

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS PROFESIONAL

**EVALUACIÓN GEOTÉCNICA EN INESTABILIDAD DE TALUDES EN ZONAS
CRITICAS EN LA CARRETERA KUNTUR WASI EN EL TRAMO Km. 45+000 –
Km 52+000**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

Presentado por:

Bach. DUBER SALOMÓN CÁCERES MALAVER

Asesor:

Dr. SEGUNDO REINALDO RODRÍGUEZ CRUZADO

CAJAMARCA – PERÚ

2019

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a la Facultad de Ingeniería y a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica por haberme permitido formarme y en ella.

Gracias a todas las personas que fueron participes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta, gracias a todos ustedes

Agradezco a mi asesor de Tesis, al Dr. Reinaldo Rodríguez Cruzado, ya que sin su apoyo ésta, no hubiera sido posible.

A mi Madre que fue mi principal apoyo de principio a fin en esta etapa de mi vida.

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre Manuel; a mi madre Benilda; que me apoyo desde siempre, por darme cariño y enseñarme los valores para seguir adelante y por siempre confiar en mí a lo largo de toda mi vida.

A todas las personas que me brindaron su apoyo incondicional

RESUMEN

La Tesis profesional, se realizó en la carretera Kuntur Wasi en el tramo Km. 45+000 –Km 52+000, está ubicada al noroeste de la ciudad de Cajamarca, la zona es compleja por la presencia de estructuras fuertemente disturbadas, dando lugar a plegamientos, fallamientos y alto fracturamiento en los macizos rocosos, los cuales están constituidos por rocas volcánicas; así como la presencia de depósitos cuaternarios aluviales y coluviales. Los cuales han sufrido fuertes procesos de erosión física y química, produciendo alteraciones en la estructura del macizo rocoso, generando inestabilidad de taludes. Las intensas precipitaciones, infiltración y cambios bruscos de temperatura, generan, alteración de las propiedades fisicoquímicas de las rocas y la disminución de los esfuerzos de resistencia como la cohesión, fricción interna y fuerzas resistentes, causa fundamental de la inestabilidad. Se realizó el cartografiado litomorfoestructural a lo largo de todo el tramo de carretera, con fines de investigación geomecánica y geotécnica, identificando zonas críticas en rocas y suelos. Para las zonas conformadas por rocas se caracterizó geomecánicamente según el método Rock Mass Rating (RMR - Bieniawski 1989), Rock Quality Designation (RQD - Deere 1967) y Geological Strength Index (GSI - Hoek 1994), y para los taludes conformados por suelos se realizó toma de muestras para su posterior análisis en el laboratorio de mecánica de suelos. De esta manera genera la base de datos para la aplicación de los programas informáticos geotécnicos Slide v.6.0 y RocLab v.1.0. Con los resultados se determinó los Factores de Seguridad de los taludes y su clasificación de acuerdo al grado de peligrosidad.

Palabras Claves: Macizo rocoso, Inestabilidad, diaclasas, litología, factor de seguridad.

ABSTRACT

The professional thesis, was carried out on the Kuntur Wasi highway in the section Km. 45 + 000 -Km 52 + 000, is located northwest of the city of Cajamarca, the area is complex due to the presence of heavily disturbed structures, leading to Folds, failures and high fracturing in the rocky massifs, which are constituted by volcanic rocks; as well as the presence of alluvial and colluvial quaternary deposits. They have undergone strong processes of physical and chemical erosion, producing alterations in the structure of the rock mass, generating slope instability. The intense precipitations, the infiltration and the abrupt changes of temperature, generate, alteration of the physicochemical properties of the rock and the diminution of the efforts of resistance like the cohesion, the internal friction and the resistant forces, fundamental cause of the instability. The lithomorphstructural mapping was carried out along the entire road section, for geomechanical and geotechnical research purposes, identifying critical areas in rocks and soils. For the zones formed by rocks, it was characterized geomechanically according to the Rock Mass Rating method (RMR - Bieniawski 1989), Rock Quality Designation (RQD - Deere 1967) and Geological Strength Index (GSI - Hoek 1994), and for the slopes formed by soils He took samples for further analysis in the soil mechanics laboratory. In this way, it generates the database for the application of the geotechnical software Slide v.6.0 and RocLab v.1.0. With the results, the Security Factors of the slopes and their classification according to the degree of danger were determined.

Keywords: Rocky massif, Instability, diaclases, lithology, safety factor.

CONTENIDO

Pág.

| | |
|---|------|
| AGRADECIMIENTO | i |
| DEDICATORIA | ii |
| RESUMEN | iii |
| ABSTRACT | iv |
| CONTENIDO | v |
| LISTA DE CUADROS | viii |
| LISTA DE FIGURAS | ix |
| LISTA DE FOTOS | xi |
| LISTA DE ABREVIATURAS | xii |
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO | 3 |
| 2.1 Antecedentes teóricos de la investigación. | 3 |
| 2.2. Bases teóricas | 4 |
| 2.2.1 Consideraciones generales sobre estabilidad de taludes..... | 4 |
| 2.2.2 Factores influyentes en la estabilidad de taludes. | 6 |
| 2.2.3 Análisis de estabilidad. | 6 |
| 2.2.4 Principales modos de inestabilidad. | 7 |
| 2.2.5 Fallas con control estructural. | 8 |
| 2.2.6 Fallas sin control estructural. | 10 |
| 2.2.7 Clasificación de los macizos rocosos. | 11 |
| 2.2.8 Clasificaciones geomecánicas. | 15 |
| 2.2.9 Características geotécnicas de los depósitos cuaternarios. | 18 |
| 2.3 Definición de términos básicos | 21 |
| CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS | 23 |
| 3.1 Ubicación de la zona de estudio | 23 |
| 3.2 Tipo y método de investigación..... | 24 |
| 3.3 Accesibilidad..... | 24 |
| 3.4 Clima y vegetación..... | 24 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.5 | Técnicas e instrumentos de recolección de datos | 25 |
| 3.5.1 | Técnicas empleadas para el acopio de la información | 25 |
| 3.5.2 | Instrumentos para la recolección de datos..... | 25 |
| 3.6 | Análisis e interpretación de datos | 26 |
| 3.7 | Técnicas de procesamiento y análisis de datos | 26 |
| 3.8 | Control de calidad de datos | 26 |
| 3.9 | Geología local..... | 26 |
| 3.9.1 | Volcánico San Pablo..... | 26 |
| 3.9.2 | Depósitos Cuaternarios | 28 |
| 3.10 | Geología estructural..... | 28 |
| 3.11 | Unidades Morfológicas | 30 |
| 3.12 | Estudio geotécnico..... | 32 |
| 3.12.1 | Estación N° 01: | 33 |
| 3.12.2 | Estación N° 02: | 36 |
| 3.12.3 | Estación N° 03: | 40 |
| 3.12.4 | Estación N° 04: | 44 |
| 3.12.5 | Estación N° 05: | 48 |
| 3.12.6 | Estación N° 06: | 52 |

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1 | Procesamiento de la información y presentación de resultados.. | 57 |
| 4.1.1 | Análisis Slide v. 6.0..... | 57 |
| 4.1.2 | Análisis Rock Lab v. 1.0..... | 57 |
| 4.2 | Clasificación geotécnica de los taludes..... | 58 |
| 4.2.1 | Tramo 01 – Progresiva Km 52+000 – Km 52+050 | 58 |
| 4.2.2 | Tramo 02 – Progresiva Km 45+500 – Km 45+540 | 58 |
| 4.2.3 | Tramo 03 – Progresiva Km 46+900 – Km 46+950. | 59 |
| 4.2.4 | Tramo 04 – Progresiva Km 48+700 – Km 48+780. | 59 |
| 4.2.5 | Tramo 05 – Progresiva Km 50+100 – Km 50+140 | 60 |
| 4.2.6 | Tramo 06 – Progresiva Km 51+500 – Km 51+100 | 60 |
| 4.3 | Contrastación de la hipótesis | 61 |

| | Pág. |
|---|------|
| CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 62 |
| 5.1 Conclusiones | 62 |
| 5.2 Recomendaciones | 63 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 64 |
| ANEXOS | 65 |

LISTA DE CUADROS

| | Pág. |
|------------|--|
| Cuadro 01. | Factores influyentes en la estabilidad de taludes 6 |
| Cuadro 02. | Valores aproximados para c y ϕ del macizo rocoso según su calidad 15 |
| Cuadro 04. | Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR. 18 |
| Cuadro 05. | Propiedades mecánicas de los suelos según SUCS. 20 |
| Cuadro 06. | Coordenadas del área de estudio. 24 |
| Cuadro 07. | Accesos hacia la zona de estudio 24 |
| Cuadro 08. | Unidades geomorfológicas. 30 |
| Cuadro 09. | Análisis granulométrico de la calicata M – 1 34 |
| Cuadro 10. | Límites de consistencia. 35 |
| Cuadro 11. | Asignación de valores para el macizo rocoso, E-02. 37 |
| Cuadro 12. | Clasificación de calidad de roca, según valor RMR para la E-02. 38 |
| Cuadro 13. | Asignación de valores para el macizo rocoso, E-03. 41 |
| Cuadro 14. | Clasificación de calidad de roca, según valor RMR para la E-03. 42 |
| Cuadro 15. | Asignación de valores para el macizo rocoso, E-04. 45 |
| Cuadro 16. | Clasificación de calidad de roca, según valor RMR para la E-04. 46 |
| Cuadro 17. | Asignación de valores para el macizo rocoso, E-05. 49 |
| Cuadro 18. | Clasificación de calidad de roca, según valor RMR para la E-05. 50 |
| Cuadro 19. | Asignación de valores para el macizo rocoso. E-06. 53 |
| Cuadro 20. | Clasificación de calidad de roca, según valor RMR para la E-06. 54 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|------------|---|
| Figura 01. | Tipos de taludes. 5 |
| Figura 02. | Roturas planas en los bancos de un talud..... 9 |
| Figura 03. | Planos de una cuña deslizada en un talud rocoso 9 |
| Figura 04. | Bloques rocosos de un talud que han sufrido proceso. 10 |
| Figura 05. | Forma de falla circular. 11 |
| Figura 06. | Representación del criterio de Hoek y Brown, en el espacio de tensiones normal y tangencial..... 13 |
| Figura 07. | Representación gráfica de la ecuación de Coulomb. 14 |
| Figura 08. | Estimadón del índice GSI en base a descripciones geológicas ... 16 |
| Figura 09. | Limites de Atterberg 20 |
| Figura 10. | Ubicación de zona estudio. 23 |
| Figura 11. | Base estructural de la provincia de San Pablo. 29 |
| Figura 12. | Curva granulométrica..... 34 |
| Figura 13. | Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.) 35 |
| Figura 14. | Método Bishop simplificado evalúa el talud (Estación N° 01), con un FS igual a 0.827 36 |
| Figura 15. | Asignación de GSI para el macizo rocoso de la estación N° 02. . 38 |
| Figura 16. | Grafica de esfuerzos para la Estación N° 02..... 39 |
| Figura 17. | Método Bishop simplificado evalúa el talud (Estación N° 02), con un FS igual a 0.675 40 |
| Figura 18. | Asignación de GSI para el macizo rocoso de la Estación N° 03.. 42 |
| Figura 19. | Grafica de esfuerzos para la Estacion N° 03..... 43 |
| Figura 20. | Método Bishop simplificado evalúa el talud(Estación N° 03), con un FS igual a 0.459 44 |
| Figura 21. | Asignación de GSI para el macizo rocoso de la Estación N° 04.. 46 |
| Figura 22. | Grafica de esfuerzos para la Estación N° 04..... 47 |
| Figura 23. | Método Bishop simplificado evalúa el talud (Estación N° 04), con un FS igual a 0.464. 48 |
| Figura 24. | Asignación de GSI para el macizo rocoso de la Estación N° 05.. 50 |
| Figura 25. | Grafica de esfuerzos para la Estación N° 05..... 51 |

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 26. | Método Bishop simplificado evalúa el talud (Estación N° 05), con un FS igual a 0.782. | 52 |
| Figura 27. | Asignación de GSI para el macizo rocoso de la Estación N° 06.. | 54 |
| Figura 28. | Grafica de esfuerzos para la Estación N° 06..... | 55 |
| Figura 29. | Método Bishop simplificado evalúa el talud (Estación N° 06), con un FS igual a 0.636. | 56 |

LISTA DE FOTOS

| | Pág. |
|----------|---|
| Foto 01. | Dacitas altamente erosionadas por la presencia de agua.27 |
| Foto 02. | Depósitos cuaternarios en la zona de estudios.28 |
| Foto 03. | Planicie formada al margen de la carreta.30 |
| Foto 04. | Lomada formada al sureste de la carreta.31 |
| Foto 05. | Ladera formada al margen izquierdo de la carreta.31 |
| Foto 06. | Escarpa formada al margen derecho de la quebrada peña negra.....32 |
| Foto 08. | Talud conformado por limos arcillosos, en la progresiva 52+000.....33 |
| Foto 09. | Talud conformado por dacita fracturada en la progresiva 45+500.....37 |
| Foto 10. | Talud altamente erosionado y fracturado en la progresiva 46+900.....41 |
| Foto 11. | Talud altamente erosionado en la progresiva 48+700.....45 |
| Foto 12. | Talud constituido por suelo, en la progresiva 50+100.49 |
| Foto 13. | Talud por compuesto por dacita en la progresiva 51+500.....53 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------------------------|---|
| WGS-84 | : Sistema de Coordenadas Geográficas Mundial 1984. |
| UTM | : Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator |
| GSI | : Geological Strength Index. |
| RQD | : Rock Quality Designation. |
| RMR | : Rock Mass Rating. |
| η_f | : Esfuerzo cortante. |
| ζ | : Esfuerzo normal. |
| c | : Cohesión. |
| ϕ | : Ángulo de fricción interna. |
| σ_{ci} | : Resistencia a compresión uniaxial del material intacto. |
| σ_1' y σ_3' | : Esfuerzos principales efectivos mayor y menor en el momento de rotura |
| ζ_1 | : Esfuerzo principal mayor. |
| ζ_3 | : Esfuerzo principal menor. |
| Ws | : peso de sólidos. |
| Cu | : coeficiente de uniformidad. |
| Cc | : coeficiente de curvatura. |
| Fs | : Factor de seguridad. |
| Em | : modulo intacto. |
| σ | : Tensión normal. |
| ζ' | : Esfuerzo efectivo. |
| c' | : Cohesión efectiva. |
| ϕ' | : Ángulo de fricción interna efectivo. |
| m_i | : Constante de roca intacta. |
| m_b | : Valor minorado de la constante m_i . |
| s y a | : Constantes del macizo rocoso. |
| D | : Factor de perturbación. |
| IP | : Índice Plástico. |
| LL | : Límite Líquido. |
| LP | : Límite Plástico. |
| SUCS | : Sistema Unificado de Clasificación de Suelo |

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El departamento de Cajamarca es una zona de abundante precipitación entre los meses de diciembre hasta abril, generando inestabilidad de taludes y deslizamientos en los cortes de las carreteras, produciendo problemas de comunicación y de comercio. En la carretera Kuntur Wasi que une Chilite con San Pablo y Empalme Ruta 3N (km 25) Carretera Cajamarca – Bambamarca en el tramo que corresponde al Km. 45+000 – Km 52+000, encontramos vertientes montañosas empinadas a escarpadas formadas por depósitos cuaternarios y afloramientos del volcánico San Pablo los cuales se encuentran meteorizados y fuertemente fracturados, generando inestabilidad en los taludes de las zonas críticas de la carretera.

La inestabilidad de taludes es un peligro inminente, que afecta el normal desenvolvimiento de las actividades económicas de los pobladores y el libre tránsito de vehículos, conllevando a generar pérdidas económicas, por ello fue necesario realizar una evaluación geotécnica, iniciando con la observación y descripción de cada uno de los taludes más propensos a la inestabilidad, hasta el análisis geotécnico, los cuales permitirán calcular los factores de seguridad. Al observar la inestabilidad de taludes surge la siguiente pregunta: ¿Cuál es la influencia que tienen las precipitaciones en el macizo rocoso y suelos del volcánico San Pablo para que se generen los deslizamientos en los taludes de las zonas críticas en la carretera Kuntur Wasi en el tramo Km. 45+000 – Km 52+000? El desarrollo del presente proyecto de investigación, implica tener una respuesta anticipada, considerando las características litológicas, morfológicas, estructurales, las cuales están relacionadas con el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos y los depósitos cuaternarios.

