno						I	I			
	Clasif. sin relleno		II	II	II	II			II		
	ÍNDICE RQD										
	λ (Fracturas/metro)		3								
DE RELLENO	**ESPESOR (mm)**						5	5			
	LITOLOGÍA						C	C			
	RESISTENCIA										
	Muy blanda (S1)										
	Débil (S2)										
	Firme (S3)						X	X			
	Rígida (S4)										
	Muy rígida (S5)										
	Dura (S6)										

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV.2 Ficha de datos de Estación Geomecánica 2

ESTACIÓN GEOMECÁNICA 2										
Cordenadas:	X: 274119			Y: 8668785			Z: 1524			
Litología:	Diorita				Fecha:		06.02.18			
Estratigrafía:	Volcánico Santa Rosa				Orientación de talud:		81°			
Condiciones hidrogeológicas:	Sin presencia de precipitaciones									
CARACTERIZACIÓN	**LECTURAS**									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Tipo de plano	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J
Dip. Buz (DIP-DIR)	164	169	172	172	163	338	341	164	165	163
Buzamiento (DIP)	85	77	83	84	49	35	46	76	81	54
DE MATRIZ ROCOSA	**METEORIZACIÓN**									
	Fresca (I)									
	Ligero (II)					X	X			
	Moderado (III)	X	X	X	X			X	X	X	X
	Alto (IV)									
	Completo (V)									
	Suelo residual (VI)									
	RESISTENCIA CON MARTILLO									
	Extremadamente blanda (R0)									
	Muy blanda (R1)									
	Blanda (R2)									
	Moderadamente dura (R3)	X	X	X	X			X	X	X	X
	Dura (R4)					X	X			
	Muy dura (R5)									
	Extremadamente dura (R6)									
DE JUNTAS Y DISCONTINUIDADE	**SEPARACION ENTRE DISCONTINUIDADES**									
	< 20 mm									
	≥ 20, < 60 mm									
	≥ 60, < 200 mm									
	≥ 200, < 600 mm			X	X				X	X	
	≥ 600, < 2000 mm	X	X			X		X			X
	≥ 2000, < 6000 mm						X				
	≥ 6000 mm										
	LONGITUD DE DISCONTINUIDAD									
	< 1 m									
	≥ 1, < 3 m			X	X		X	X		X	X
	≥ 3, < 10 m	X	X			X			X		
	≥ 10, < 20 m										
	≥ 20 m										

ABERTURA											
< 0.1 mm											
≥ 0.10, < 0.25 mm		X	X			X	X	X	X		
≥ 0.25, < 0.50 mm				X	X					X	X
≥ 0.50, < 2.50 mm											
≥ 2.50, < 10 mm											
≥ 1, < 10 cm											
≥ 10, < 100 cm											
≥ 1 m											
RUGOSIDAD											
Escalonada	Rugosa (I)										
	Lisa (II)		X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Pulida (III)										
Ondulada	Rugosa (IV)										
	Lisa (V)										
	Pulida (VI)										
Plana	Rugosa (VII)										
	Lisa (VIII)										
	Pulida (IX)										
HUMEDAD											
Clasif. con relleno											
Clasif. sin relleno		II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
ÍNDICE RQD											
λ (Fracturas/metro)		1.5									

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV.3 Ficha de datos de Estación Geomecánica 3

ESTACIÓN GEOMECÁNICA 3									
Cordenadas:	X: 274176			Y: 8668751			Z: 1521		
Litología:	Diorita				Fecha:			06.02.18	
Estratigrafía:	Volcánico Santa Rosa				Orientación de talud:			84°	
Condiciones hidrogeológicas:	Sin presencia de precipitaciones								
	LECTURAS								
CARACTERIZACIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tipo de plano	J	J	J	J	J	J	J	J	J
Dip. Buz (DIP-DIR)	101	99	105	112	114	116	117	113	279
Buzamiento (DIP)	66	65	51	47	43	46	45	41	44
DE MATRIZ ROCOSA	**METEORIZACIÓN**								
	Fresca (I)								
	Ligero (II)								
	Moderado (III)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Alto (IV)								
	Completo (V)								
	Suelo residual (VI)								
	RESISTENCIA CON MARTILLO								
	Extremadamente blanda (R0)								
	Muy blanda (R1)								
	Blanda (R2)								
	Moderadamente dura (R3)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Dura (R4)								
	Muy dura (R5)								
	Extremadamente dura (R6)								
	SEPARACION ENTRE DISCONTINUIDADES								
	< 20 mm								
	≥ 20, < 60 mm								
	≥ 60, < 200 mm								
	≥ 200, < 600 mm								
	≥ 600, < 2000 mm	X	X	X	X	X	X	X	X	
	≥ 2000, < 6000 mm									X
	≥ 6000 mm									
	LONGITUD DE DISCONTINUIDAD								
	< 1 m								
	≥ 1, < 3 m		X	X						
	≥ 3, < 10 m	X			X	X	X	X	X	X
	≥ 10, < 20 m								
ES	≥ 20 m								

DE JUNTAS Y DISCONTINUIDADES	**LONGITUD DE DISCONTINUIDAD**									
	< 1 m									
	≥ 1, < 3 m		X	X						
	≥ 3, < 10 m	X			X	X	X	X	X	X
	≥ 10, < 20 m									
	≥ 20 m									
	ABERTURA									
	< 0.1 mm	X	X	X	X		X	X		X
	≥ 0.10, < 0.25 mm					X				
	≥ 0.25, < 0.50 mm								X	
	≥ 0.50, < 2.50 mm									
	≥ 2.50, < 10 mm									
	≥ 1, < 10 cm									
	≥ 10, < 100 cm									
	≥ 1 m									
	RUGOSIDAD									
	Escalonada	Rugosa (I)								
		Lisa (II)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Pulida (III)									
	Ondulada	Rugosa (IV)									
		Lisa (V)									
		Pulida (VI)									
	Plana	Rugosa (VII)									
		Lisa (VIII)									
		Pulida (IX)									
	HUMEDAD									
	Clasif. con relleno									
	Clasif. sin relleno	I	I	I	I	I	I	I	I	I
	ÍNDICE RQD									
	λ (Fracturas/metro)	1.5								

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV.4 Ficha de datos de Estación Geomecánica 4

ESTACIÓN GEOMECÁNICA 4										
Cordenadas:		X: 274287			Y: 8668766			Z: 1515		
Litología:		Diorita			Fecha:			06.02.18		
Estratigrafía:		Volcánico Santa Rosa			Orientación de talud:			80°		
Condiciones hidrogeológicas:		Sin presencia de precipitaciones								
CARACTERIZACIÓN		**LECTURAS**								
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Tipo de plano		J	J	J	J	J	J			
Dip. Buz (DIP-DIR)		183	180	175	186	348	354			
Buzamiento (DIP)		21	20	19	6	60	58			
DE MATRIZ ROCOSA	**METEORIZACIÓN**									
	Fresca (I)									
	Ligero (II)									
	Moderado (III)	X	X	X	X	X	X			
	Alto (IV)									
	Completo (V)									
	Suelo residual (VI)									
	RESISTENCIA CON MARTILLO									
	Extremadamente blanda (R0)									
	Muy blanda (R1)									
	Blanda (R2)									
	Moderadamente dura (R3)		X		X	X	X			
	Dura (R4)	X		X						
	Muy dura (R5)									
	Extremadamente dura (R6)									
ES	**SEPARACION ENTRE DISCONTINUIDADES**									
	< 20 mm									
	≥ 20, < 60 mm									
	≥ 60, < 200 mm									
	≥ 200, < 600 mm	X	X	X	X					
	≥ 600, < 2000 mm					X	X			
	≥ 2000, < 6000 mm									
	≥ 6000 mm									
	LONGITUD DE DISCONTINUIDAD									
	< 1 m									
	≥ 1, < 3 m		X	X		X	X			
	≥ 3, < 10 m				X					
	≥ 10, < 20 m	X								
	≥ 20 m									

DE JUNTAS Y DISCONTINUIDADE												
	ABERTURA											
	< 0.1 mm		X	X	X	X	X	X				
	≥ 0.10, < 0.25 mm											
	≥ 0.25, < 0.50 mm											
	≥ 0.50, < 2.50 mm											
	≥ 2.50, < 10 mm											
	≥ 1, < 10 cm											
	≥ 10, < 100 cm											
	≥ 1 m											
	RUGOSIDAD											
	Escalonada	Rugosa (I)										
		Lisa (II)	X	X	X	X	X	X				
		Pulida (III)										
	Ondulada	Rugosa (IV)										
		Lisa (V)										
		Pulida (VI)										
	Plana	Rugosa (VII)										
		Lisa (VIII)										
		Pulida (IX)										
	HUMEDAD											
	Clasif. con relleno											
	Clasif. sin relleno		I	I	I	I	I	I				
	ÍNDICE RQD											
	λ (Fracturas/metro)		2.5									

Fuente: Elaboración propia

Los cálculos de índice RQD se realizan mediante la ecuación de Priest y Hudson (ver Ecuación 4.1), la cual correlaciona la cantidad de juntas por metro lineal (λ).

$$RQD = 100e^{-0.1\,\lambda\,(0.1\lambda+1)} \qquad \text{(Ec. 4.1)}$$

La utilización de esta correlación se debe a la ausencia de muestras de perforación en el proyecto, pero con la ventaja de tener la orientación de las discontinuidades de los taludes de corte. En la Tabla IV.5 se muestra los índice RQD de las estaciones geomecánicas 1, 2, 3 y 4.

Tabla IV.5 Índice RQD

	Estación Geomecánica 1	Estación Geomecánica 2	Estación Geomecánica 3	Estación Geomecánica 4
λ	3	1.5	1.5	2.5
RQD	67.7	84.2	84.2	73.2
Calidad	Media	Buena	Buena	Media

Fuente: Elaboración propia

4.3. Propiedades Índice de roca intacta

Considerada también como las propiedades físicas que presenta la matriz rocosa. El macizo rocoso encontrado está formado por diorita, la cual es considerada como una roca plutónica compuesta por feldespastos y minerales oscuros. A continuación se muestran las propiedades índice realizadas a muestras de rocas intactas de diorita.

4.3.1. Contenido de Humedad

Representa el porcentaje de agua, en peso, contenida en la matriz rocosa. En la Tabla IV.6 se muestran los valores obtenidos de los especímenes de diorita estudiados.

Tabla IV.6 Contenido de Humedad

	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03
Peso de Tara (g)	131.4	135.2	136.5
Peso muestra humedad+tara (g)	236.37	274.32	223.85
Peso muestra seca+ tara (g)	236.31	274.28	223.81
Peso agua (g)	0.06	0.04	0.04
Peso muestra húmeda (g)	104.97	139.12	87.35
Peso muestra seca (g)	104.91	139.08	87.31
W (%)	0.06	0.03	0.05
Promedio	0.05		

Fuente: Laboratorio de Geotecnia. Tupia Ingenieros SAC

4.3.2. Porosidad

Representa el volumen de vacíos contenido en la matriz rocosa. En la Tabla IV.7 se muestran los valores obtenidos de los especímenes de diorita estudiados.

Tabla IV.7 Porosidad

	Muestra 01	**Muestra 02**
Volumen total (cm3)	84.32	76.68
Volumen de vacíos (cm3)	0.07	0.06
Porosidad (% n)	0.06	0.08

Fuente: Laboratorio de Geotecnia. Tupia Ingenieros SAC

4.3.3. Peso Unitario

Denominado también como peso específico y considerado como la multiplicación de la densidad por la aceleración de la gravedad. En la Tabla IV.8 se muestran los valores obtenidos de los especímenes de diorita estudiados.

Tabla IV.8 Peso Específico y Densidad

	Muestra 01	**Muestra 02**	**Muestra 03**
Masa (g)	68.25	76.85	72.34
Volumen (cm3)	24.38	27.58	25.8
Densidad (g/cm3)	2.8	2.79	2.8
Peso Específico (KN/m3)	27.47	27.37	27.47

Fuente: Laboratorio de Geotecnia. Tupia Ingenieros SAC

4.3.4. Resistencia

Esfuerzo máximo que soporta la matriz rocosa hasta su rotura. Este ensayo se realizó en laboratorio, por lo que el cálculo de la resistencia se realizó mediante la correlación del índice de carga puntual. Se realizó ensayos de resistencia en bloques irregulares, cuyos resultados se muestran en la Tabla IV.9.

Tabla IV.9 Is(50) y resistencia a la compresión

Muestra	W1 (cm)	W2 (cm)	W (cm)	D (cm)	L (cm)	Carga (Mpa)	P (kN)	De^2 (mm^2)	F	Is(50) (Mpa)	qu (Mpa)
1-I	4.4	3.2	3.8	2.1	1.6	1	0.96	1016.05	0.82	0.77	18.56
2-I	3.8	4.7	4.3	2.3	1.7	1.4	1.35	1231.06	0.85	0.93	22.39
3-I	4.3	4.9	4.6	2.6	1.5	0.9	0.87	1522.79	0.89	0.51	12.21
4-I	4.7	5.5	5.1	2.9	1.8	2.7	2.60	1899.36	0.94	1.29	30.85
5-I	3.9	4.8	4.4	2.3	1.4	1.3	1.25	1260.03	0.86	0.85	20.42
6-I	4.1	3.7	3.9	2.4	1.6	1.5	1.44	1196.72	0.85	1.02	24.52
7-I	6.3	5.6	6.0	3.6	2.1	4	3.85	2708.34	1.02	1.45	34.72
8-I	5.4	4.1	4.8	2.8	1.9	3.5	3.37	1693.41	0.92	1.82	43.71

Fuente: Laboratorio de Geotecnia. Tupia Ingenieros SAC

4.4. Clasificación geomecánica del macizo rocoso

La clasificación geomecánica permite interpretar los estudios de campo y ensayos de laboratorio del macizo rocoso en base a criterios que permitan establecer parámetros para diseños de ingeniería. Las clasificaciones geomecánicas tomadas en cuenta es la clasificación geomecánica RMR y GSI.

4.4.1. Índice de calidad RMR

Valoración numérica que se le genera a los parámetros de clasificación geomecánica RMR_{89} planteada por Bieniawski, los cuales consideran características y propiedades de la roca intacta, discontinuidades y relleno que presente el macizo rocoso, así como también, es afectado por una corrección de la orientación de las discontinuidades dependiendo del tipo proyecto a estudiar.

La clasificación geomecánica RMR de las estaciones geomecánicas estudiadas se muestran en la Tabla IV.10, Tabla IV.11, Tabla IV.12, Tabla IV.13.

Tabla IV.10 RMR89 Estación Geomecánica 1

DETERMINACION DEL INDICE RMR 1									
PARAMETRO			**RANGO DE VALORES**						
1	Resitencia de la Matriz Rocosa (Mpa)	Ensayo de Carga Puntual	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	Compresión Simple (Mpa)		
		Compresión Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
	Puntuación		**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**	**0**
2	RQD		90 % - 100 %	75 % - 90 %	50 % - 75 %	25 % - 50 %	< 25%		
	Puntuación		**20**	**17**	**13**	**8**	**3**		
3	Separación entre		> 2m	0.6 - 2m	0.2 - 0.6m	0.06 - 0.2m	< 0.06m		
	Puntuación		**20**	**15**	**10**	**8**	**5**		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntuación	**6**	**4**	**2**	**1**	**0**		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 -1.0 mm	1 -5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
		Relleno	Ninguno	Relleno Duro < 5mm	Relleno Duro >5 mm	Relleno Blando <5mm	Relleno Blando >5mm		
		Puntuación	**6**	**4**	**2**	**2**	**0**		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
5	Agua Freática	Caudal por 10m de tunel	Nulo	< 10 litros / min	10 - 25 litros / min	25 - 125 litros / min	> 125 litros / min		
		Relación entre presión de agua y la tensión mayor.	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado General	Seco	Lig. Húmedo	Húmedo	Goteando	Agua Fluyendo		
	Puntuación		**15**	**10**	**7**	**4**	**0**		
Correción por la orientación de las discontinuidades									
Dirección y Buzonamiento			**Muy Favorables**	**Favorables**	**Medias**	**Desfavorables**	**Muy Desfavorables**		
Valoración para		**Túneles**	0	-2	-5	-10	-12		
		Cimentación	0	-2	-7	-15	-25		
		Taludes	0	-5	-25	-50	-60		
Clasificación									
Clase			I	II	III	IV	V		
Calidad			Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala		
Puntuación			100-81	80-61	60-41	40-21	<20		

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV.11 RMR89 Estación Geomecánica 2

DETERMINACION DEL INDICE RMR 2									
PARAMETRO			**RANGO DE VALORES**						
1	Resitencia de la Matriz Rocosa	Ensayo de Carga Puntual	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	Compresión Simple (Mpa)		
		Compresión Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
	Puntuación		**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**	**0**
2	RQD		90 % - 100 %	75 % - 90 %	50 % - 75 %	25 % - 50 %	< 25%		
	Puntuación		**20**	**17**	**13**	**8**	**3**		
3	Separación entre		> 2m	0.6 - 2m	0.2 - 0.6m	0.06 - 0.2m	< 0.06m		
	Puntuación		**20**	**15**	**10**	**8**	**5**		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntuación	**6**	**4**	**2**	**1**	**0**		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 -1.0 mm	1 -5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
		Relleno	Ninguno	Relleno Duro < 5mm	Relleno Duro >5 mm	Relleno Blando <5mm	Relleno Blando >5mm		
		Puntuación	**6**	**4**	**2**	**2**	**0**		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
5	Agua Freática	Caudal por 10m de tunel	Nulo	< 10 litros / min	10 - 25 litros / min	25 - 125 litros / min	> 125 litros / min		
		Relación entre presión de agua y la tensión mayor.	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado General	Seco	Lig. Húmedo	Húmedo	Goteando	Agua Fluyendo		
	Puntuación		**15**	**10**	**7**	**4**	**0**		
Correción por la orientación de las discontinuidades									
Dirección y Buzonamiento			**Muy Favorables**	**Favorables**	**Medias**	**Desfavorables**	**Muy Desfavorables**		
Valoración para		**Túneles**	0	-2	-5	-10	-12		
		Cimentación	0	-2	-7	-15	-25		
		Taludes	0	-5	-25	-50	-60		
Clasificación									
Clase			I	II	III	IV	V		
Calidad			Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala		
Puntuación			100-81	80-61	60-41	40-21	<20		

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV.12 RMR89 Estación Geomecánica 3

DETERMINACION DEL INDICE RMR 3									
PARAMETRO			**RANGO DE VALORES**						
1	Resitencia de la Matriz Rocosa (Mpa)	Ensayo de Carga Puntual	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	Compresión Simple (Mpa)		
		Compresión Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
	Puntuación		**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**	**0**
2	RQD		90 % - 100 %	75 % - 90 %	50 % - 75 %	25 % - 50 %	< 25%		
	Puntuación		**20**	**17**	**13**	**8**	**3**		
3	Separación entre		> 2m	0.6 - 2m	0.2 - 0.6m	0.06 - 0.2m	< 0.06m		
	Puntuación		**20**	**15**	**10**	**8**	**5**		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntuación	**6**	**4**	**2**	**1**	**0**		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 -1.0 mm	1 -5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
		Relleno	Ninguno	Relleno Duro < 5mm	Relleno Duro >5 mm	Relleno Blando <5mm	Relleno Blando >5mm		
		Puntuación	**6**	**4**	**2**	**2**	**0**		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
5	Agua Freática	Caudal por 10m de tunel	Nulo	< 10 litros / min	10 - 25 litros / min	25 - 125 litros / min	> 125 litros / min		
		Relación entre presión de agua y la tensión mayor.	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado General	Seco	Lig. Húmedo	Húmedo	Goteando	Agua Fluyendo		
	Puntuación		**15**	**10**	**7**	**4**	**0**		
Correción por la orientación de las discontinuidades									
Dirección y Buzonamiento			**Muy Favorables**	**Favorables**	**Medias**	**Desfavorables**	**Muy Desfavorables**		
Valoración para		**Túneles**	0	-2	-5	-10	-12		
		Cimentación	0	-2	-7	-15	-25		
		Taludes	0	-5	-25	-50	-60		
Clasificación									
Clase			I	II	III	IV	V		
Calidad			Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala		
Puntuación			100-81	80-61	60-41	40-21	<20		

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV.13 RMR89 Estación Geomecánica 4

DETERMINACION DEL INDICE RMR 4									
PARAMETRO			**RANGO DE VALORES**						
1	Resitencia de la Matriz Rocosa (Mpa)	Ensayo de Carga Puntual	> 10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	Compresión Simple (Mpa)		
		Compresión Simple	> 250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 1	< 1
	Puntuación		**15**	**12**	**7**	**4**	**2**	**1**	**0**
2	RQD		90 % - 100 %	75 % - 90 %	50 % - 75 %	25 % - 50 %	< 25%		
	Puntuación		**20**	**17**	**13**	**8**	**3**		
3	Separación entre		> 2m	0.6 - 2m	0.2 - 0.6m	0.06 - 0.2m	< 0.06m		
	Puntuación		**20**	**15**	**10**	**8**	**5**		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
		Puntuación	**6**	**4**	**2**	**1**	**0**		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 -1.0 mm	1 -5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
		Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Ligeramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
		Relleno	Ninguno	Relleno Duro < 5mm	Relleno Duro >5 mm	Relleno Blando <5mm	Relleno Blando >5mm		
		Puntuación	**6**	**4**	**2**	**2**	**0**		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	**6**	**5**	**3**	**1**	**0**		
5	Agua Freática	Caudal por 10m de tunel	Nulo	< 10 litros / min	10 - 25 litros / min	25 - 125 litros / min	> 125 litros / min		
		Relación entre presión de agua y la tensión mayor.	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado General	Seco	Lig. Húmedo	Húmedo	Goteando	Agua Fluyendo		
	Puntuación		**15**	**10**	**7**	**4**	**0**		
Correción por la orientación de las discontinuidades									
Dirección y Buzonamiento			**Muy Favorables**	**Favorables**	**Medias**	**Desfavorables**	**Muy Desfavorables**		
Valoración para		**Túneles**	0	-2	-5	-10	-12		
		Cimentación	0	-2	-7	-15	-25		
		Taludes	0	-5	-25	-50	-60		
Clasificación									
Clase			I	II	III	IV	V		
Calidad			Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala		
Puntuación			100-81	80-61	60-41	40-21	<20		

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de índice RMR se realiza mediante la siguiente fórmula:

Índice RMR=(1) +(2) +(3) +(4) +(5) – corrección por orientación de discontinuidades

La valoración de la corrección RMR realizada en la estación geomecánica 1 es considerada -25 (media) debido a que las discontinuidades presentan longitudes a lo largo de la estación geomecánica 1 y, adicionalmente se observa visualmente una posible falla planar o de volcamiento.

La valoración de la corrección RMR realizada en la estación geomecánica 2 es considerada -5 (favorable) debido a que la mayoría de las discontinuidades no presentan largas longitudes y solo existiría la posibilidad de que pocas discontinuidades generen volcadura.

La valoración de la corrección RMR realizada en la estación geomecánica 3 es considerada -25 (media) debido a las posibles fallas tipo cuña que podrían surgirse al presentar dos familias de discontinuidades con longitudes muy largas.

La valoración de la corrección RMR realizada en la estación geomecánica 4 es considerada -5 (favorable) debido a que la longitud de las discontinuidades no son largas y la mayoría de ellas no llegan a la cabeza del talud.

En la tabla IV.14 se muestra los resultados de índice RMR obtenidos, y en la tabla IV.15 la interpretación y correlación de estos resultados.

Tabla IV.14 Índices RMR de estaciones geomecánicas

Estación geomecánica	Valoración RMR sin correción	Correción RMR	Indice RMR
1	57	-25	32
2	68	-5	63
3	70	-25	45
4	63	-5	58

Fuente: Elaboración propia

Tabla IV.15 Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR

Clase	Calidad	Valoración RMR	Cohesión	Ángulo de rozamiento
II	Buena	80-61	3-4 kg/cm2	34-45°
III	Media	60-41	2-3 kg/cm2	25-35°
IV	Mala	40-21	1-2 kg/cm2	15-25°

Fuente: Gonzales de Vallejo, 2002

4.4.2. Índice de resistencia geológica GSI

Es un tipo de clasificación geomecánica del macizo rocoso que considera la geología y fracturación de macizos rocosos sin presencia de agua. Además, mediante los parámetros m y s, esta clasificación permite determinar la resistencia del macizo rocoso mediante el criterio de rotura de Hoek-Brown.

El Manual de Carreteras-Túneles, muros y obras complementarias 2016 recomienda la correlación de la clasificación RMR y GSI para macizos rocosos que presenten GSI >35 mediante la Ecuación 4.2. De acuerdo a la Tabla IV.14 *Índice RMR de estaciones geomecánicas* se deduce que se pueden realizar correlaciones para el Índice GSI a las estaciones geomecánicas 2, 3 y 4. El cálculo de índice GSI se calculará manualmente.

$$GSI=RMR\ básico\ (1989)-5 \qquad \text{(Ec. 4.2)}$$

La correlación del Índice de GSI de las estaciones geomecánicas 2, 3 y 4 se muestran a continuación:

Tabla IV.16 Índices RMR de estaciones geomecánicas

Estación geomecánica	Indice RMR	Indice GSI
2	63	58
3	45	40
4	58	53

Fuente: Elaboración propia

En base a la Figura II.15 *Consideraciones para Índice GSI*, el Indice GSI de la estación geomecánica 1 presenta una valoración de 35, ya que se considera como macizo rocoso de mucha blocosidad, posibles rellenos de bajo espesor y compactos, y discontinuidades de rugosidad muy lisa.

El valor de la constante adimensional m_i dependiente del tipo de macizo rocoso clasificado de acuerdo a la Figura II.16 *Valores de la constante m_i de la roca intacta para distintos tipos de roca* corresponde a 28, ya que el tipo de roca es diorita.

El valor del factor de alteración *D* permite cuantificar el grado de alteración que presenta el macizo rocoso en base a los efectos externos que se hayan producido en este. El tipo de excavación fue mediante ripado o mecánico, considerándose al factor de alteración como 0.7.

4.5. Modelamiento mediante software

En la presenta investigación se utiliza los software DIPS y Slide como software de modelamiento del macizo rocoso y sus discontinuidades, debido a su comerciabilidad, alto uso en proyectos de macizos rocosos y practicidad de uso para usuarios.

4.5.1. DIPS 5.0

Es un software que permite visualizar la proyección estereográfica de las discontinuidades mediante una red estereográfica y realizar el análisis cinemático de estas proyecciones, con la finalidad de descartar o definir los mecanismos de falla por geometría del talud (falla planar, falla de cuña y falla por volcamiento) del macizo rocoso. A continuación se muestra el análisis de la orientación de discontinuidades de las Estaciones Geomecánicas 1, 2, 3 y 4 realizas mediante el software DIPS 5.0:

- En la evaluación de la **Estación Geomecánica 1** mediante DIPS 5.0 (ver Figura IV.8) se observa la representación de la orientación de dos familias de discontinuidades (familia 1 y familia 2), el talud y ángulo de fricción. La intersección de familia 1 y familia 2 se encuentra en la zona al Sur-Oeste, la cual se encuentra en contra al área de falla potencial generado entre el plano del talud y el ángulo de fricción. Las familias no se encuentran en forma paralela ni en contra a la orientación del talud, por ende, no generan fallas planares y por vuelco, respectivamente. Es decir, la zona geomecánica 1 no presenta fallas por la orientación de sus discontinuidades.

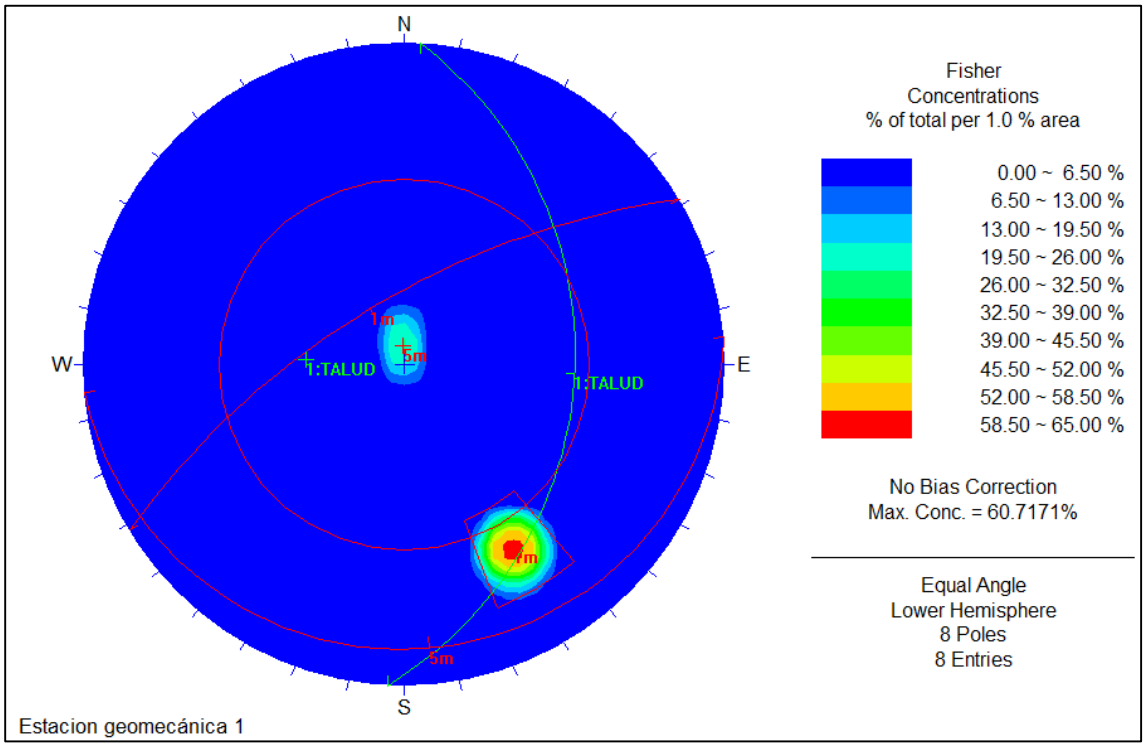


Figura IV.8 Evaluación de Estación Geomecánica 1 mediante DIPS 5.0

Fuente: Elaboración propia

- En la evaluación de la **Estación Geomecánica 2** mediante DIPS 5.0 (ver Figura IV.9) se observa la representación de la orientación de tres familias de discontinuidades (familia 1, familia 2 y familia 3), el talud y ángulo de fricción. La intersección de las familias se encuentran fuera del área de falla potencial generada por el ángulo de fricción y orientación del talud, por ende, no generan falla tipo cuña. Las familias no se encuentran en forma paralela ni en contra a la orientación del talud, por ende, no se generan fallas planares y por vuelco, respectivamente. Es decir, la zona geomecánica 2 no presenta fallas por la orientación de sus discontinuidades.