El tramo de carretera Kuntur Wasi en el tramo Km. 45+000 – Km 52+000 se encuentra asfaltada en su totalidad y construida sobre depósitos cuaternarios y afloramientos del volcánico San Pablo, con poca conservación de taludes, los cuales se encuentran en condiciones inestables a muy inestables debido a que no cuentan con un mantenimiento y se encuentran expuestos a las fuertes precipitaciones, además del continuo tránsito de vehículos pesados que generan vibraciones que afectan los taludes, teniendo como consecuencia el deterioro del asfalto, siendo afectados los pobladores de San Pablo. Con esta investigación se logró identificar y evaluar las zonas críticas que tienen mayor peligro a deslizamientos, conociendo las características geotécnicas de los taludes, siendo la investigación de tipo Descriptiva – Explicativa y Transversal. Por lo que el objetivo principal propuesto en la presente investigación, es determinar la inestabilidad de los taludes de las zonas críticas, de la carretera Kuntur Wasi en el tramo Km. 45+000 – Km 52+000, se cumplió los objetivos específicos, realizar el cartografiado de las unidades litológicas, estructurales, identificar las zonas críticas del tramo de carretera, definir los parámetros geomecánicos de los macizos rocos y depósitos cuaternarios, calcular los Factores de Seguridad de los taludes en las zonas críticas. El proyecto de investigación cuenta con los siguientes capítulos: en el primer capítulo se muestra una introducción al tema a investigar. El segundo capítulo los antecedentes a nivel internacional, nacional y local del tema a investigar, así como conceptos y teorías empleadas y las definiciones de términos básicos. En el tercer capítulo se muestra el método de trabajo, siguiendo un cronograma de trabajo en gabinete y campo; en ésta fase se lleva a cabo la recopilación de los datos que servirán como fundamento de la investigación. En el cuarto capítulo se expone el análisis y discusión de resultados a los cuales se han llegado durante el procesamiento de datos obtenidos en campo. En el capítulo cinco se presentan las conclusiones y resultados.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes teóricos de la investigación.

Zavaleta (2016), En su tesis: Evaluación geotécnica en zonas críticas de la carretera Cajabamba – Cauday, analiza los fenómenos geodinámicos en la zona de investigación, por lo que se busca establecer las condiciones geodinámicas de las litomorfoestructuras de las zonas críticas, que constituyen zonas de inestabilidad, las cuales permitirán definir las condiciones geodinámicas relacionadas con la carretera de alta transitividad Cajabamba - Cauday, concluye que la carretera presenta zonas inestables en los conglomerados de la Formación Condebamba, el cual se ve afectado en los periodos de precipitación, de la misma manera en la Formación Chicama encontramos deslizamientos activos debido al comportamiento geodinámico de los estratos de lutitas que afecta continuamente la transitabilidad en la carretera.

Ocón (2015), En su tesis: Evaluación geotécnica de inestabilidad de taludes en la carretera Hualgayoc – Apan Alto, analiza la inestabilidad de taludes en zonas críticas, teniendo en cuenta características litológicas, geomorfológicas, estructurales. Analiza también los factores de seguridad en zonas críticas, concluye que la presencia de pendientes abruptas que sobrepasan los 70°, litología pertenecientes a rocas sedimentarias e ígneas y estructuras fuertemente disturbadas que originan alto fracturamiento en los macizos rocosos.

Montoya (2014), Evaluación geotecnia de los taludes de la carretera Cruz Blanca – El Gavilán, donde se analiza la inestabilidad de los taludes de la carretera, teniendo en cuenta el contexto geológico local, regional y su relación estrecha que existen con los agentes geodinámicos, además se establece las diferencias entre los factores de seguridad de los taludes calculados con esfuerzos totales, efectivos

y un factor sísmico. Pues concluye en un decremento hasta del 98% de su factor de seguridad. También identifica zonas críticas altamente peligrosas, sectorizando y caracterizando por tramos los problemas de índole geotécnico.

Zavala (2011), Riesgos geológicos en la región de Cajamarca, en el ámbito regional como parte de las cuencas medio-altas de la vertiente pacífica, donde se evaluó la ocurrencia de peligros geológicos y geohidrológicos relacionados a procesos de geodinámica externa (movimientos en masa e inundaciones), y en menor porcentaje a sismos.

Torres (2007), Rehabilitación y mejoramiento de la carreta Chilete – San Pablo – empalme ruta 3N (Km25 carretera Cajamarca – Bambamarca), se realizó un estudio de impacto socio ambiental en el cual se pudieron identificar , evaluar, determinar y valorar los impactos ambientales potenciales, sobre el medio abiótico, medio biótico y medio socioeconómico y de interés humano, que se pudieran presentar a consecuencia de la ejecución de las actividades durante la etapa de construcción, operación y mantenimiento del presente proyecto.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Consideraciones generales sobre estabilidad de taludes.

Se comprende bajo el nombre genérico de talud toda superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, bien sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana en una obra de ingeniería. Los taludes se dividen en naturales (laderas) o artificiales (cortes y terraplenes).

En la mayor parte de los casos, el estudio de la estabilidad de taludes no puede realizarse a nivel general, sino talud por talud, ya que las inestabilidades suelen ir asociadas a la presencia de discontinuidades concretas con orientaciones determinadas. Cuando el coeficiente de seguridad de un talud bien calculado sea inferior a 1, es probable que se produzca su falla. (Ramírez & Monge, 2007).

La distinta naturaleza de las rocas que forman los macizos rocosos implica una problemática en su comportamiento ante la inestabilidad de taludes. El comportamiento de un macizo rocoso generalmente depende de las características de las discontinuidades (estratificación, diaclasas, fallas, esquistosidad, etc.), así como la litología de la matriz rocosa y su historia evolutiva, y que generalmente los diferentes modos de falla que se producen en los medios rocosos siguen superficies ya existentes. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

Un “talud” o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. En la literatura técnica se define como “ladera” cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y “talud” cuando se conformó artificialmente. Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas. (Suárez, 2009)

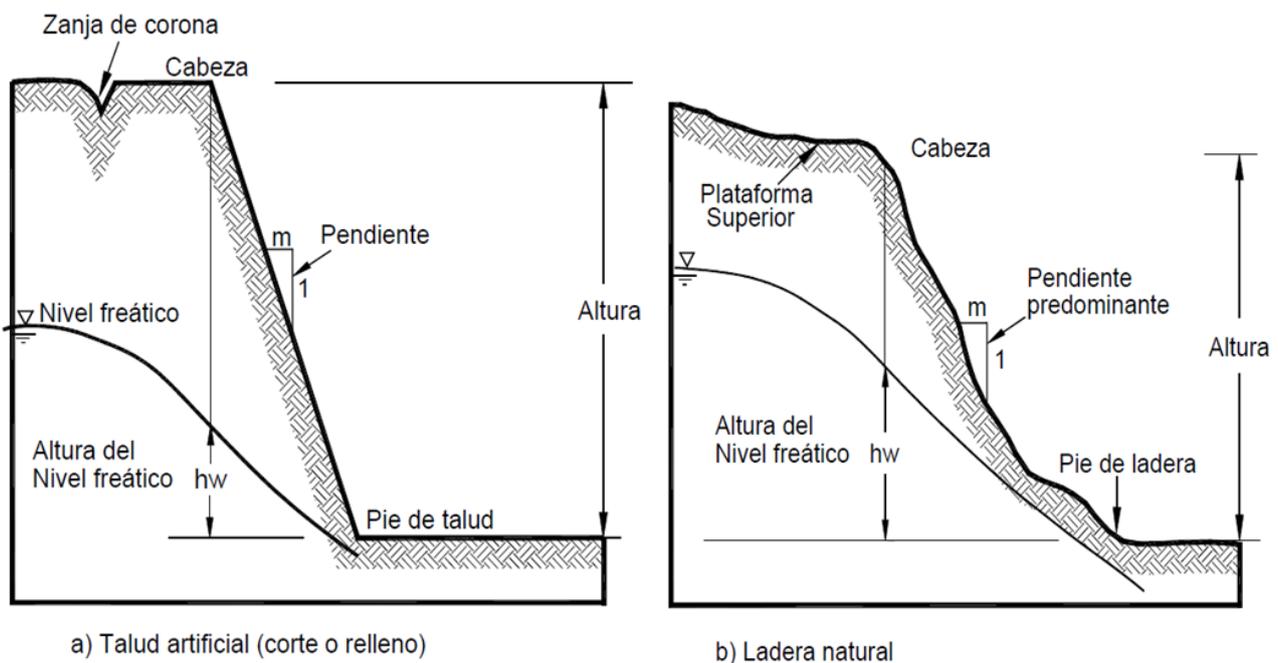


Figura 01. Tipos de taludes. (Suárez 2009)

2.2.2 Factores influyentes en la estabilidad de taludes.

La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), factores geológicos (que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos o relacionados con el comportamiento mecánico del terreno (resistencia y deformabilidad). El conocimiento de cada uno de estos factores permitirá un correcto análisis del talud, la evaluación del estado del mismo y diseñar medidas de prevención y corrección. (Gonzales de Vallejo, 2004).

La posibilidad de que se produzcan movimientos en un talud depende de la estructura geológica, la litología, las condiciones hidrogeológicas y la morfología propia del terreno. Una variación de dichos factores, por causas naturales o debidas a la actividad humana, puede traducirse en un incremento o disminución de las tensiones o de la resistencia al corte, cuyo efecto inmediato puede ser la inestabilidad de una masa de rocas. Los principales factores pueden desencadenar la inestabilidad de taludes son: el agua, el hielo y nieve, sismicidad y la actividad humana. (Ramírez & Monge, 2007).

Cuadro 01. Factores influyentes en la estabilidad de taludes

| FACTORES CONDICIONANTES | FACTORES DESENCADENANTES |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">➤ Estratigrafía y litología.➤ Estructura geológica.➤ Condiciones hidrogeológicas y comportamiento hidrogeológico de los materiales.➤ Propiedades físicas, resistentes y deformacionales.➤ Tensiones naturales y estado tenso-deformacional. | <ul style="list-style-type: none">➤ Sobrecargas estáticas.➤ Cargas dinámicas.➤ Cambios en las condiciones hidrogeológicas➤ Factores climáticos➤ Variaciones en la geometría.➤ Reducción de parámetros resistentes. |

Fuente. Gonzáles de Vallejo (2004)

2.2.3 Análisis de estabilidad.

El análisis de estabilidad permite diseñar los taludes mediante el cálculo de un factor de seguridad y definir el tipo de medidas correctoras que deben ser aplicadas

en caso de fallas potenciales. Para este procedimiento es necesario un estudio geológico y geomecánico de los materiales conformantes del talud, de los posibles mecanismos de rotura que pueden tener lugar y de los factores que influyen, condicionan y desencadenan las inestabilidades.

La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura inclinación), factores geológicos (presencia de planos de discontinuidad y zonas de debilidad y anisotropía), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos relacionados con el comportamiento mecánico del terreno es decir resistencia y deformabilidad.

La combinación de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies, y sea cinemáticamente posible el movimiento de un cierto volumen de masa de suelo o roca. La probabilidad de rotura y los mecanismos de esta están controlados principalmente por factores geológicos y geométricos, los cuales son intrínsecos a los materiales naturales (Gonzales de Vallejo, 2004).

2.2.4 Principales modos de inestabilidad.

En cualquier parte de la superficie terrestre la gravedad actúa continuamente sobre los materiales, que tienden a dirigirse hacia niveles más bajos. El término más comúnmente usado para designar los movimientos producidos en los taludes es el de deslizamiento. Dicho término implica movimientos de masas formadas por diferentes tipos de materiales: rocas, suelos, rellenos artificiales o también combinaciones de los mismos, a través de una superficie determinada denominada de rotura. La velocidad con que se desarrollan las roturas de los taludes es variable, dependiendo de la clase de material involucrado en los mismos y del tipo de deslizamiento. El movimiento puede ser progresivo, produciéndose inicialmente una rotura local, que va progresando hasta convertirse en una rotura generalizada. (Ramírez & Monge, 2007).

Los diferentes modos de falla en taludes están asociados con diferentes estructuras geológicas y es importante para el diseñador que podrá reconocer potenciales

problemas de inestabilidad durante la realización de las fases del proyecto. Algunas pueden ser identificadas mediante la representación y ploteo de polos en estereogramas. (Wyllie & Mah, 2004).

Desde el punto de vista mecánico, los modos de falla que se suelen producir mayormente en los taludes en roca se pueden dividir en cuatro grupos, a saber:

- Modos de falla por deslizamiento según uno o varios planos de discontinuidad que afloran en el talud y que incluirán los modos de falla plana y en cuña.
- Modos de falla por movimiento relativo de bloques a través de planos de discontinuidad preexistentes que no afloren necesariamente y que incluirán los modos de falla por volteo o vuelco, algunas fallas que siguen discontinuidades paralelas al talud y las fallas de varios bloques.
- Modos de falla producidas parte por deslizamiento a lo largo de planos de discontinuidad y parte por rotura de la roca y que incluirán los modos de falla en escalón, mixtas, complejas y por pandeo.
- Modos de falla que se producen siguiendo una superficie circular, sin relación importante con los planos de junta, y que en términos generales se denominan fallas circulares.

Dentro de este encuadre general, los modos de rotura que se producen de manera más frecuente en el ámbito de las ingenierías civil y minera son la rotura plana, la rotura en cuña, la rotura por vuelco, la rotura circular y la rotura siguiendo discontinuidades paralelas al talud. (Ramírez & Monge, 2007).

2.2.5 Fallas con control estructural.

Falla plana.

Se entiende por falla plana, o rotura planar, como aquella donde el deslizamiento se produce a través de una única superficie plana. Siendo la más sencilla de las formas de rotura posibles, produciéndose cuando existe una fracturación dominante en la roca y convenientemente orientada respecto al talud. Previendo el deslizamiento cuando el rumbo de la familia de discontinuidades es similar al del

talud y su buzamiento menor que este. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

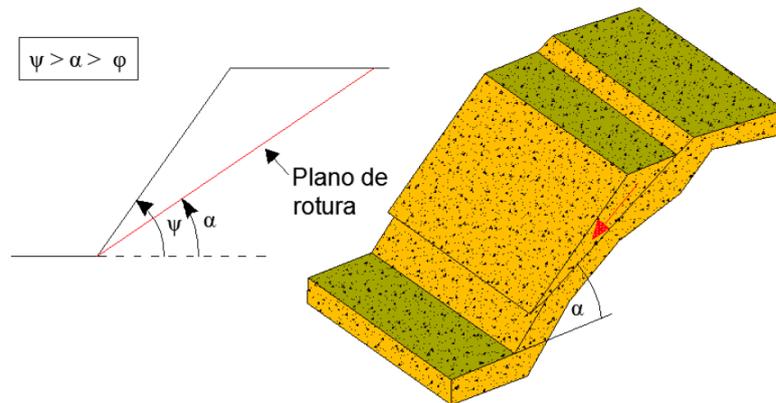


Figura 02. Roturas planas en los bancos de un talud. (González de Vallejo 2004)

Falla por cuña.

La falla en cuña es un tipo de deslizamiento traslacional que está controlado por dos o más discontinuidades (estratificación, esquistosidad, diaclasa, falla, etc). Este tipo de deslizamiento generalmente se encuentra en macizos rocosos resistentes, con discontinuidades bien marcadas. Este tipo de fallas es sin duda una de las más comunes en taludes excavados en roca, fácilmente observados en canteras. (Ramírez & Monge, 2007).

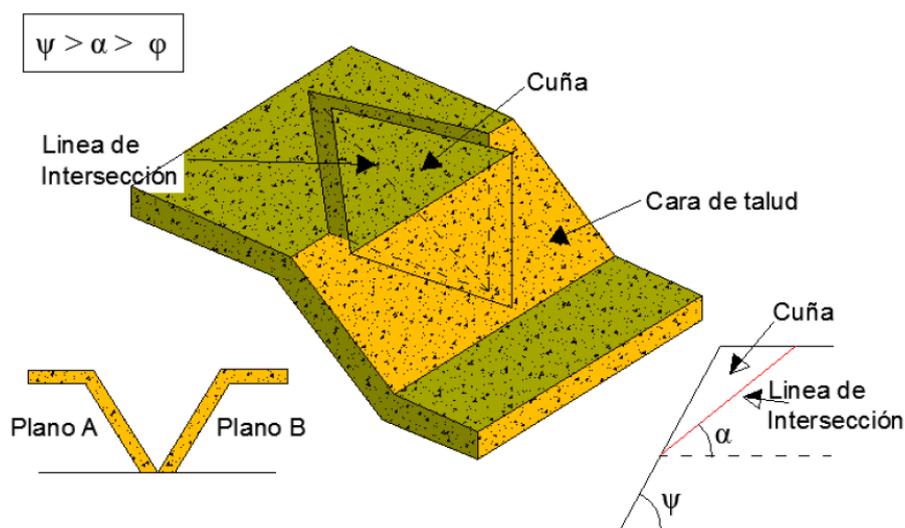


Figura 03. Planos de una cuña deslizada en un talud rocoso. (González de Vallejo 2004)

Falla por vuelco.