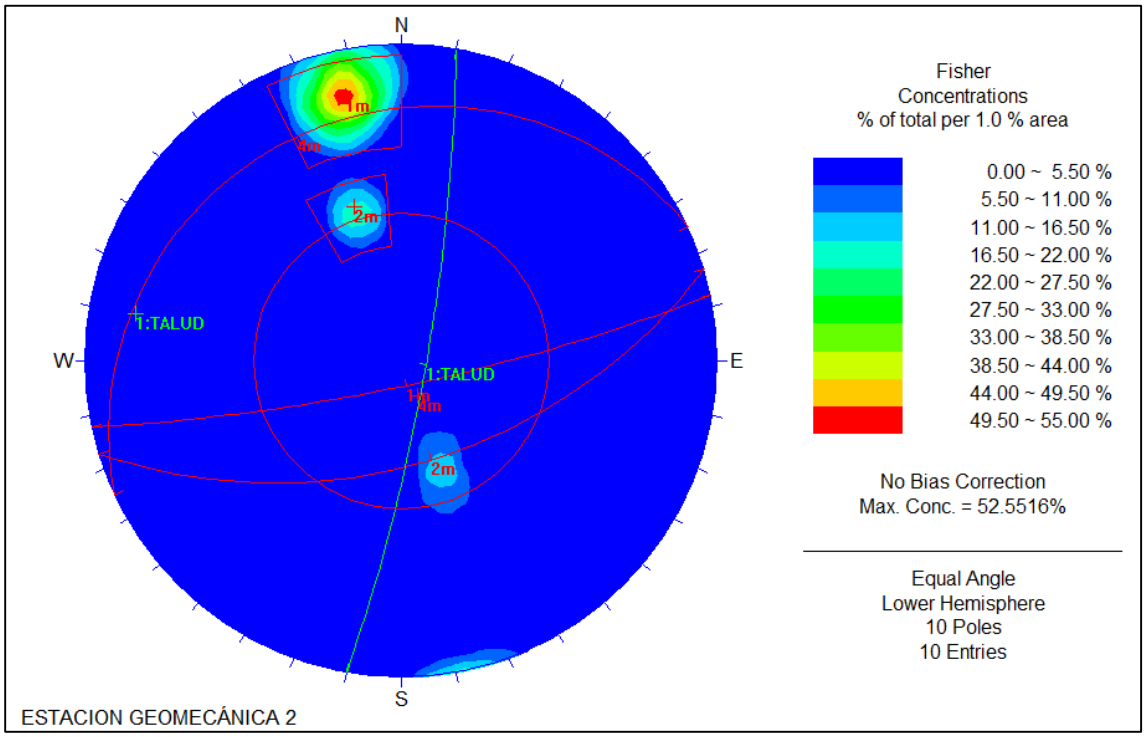


Figura IV.9 Evaluación de Estación Geomecánica 2 mediante DIPS 5.0

Fuente: Elaboración propia

- En la evaluación de la **Estación Geomecánica 3** mediante DIPS 5.0 (ver Figura IV.10) se observa la representación de la orientación de dos familias de discontinuidades (familia 1 y familia 2), el talud y ángulo de fricción. La intersección de familia 1 y familia 2 tiene dirección Sur, la cual no se encuentra dentro del área de falla posible generado entre el ángulo de fricción y dirección del talud. Las familias no se encuentran en forma paralela ni en contra a la orientación del talud, por ende, no se generan fallas planares y por vuelco, respectivamente. Es decir, la zona geomecánica 3 no presenta fallas por la orientación de sus discontinuidades.

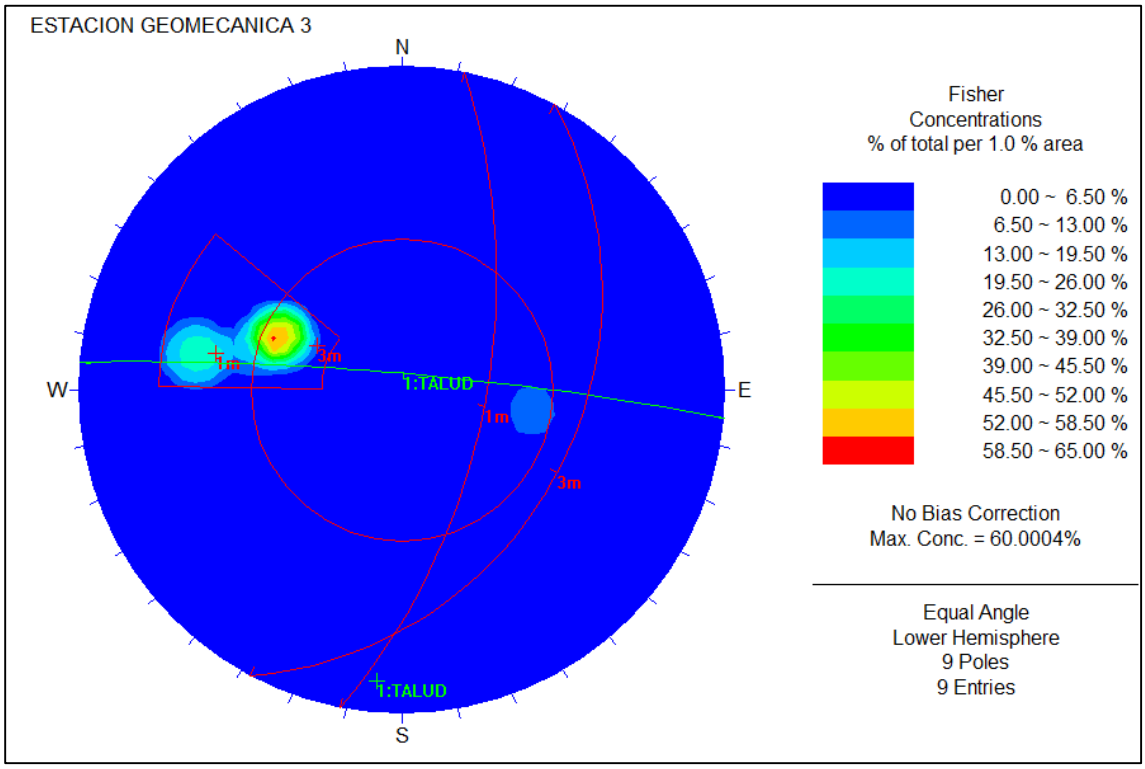


Figura IV.10 Evaluación de la Estación Geomecánica 3 mediante DIPS 5.0

Fuente: Elaboración propia

- En la evaluación de la **Estación Geomecánica 4** mediante DIPS 5.0 (ver Figura IV.11) se observa la representación de la orientación de dos familias de discontinuidades (familia 1 y familia 2), el talud y ángulo de fricción. La intersección de familia 1 y familia 2 se encuentra en la zona Oeste, la cual no se encuentra dentro del área de falla posible generado entre el ángulo de fricción y dirección del talud. Las familias no se encuentran en forma paralela ni en contra a la orientación del talud, por ende, no se generan fallas planares y por vuelco, respectivamente. Es decir, la zona geomecánica 4 no presenta fallas por la orientación de sus discontinuidades.

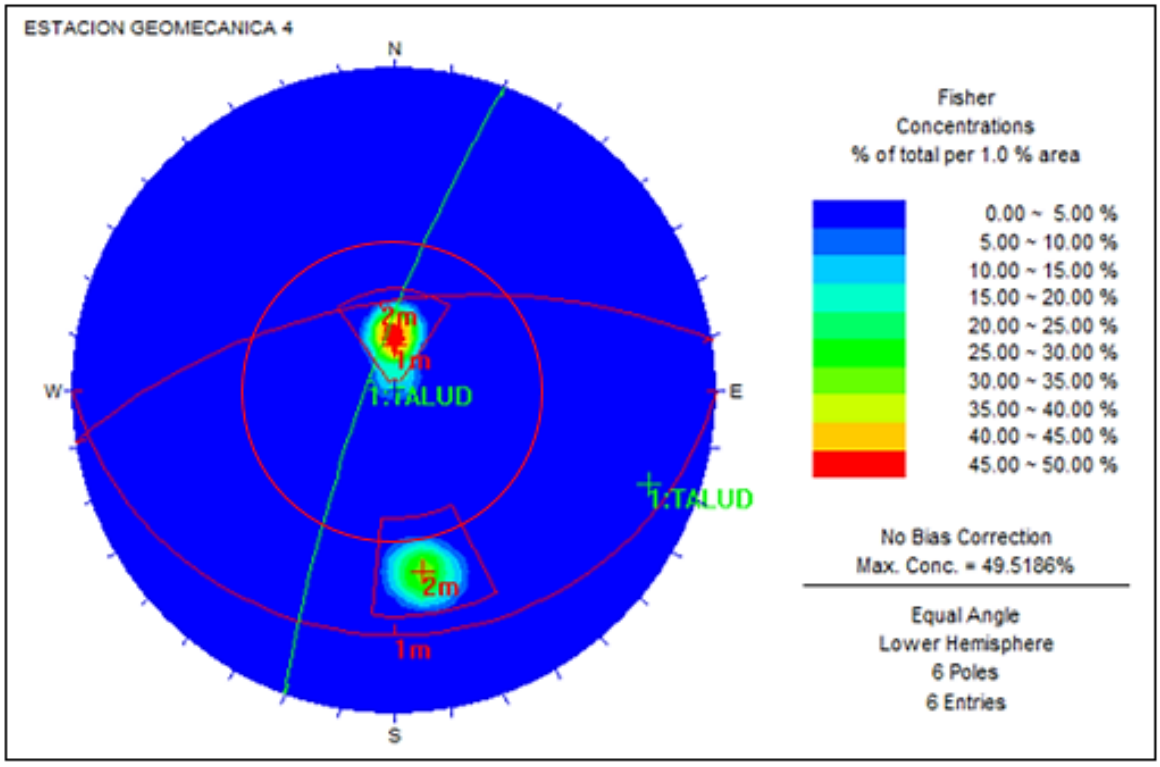


Figura IV.11 Evaluación de la Estación Geomecánica 4 mediante DIPS 5.0

Fuente: Elaboración propia

4.5.2. SLIDE

Slide es un software que permite analizar la estabilidad de taludes en rocas a nivel 2D con la finalidad de calcular el factor de seguridad, superficie de falla crítica (circular o no circular) y centro de giro. Los análisis de la estabilidad de taludes de corte estudiados consideran como criterio de rotura a la fórmula generalizada de Hoek y Brown. Adicionalmente, para el cálculo de factor de seguridad se considera el método de Bishop simplificado.

Asimismo, los análisis de estabilidad de taludes de corte son analizados para condiciones estáticas y pseudo-estáticas. En la Figura IV.12 se muestra la distribución de isoaceleraciones para 10% de excedencia en 50 años de vida útil que considera Alva según investigaciones, correspondiendo al área de estudio una aceleración horizontal de 0.43 g.

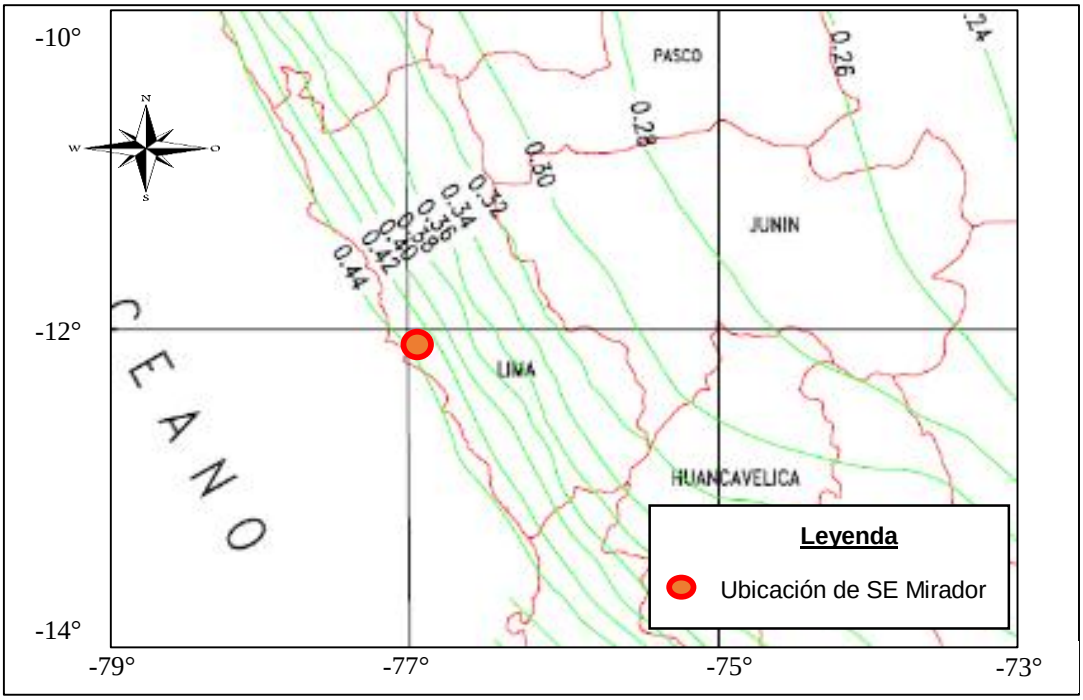


Figura IV.12 Distribución de Isoaceleraciones para 10% de Excedencia en 50 años.

Fuente: Alva, 2002.

Los parámetros necesarios para el análisis con Slide son: peso unitario, resistencia a la compresión axial UCS, índice GSI, constante de roca intacta m_i y factor de alteración D del macizo rocoso; los cuales se muestran en la Tabla IV.17 y Tabla IV.18.

Tabla IV.17 Parámetros geomecánicos para análisis con Slide

Peso Unitario [kN/m3]	UCS [Mpa]	mi	D
27.44	41.85	28	0.7

Fuente: Elaboración propia

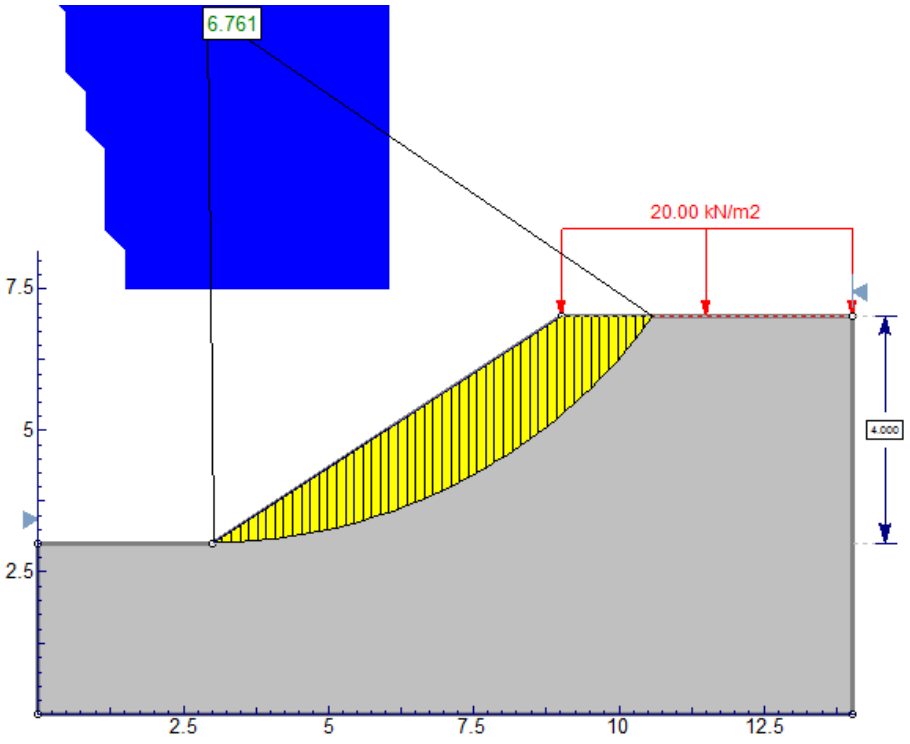
Tabla IV.18 Índice de resistencia geológica de estaciones geomecánicas

Estación geomecánica	Indice GSI
1	35
2	58
3	40
4	53

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestra el análisis estático y pseudo-estático de estabilidad de taludes de las zonas geotécnicas 1, 2, 3 y 4 realizadas mediante el software Slide:

- La **zona geotécnica 1** presenta un talud de corte de 4 m de altura cuyo buzamiento es de 34°. El macizo rocoso se caracteriza por ser roca diorita y sus propiedades se muestran en la Figura IV. 13. En la corona del talud se ha considerado la carga de caseta de guardianía y el tránsito vehicular que se realiza en el anillo vial circundante a esta zona geotécnica, siendo un total de 2 Tn o 20 kN/m2 aproximadamente. El análisis estático se ha realizado por el método de Bishop Simplificado y Janbu Simplificado como se muestra en la Figura IV.13 y Figura IV.14, respectivamente. Asimismo, el análisis pseudo-estático realizado por el método de Bishop Simplificado y Janbu Simplificado se muestra en la Figura IV.15 y Figura IV.16, respectivamente.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	UCS (kN/m2)	m	s	a	Water Surface	Ru
Diorita		27.44	Generalised Hoek-Brown	41850	0.787238	8.10625e-005	0.51595	None	0

Figura IV.13 Evaluación de Zona Geotécnica 1 con Slide, método Bishop Simplificado, análisis estático

Fuente: Elaboración propia

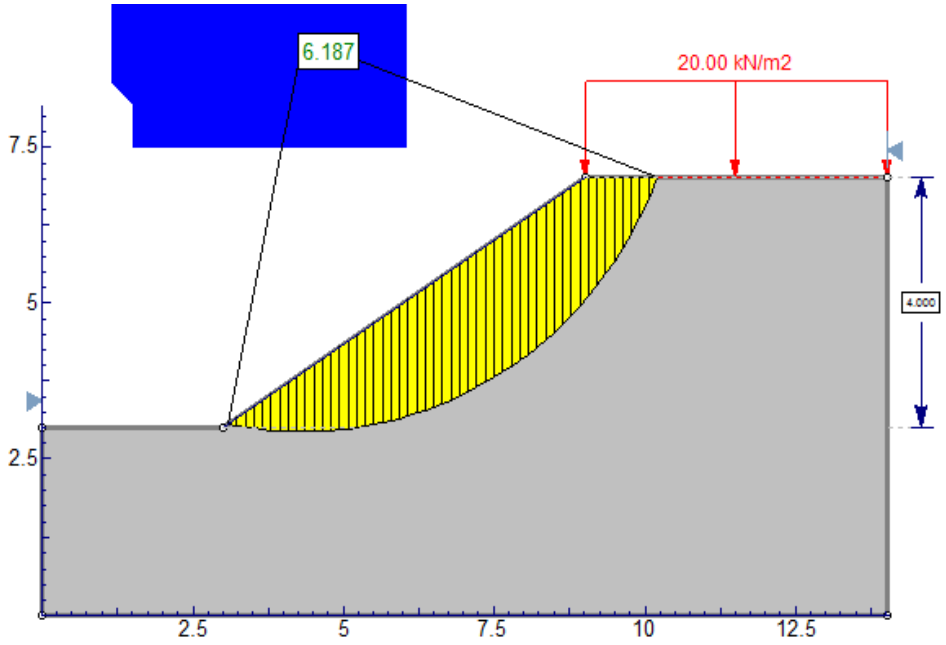


Figura IV.14 Evaluación de Zona Geotécnica 1 con Slide, método Janbu Simplificado, análisis estático

Fuente: Elaboración propia

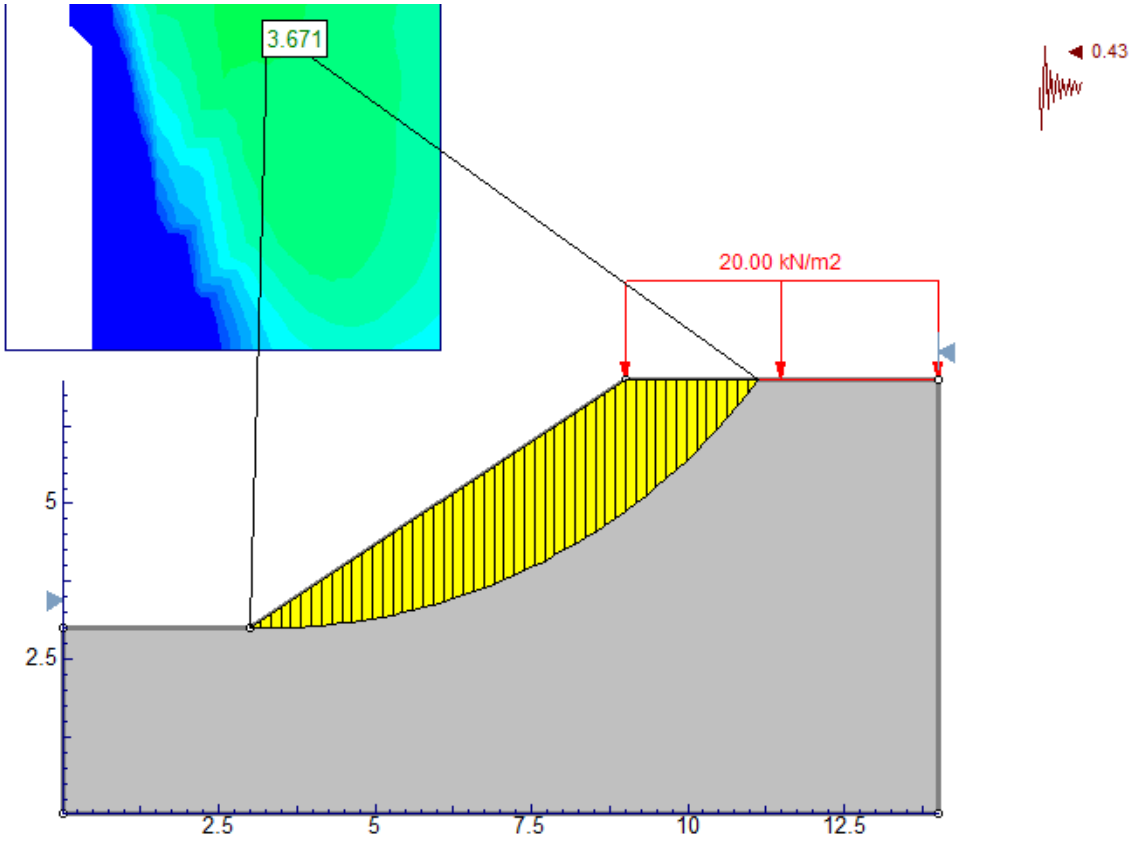


Figura IV.15 Evaluación de Zona Geotécnica 1 con Slide, método Bishop Simplificado, análisis pseudo-estático

Fuente: Elaboración propia

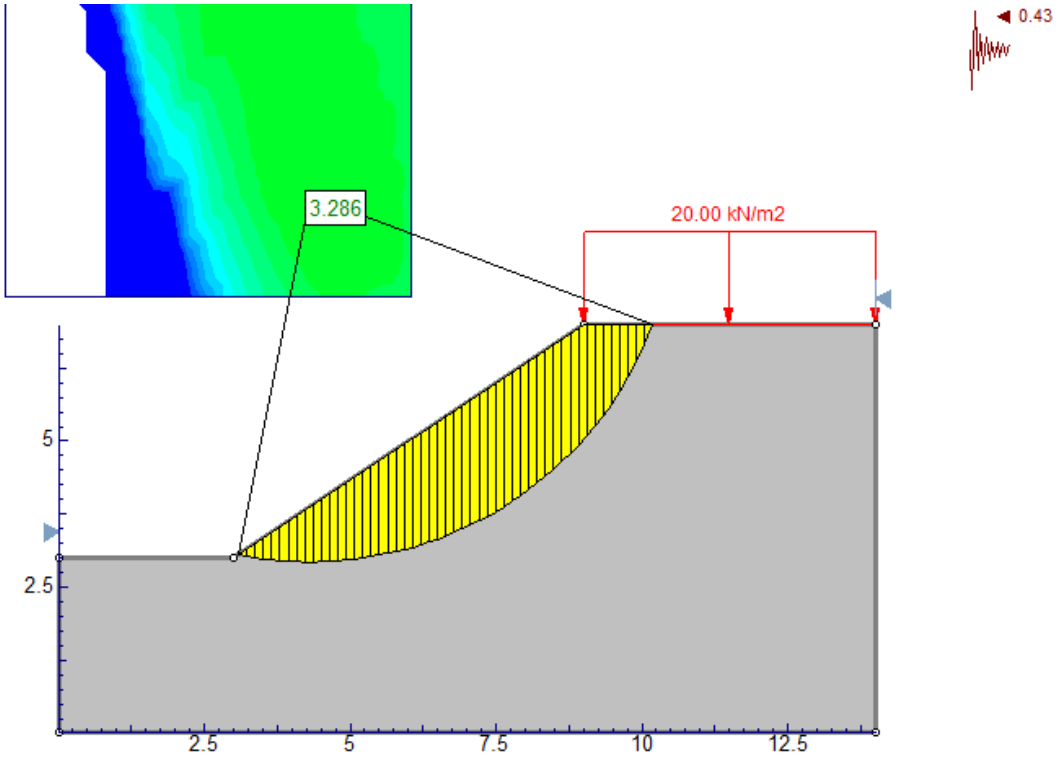
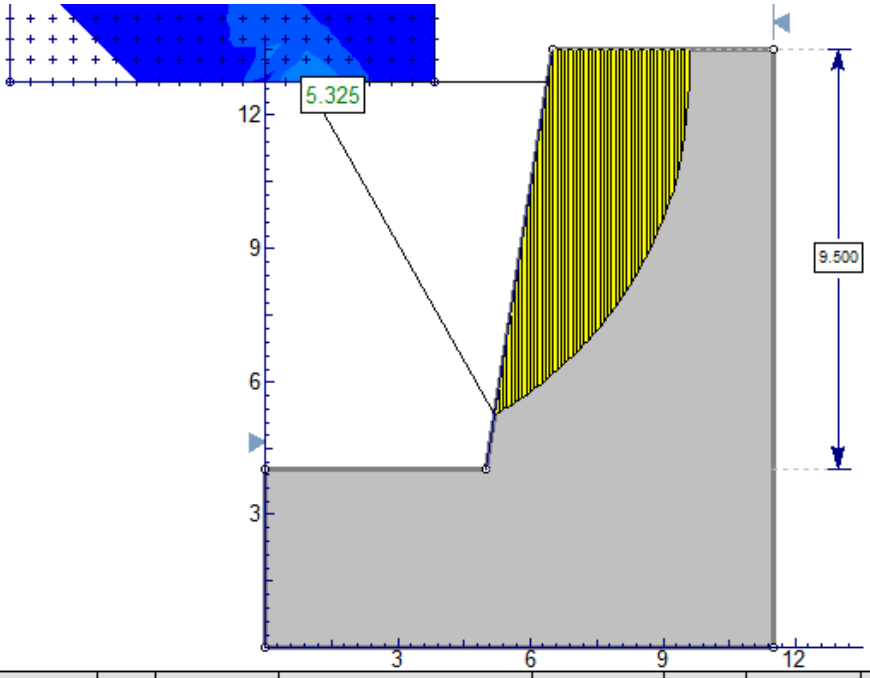


Figura IV.16 Evaluación de Zona Geotécnica 1 con Slide, método Janbu Simplificado, análisis pseudo-estático

Fuente: Elaboración propia

- La **zona geotécnica 2** presenta un talud de corte de 9.50 m de altura máxima cuyo buzamiento es de 81°. El macizo rocoso se caracteriza por ser roca diorita y sus propiedades se muestran en la Figura IV. 17. El análisis estático se ha realizado por el método de Bishop Simplificado y Janbu Simplificado como se muestra en la Figura IV.17 y Figura IV.18, respectivamente. Asimismo, el análisis pseudo-estático realizado por el método de Bishop Simplificado y Janbu Simplificado se muestra en la Figura IV.19 y Figura IV.20, respectivamente.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	UCS (kN/m2)	m	s	a	Water Surface	Ru
Diorita		27.44	Generalised Hoek-Brown	41850	2.78574	0.00227231	0.503276	None	0

Figura IV.17 Evaluación de Zona Geotécnica 2 con Slide, método Bishop Simplificado, análisis estático

Fuente: Elaboración propia

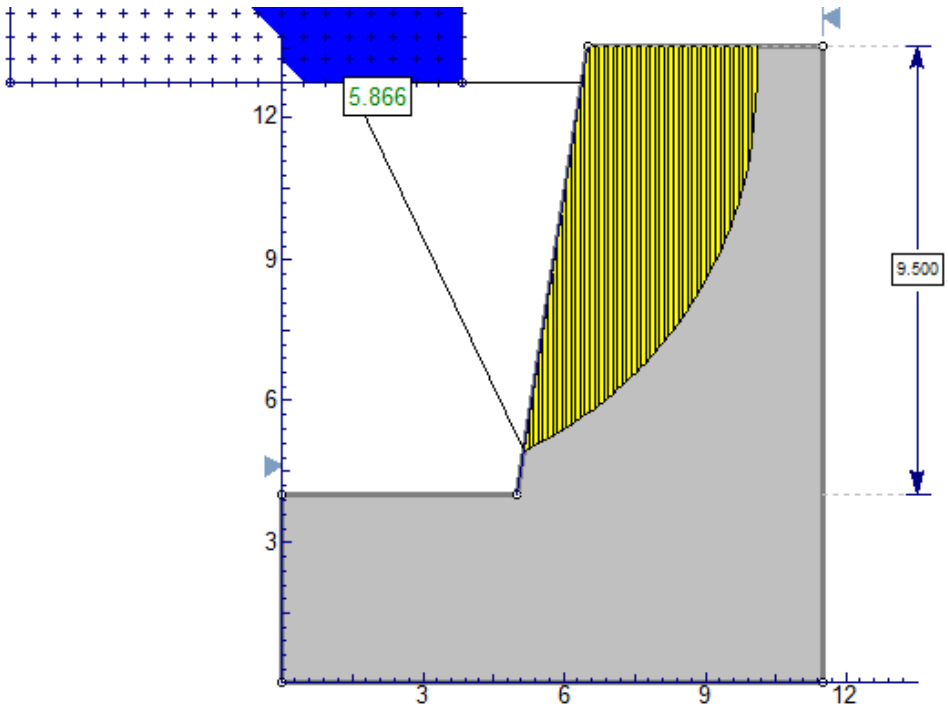


Figura IV.18 Evaluación de Zona Geotécnica 2 con Slide, método Janbu Simplificado, análisis estático

Fuente: Elaboración propia

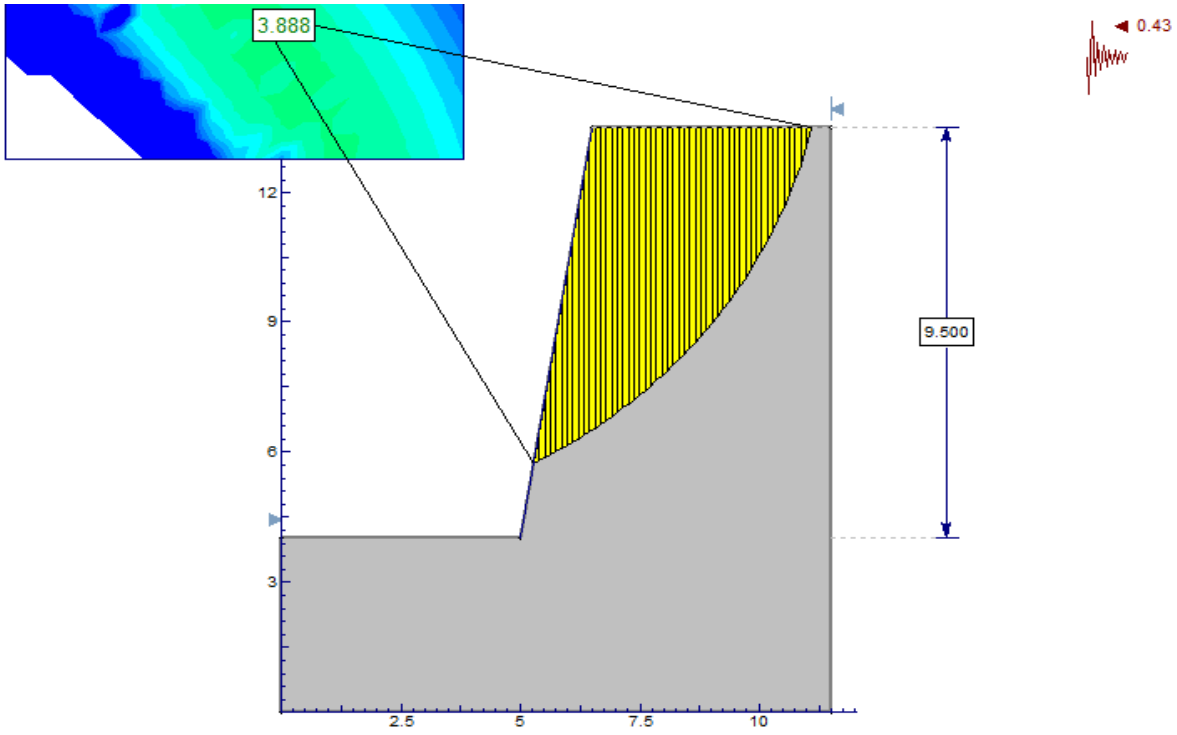


Figura IV.19 Evaluación de Zona Geotécnica 2 con Slide, método Bishop Simplificado, análisis pseudo-estático