Una rotura o falla por volcamiento se produce debido a la existencia de un set de fracturas paralelas o subparalelas y otro set perpendicular o sub-perpendicular. Estas estructuras forman bloques los cuales pierden la adhesión a la matriz y pueden rotar por sobre la base por efectos de la gravedad (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

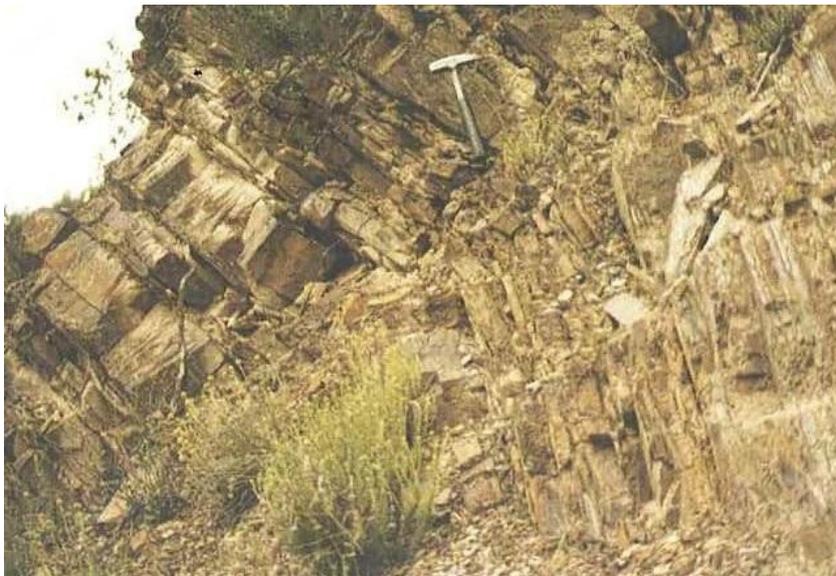


Figura 04. Bloques rocosos de un talud que han sufrido proceso. (González de Vallejo, 2004)

2.2.6 Fallas sin control estructural.

Caída de rocas.

Es el tipo de falla más simple y sucede cuando una roca suelta, o varias, se movilizan producto de una pequeña perturbación que hace cambiar su estado desde reposo a movimiento, rodando por el talud hasta quedar detenida. Su predicción es muy difícil y por tanto se recurre comúnmente a métodos de contención de rocas en la caída más que al modelamiento de la falla misma, por lo tanto modelos de simulación de caída relativas de rocas sueltas son capaces de producir razonablemente predicciones de trayectorias de caída de rocas. (Ramírez & Monge, 2007).

Falla circular.

También conocida como deslizamiento o rotura rotacional, es producida por muchos sets de fallas, las cuales tienen distintos rumbos y manteos, y dejan la roca muy fracturada, perdiendo la cohesión. Por la cantidad de fracturas, el macizo rocoso se transforma en una especie de gravilla, la que desliza por la cara del talud, tal como se muestra en la Figura 5. Esta aproximación de rotura se hace cuando no es posible determinar la familia de discontinuidades que controla la inestabilidad (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

Este tipo de rotura además de producirse en terrenos homogéneos, cumple con la condición de que el tamaño de las partículas de suelo sea muy pequeña en comparación con el tamaño del talud (es decir que dado su forma no son susceptibles de lograr cohesión).

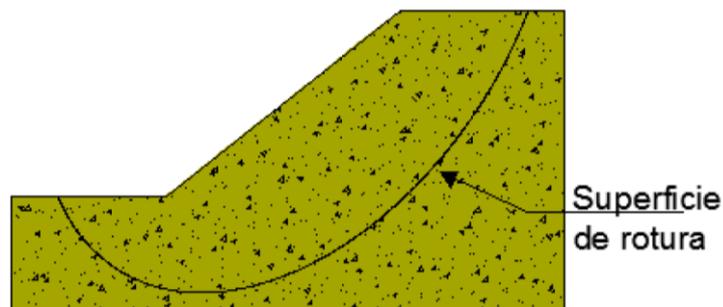


Figura 05. Forma de falla circular. .(González de Vallejo, 2004)

2.2.7 Clasificación de los macizos rocosos.

Las clasificaciones se basan en factores que determinan su comportamiento geomecánico:

- Propiedades de la matriz rocosa.
- Frecuencia y tipo de las discontinuidades, que definen el grado de fracturación, el tamaño y la forma de los bloques del macizo, sus propiedades hidrogeológicas, etc.
- Grado de meteorización o alteración.
- Estado de tensiones in situ.
- Presencia de agua.

Criterio de Hoek y Brown generalizado

El criterio se dedujo a partir de los resultados de las investigaciones de Hoek de roturas frágiles de rocas intactas y de un modelo de estudio del comportamiento de macizos rocosos de Brown, el criterio parte de las propiedades de la roca intacta.

El Criterio de Hoek y Brown en su última versión tiene la misma expresión que la versión generalizada del año 1997, pero introduce un nuevo parámetro, el factor de alteración (D), dando lugar a una distinta formulación para la obtención de los valores m_b , s y a .

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

El factor D representa un factor reductor de la resistencia que depende del grado de alteración que ha sufrido el macizo rocoso por efecto de voladuras o descompresión, es decir por efectos antrópicos. Adopta valores desde 0 para la roca no alterada en condiciones in situ, hasta el valor de 1 para roca muy alterada. Los autores presentan una tabla con valores estimados del factor de alteración D para distintos estados del macizo rocoso.

El valor m_b es el valor reducido del correspondiente al material intacto m_0 y viene dado por la siguiente expresión:

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right)$$

Los valores s y α vienen dados por las siguientes expresiones:

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

Con esta expresión se produce una transición suave de los parámetros del modelo tanto en función del GSI como de la incidencia de la alteración, perturbación, de origen humano.

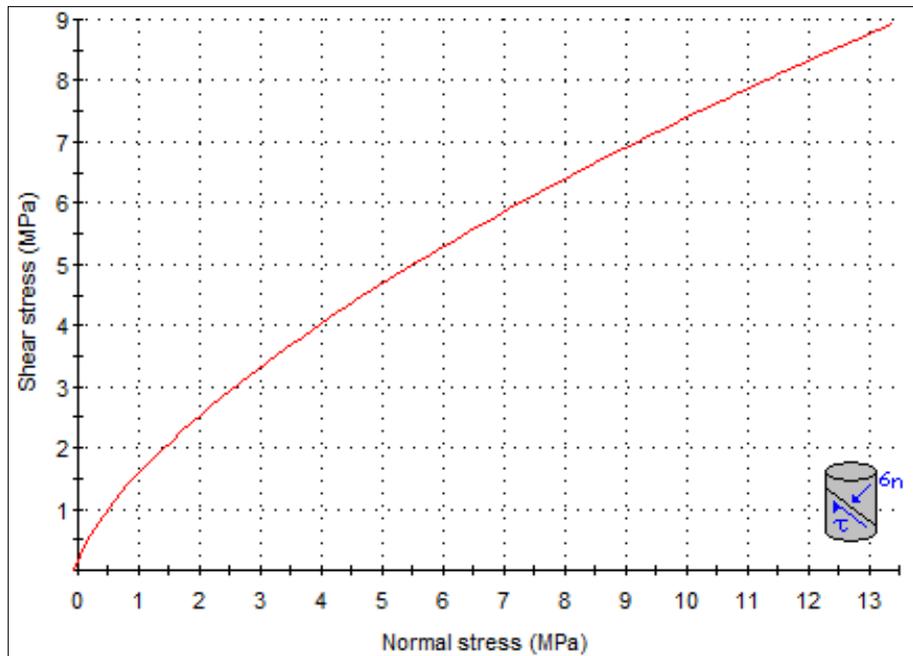


Figura 06. Representación del criterio de Hoek y Brown, en el espacio de tensiones normal y tangencial (Rock Lab, 2018).

Criterio de Mohr-Coulomb.

Introducido por primera vez en el año 1973, inicialmente realizado para el estudio de suelos. A partir de una serie de pruebas de compresión, llevadas a cabo sobre muestras idénticas de suelo, con presiones de confinamiento diferentes, representadas por un conjunto de círculos de Mohr que representan la falla. Se ha definido en la práctica que una envolvente de falla es tangente a estos círculos, representándose como una línea recta sobre un amplio rango de tensiones. La ecuación de la envolvente se puede expresar de la misma forma que la ley de coulomb.

$$t = c' + \tan\phi'$$

Dónde:

c' = la cohesión, en efectivas. Es una constante que representa la tensión cortante que puede ser resistida sin que haya ninguna tensión normal aplicada.

ϕ' = el ángulo de rozamiento interno.

τ = la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura.

σ = la tensión normal que actúa en el plano de rotura.

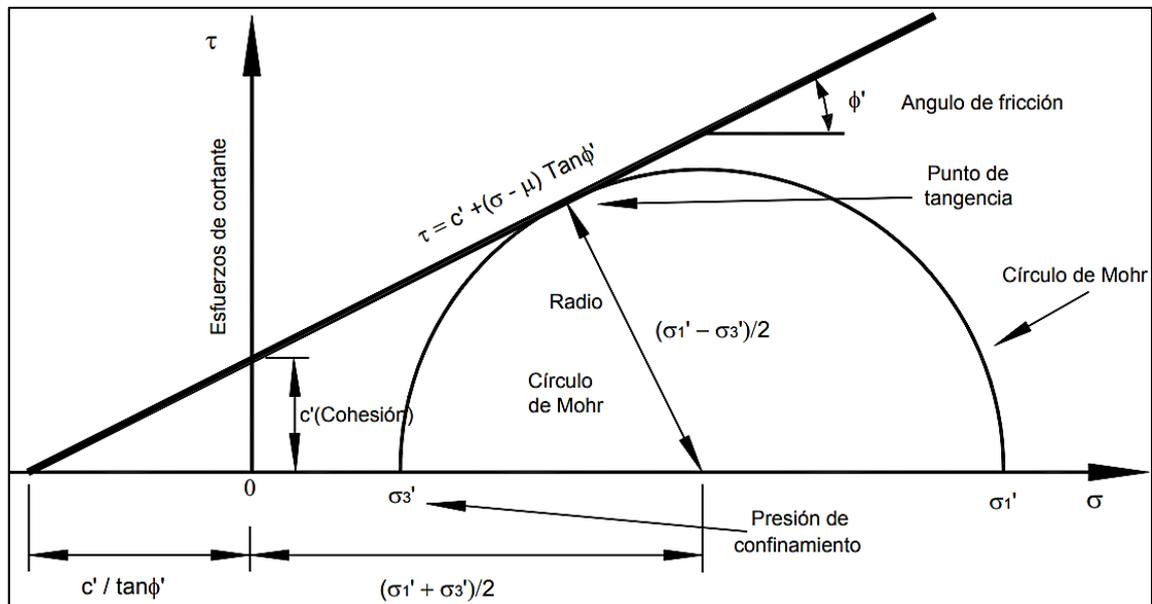


Figura 07. Representación gráfica de la ecuación de Coulomb.(Suarez, 2019)

La ventaja del criterio de Mohr-Coulomb es su simplicidad. Sin embargo presenta inconvenientes para el caso de la matriz rocosa, sobre todo los relacionados con el comportamiento tensión-deformación no lineal de los macizos rocosos, por lo que no es un criterio adecuado para la estimación de su resistencia. No obstante, en determinados casos el criterio puede ser empleado para macizos rocosos resistentes en los que la rotura se produzca a favor de superficies de discontinuidad, teniendo en cuenta que deben adoptarse valores para la cohesión y para el ángulo de rozamiento representativo del macizo rocoso. Bieniawski (1979) propone unos valores orientativos para ambos parámetros, en función de la calidad del macizo rocoso dada por el índice RMR (González de Vallejo, 2004).

Cuadro 02. Valores aproximados para c y ϕ del macizo rocoso según su calidad

| Valores aproximados para c y ϕ del macizo rocoso según su calidad | | | | | |
|---|-------|-----------|-----------|-----------|-------|
| Clase de roca | I | II | III | IV | V |
| RMR | > 80 | 61 - 80 | 41 - 60 | 21 - 40 | < 20 |
| Cohesión (Mpa) | > 0.4 | 0.3 - 0.4 | 0.2 - 0.3 | 0.1 - 0.2 | < 0.1 |
| Ángulo rozamiento interno | > 45° | 35° - 45° | 25° - 35° | 15° - 25° | < 15 |

Fuente. Gonzáles de Vallejo (2004)

2.2.8 Clasificaciones geomecánicas.

Son numerosos los métodos de cualitativos y cuantitativos establecidos por diversos autores para clasificar la complejidad del comportamiento geomecánico de los distintos macizos rocosos, los cuales han sido mejorados al paso de los años gracias a nuevas investigaciones y sus formas de entender la geomecánica, además con el empleo de software se ha podido establecer las relaciones entre las distintas teorías y así establecer un modelo cuasi generalizado, entre ellos: RQD (Rock Quality Designation), y también los sistemas que emplean múltiples parámetros GSI (Geological Strength Index), RMR (Rock Mass Rating), entre otros.

Rock Quality Designation (RQD).

El índice RQD (Designación de la calidad de roca), fue propuesto para proveer un estimado cuantitativo de la calidad de la masa rocosa, a partir de los testigos de diamantina. Palmstrom (1982) sugirió que, cuando los testigos no estén disponibles para la traza de discontinuidades; expresando el grado de fracturación, partir de cartografiado geotécnico en función al número de fracturamiento por metro cúbico (J_r), determinadas al realizar el levantamiento litológico – estructural en área o zona determinada. (Deere, 1967)

$$RQD = 100 \exp^{-0.1\lambda} (0.1 \lambda + 1)$$

Geological Strength Index (GSI).

El Índice de Resistencia Geológica, GSI, fue desarrollado por Hoek (1994) para subsanar los problemas detectados con el uso del índice RMR para evaluar la resistencia de macizos rocosos según el criterio generalizado de Hoek-Brown. Este índice de calidad geotécnica se determina en base a dos parámetros que definen la resistencia y la deformabilidad de los macizos rocosos:

| ÍNDICE GEOLOGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>) A partir de la clasificación obtenida seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI. | | CONDICIÓN DEL FRENTE | | | | | |
|---|--|---|--|---|---|--|--|
| ESTRUCTURA | | MUY BUENA (MB) Superficie muy rugosa sin alterar | BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación | MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas | POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos | MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos | |
|  | BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno. | 80 | | | | | |
|  | BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos. | 70 | 60 | | | | |
|  | BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado. Plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos. | | 50 | 40 | | | |
|  | FRACTURACION INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos. | | | 30 | 20 | 10 | |

Figura 08. Estimación del índice GSI en base a descripciones geológicas. (Hoek y Brown, 1997)

Rock Mass Rating (RMR).

Esta clasificación fue propuesta por Bieniawski en 1976, y posteriormente modificada por el mismo autor en 1989, González de Vallejo (2004) define al RMR. “Constituye un sistema de clasificación del macizo rocoso que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y de excavación y sostenimiento en túneles.

Cuadro 03. Parámetros de clasificación RMR (Bieniawski 1989).

| Parámetros de clasificación RMR (Bieniawski 1989) | | | | | | | |
|---|---------------------------------------|---|----------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | Resistencia 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 |
| | | <i>Puntuación</i> | 15 | 12 | 7 | 4 | 2 1 0 |
| 2 | | RQD | 90% - 100% | 75% - 90% | 50% - 75% | 25% - 50% | < 25% |
| | | <i>Puntuación</i> | 20 | 17 | 13 | 6 | 3 |
| 3 | | Separación entre diaclasas | > 2 m | 0.6 - 2 m | 0.2 - 0.6 m | 0.06 - 0.2 m | <0.06 m |
| | | <i>Puntuación</i> | 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 |
| | | <i>Puntuación</i> | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| | | Abertura | Nada | < 0.1 mm | 0.1 - 1.0 mm | 1 - 5 mm | > 5 mm |
| | | <i>Puntuación</i> | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |
| | | Rugosidad | Muy rugosa | Rugosa | Ligeramente rugosa | Ondulada | Suave |
| | | <i>Puntuación</i> | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 |
| | | Relleno | Ninguno | Relleno duro < 5 mm | Relleno duro > 5 mm | Relleno blando < 5 mm | Relleno blando > 5 mm |
| <i>Puntuación</i> | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 | | |
| | Alteración | Inalterada | Ligeramente alterada | Moderadamente alterada | Muy alterada | Descompuesta | |
| <i>Puntuación</i> | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | |
| 5 | Agua freática | Caudal por 10 m de túnel | Nulo | < 10 litros/min | 10-25 litros/min | 25-125 litros/min | > 125 litros/min |
| | | Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor | 0 | 0 - 0.1 | 0.1 - 0.2 | 0.2 - 0.5 | > 0.5 |
| | | Estado general | Seco | Ligeramente húmedo | Húmedo | Goteando | Agua fluyendo |
| | <i>Puntuación</i> | 15 | 10 | 7 | 4 | 0 | |

Fuente. González de Vallejo (2004)

Cuadro 04. Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR.

| Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR | | | | |
|--|-----------|----------------|--------------------------|----------------------|
| Clase | Calidad | Valoración RMR | Cohesión | Ángulo de rozamiento |
| I | Muy buena | 100 - 81 | > 4 kg/cm ² | > 45° |
| II | Buena | 80 - 61 | 3 - 4 kg/cm ² | 35° - 45° |
| III | Media | 60 - 41 | 2 - 3 kg/cm ² | 25° - 35° |
| IV | Mala | 40 - 21 | 1 - 2 kg/cm ² | 15° - 25° |
| V | Muy mala | < 20 | <1 kg/cm ² | < 15° |

Fuente. González de Vallejo (2004)

2.2.9 Características geotécnicas de los depósitos cuaternarios.

Los depósitos cuaternarios se forman por los procesos de erosión y climáticos, destacando el medio de transporte y la meteorización. Los distintos medios de sedimentación originan una serie de depósitos cuyas características geotécnicas están relacionadas con las condiciones de formación de estos sedimentos. Así, la clasificación de los materiales, granulometría, forma y tamaño, dependen del medio de transporte.