Fuente: Elaboración propia

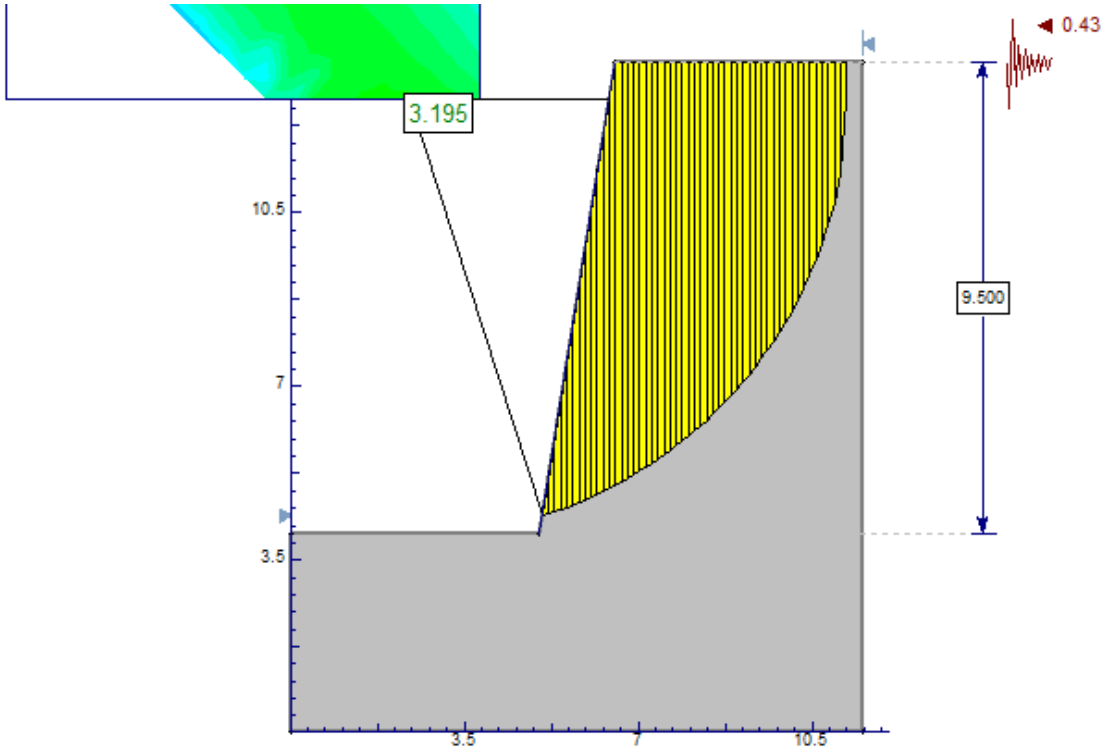
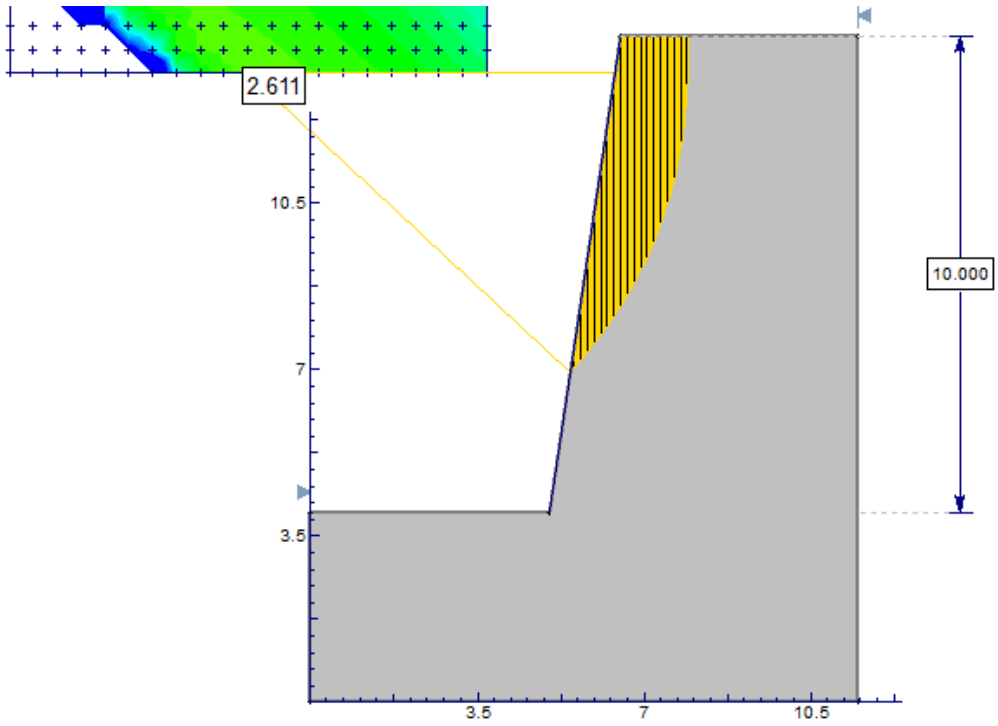


Figura IV.20 Evaluación de Zona Geotécnica 2 con Slide, método Janbu Simplificado, análisis pseudo-estático

Fuente: Elaboración propia

- La **zona geotécnica 3** ha sido analizada en su altura de corte máxima de 15 m y altura de corte de 10 m para fines de esta investigación, cuyo buzamiento es de 84°. El macizo rocoso se caracteriza por ser roca diorita y sus propiedades se muestran en la Figura IV. 21. El análisis estático de las alturas de corte de 15 m y 10 m se han realizado por el método de Bishop Simplificado y Janbu Simplificado como se muestran en la Figura IV.21, Figura IV.22, Figura IV.25 y Figura IV.26. Asimismo, el análisis pseudo-estático de las alturas de corte de 15 m y 10 m se han realizado por el método de Bishop Simplificado y Janbu Simplificado se muestra en la Figura IV.23, Figura IV.24, Figura IV.27 y Figura IV.28.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	UCS (kN/m2)	m	s	a	Water Surface	Ru
Diorita		27.44	Generalised Hoek-Brown	41850	1.03614	0.000167312	0.511368	None	0

Figura IV.21 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 10 m, método Bishop Simplificado, análisis estático

Fuente: Elaboración propia

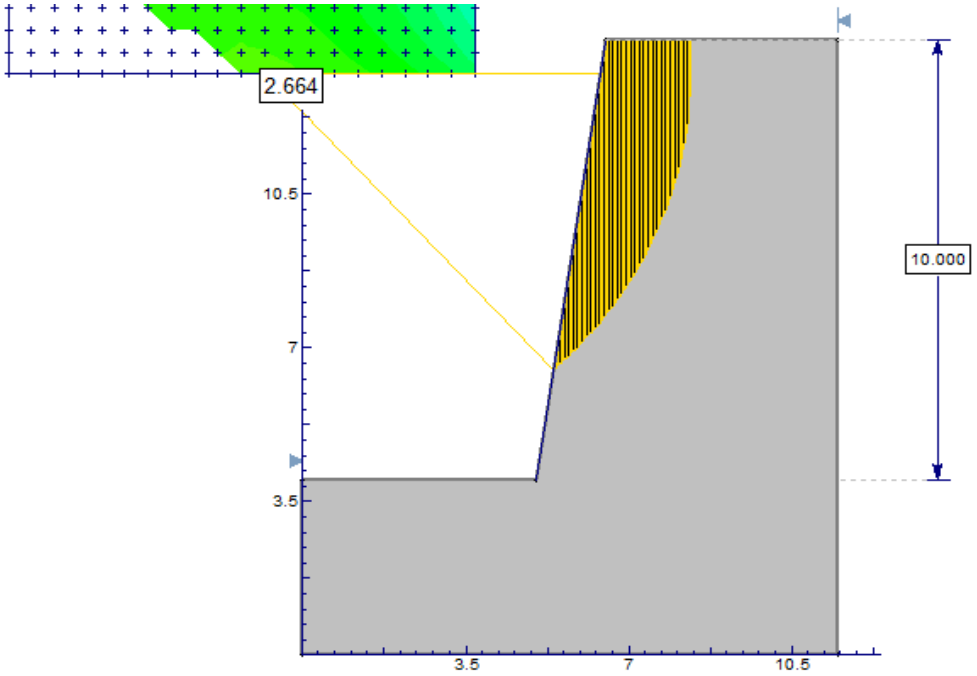


Figura IV.22 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 10 m, método Janbu Simplificado, análisis estático

Fuente: Elaboración propia

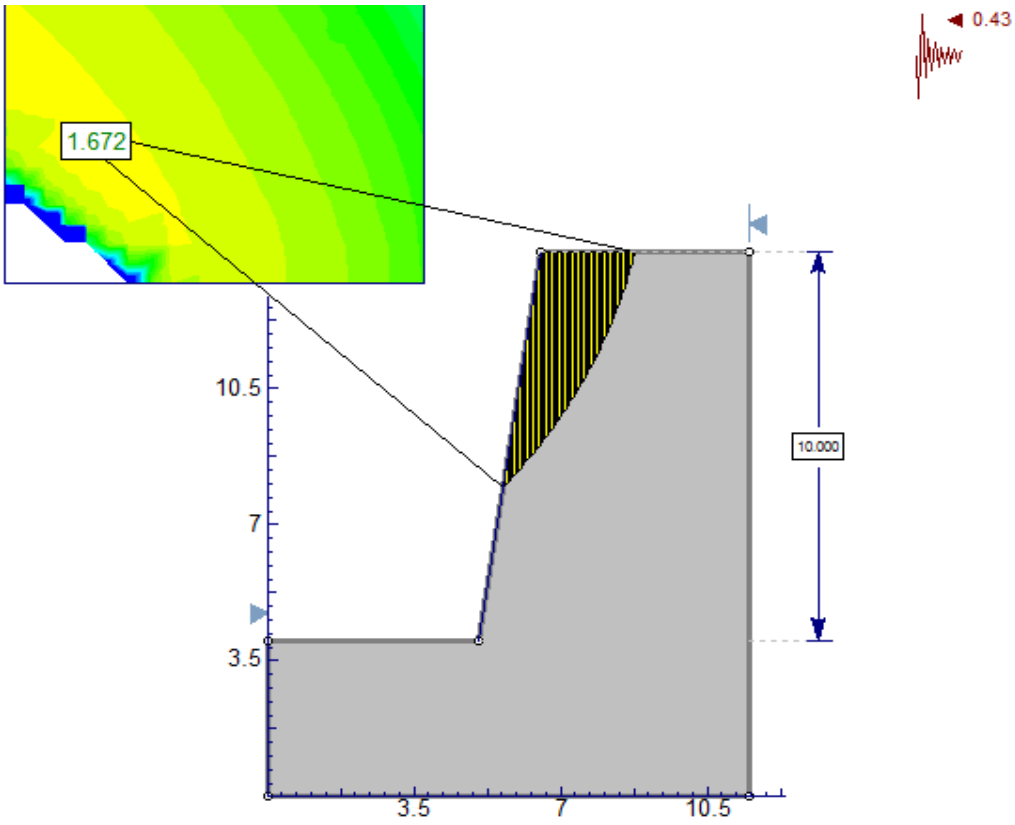


Figura IV.23 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 10 m, método Bishop Simplificado, análisis pseudo-estático

Fuente: Elaboración propia

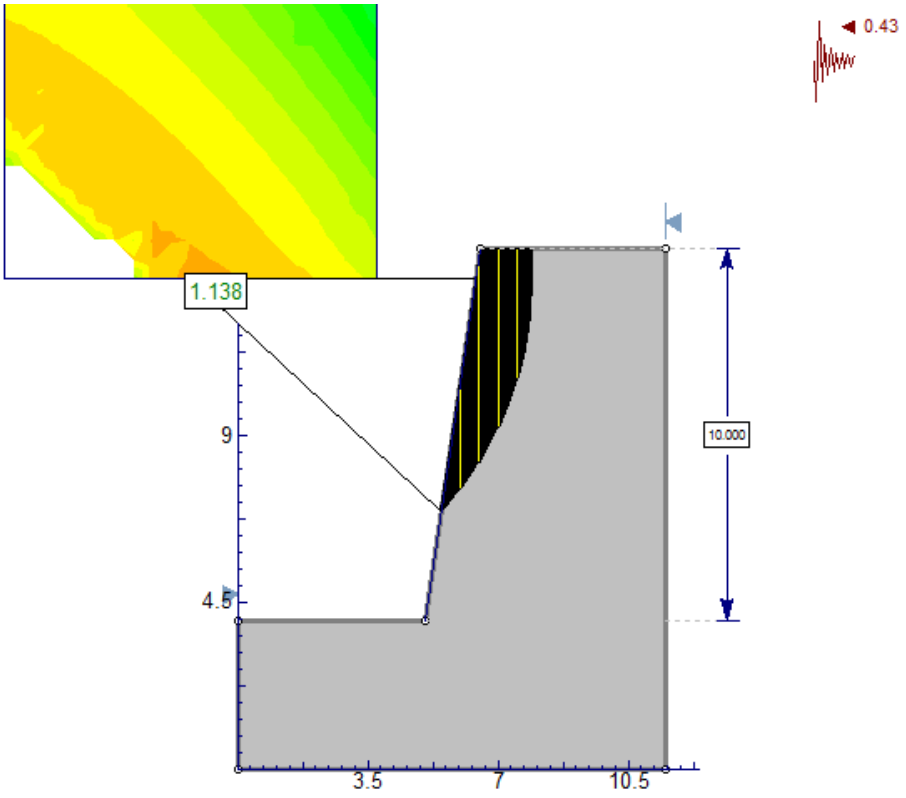


Figura IV.24 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 10 m, método Janbu Simplificado, análisis pseudo-estático

Fuente: Elaboración propia

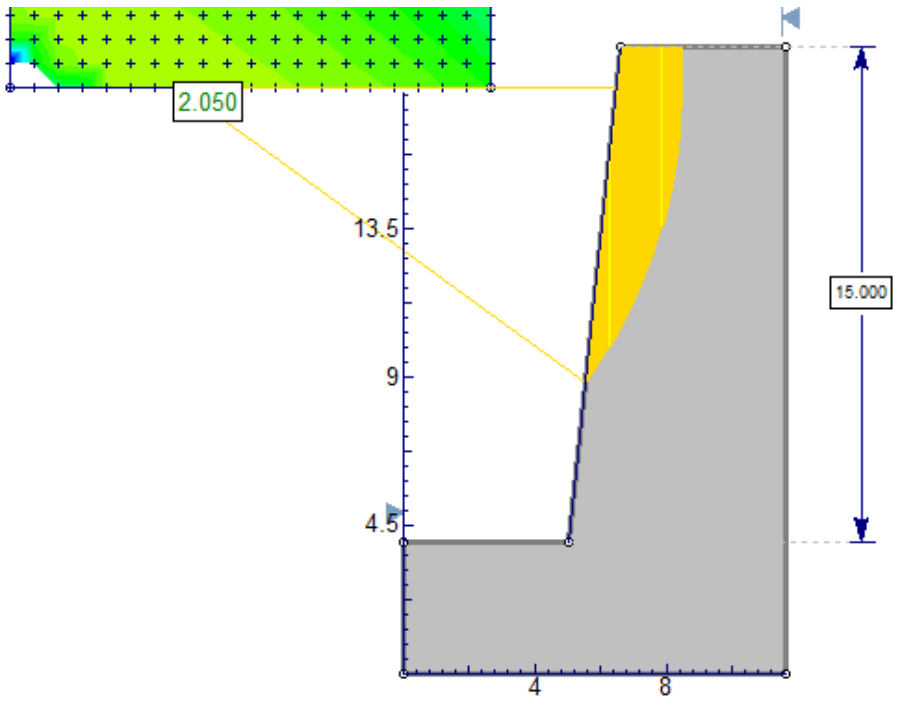


Figura IV.25 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 15 m, método Bishop Simplificado, análisis estático

Fuente: Elaboración propia

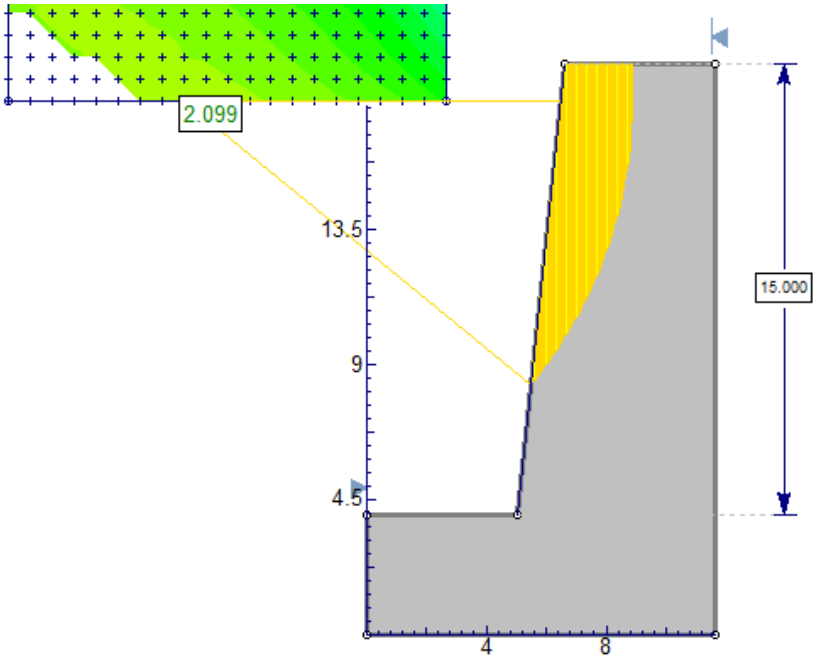


Figura IV.26 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 15 m, método Janbu Simplificado, análisis estático

Fuente: Elaboración propia

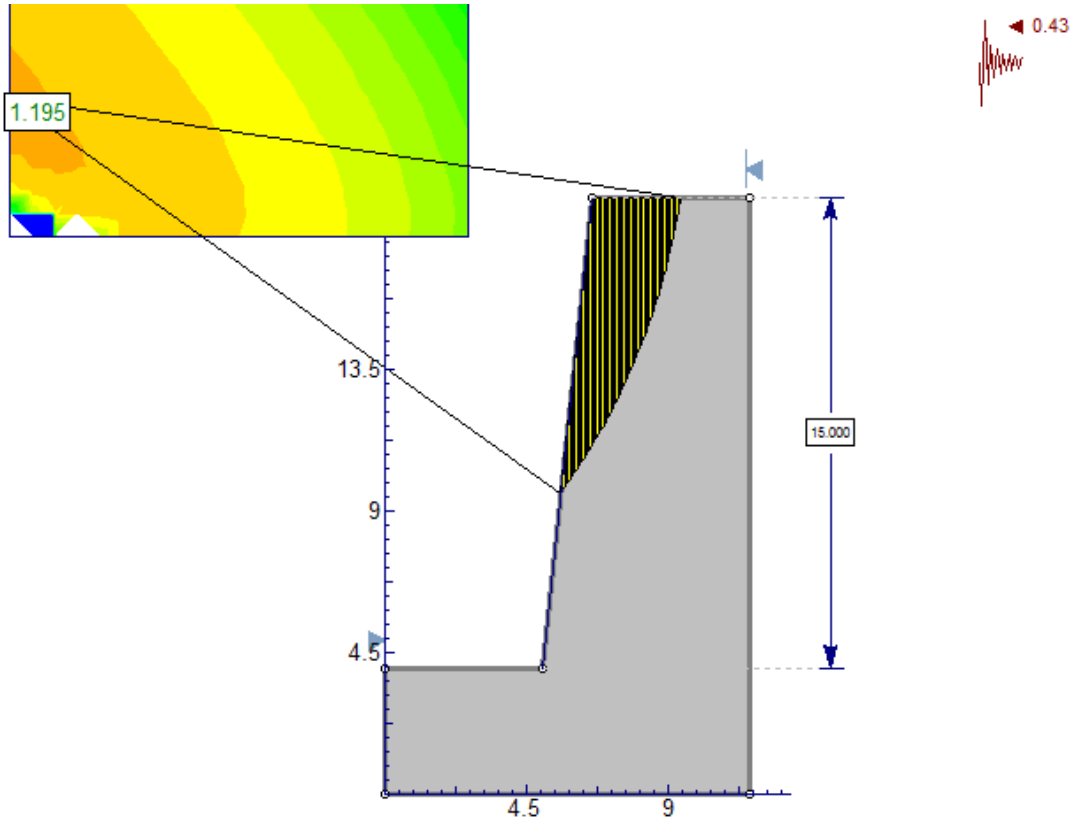


Figura IV.27 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 15 m, método Bishop Simplificado, análisis pseudo-estático

Fuente: Elaboración propia

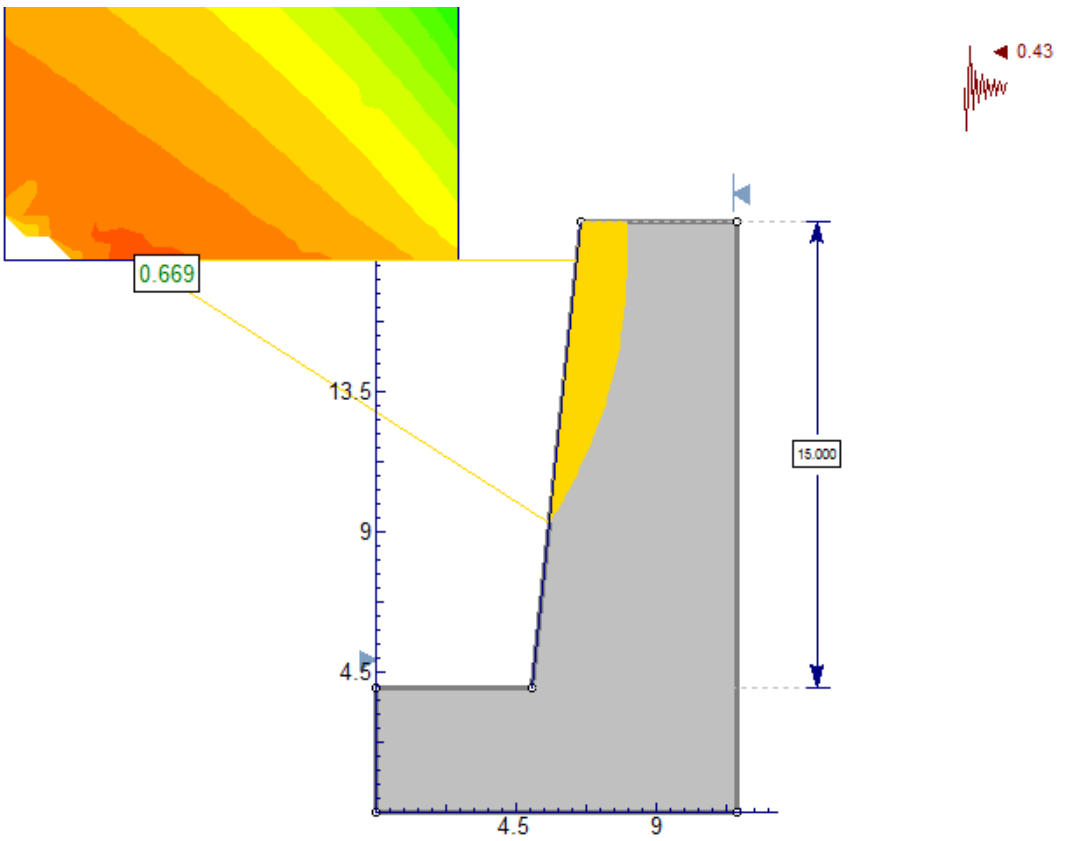
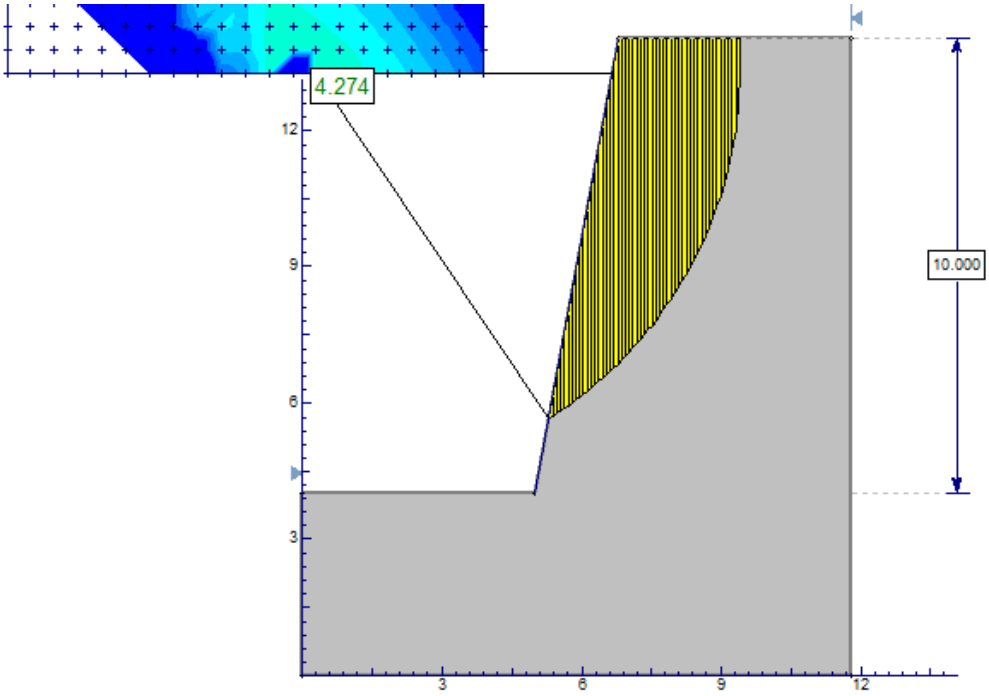


Figura IV.28 Evaluación de Zona Geotécnica 3 con Slide, talud 15 m, método Janbu Simplificado, análisis pseudo-estático

Fuente: Elaboración propia

- La **zona geotécnica 4** ha sido analizada en su altura de corte máxima de 14 m y altura de corte de 10 m para fines de esta investigación, cuyo buzamiento es de 80°. El macizo rocoso se caracteriza por ser roca diorita y sus propiedades se muestran en la Figura IV. 29. El análisis estático de las alturas de corte de 14 m y 10 m se han realizado por el método de Bishop Simplificado y Janbu Simplificado como se muestran en la Figura IV.29, Figura IV.30, Figura IV.33 y Figura IV.34. Asimismo, el análisis pseudo-estático de las alturas de corte de 14 m y 10 m se han realizado por el método de Bishop Simplificado y Janbu Simplificado se muestra en la Figura IV.31, Figura IV.32, Figura IV.35 y Figura IV.36.



Material Name	Color	Unit Weight (kN/m3)	Strength Type	UCS (kN/m2)	m	s	a	Water Surface	Ru
Diorita		27.44	Generalised Hoek-Brown	41850	2.11655	0.00110094	0.504656	None	0

Figura IV.29 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 10 m, método Bishop Simplificado, análisis estático

Fuente: Elaboración propia

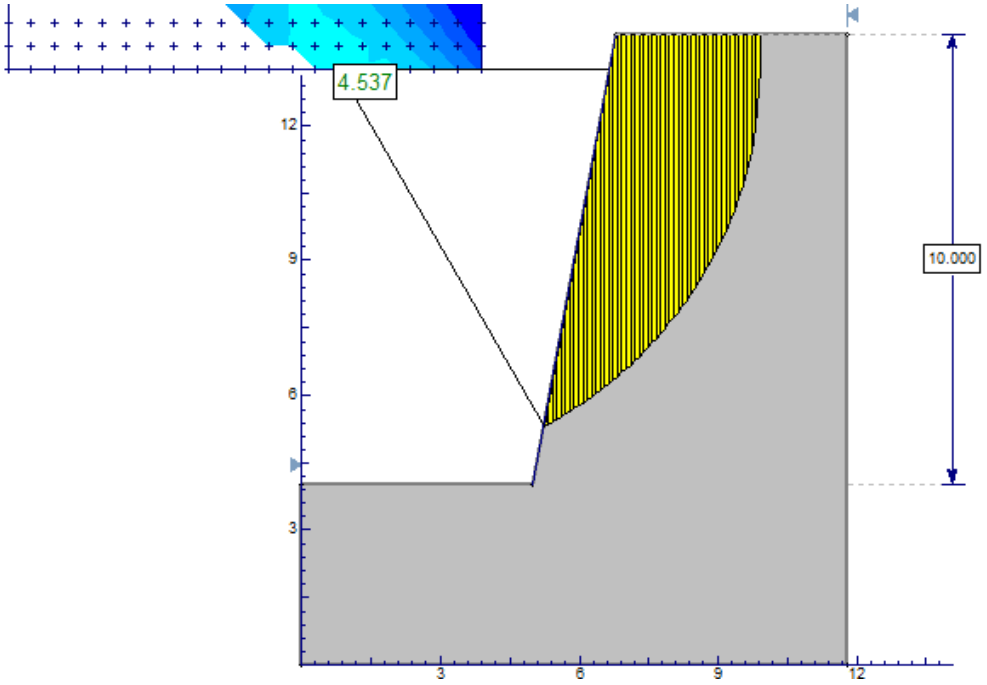


Figura IV.30 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 10 m, método Janbu Simplificado, análisis estático

Fuente: Elaboración propia

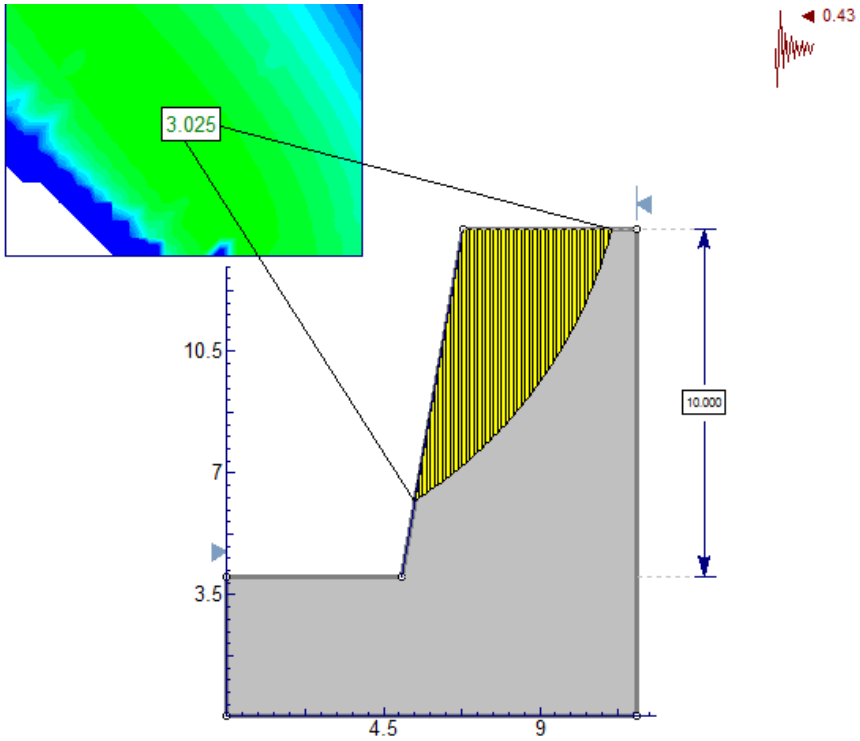


Figura IV.31 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 10 m, método Bishop Simplificado, análisis pseudo-estático