Granulometría.

Consiste en clasificar por tamaños los granos que componen un suelo. Con dicha distribución se puede determinar otras propiedades del mismo. Dependiendo de la composición del suelo el método a usar puede ser por tamices o por hidrómetro.

El análisis mecánico consiste en segregar el suelo por medio de una serie de tamices y luego clasificarlos por el tamaño de las partículas.

Se tienen dos opciones para clasificar los suelos, siendo SUCS y AASHTO las alternativas a escoger. Usaremos la primera como método de clasificación, la segunda es usada con frecuencia para el diseño de carreteras y vías, por lo que para nosotros incumbe, (Braja, 2001).

Límites de Atterberg

A principios de 1900, un científico sueco, Albert Mauritz Atterberg desarrollo un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con contenidos de agua variables. A muy bajo contenido de agua, el suelo se comporta más como un sólido frágil. Cuando el contenido de agua es muy alto, el suelo y el agua fluyen como un líquido. Por tanto, dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica arbitrariamente en cuatro estados básicos, denominados sólido, semisólido, plástico y líquido, como muestra la figura 09.

Límite líquido (LL)

Consiste en una copa de bronce y una base de hule duro. La copa de bronce se deja caer sobre la base por una leva operada por una manivela. Para la prueba del límite líquido se coloca una pasta en la copa. Se corta una ranura en el centro de la pasta de suelo, usando la herramienta de corte estándar. Luego, con la leva operada por la manivela, se levanta la copa y se deja caer desde una altura de 10 mm.

Límite plástico (PL)

El límite plástico se define como el contenido de agua, en porcentaje, con el cual el suelo, al ser enrollado en rollitos de 3.2 mm de diámetro, se desmorona. El límite plástico es el límite inferior de la etapa plástica del suelo. La prueba es simple y se lleva a cabo enrollando repetidamente a mano sobre una placa de vidrio una masa de suelo de forma elipsoidal.

El índice de plasticidad (PI) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico de un suelo.

$$LL - LP = IP$$

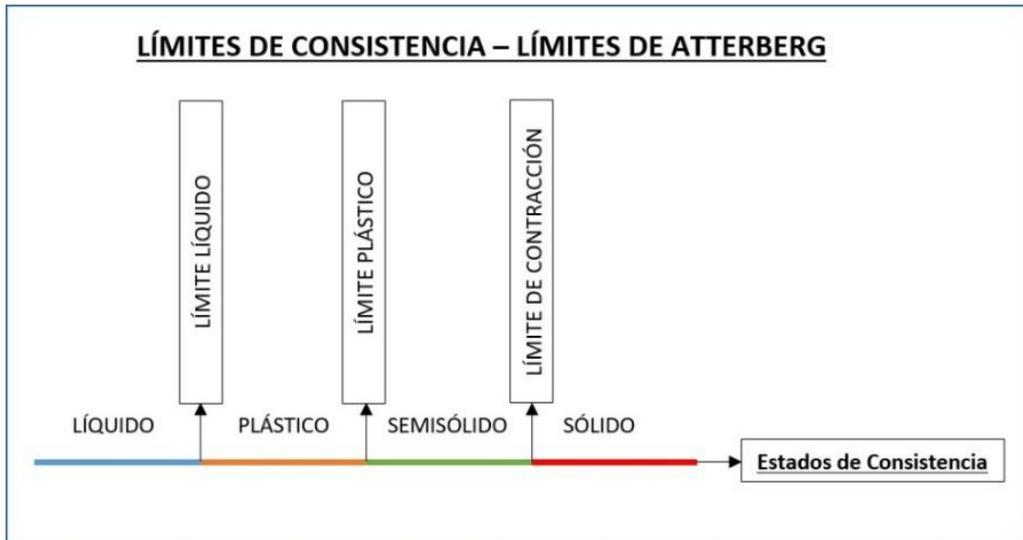


Figura 09.Limites de Atterberg. (Braja 2001)

El Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) nos da valores aproximados de las propiedades mecánicas para los diferentes tipos de suelos que se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 05.Propiedades mecánicas de los suelos según SUCS

| GRUPO | Resistencia al corte (tensiones efectivas) | |
|-------|--|-----------|
| | C°(kg/cm ²) | tanφ |
| GW | - | >0.79 |
| GP | - | >0.74 |
| GM | 0.05 | >0.67 |
| GC | 0.05 | >0.60 |
| SP | - | 0.72-0.76 |
| SM | 0.13-0.27 | 0.65-0.69 |
| SC | 0.09-0.21 | 0.59-0.73 |
| SC | 0.05-0.17 | 0.53-0.67 |
| ML | 0.09 | 0.58-0.66 |
| CL | 0.22 | 0.56-0.68 |
| CL | 0.1-0.15 | 0.50-0.58 |
| MH | 0.11-0.29 | 0.42-0.52 |

Fuente. Amer Ali Al-Rawas & Mattheus F.A. Goosen, (2006)

2.3 Definición de términos básicos

Macizo rocoso. Masa rocosa afectada por discontinuidades o superficies de debilidad (Gonzales de Vallejo, 2002).

Suelo. Cobertura superficial de la corteza terrestre producto de la alteración de los minerales de las rocas pre-existentes. La formación del suelo implica la meteorización química de los minerales primarios dando lugar a nuevos minerales. (Dávila, 2011).

Geodinámica. Parte de la geología física o geomorfología que estudia los fenómenos geológicos que provocan modificaciones en la superficie terrestre por acción de los esfuerzos tectónicos internos (geodinámica interna) o esfuerzos externos (geodinámica externa) (Dávila, 2011).

Zonas críticas. Delimitación espacial que hace referencia del estado actual respecto a variables físicas y temporales. (Dávila, 2011).

Litología. Es la parte de la geología que trata de las rocas, especialmente de su tamaño de grano, del tamaño de las partículas y de sus características físicas y químicas. Incluye también su composición, su textura, tipo de transporte así como su composición mineralógica, distribución espacial y material cementante. (Lexis, 1980).

Arcilla. Partículas finas con tamaño de grano menor a 0.002 mm, provenientes de la alteración física y química de rocas y minerales (MTC, 2013).

Estructuras. Disposición, arreglo y cohesión de los materiales constituyentes de un determinado cuerpo rocoso. Determina el desarrollo del relieve terrestre, tanto superficial o subterráneo. (Dávila, 2011).

Talud. Una superficie de terreno expuesta situada a un ángulo con la horizontal se llama talud o pendiente no restringida, y puede ser natural o construido (Braja, 1984).

Diaclasas. Fractura o juntura que aparece en el cuerpo de una roca ocasionalmente producida por los esfuerzos tectónicos, presentando direcciones definidas a las cuales se les denomina sistemas de diaclasas. Las diaclasas tienen especial importancia en el modelado terrestre dado que facilita la erosión. El diaclasamiento está controlado por la estructura geológica y por las deformaciones tectónicas (Dávila, 2011).

Falla. Desplazamiento de un bloque rocoso con respecto a otro colindante a éste o de ambos bloques, a través de un plano denominado "plano de falla". Las fallas son producto de esfuerzos tectónicos, producto de la epirogenesis, orogenia, diastrofismo, tectónica de placas o cualquier otro tipo de desplazamiento de parte de la corteza. Una falla ocasiona discontinuidad de las estructuras geológicas. Los esfuerzos pueden ser: tensionales, compresionales, verticales (en ambos sentidos) o inclinados, dando lugar a diversos tipos de fallas. Los elementos de una falla son: plano de falla, bloque superior o techo, bloque inferior o piso, desplazamiento de la falla o rechazo, espejo de falla, etc. (Dávila, 2011).

Geodinámica. Parte de la geología física o geomorfología que estudia los fenómenos geológicos que provocan modificaciones en la superficie terrestre por acción de los esfuerzos tectónicos internos (geodinámica interna) o esfuerzos externos (geodinámica externa). (Dávila, 2011).

Deslizamiento. Deslizamiento de masas rocosas o de suelo por la pérdida de estabilidad, que puede ser por saturación de agua, presencia de materiales arcillosos que actúan como lubricantes, fuertes inclinaciones de las vertientes u otras causas. La acción humana puede muchas veces acelerar el proceso de deslizamiento, por la utilización sin el estudio debido, de las áreas de posibles deslizamientos. (Dávila, 2011).

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación de la zona de estudio

La carretera Kuntur Wasi se encuentra ubicada dentro del Cuadrángulo de Chota (14 f), con coordenadas UTM, sistema WGS-84, zona 17S, abarca una longitud de 7 km y las coordenadas se ubican en el cuadró 06.

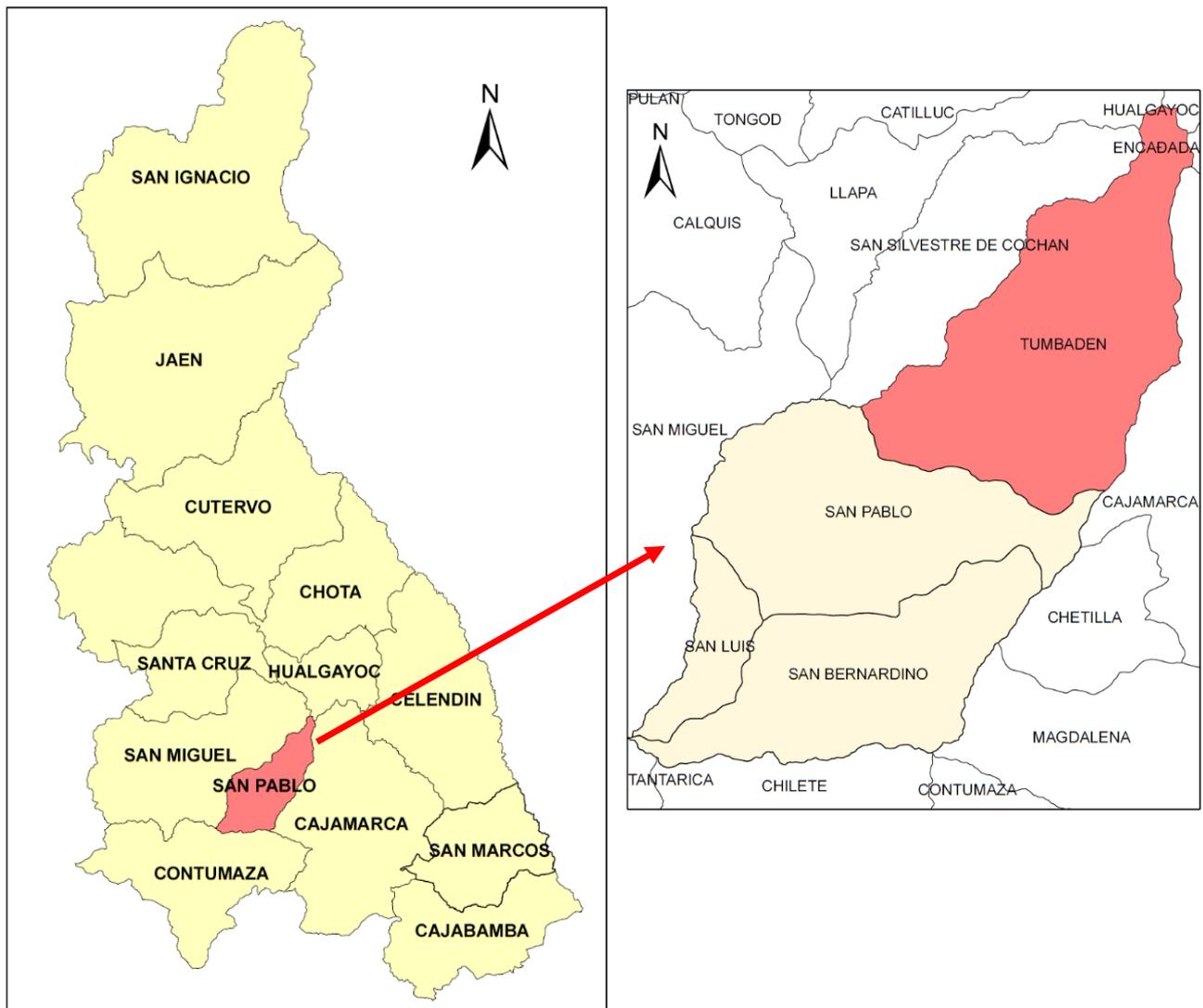


Figura 10. Ubicación de zona estudio.

Cuadro 06.Coordenadas del área de estudio.

| Vértices | Norte | Este | Cota |
|----------------------|--------------|-------------|-------------|
| Punto Inicial | 9220500 | 747064 | 3260 |
| Punto Final | 9219775 | 750421 | 3400 |

Políticamente se encuentra ubicado en:

Departamento : Cajamarca

Provincia : San Pablo

Distrito : Tumbaden

3.2 Tipo y método de investigación

El tipo de investigación fue descriptivo - explicativo. El método de investigación utilizado será deductivo – inductivo.

3.3 Accesibilidad.

El acceso hacia el punto de inicio de la zona de estudio, se realiza desde la ciudad de Cajamarca, por la carretera principal hacia la ciudad de Bambamarca, llegando hasta el km 25 de dicha carretera, en aquel punto se tomara el desvío por la carreta Kuntur Wasi hasta el km 45. Esta carretera se encuentra asfaltada en su totalidad.

Cuadro 07.Accesos hacia la zona de estudio

| Ruta | Distancia (Km) | Vía | Estado | Tiempo (min) |
|--|-----------------------|------------|---------------|---------------------|
| Km 25 carretera Cajamarca – Bambamarca | 25 km | Asfaltada | bueno | 35 |
| Carretera Kuntur Wasi | 27 km | Asfaltada | bueno | 40 |

3.4 Clima y vegetación.

La zona de estudio se encuentra a una altitud promedio de 3000 m.s.n.m ubicándose en la región quechua (2300-3500 m.s.n.m).

Se caracteriza por la existencia de precipitaciones durante gran parte del año, siendo los periodos más lluvioso los meses de octubre a abril, periodo en el que se

descarga entre el 75% y 95% del total anual de las precipitaciones pluviales. Presenta una temperatura que varía desde los 20° C al medio día, hasta 3° C por las noches.

En la zona se pueden encontrar diversos tipos de vegetaciones como eucaliptos, alisos, pinos, pastos naturales que en su mayoría de la familia de las gramíneas, con predominancia de los géneros *Stypa*, *Eragrostis*, *Calamagrostis*, *Festuca*. (CESEL S.A, 2008)

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.5.1 Técnicas empleadas para el acopio de la información serán:

- Cartografiado en la que se reunieron, realizaron y analizaron las medidas tomadas en el campo para luego representarlas gráficamente.
- Registro Fotográficas de la zona de estudio mediante el uso de cámara fotográfica.
- Medición en campo de los taludes con el uso del flexómetro.
- Toma de rumbo y buzamiento con brújula.

3.5.2 Instrumentos para la recolección de datos.

- Matriz para el Registro geológico – geotécnico (Rodríguez 2016).
- Plano topográfico y geológico en sistema WGS-84
- GPS GARMIN MAP 60 CSX Navegador, para toma de puntos y georreferenciación.
- Picota de geólogo Estwing, extracción de muestras.
- Lupas de 10X y 20X aumentos, utilizada para observas las muestras.
- Brújula Brunton Azimutal, utilizada para la toma de pendientes, rumbos y buzamientos.
- Rayador punta Carburo de Tungsteno para estimar la dureza de las muestras.
- Flexómetro de 8m - 3M, medida de taludes.
- Libreta de campo para anotar datos obtenidos en campo.
- Cámara Fotográfica Digital Sony 18 Mp, registró fotográfico.

3.6 Análisis e interpretación de datos

Los datos que se obtuvieron en campo de las diferentes zonas críticas, fueron transferidos a una base de datos, para luego ser procesados en los siguientes softwares: ArcGis 10.3, RocLab 1.0, y Slide V6.0.

3.7 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Los datos tomados en campo fueron procesados por una computadora haciendo uso de software los cuales han sido indicados anteriormente, con el procesamiento de los datos se obtuvo los planos (peligrosidad, geotécnico, geológico, y geodinámico) y modelos geotécnicos que demuestran el comportamiento de los taludes a lo largo de la carretera

3.8 Control de calidad de datos

La calidad de datos es un aspecto muy importante que debe ser considerado ya que se pueden cometer errores al tomar los datos en campo, como medidas con GPS, wincha y brújula geotécnica; siendo muy importante un previo análisis de los equipos y comprobar que se encuentren en buen estado, y de este modo minimizar los márgenes de error al momento tomar los datos con los equipos.