Fuente: Elaboración propia

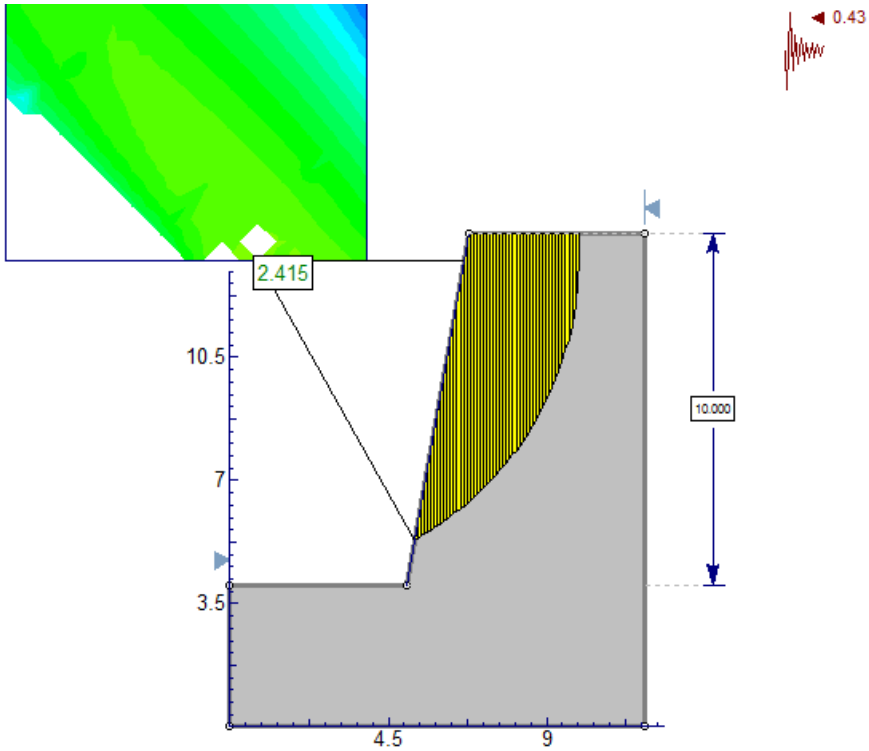


Figura IV.32 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 10 m, método Janbu Simplificado, análisis pseudo-estático

Fuente: Elaboración propia

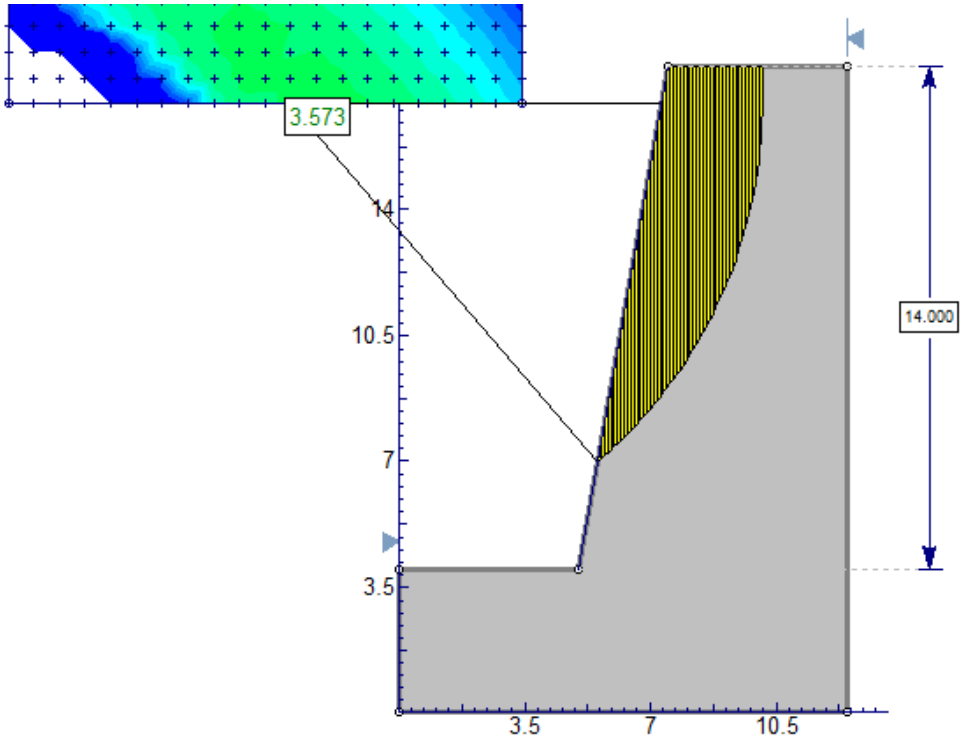


Figura IV.33 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 14 m, método Bishop Simplificado, análisis estático

Fuente: Elaboración propia

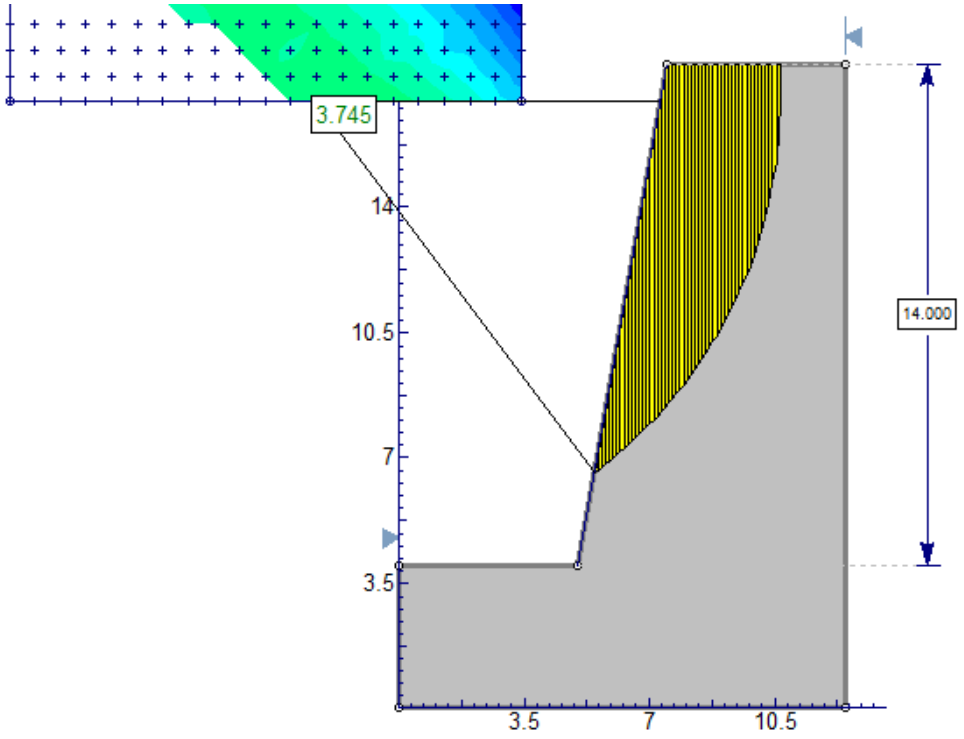


Figura IV.34 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 14 m, método Janbu Simplificado, análisis estático

Fuente: Elaboración propia

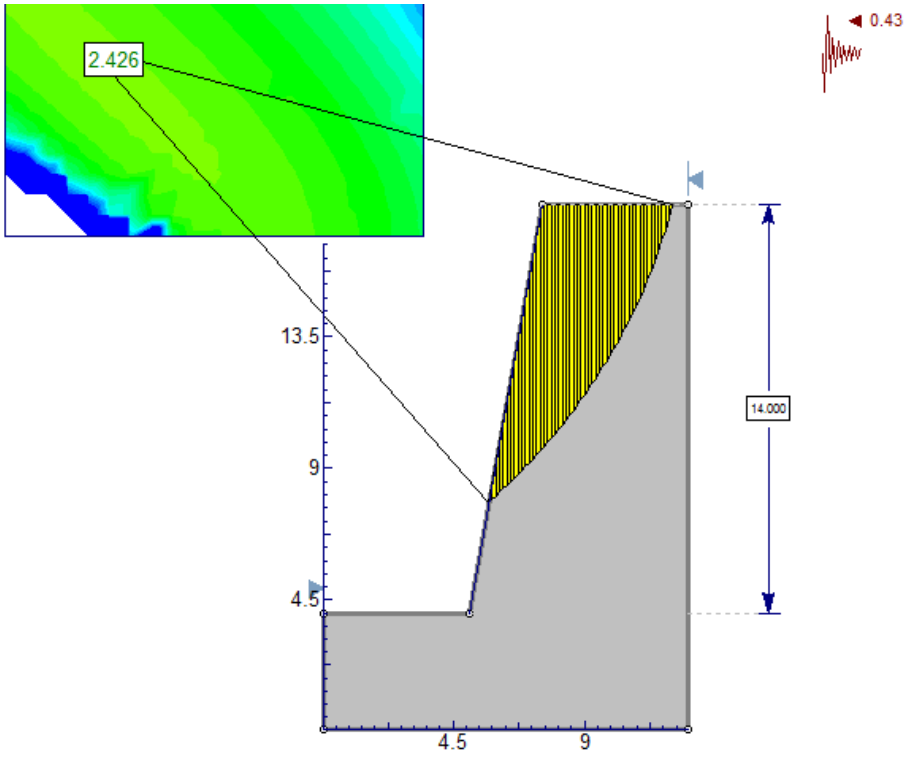


Figura IV.35 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 14 m, método Bishop Simplificado, análisis pseudo-estático

Fuente: Elaboración propia

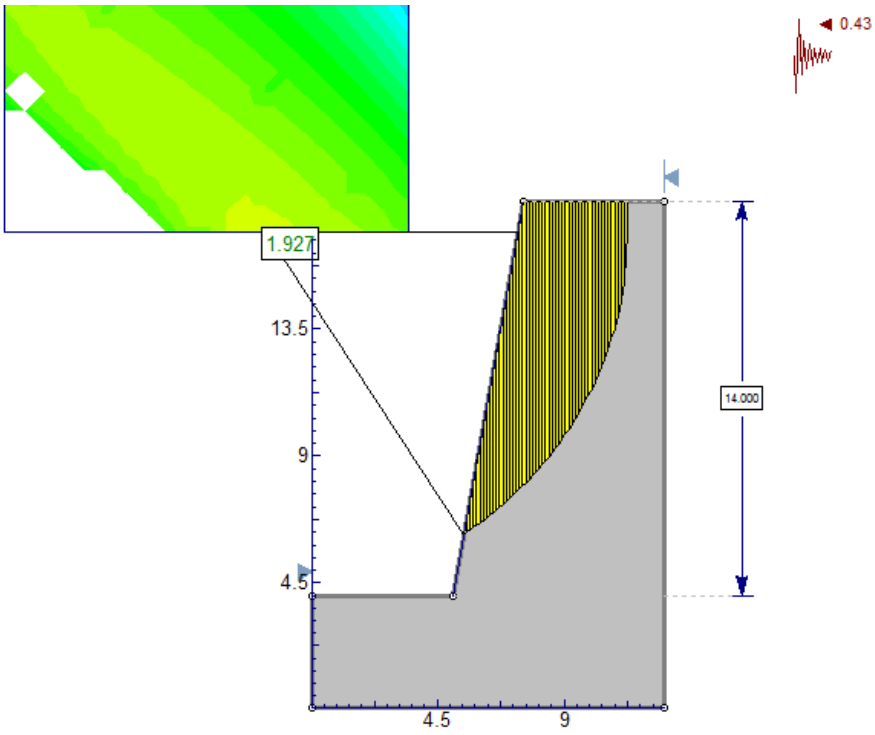


Figura IV.36 Evaluación de Zona Geotécnica 4 con Slide, talud 14 m, método Janbu Simplificado, análisis pseudo-estático

Fuente: Elaboración propia

El Reglamento Nacional de Edificaciones CE.020 Estabilización de suelos y taludes (2012) menciona: “El factor de seguridad mínimo de talud deberá ser 1.5 para solicitaciones estáticas y 1.25 para solicitaciones sísmicas” (CE.020, pág. 6).

A continuación se muestra una tabla de resumen de resultados sobre el análisis de estabilidad global de los taludes cortados de las zonas geotécnicas 1, 2, 3 y 4:

Tabla IV.19 Resultados de análisis de estabilidad global de zonas geotécnicas

Zonas Geotécnicas	Altura de Talud (m)	Ángulo de Buzamiento (°)	Análisis Estático		Análisis Pseudo-estático	
			FS Bishop Simplificado	FS Janbu Simplificado	FS Bishop Simplificado	FS Janbu Simplificado
1	4.00	34	6.761	6.187	3.671	3.286
2	9.50	81	5.325	5.866	3.888	3.195
3	10.00	84	2.611	2.664	1.672	1.138
3	15.00	84	2.05	2.099	1.195	0.669
4	10.00	80	4.274	4.537	3.025	2.415
4	14.00	80	3.573	3.745	2.426	1.927

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla IV.19 se observa que todos los factores de seguridad del análisis estático superan el valor mínimo de estabilidad de 1.5. En el caso de los factores de seguridad del análisis pseudo-estáticos, se observa que solo la zona geotécnica 3 podría presentar inestabilidad en los taludes de altura de 10 y 14 m, considerándose como coeficiente símico 0.43.

CAPITULO V

V. DISCUSION DE RESULTADOS

El análisis de estabilidad de taludes de macizo rocoso del proyecto Subestación Mirador se desarrolló mediante una metodología analítica complementada con el modelamiento de taludes cortados de baja envergadura para la prevención de algún mecanismo de falla que pudiera surgir en los taludes del macizo rocoso. Para el caso del área de proyecto se puede generalizar que el macizo rocoso estudiado está subdividido en cuatro zonas geotécnicas los cuales fueron analizados de acuerdo a su geometría mediante programa DIPS y falla circular en análisis estático y pseudo-estático mediante Slide. La zona 1 presenta macizo rocoso de mala calidad y sin presencia de mecanismos de falla. La zona 2 presenta macizo rocoso de buena calidad y sin presencia de mecanismos de falla. La zona 3 presenta macizo rocoso de calidad media y con presencia de mecanismos de falla circular en análisis pseudo-estático. La zona 4 presenta macizo rocoso de calidad media y sin presencia de mecanismos de falla.

A continuación se muestran una comparación entre los antecedentes y los resultados del proyecto, mostrándose así sus diferencias y similitudes:

- El Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, Sección Suelos y Pavimentos 2014 menciona relaciones de corte referenciales 10:1 (V:H) en roca fija y 4:1 (V:H) en roca suelta para cortes de taludes menores a 10 m, recomendando la realización de banquetas o análisis de estabilidad de 5 a 10 m de altura de talud. La zona geomecánica 1 presenta un talud de corte de 4 m de altura con una pendiente aprox. 0.7:1 (V:H), la zona geomecánica 2 y 4 de talud de corte de 10 m presenta una pendiente aprox. 6:1 (V:H), y la zona geomecánica 3 de talud de corte de 10 m

presenta una pendiente aprox. 10:1 (V:H); obteniéndose posible inestabilidad pseudo-estática en el talud de 10 m de la zona geomecánica 3.