3.9 Geología local

En la carretera Kuntur Wasi afloran distintas formaciones con edades comprendidas desde el Paleógeno hasta el Cuaternario, el piso estratigráfico es el volcánico San Pablo, representado por rocas volcánicas del Paleógeno y Depósitos Cuaternarios del Holoceno.

3.9.1 Volcánico San Pablo

Se llama así a la secuencia superior del Grupo Calipuy que aflora en los alrededores del pueblo de San Pablo y noreste de San Miguel (fuera del área). Consiste de gruesos bancos de rocas volcánicas, intercaladas en la base con areniscas rojizas

y en la parte superior de una espesa secuencia de aglomerados y piroclásticos bien estratificados.

El Volcánico San Pablo aflora en el valle de Jequetepeque yaciendo con suave discordancia erosional al Volcánico Chilete, pero no sería raro encontrarlo suprayaciendo directamente sobre las rocas del Cretáceo en discordancia angular. Subyace al Volcánico Huambos con igual relación.

Sus afloramientos se extienden ampliamente por la Cordillera Occidental, de tal forma que en muchos lugares, especialmente fuera del área, el Grupo Calipuy está representado sólo por restos volcánicos, cuya composición es generalmente dacítica y en menor proporción andesítica.

En la siguiente imagen podemos ver una roca con moderado fracturamiento, presencia de venillas primarias que son cortadas por venillas secundarias de óxidos de hierro, oxidación moderada posible zona de alteración argílica, Las venillas primarias son de limonita y son cortadas por venillas de hematita.



Foto 01. Dacitas altamente erosionadas por la presencia de agua.

3.9.2 Depósitos Cuaternarios

Conformados por depósitos coluvio - aluviales, rodados de 20 cm a 50cm aproximadamente, con óxidos de hierro (limonita, hematita y gohetita), estos se han formado a partir de materiales acumulados por acción de las precipitaciones y la gravedad. Se encuentran distribuidos en superficies de laderas, en piedemontes de colinas y montañas, en la zona de estudio se caracterizan por tener fragmentos de areniscas, clastos sub redondeados y redondeados.

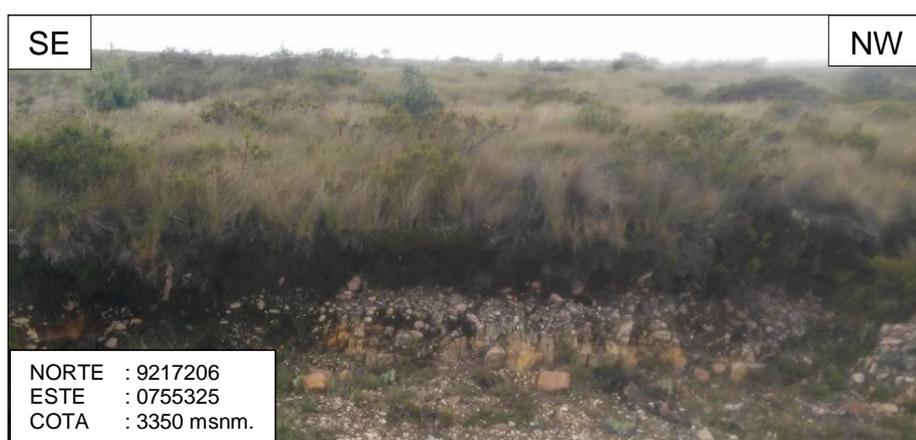


Foto 02. Depósitos cuaternarios en la zona de Pozo Seco.

3.10 Geología estructural

Las rocas que afloran en la carretera kuntur Wasi en el tramo Km. 45+000 – Km 52+000 se pudo observar que no han sufrido efectos de deformación tectónica regional, en el área de estudio, no se muestra influencia directa en la estructura estratigráfica de la carretera a lo largo del tramo estudiado.

Fallas

En la zona de estudio no se ha identificado fallamiento intenso pero si se aprecia fracturas, el mismo que tienen como rumbo NE-SW perpendicular al corredor estructural regional sin embargo esto no es relevante en cuanto a la estabilidad de un talud en el proyecto porque se encuentra ubicado en zonas de taludes bajos en altura.

Diaclasas

En las rocas Volcánicas expuestas en nuestro proyecto se encuentran diaclasamiento en la formación volcánico San Pablo las que tienen direcciones NE-SW y NW-SE; es por esta razón que fue necesario hacer un estudio de Mecánica de rocas.

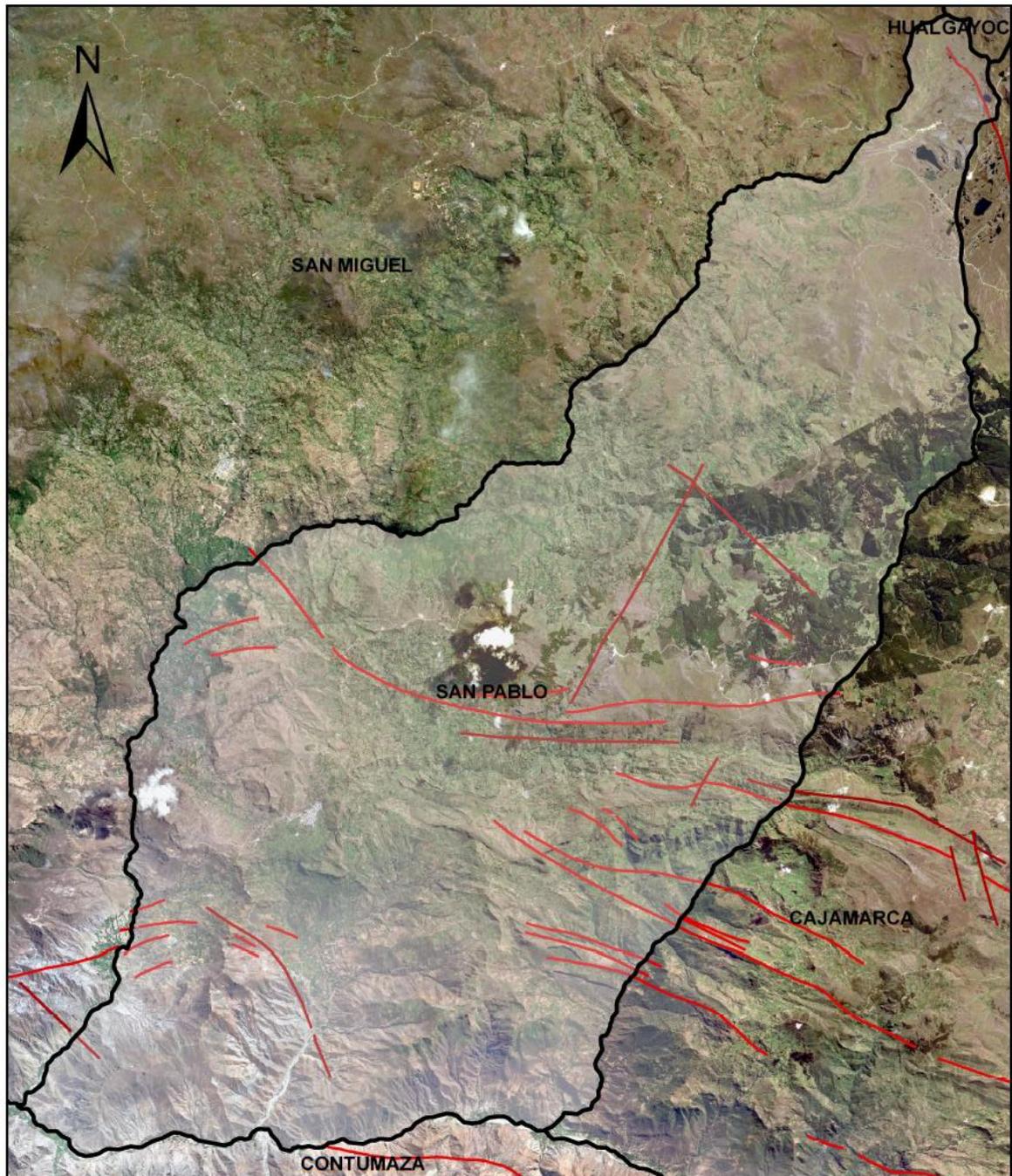


Figura 11. Base estructural de la provincia de San Pablo.

3.11 Unidades Morfológicas

En la zona de estudio hay un clima lluvioso intenso y la presencia de vegetación en casi su totalidad, presenta una altura máxima de 3400 m.s.n.m y una mínima de 3100 m.s.n.m. Para determinar las unidades geomorfológicas tomamos como referencia la clasificación de alturas y pendientes para lo cual utilizamos como referencia los intervalos definidos en la siguiente tabla:

Cuadro 08.Unidades geomorfológicas

| Pendientes | Descripción |
|------------|-------------|
| 0° - 8° | Planicies |
| 8° - 20° | Lomadas |
| 20° - 50° | Laderas |
| 50° - 90° | Escarpas |

Fuente. Rodríguez (2018)

Planicie (0° a 8°)

Presenta una superficie homogénea, ligeramente ondulada, constituida por depósitos aluviales, depositados durante el Holoceno, aprovechada para actividades agrícolas y ganaderas. Comprendida dentro del rango de 0° a 8°,



Foto 03.Planicie formada al margen de la carretera. (Quebrada Misho).

Lomadas (8° a 20°)

Terreno de superficie heterogénea, con elevaciones de bajo ángulo y pendientes suaves ya que está comprendida entre los 8° a 20°, se encuentran en poco porcentaje en la zona de estudios.

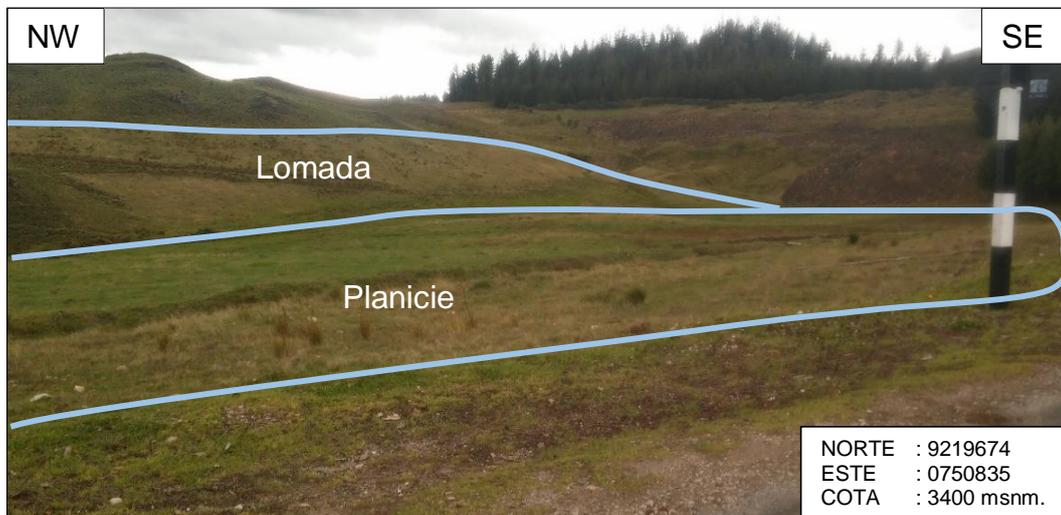


Foto 04.Lomada formada al sureste de la carretera. (Quebrada Misho).

Laderas (20° a 50°)

Terreno relativamente inclinado y heterogéneo, con inclinaciones que están comprendidas entre los 20 ° a 50 °, se encuentran en su mayoría en la zona de estudios. Estas áreas son aprovechadas para la agricultura y pastoreo.



Foto 05.Ladera formada al margen izquierdo de la carretera. (Cruce al centro poblado de Maraypampa)

Escarpas (50° a más)

Dávila, (2011) la describe como: “Fuerte desnivel en los terrenos que delimita a dos superficies más o menos planas”. Consideradas en un intervalo de 50° a 90°. La presencia de escarpas en la zona es en poco porcentaje



Foto 06. Escarpa formada al margen derecho de la quebrada peña negra.

3.12 Estudio geotécnico

Para realizar la evaluación geotécnica se emplearon técnicas de campo en las cuales se identificaron las zonas críticas del tramo de carretera y se realizara mediante la observación de los taludes a lo largo de toda la longitud de la zona en estudio, una vez identificadas cuales son las zonas más representativas e inestables, se les dará una calificación de acuerdo al grado de inestabilidad que presenten.

Una vez recolectados los datos se iniciara el trabajo en gabinete, los datos tomados en cada estación geomecánica serán anotados en la ficha de registro geológico - geotécnico como: Coordenadas UTM, cota, formación geológica, la meteorización, grado de fracturamiento, calidad de la roca (RQD), índice geológico de resistencia (GSI), así como las propiedades de las discontinuidades como: el tipo de

discontinuidad o fractura, espaciado, persistencia, abertura, rugosidad, relleno, alteración y meteorización; todos estos datos fueron analizados para poder caracterizar el macizo rocoso y obtener el RMR de Bieniawski(1989) de cada estación geomecánica, el estudio detallara el comportamiento geodinámico, tipo de material y problemas geotécnicos. Para definir el comportamiento geomecánico y geológico de los macizos rocos y depósitos cuaternarios se utilizaran los softwares Rocklab y Slide respectivamente. Para Determinar los factores de seguridad de los taludes inestables se realizara mediante el software Slide.

3.12.1 Estación N° 01:

En el talud está constituido por limos arcillosos, El talud tiene una altura de 26 m., con una pendiente de 45°; muy erosionado, en la parte superior los suelos presentan vegetación.



Foto 08. Talud conformado por limos arcillosos, en la progresiva 52+000.

Ensayo: Análisis granulométrico en seco de las muestras obtenidas en la estación N° 1, progresiva 52+000.

Cuadro 09. Análisis granulométrico de la calicata M – 1

| | φ (mm) | Peso retenido (gr) | % Ret Parcial (%) | P. Ret Acumulado (gr) | (%)Ret Acumulado (%) | Acumulado que pasa (%) |
|--------|----------------|--------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| 1" | 25.30 | 61.70 | 4.78% | 61.70 | 4.78% | 95.222% |
| 3 / 4" | 18.45 | 116.50 | 9.02% | 178.20 | 13.80% | 86.20% |
| 1 / 2" | 12.70 | 139.40 | 10.79% | 317.60 | 24.59% | 75.41% |
| 3 / 8" | 9.53 | 119.10 | 9.22% | 436.70 | 33.82% | 66.18% |
| 1 / 4" | 6.35 | 132.10 | 10.23% | 568.80 | 44.05% | 55.95% |
| N° 4 | 4.76 | 76.80 | 5.95% | 645.60 | 49.99% | 50.01% |
| N° 10 | 2.00 | 161.10 | 12.47% | 806.70 | 62.47% | 37.53% |
| N° 20 | 0.84 | 130.50 | 10.11% | 937.20 | 72.57% | 27.43% |
| N° 30 | 0.59 | 56.00 | 4.34% | 993.20 | 76.91% | 23.09% |
| N° 40 | 0.43 | 54.20 | 4.20% | 1047.40 | 81.11% | 18.89% |
| N° 60 | 0.25 | 56.30 | 4.36% | 1103.70 | 85.47% | 14.53% |
| N° 100 | 0.15 | 82.80 | 6.41% | 1186.50 | 91.88% | 8.12% |
| N° 200 | 0.07 | 91.20 | 7.06% | 1277.70 | 98.94% | 1.06% |
| < 200 | | 13.70 | 1.06% | 1291.40 | 100.00% | 0.00% |

Pms: Peso de muestra seca, P.R.P: Pesos retenidos parciales, % R.P: Porcentaje de pesos retenidos en cada tamiz, % R.A: Porcentajes retenidos acumulados en cada tamiz, %A: Porcentajes acumulados que pasan en cada tamiz.

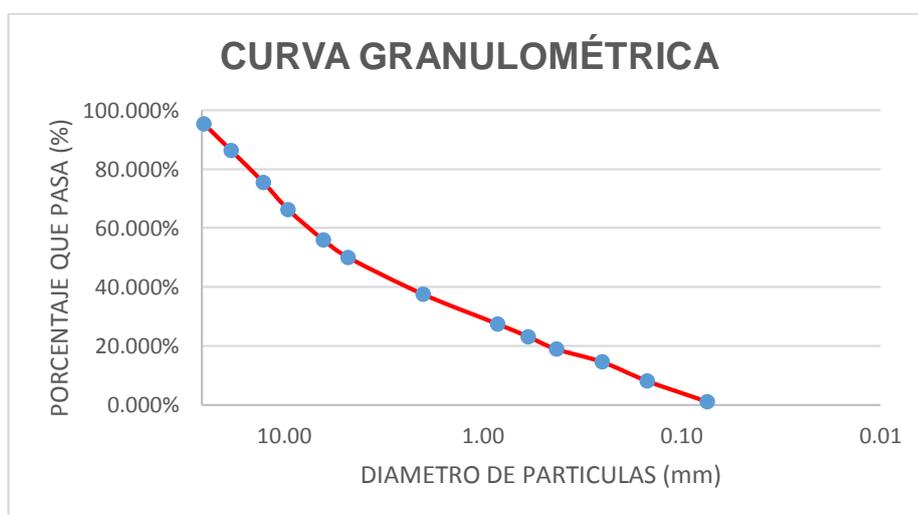


Figura 12. Curva granulométrica

Cuadro 10. Límites de consistencia.

| | LIMITE LIQUIDO | | | | LIMITE PLASTICO | | | |
|--------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-----|-------|
| | 60 | T40 | L24 | D27 | G6 | R5 | | |
| TARA | 60 | T40 | L24 | D27 | G6 | R5 | | |
| Nro. DE GOLPES | 35 | 32 | 27 | 16 | --- | --- | I | 30.00 |
| PESO TARA | 27.7 | 27.9 | 27.5 | 27.1 | 26.4 | 27.2 | II | 26.32 |
| PESO TARA + SUELO HUMEDO (gr) | 40.9 | 37.8 | 41.5 | 39.5 | 32.9 | 34.4 | III | ----- |
| PESO TARA + MUESTRA SECA (gr) | 36.7 | 34.6 | 36.9 | 35.2 | 31.4 | 32.9 | | |
| PESO DEL AGUA | 4.2 | 3.2 | 4.6 | 4.3 | 1.5 | 1.5 | = | 28.16 |
| PESO SUELO SECO | 9 | 6.7 | 9.4 | 8.1 | 5 | 5.7 | | |
| CONTENIDO DE HUMEDAD (%) | 46.67 | 47.76 | 48.94 | 53.09 | 30.00 | 26.32 | | |
| LIMITE LIQUIDO : | | | | 48.8 | | | % | |
| LIMITE PLASTICO : | | | | 28.16 | | | % | |
| INDICE DE PLASTICIDAD : | | | | 20.64 | | | % | |

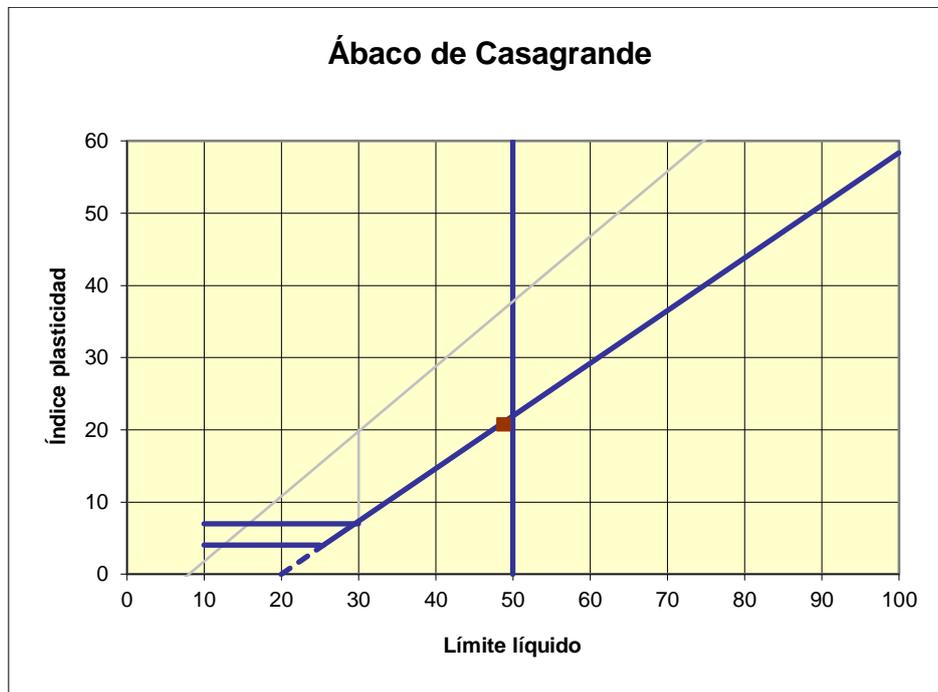


Figura 13. Sistema unificado de clasificación de suelos (S.U.C.S.)

Interpretación Slide v.6.005.

Tomando las medidas reales del talud y su entorno, se consideró que está compuesto por un suelo limo arcilloso (Sistema unificado de clasificación de suelos S.U.C.S.).

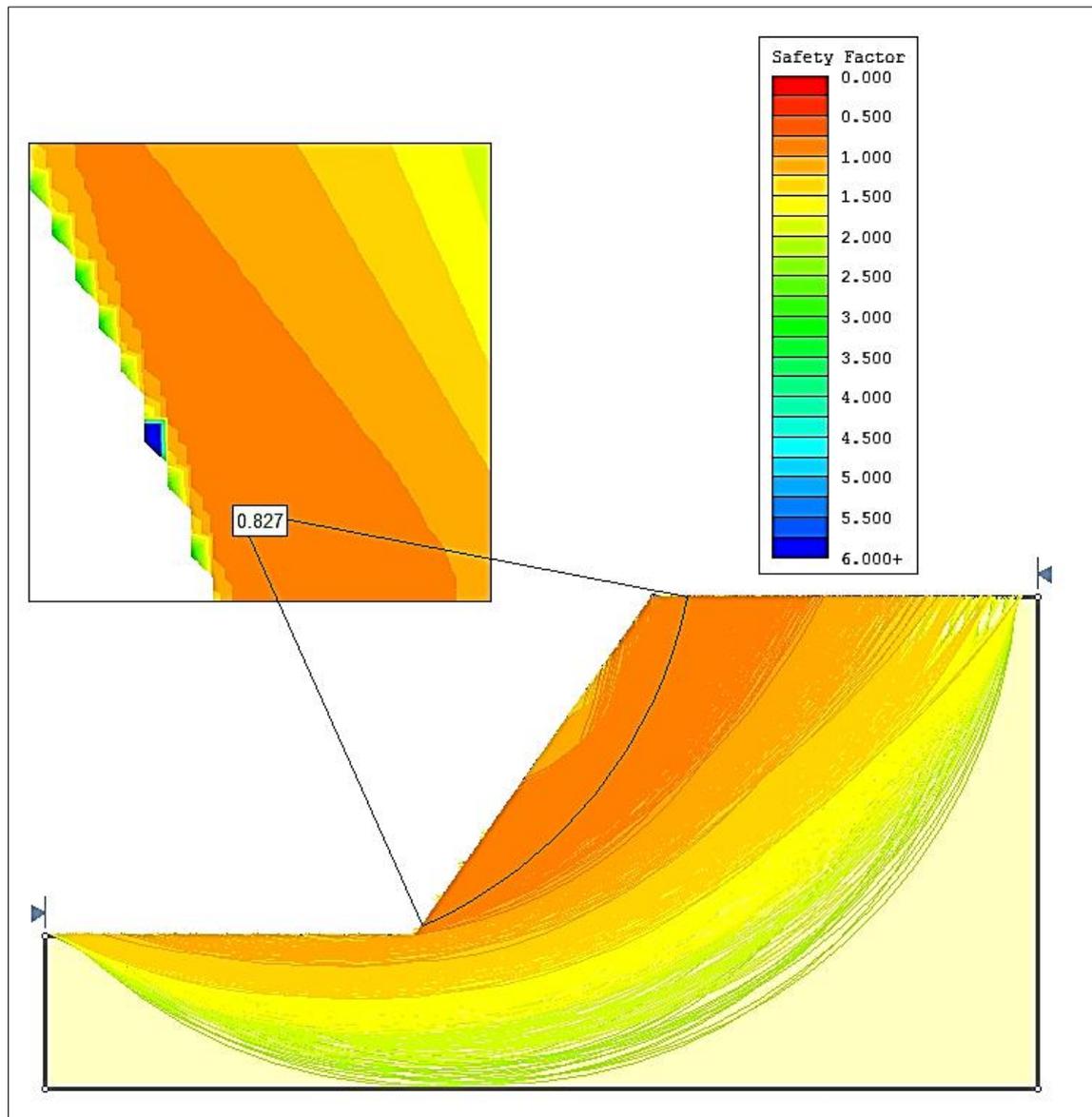


Figura 14. Método Bishop simplificado evalúa el talud (Estación N° 01), con un FS igual a 0.827

3.12.2 Estación N° 02:

Descripción del talud.

Talud presentando características de inestabilidad, conformada por un macizo rocoso de dacita, altamente fracturados y con presencia de óxidos, la litología pertenece al volcánico San Pablo.



Foto 09. Talud conformado por dacita fracturada en la progresiva 45+500.

Caracterización del macizo.

Asignación de puntaje. (Clasificación geomecánica Bieniawski 1989.)

Cuadro 11. Asignación de valores para el macizo rocoso, E-02.

| VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR) | | | | | | | |
|---|---------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|---|
| PARAMETRO | RANGO DE VALORES Y VALORACIONES | | | | | Val | |
| Resistencia a compresión uniaxial (Mpa) | >250 (15) | 250-100 (12) | 100-50 (7) | 50-25 (4) | <25 (2) <5 (1) <1(0) | 7 | |
| RDD (%) | 90 -100 (20) | 75 – 90 (17) | 50-75 (13) | 25-50 (8) | <25 (3) | 13 | |
| Espaciamiento (M) | >2 m (20) | 0.6 – 2 m (15) | 0.2–0.6 (10) | 0.06-0.2 (8) | <0.06 (5) | 5 | |
| Condición de las Juntas | Persistencia | < 1m (6) | 1-3 m (4) | 3-10 m (2) | 10-20m (1) | >20 m (0) | 1 |
| | Abertura | Cerrada (6) | < 0.01 mm (5) | 0.1-1.0 mm (4) | 1-5 mm (1) | >5mm (0) | 4 |
| | Rugosidad | Muy Rugosa (6) | Rugosa (5) | Lig. Rugosa (3) | Lisa (1) | Suave (0) | 5 |
| | Relleno | Ninguno (6) | Duro < 5mm (4) | Duro >5mm (2) | Suave <5mm (1) | Suave > 5mm (0) | 1 |
| | Alteración | Sana (6) | Lig. Alt (5) | Moder. Alt. (3) | Muy Alterada (1) | Descompuesta (0) | 3 |
| AGUA SUBTERRANEA | Seco (15) | Ligeramente Húmedo (10) | Húmedo (7) | Goteando (4) | Agua Fluyendo (0) | 10 | |
| VALOR TOTAL RMR | | | | | | 49 | |

Clasificación RMR.

Según la clasificación geomecánica RMR tenemos una roca de clase III, y calidad regular.

Cuadro 12. Clasificación de calidad de roca, según valor RMR para la E-02.

| VALOR RMR = | | | | | | 49 |
|------------------------|-------------|----------|-------------|---------|------------|---------|
| CLASE DE MACIZO ROCOSO | | | | | | |
| RMR | 100 - 81 | 80 - 61 | 60 - 41 | 40 - 21 | 20 - 0 | III |
| DESCRIPCIÓN | I MUY BUENA | II BUENA | III REGULAR | IV MALA | V MUY MALA | REGULAR |

Asignación de valor GSI.

| ÍNDICE GEOLOGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strenth index</i>) | | CONDICIÓN DEL FRENTE | | | | |
|--|--|---|--|---|---|--|
| A partir de la clasificación obtenida seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI. | | MUY BUENA (MB) Superficie muy rugosa sin alterar | BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación | MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas | POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos | MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos |
| ESTRUCTURA | | | | | | |
|  | BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortoganales, sin relleno. | 80 | 70 | | | |
|  | BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o mas familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos. | | 60 | 50 | | |

El punto de asignación se encuentra en la intersección de la estructura de bloques irregulares (BI) y la condición de frente media (M), con un valor GSI de 44.

Figura 15. Asignación de GSI para el macizo rocoso de la estación N° 02.

Interpretación Rock Lab V.1

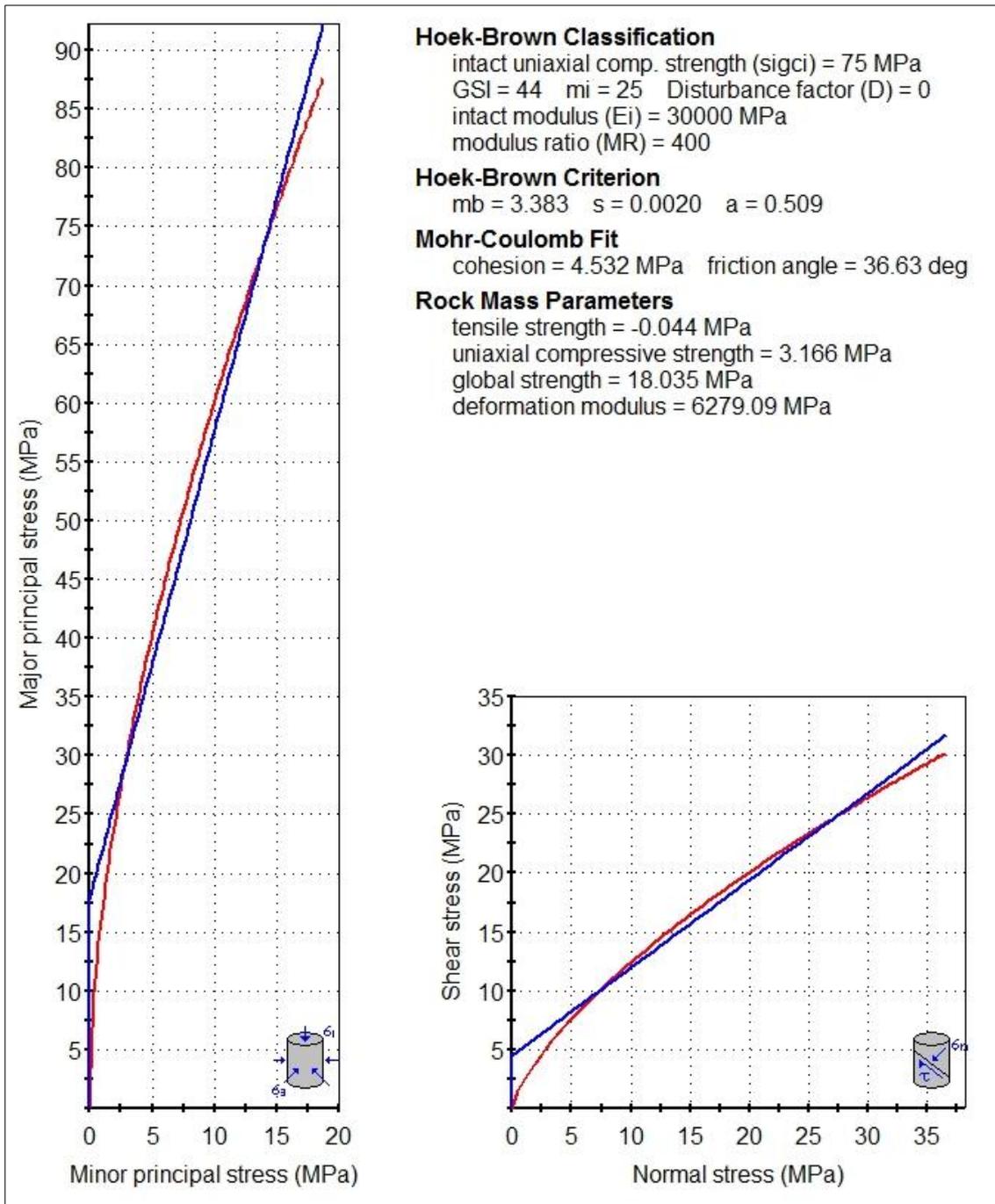


Figura 16. Grafica de esfuerzos para la Estación N° 02

Interpretación Slide v.6.005.

Tomando las medidas reales del talud y su entorno, y considerando la roca constituyente del talud se encuentra altamente fracturada, consideramos un GSI igual a 44.