- El Reglamento Nacional de Edificaciones "CE.020 Estabilización de suelos y taludes" sugiere al Profesional Responsable la realización de una metodología para análisis de estabilidad de taludes de acuerdo a su criterio. Los estudios geotécnicos realizados se muestran en el capítulo IV y la metodología aplicada, en el capítulo III.
- A diferencia de la tesis propuesta por Chura, el estudio de análisis de estabilidad global de la Subestación Mirador se realizó mediante equilibrio límite y se analizó pseudo-estáticamente. Las características del macizo rocoso son diferentes y el propósito del proyecto también, ya que este autor realizar un estudio para diseño y refuerzo de túneles.
- La tesis propuesta por Gallardo desarrolla la recopilación de información internacional aplicables a la mecánica de rocas y concluye considerando a la mecánica de rocas como una disciplina empírica, limitante y con mucho conocimiento por descubrir, postura de la cual se está de acuerdo.
- La tesis realizada por Ramos desarrolla un comparativo de programas Slide y LS-SYNA para análisis de falla circular de estabilidad de taludes, los cuales utilizan el criterio de Mohr-Coulomb y método de elementos finitos, respectivamente. En la presente tesis se utilizó el criterio de Generalizado de Hoek y Brown, el cual considera la resistencia de la matriz rocosa como un criterio no lineal, siendo esta más próxima al comportamiento real que el criterio de Mohr-Coulomb.
- La investigación realizada por Mohammad A., Haluk A. y Ebrahim A. desarrollan la clasificación geomecánica SMR (variación de clasificación RMR), modelamiento de macizo rocoso mediante SWEDGE, Slide y RockPlane en sistemas estáticos. En la presente tesis se utilizó la clasificación geomecánica RMR sin considerar los factores

de ajuste que propone el criterio SMR y el modelamiento mediante Slide en sistema estático y pseudo-estático. No se utilizó el software SWEDGE y RockPlane, ya que mediante el programa DIPS se descartaron fallas planares y por cuña.

La presente investigación genera aportes para futuros proyectos de estabilización de taludes cortados de baja envergadura. Durante el proceso de proyección estereográfica y análisis cinemático se expuso la representación del ángulo de fricción, buzamiento de talud en Falsilla de Wulff y reconocimiento de mecanismos de falla de macizo rocoso como proyecciones estereográficas. Asimismo, durante el modelamiento con Slide se evaluaron las posibles fallas circulares en taludes de corte con el criterio Generalizado de Hoek y Brown y se analizaron en sistema estático y pseudo-estático.

Durante el desarrollo del estudio se observaron algunas limitaciones. En primera instancia, no se tuvieron parámetros de ángulo de fricción de la roca intacta, por ende, se correlacionó con los resultados de la clasificación geomecánica RMR para la proyección estereográfica y análisis cinemático de discontinuidades. Por último, durante el análisis de las posibles fallas circulares o inestabilidad global que pudieran presentar los taludes de las zonas geotécnicas, se observó que el modelamiento con software Slide no permite el dibujo de las familias de discontinuidades que presenta el macizo, pero sí los parámetros que definen el índice GSI; además, en las evaluaciones pseudo-estáticas con Slide se consideró al coeficiente sísmico como la aceleración horizontal máxima, estimando así un análisis crítico de sismicidad debido a que no realizó un estudio de peligrosidad sísmica.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

El modelamiento del macizo rocoso, como parte de una metodología analítica, sí influye en la prevención de mecanismos de falla de proyectos de baja envergadura (taludes menores a 10 m), debido a que permite identificar posibles mecanismos de falla y definir el área inestable para su estabilización mediante resultados reales y optimizados que generan una mayor seguridad al proyecto.

Respecto al talud de la zona geotécnica 1, el cual presenta en la cabeza del talud una caseta de guardianía con grietas moderadas y severas, no manifiesta posibles mecanismos de falla planar, tipo cuña, vuelco y falla circular analizado en forma estática y pseudo-estática; por ende, se concluye que el agrietamiento no se generó por inestabilidad del talud.

Respecto a las relaciones de corte referenciales mencionadas en el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos 2014 considerados en la Subestación Eléctrica Mirador, se obtuvo la inestabilidad por falla circular en análisis pseudo-estático por Janbu Simplificado del talud de corte de 10 m de altura en la zona geotécnica 3, la cual presenta macizo rocoso de calidad media y talud con buzamiento de 84°. Cabe mencionar que en la zona geotécnica 1 (altura de corte de 4 m, macizo rocoso de mala calidad y buzamiento de talud de 34°), zona geotécnica 2 (altura de corte de 9.5 m, macizo rocoso de buena calidad y buzamiento de talud de 81°) y zona geotécnica 4 (altura de corte de 10 m y macizo rocoso de calidad media y buzamiento de talud de 80°) no se identificaron posibles mecanismos de falla. Por lo tanto, las relaciones de corte referenciales mencionadas en el Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos 2014 para taludes de corte menores a 10 m de altura pueden ser aplicables

para análisis estáticos de macizos rocosos con clasificación geomecánica similar a la estudiada. Sin embargo, también se debe realizar análisis pseudo-estáticos, en zonas con peligrosidad sísmica, y un estudio de estabilización de taludes para verificación de inestabilidad por método de Janbu, ya que dependiendo del macizo rocoso se puede presentar inestabilidad debido a la calidad del macizo rocoso, orientación de discontinuidades y/o pendiente del talud. Cabe mencionar que los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos de los taludes del estudio se compararon en base a los factores mencionados en el Reglamento Nacional de Edificaciones CE.020 Estabilización de suelos y taludes.

Adicionalmente, se analizaron los taludes de corte con alturas mayores a 10 m presentes en la zona geotécnica 3 y 4 mediante criterios estáticos y pseudoestáticos, de los cuales se encontró inestabilidad pseudo-estática del talud de 15 m de altura perteneciente a la zona geotécnica 3, ya que presenta factores de seguridad menores a 1.25.

CAPITULO VII

RECOMENDACIONES

Diseñar métodos de sostenimiento o cambios de pendiente de talud para estabilización de fallas circulares que podría presentarse en la zona geotécnica 3.

Optimizar parámetros sísmicos realizando un estudio de peligro sísmico del área de estudio, para así obtener coeficientes sísmicos reducidos a los planteados por bibliografía nacional y factores de seguridad pseudo-estáticos optimizados.

Realizar más pruebas en laboratorio y campo para obtener parámetros más precisos y obtener un estudio con resultados más cercanos a la realidad.

La creación de un reglamento o manual que establezca lineamientos sobre metodologías analíticas, criterios de análisis, requerimientos mínimos de estudio, métodos de estabilización, entre otros, en base de estudios de ingeniería de macizos rocosos peruanos.

Como futura línea de investigación, la caracterización geomecánica SMR y modelamiento de macizo rocoso mediante software con criterio de elementos finitos y que considere la orientación de discontinuidades para análisis de estabilidad global generaría la optimización de resultados.

CAPITULO VIII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alva, Jorge (2002), *Dinámica de Suelos*, Lima, Perú, Universidad Nacional de Ingeniería.

ASTM D5731-16, *Standard Test Method for Dtermination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strenght Classifications*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.

Bieniwaski, Z. T. (1979). *The geomechanics classification in rock engineering applications. Proc. 4th International Conference on Rock Mechanics*. Montreaux. Balkema, vol. 2.

Chura, Wilberth (2016). *Caracterización Geomecánica del macizo rocoso y su aplicación en el diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la unidad económica administrativa Ana María-La Rinconada (tesis de máster)*. Universidad Nacional del Altiplano, Perú.

Gallardo, M (2013). *Cimentaciones en Roca (tesis de pregrado)*, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Garzón, Julio (2018). *Análisis cinemática de la estabilidad de taludes en roca por vuelco*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

Glosario de Términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial, MTC, Perú, 2018.

Gonzales de Vallejo L., Ferrer M., Ortuño L., Oteo C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid, España. PEARSON EDUCACIÓN S.A.

Goodman, Richard (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. New York, USA. John Wiley & Sons

Hoek, E. and Brown, E. T. (1997) *Practical Estimates of Rock Mass Strength*. International Journal Rock Mechanics Mining Science.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. y Corkum, B. (2002). *Hoek-Brown failure criterion*. Rocscience, 1, 1-8.

Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Balkema, Rotterdam.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2010). *Zonas críticas por peligros geológicos en la subcuenca Canto Grande*. Informe Técnico. Lima, Perú. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (1992). *Geología de los cuadrángulos de Lima, Lurin, Chancay y Chosica*. Boletín N°43. Lima, Perú. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

ISRM (1981). Rock characterization. *Testing and monitoring. ISRM suggested methods*. Brown, E. T. Ed. Commision on testing and monitoring. International Society for Rock Mechanics. Pergamon Press.

Manual de Carreteras-Túneles, muros y obras complementarias, MTC, Perú, 2016.

Manual de Carreteras-Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos, MTC, Perú, 2014.

Marinos, P and Hoek, E. (2000) *GSI: A Geological Friendly Tool for Rock Mass Estimation. Proceedings of the GeoEng 2000 at the Internacional Conference on Geotechnical and Geological Engineering*. Melbourne, Australia.

Mohammad A., Haluk A. y Ebrahim A. (2017). *Assessment of rock slope stability slope mass rating (SMR): a case study for the gas flare site in Assalouyeh,South of Irán.* Geomechanics and Engineering

Ramos, Abel (2017). *Análisis de Estabilidad de Taludes en Rocas (tesis de máster)*, Universidad Politécnica de Madrid, España.

Tomás, R., Ferreiro, I., Sentana, I. y Díaz, M. (2002). *Aplicaciones de la proyección estereográfica en ingeniería geológica*. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, XIV (1), 1-10.

Wyllie D. and Mah C. (2005), *Rock slope engineering*, New York, EE.UU., Spon Press.

CAPITULO IX

ANEXOS

Anexo fotográfico



Foto N°01: Anillo Vial tramo San Lurigancho localizado alrededor del área del proyecto.



Foto N°02: Vista exterior del proyecto Subestación Eléctrica Mirador.



Foto N°03: Caseta de guardianía localizada en la zona geotécnica 1.



Foto N°04: Grietas moderadas menores de 6mm localizadas en el piso de la caseta de guardianía.



Foto N°05: Grietas severas menores de 1.5 cm localizadas en el muro de balcón de la caseta de guardianía.



Foto N°06: Zona geotécnica 1 con presencia de dos familias de discontinuidades de roca tipo Diorita y calidad Clase IV.



Foto N°07: Cálculo de índice RQD de zona geotécnica 1 mediante correlación de λ. RQD=67.7%



Foto N°08: Zona geotécnica 2 con presencia de tres familias de discontinuidades de roca tipo Diorita y calidad Clase II.

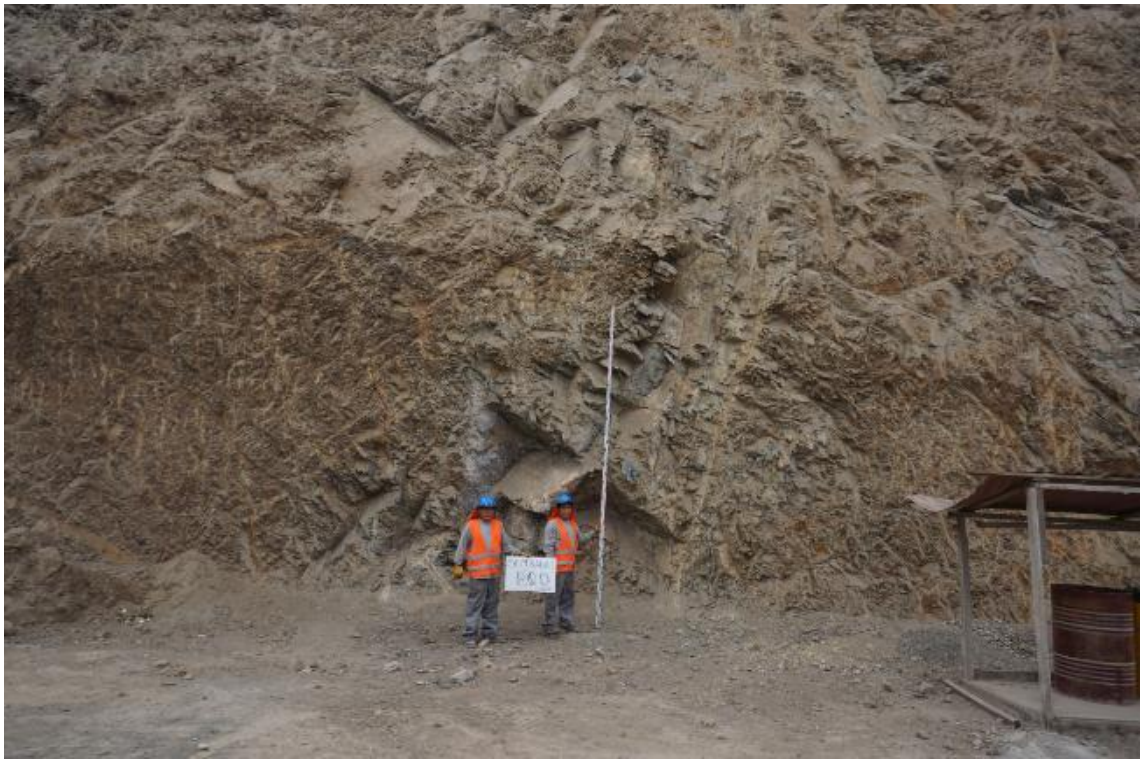


Foto N°09: Cálculo de índice RQD de zona geotécnica 2 mediante correlación de λ. RQD= 84.2%



Foto N°10: Estado de zona baja de la roca intacta de la zona geotécnica 2 después de excavación mediante ripado.



Foto N°11: Zona geotécnica 3 con presencia de dos familias de discontinuidades de roca tipo Diorita y calidad Clase III. RQD=84.2%

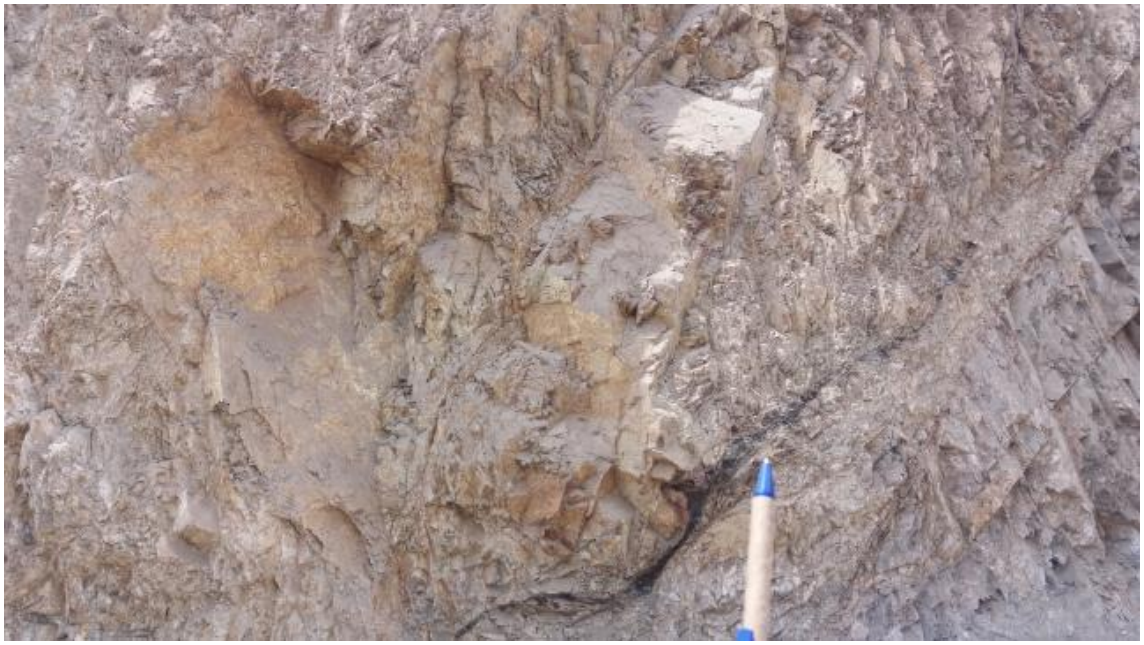


Foto N°12: Presencia de oxidaciones en discontinuidad de zona geotécnica 3.



Foto N°13: Zona geotécnica 4 con presencia de dos familias de discontinuidades de roca tipo Diorita y calidad Clase III. RQD=73.2%



Foto N°14: Identificación de resistencia de roca intacta mediante prospecciones de campo con martillo geológico.



Foto N°15 y 16: Ensayos de Carga Puntual en bloques irregulares, muestras Subestación Eléctrica Mirador.