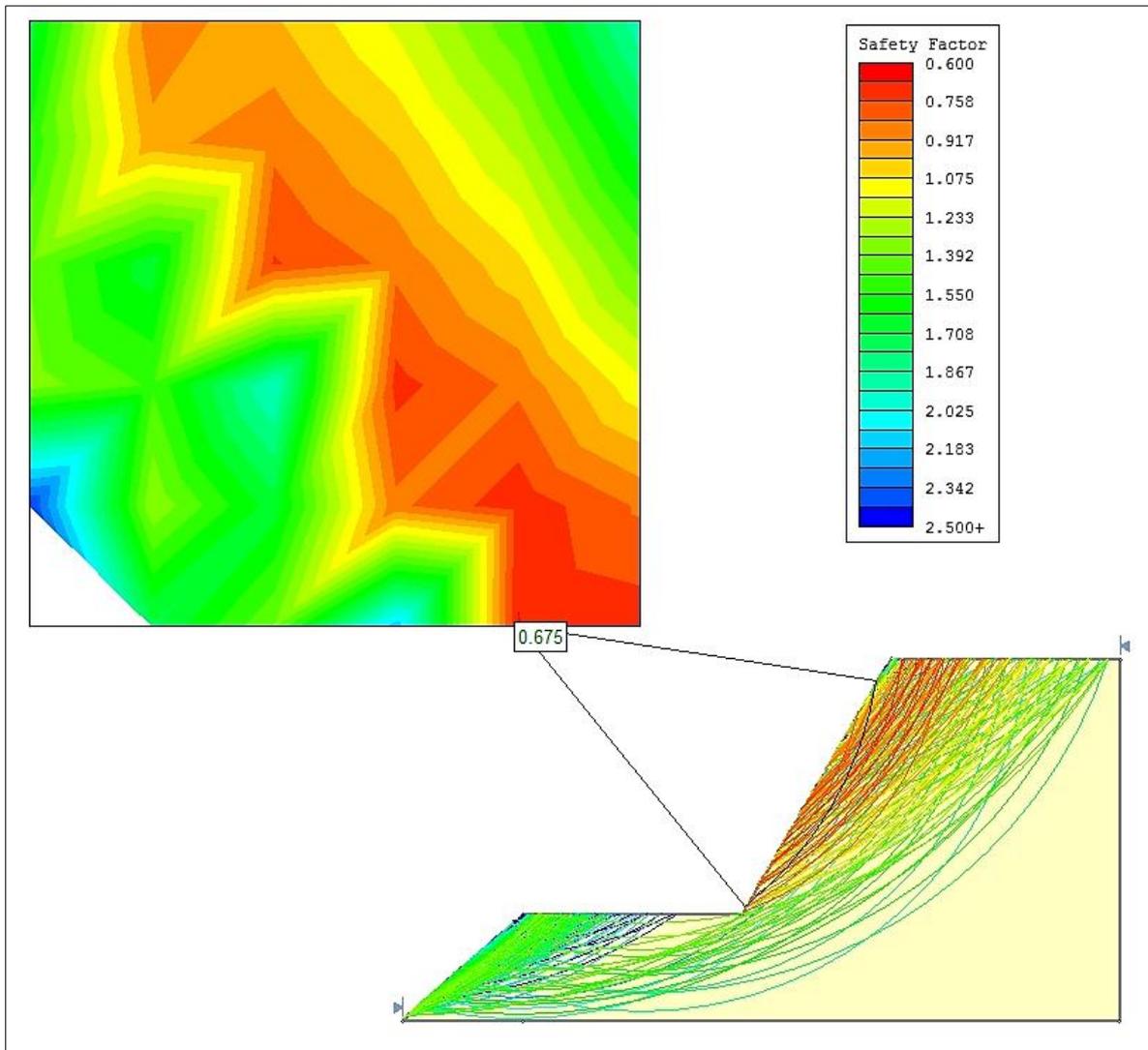


Figura 17. Método Bishop simplificado evalúa el talud (Estación N° 02), con un FS igual a 0.675

3.12.3 Estación N° 03:

Descripción del talud.

Talud que presenta características de inestabilidad, altamente erosionado por la presencia de agua, las diaclasas están rellenas de arcilla y óxidos la litología pertenece al volcánico San Pablo.



Foto 10. Talud altamente erosionado y fracturado en la progresiva 46+900.

Caracterización del macizo

Asignación de puntaje. (Clasificación geomecánica Bieniawski 1989.)

Cuadro 13. Asignación de valores para el macizo rocoso, E-03.

| VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR) | | | | | | | |
|---|---------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|---|
| PARAMETRO | RANGO DE VALORES Y VALORACIONES | | | | | Val | |
| Resistencia a compresión uniaxial (Mpa) | >250 (15) | 250-100 (12) | 100-50 (7) | 50-25 (4) | <25 (2) <5 (1) <1(0) | 2 | |
| RDD (%) | 90 -100 (20) | 75 – 90 (17) | 50-75 (13) | 25-50 (8) | <25 (3) | 8 | |
| Espaciamiento (M) | >2 m (20) | 0.6 – 2 m (15) | 0.2–0.6 (10) | 0.06-0.2 (8) | <0.06 (5) | 5 | |
| Condición de las Juntas | Persistencia | < 1m (6) | 1-3 m (4) | 3-10 m (2) | 10-20m (1) | >20 m (0) | 1 |
| | Abertura | Cerrada (6) | < 0.01 mm (5) | 0.1-1.0 mm (4) | 1-5 mm (1) | >5mm (0) | 1 |
| | Rugosidad | Muy Rugosa (6) | Rugosa (5) | Lig. Rugosa (3) | Lisa (1) | Suave (0) | 5 |
| | Relleno | Ninguno (6) | Duro < 5mm (4) | Duro >5mm (2) | Suave <5mm (1) | Suave > 5mm (0) | 1 |
| | Alteración | Sana (6) | Lig. Alt (5) | Moder. Alt. (3) | Muy Alterada (2) | Descompuesta (0) | 2 |
| AGUA SUBTERRANEA | Seco (15) | Ligeramente Húmedo (10) | Húmedo (7) | Goteando (4) | Agua Fluyendo (0) | 10 | |
| VALOR TOTAL RMR | | | | | | 35 | |

Clasificación RMR.

Según la clasificación geomecánica RMR tenemos una roca de clase IV, y calidad mala.

Cuadro 14. Clasificación de calidad de roca, según valor RMR para la E-03.

| VALOR RMR = | | | | | | 35 |
|------------------------|-------------|----------|-------------|---------|------------|------|
| CLASE DE MACIZO ROCOSO | | | | | | |
| RMR | 100 - 81 | 80 - 61 | 60 - 41 | 40 - 21 | 20 - 0 | IV |
| DESCRIPCIÓN | I MUY BUENA | II BUENA | III REGULAR | IV MALA | V MUY MALA | MALA |

Asignación de valor GSI.

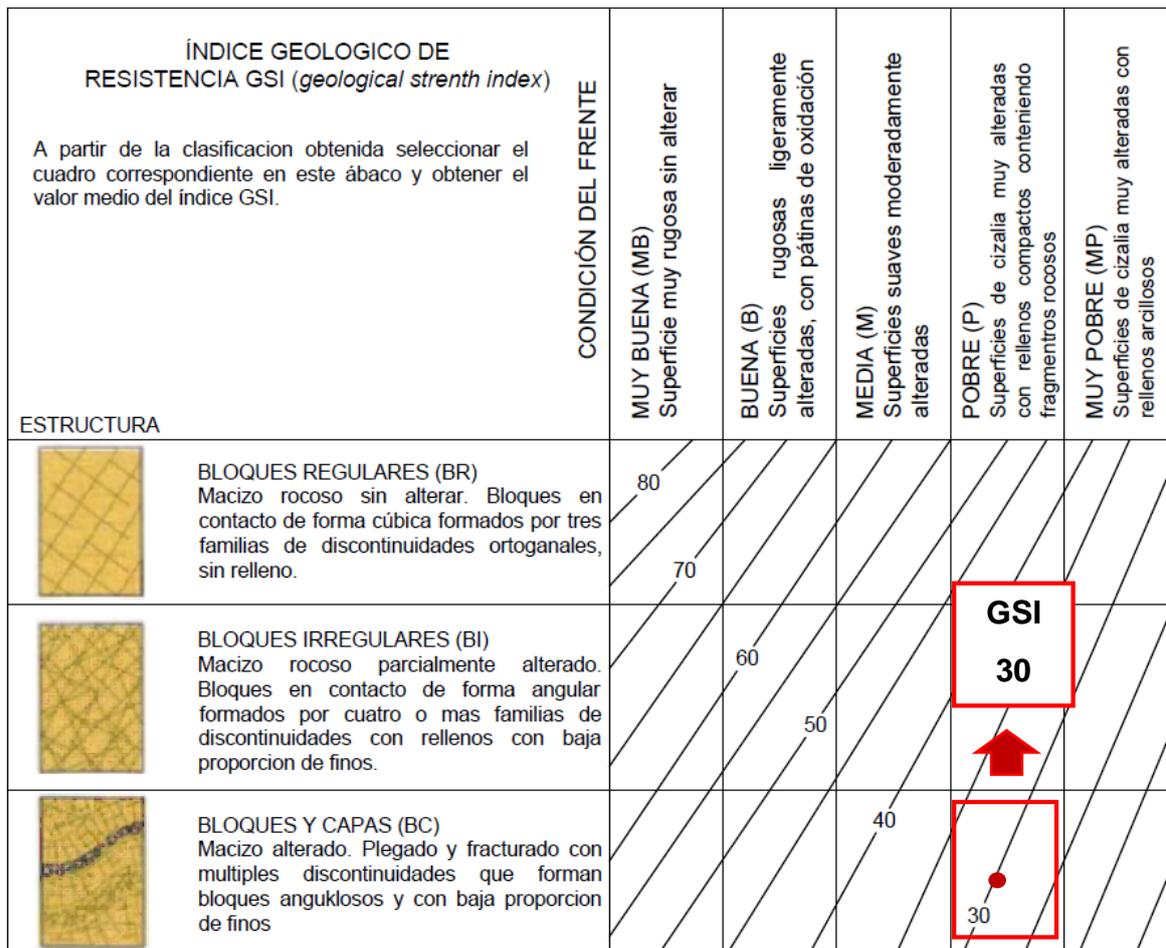


Figura 18. Asignación de GSI para el macizo rocoso de la Estación N° 03.

Interpretación Rock Lab V.1

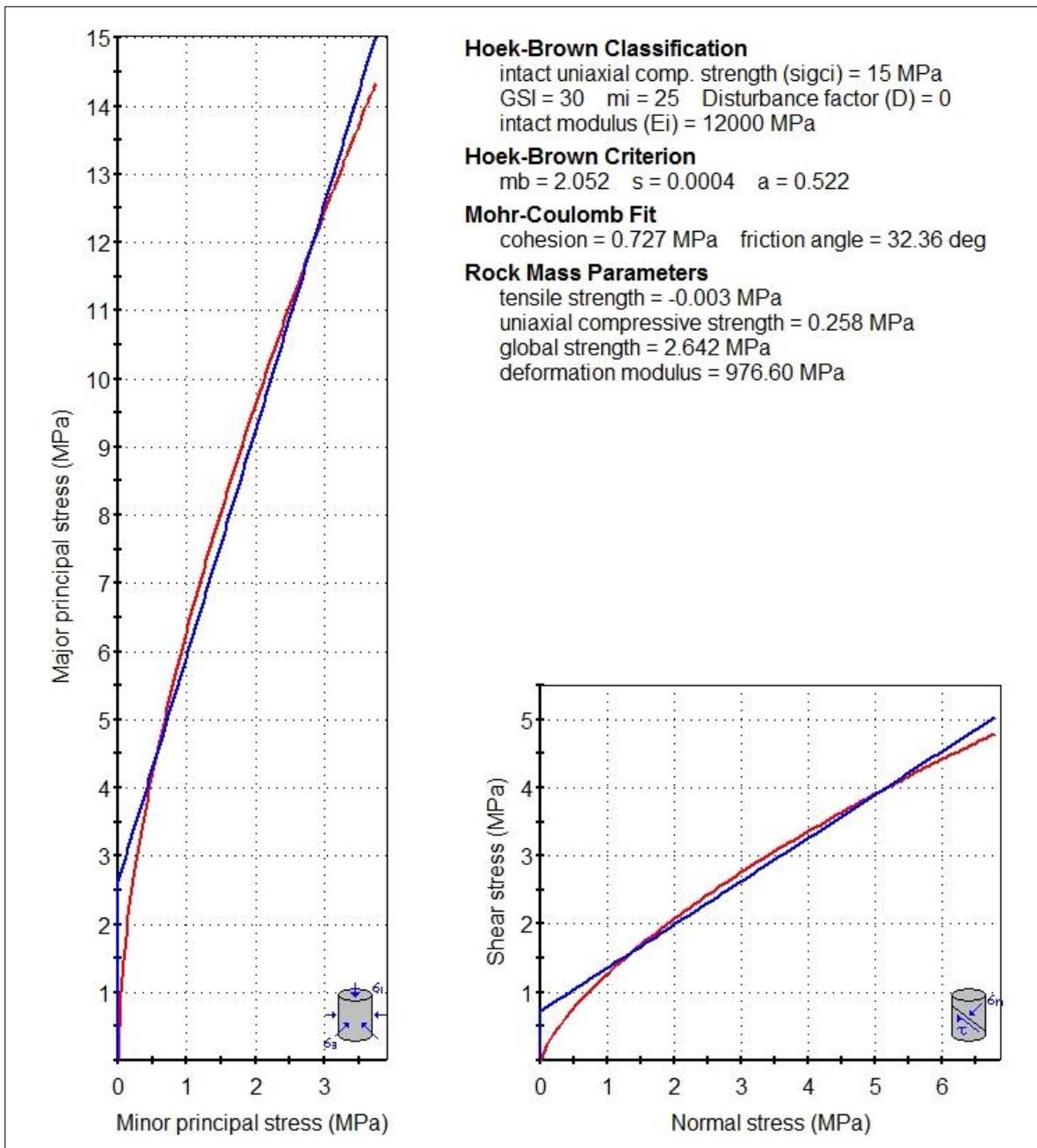


Figura 19. Grafica de esfuerzos para la Estacion N° 03.

Interpretación Slide v.6.005.

Tomando las medidas reales del talud y su entorno, y considerando la roca constituyente del talud se encuentra erosionado por la presencia de agua, consideramos un GSI igual a 30.

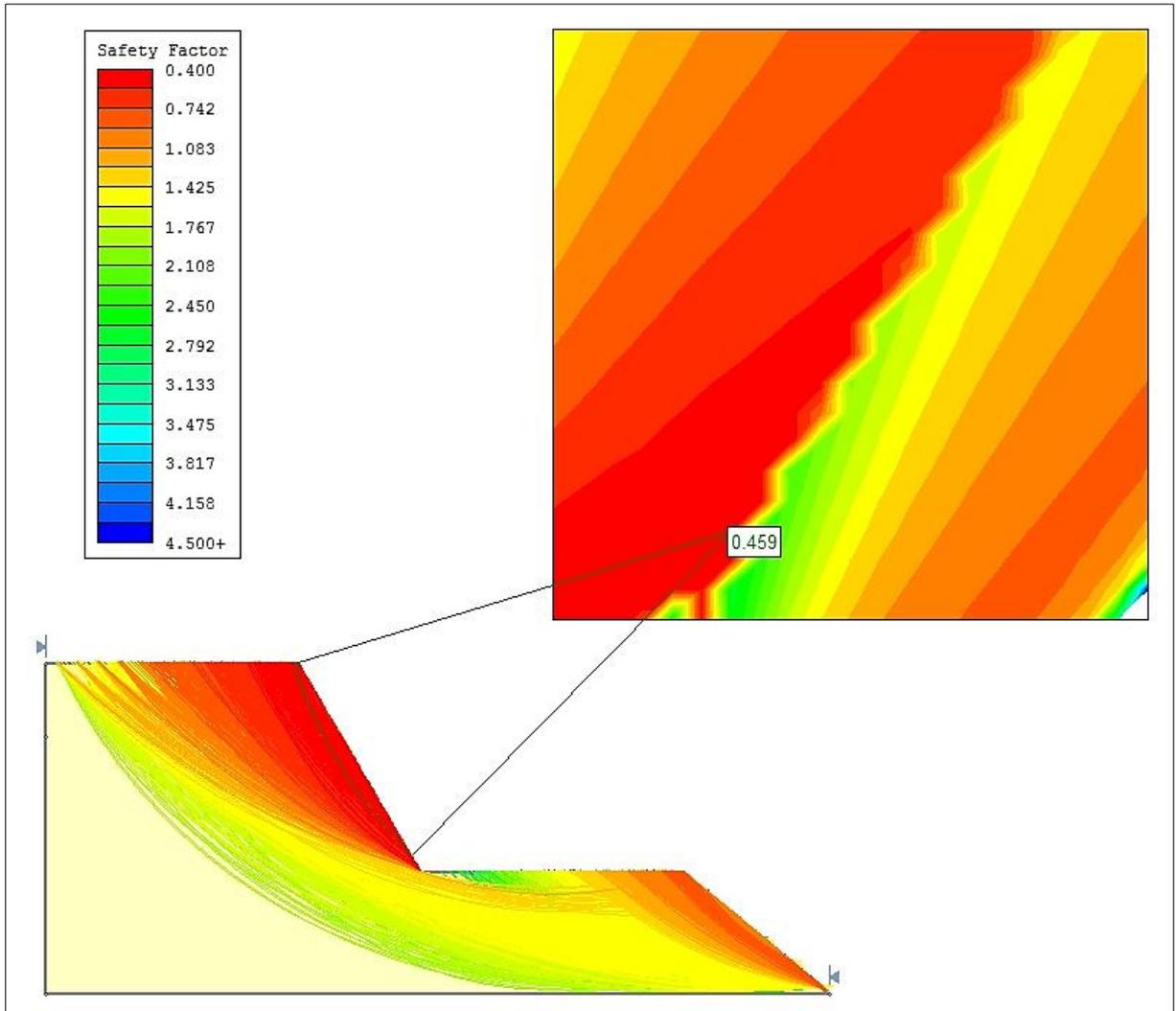


Figura 20. Método Bishop simplificado evalúa el talud(Estación N° 03), con un FS igual a 0.459

3.12.4 Estación N° 04:

Descripción del talud.

Talud que presenta características de inestabilidad intensas, se puede observar que se encuentra muy erosionado por la presencia de agua, tiene una altura de 45 m., con una pendiente de 45°; la litología pertenece al volcánico San Pablo.



Foto 11. Talud altamente erosionado en la progresiva 48+700.

Caracterización del macizo

Asignación de puntaje. (Clasificación geomecánica Bieniawski 1989.)

Cuadro 15. Asignación de valores para el macizo rocoso, E-04.

| VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR) | | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------|----------------------------|------------------|---|
| PARAMETRO | RANGO DE VALORES Y VALORACIONES | | | | | Val | |
| Resistencia a compresión uniaxial (Mpa) | >250 (15) | 250-100 (12) | 100-50 (7) | 50-25 (4) | <25 (2) <5 (1) <1(0) | 2 | |
| RDD (%) | 90 -100 (20) | 75 – 90 (17) | 50-75 (13) | 25-50 (8) | <25 (3) | 3 | |
| Espaciamiento (M) | >2 m (20) | 0.6 – 2 m (15) | 0.2–0.6 (10) | 0.06-0.2 (8) | <0.06 (5) | 5 | |
| Condición de las Juntas | Persistencia | < 1m (6) | 1-3 m (4) | 3-10 m (2) | 10-20m (1) | >20 m (0) | 1 |
| | Abertura | Cerrada (6) | < 0.01 mm (5) | 0.1-1.0 mm (4) | 1-5 mm (1) | >5mm (0) | 1 |
| | Rugosidad | Muy Rugosa (6) | Rugosa (5) | Lig. Rugosa (3) | Lisa (1) | Suave (0) | 6 |
| | Relleno | Ninguno (6) | Duro < 5mm (4) | Duro >5mm (2) | Suave <5mm (1) | Suave > 5mm (0) | 1 |
| | Alteración | Sana (6) | Lig. Alt (5) | Moder. Alt. (3) | Muy Alterada (2) | Descompuesta (0) | 2 |
| AGUA SUBTERRANEA | Seco (15) | Ligeramente Húmedo (10) | Húmedo (7) | Goteando (4) | Agua Fluyendo (0) | 7 | |
| VALOR TOTAL RMR | | | | | | 28 | |

Clasificación RMR.

Según la clasificación geomecánica RMR tenemos una roca de clase IV, y calidad mala.

Cuadro 16. Clasificación de calidad de roca, según valor RMR para la E-04.

| | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|-------------------|-------------|
| VALOR RMR = | | | | | | 28 |
| CLASE DE MACIZO ROCOSO | | | | | | |
| RMR | 100 - 81 | 80 - 61 | 60 - 41 | 40 - 21 | 20 - 0 | IV |
| DESCRIPCIÓN | I MUY BUENA | II BUENA | III REGULAR | IV MALA | V MUY MALA | MALA |

Asignación de valor GSI.

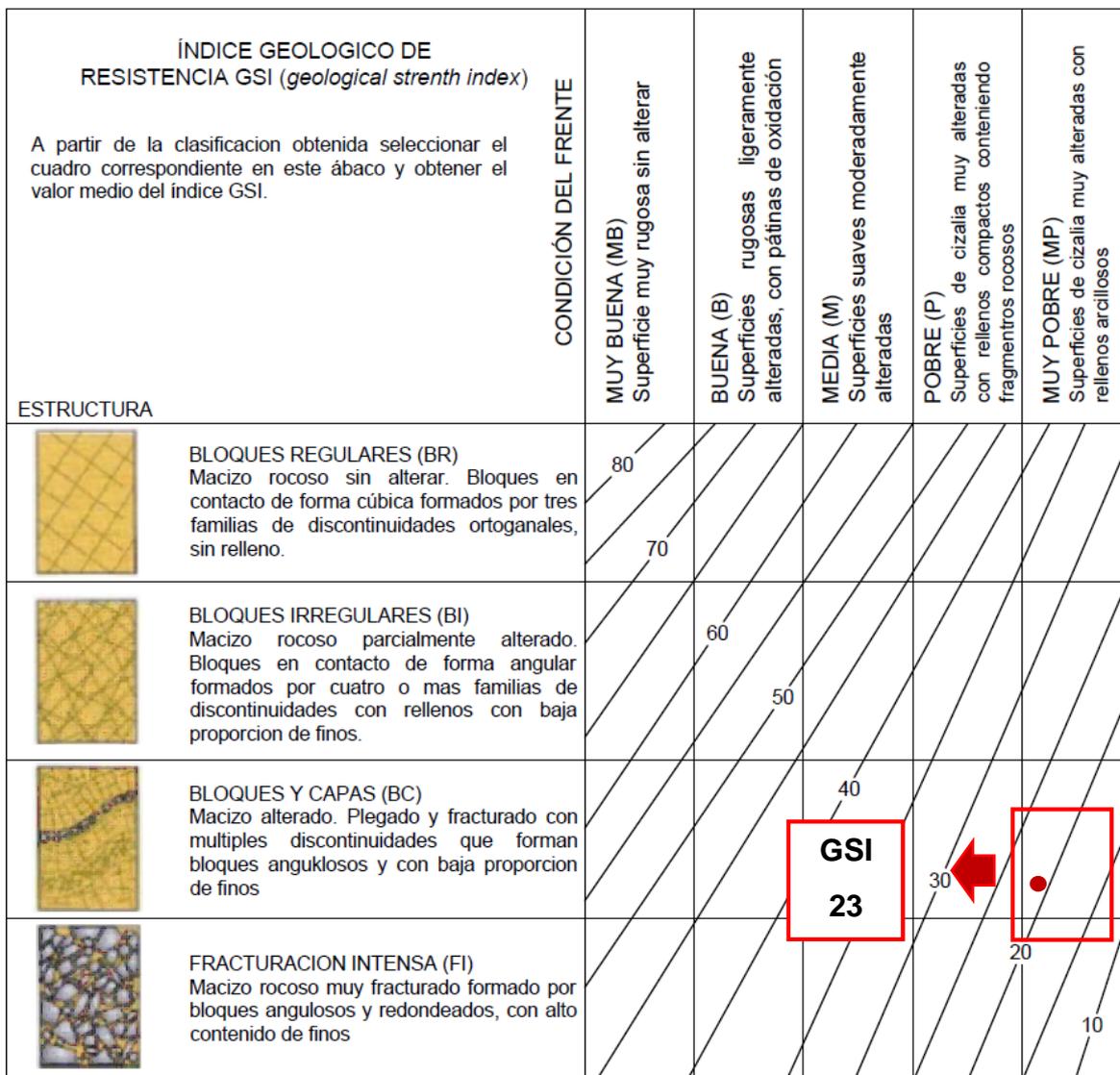


Figura 21. Asignación de GSI para el macizo rocoso de la Estación N° 04.

Interpretación Rock Lab V.1

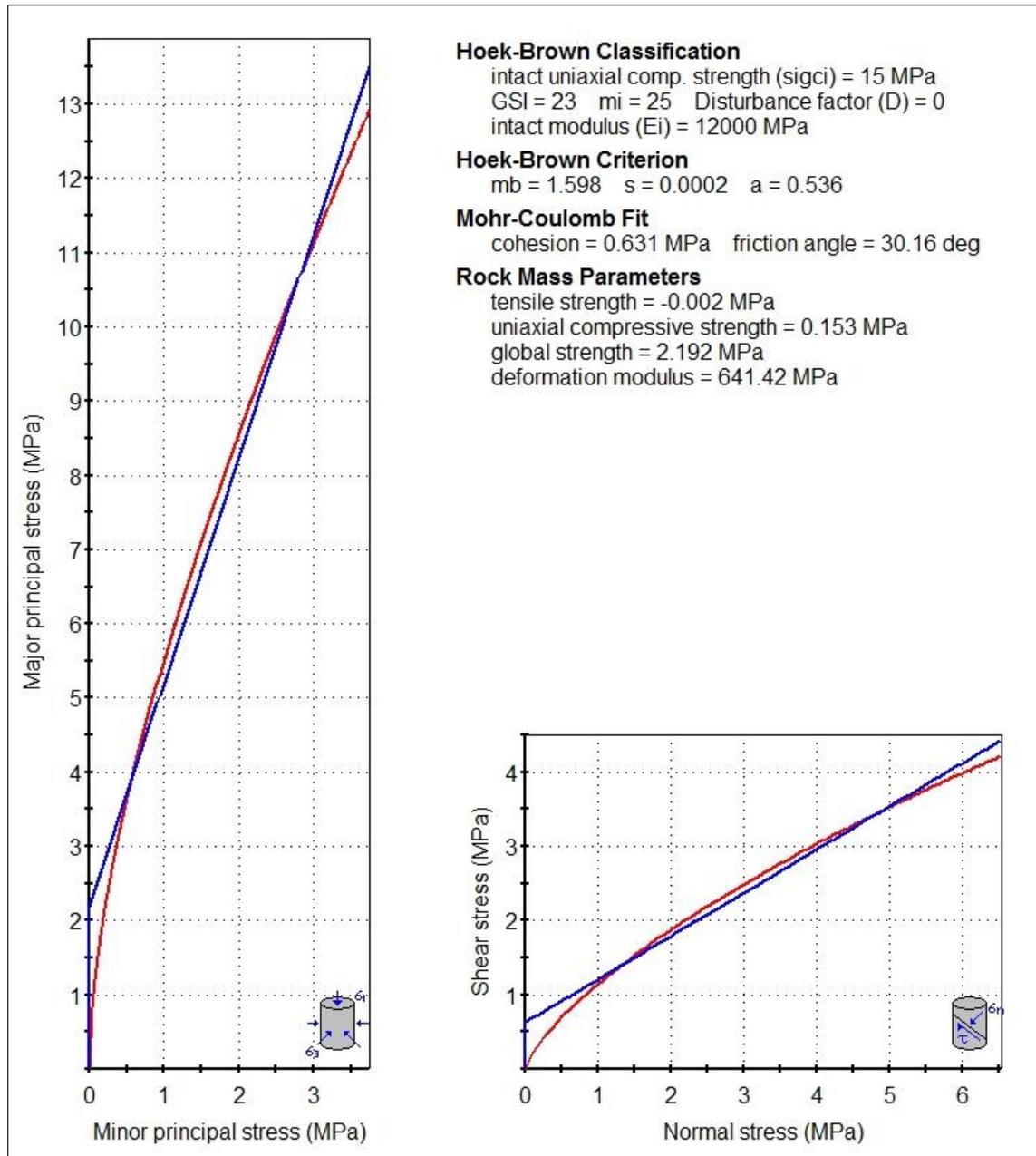


Figura 22. Grafica de esfuerzos para la Estación N° 04.

Interpretación Slide v.6.005.

Tomando las medidas reales del talud y su entorno, y considerando la roca constituyente del talud se encuentra erosionado por la presencia de agua, consideramos un GSI igual a 23.

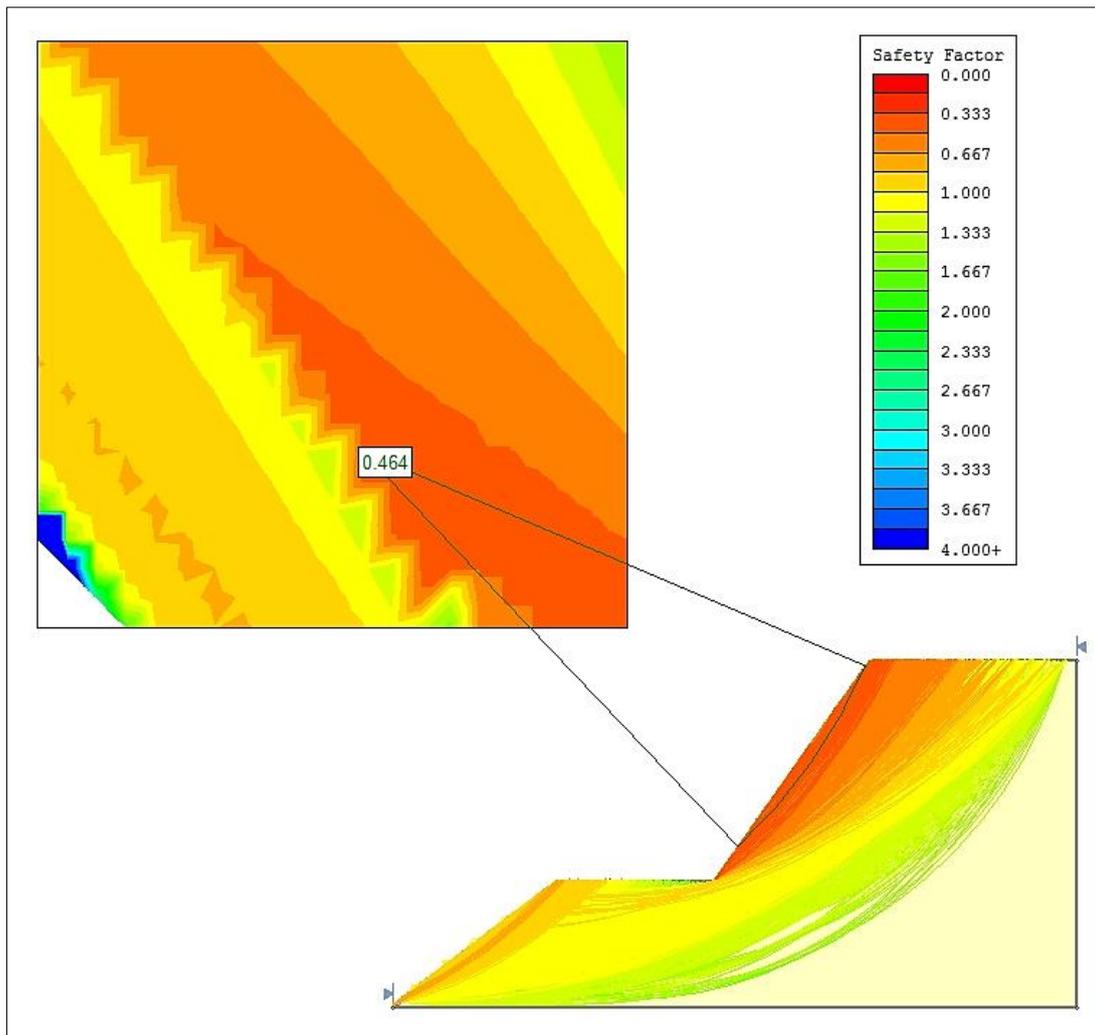


Figura 23. Método Bishop simplificado evalúa el talud (Estación N° 04), con un FS igual a 0.464.

3.12.5 Estación N° 05:

En el talud está constituido por dacitas; la litología pertenece al volcánico San Pablo tiene una altura de 15 m., con una pendiente de 60°, en la parte superior presentan vegetación.



Foto 12. Talud constituido por suelo, en la progresiva 50+100.

Caracterización del macizo

Asignación de puntaje. (Clasificación geomecánica Bieniawski 1989.)

Cuadro 17. Asignación de valores para el macizo rocoso, E-05.

| VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR) | | | | | | | |
|---|---------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|---|
| PARAMETRO | RANGO DE VALORES Y VALORACIONES | | | | | Val | |
| Resistencia a compresión uniaxial (Mpa) | >250 (15) | 250-100 (12) | 100-50 (7) | 50-25 (4) | <25 (2) <5 (1) <1(0) | 7 | |
| RDD (%) | 90 -100 (20) | 75 – 90 (17) | 50-75 (13) | 25-50 (8) | <25 (3) | 13 | |
| Espaciamiento (M) | >2 m (20) | 0.6 – 2 m (15) | 0.2–0.6 (10) | 0.06-0.2 (8) | <0.06 (5) | 8 | |
| Condición de las Juntas | Persistencia | < 1m (6) | 1-3 m (4) | 3-10 m (2) | 10-20m (1) | >20 m (0) | 1 |
| | Abertura | Cerrada (6) | < 0.01 mm (5) | 0.1-1.0 mm (4) | 1-5 mm (1) | >5mm (0) | 1 |
| | Rugosidad | Muy Rugosa (6) | Rugosa (5) | Lig. Rugosa (3) | Lisa (1) | Suave (0) | 5 |
| | Relleno | Ninguno (6) | Duro < 5mm (4) | Duro >5mm (2) | Suave <5mm (1) | Suave > 5mm (0) | 1 |
| | Alteración | Sana (6) | Lig. Alt (5) | Moder. Alt. (3) | Muy Alterada (2) | Descompuesta (0) | 5 |
| AGUA SUBTERRANEA | Seco (15) | Ligeramente Húmedo (10) | Húmedo (7) | Goteando (4) | Agua Fluyendo (0) | 10 | |
| VALOR TOTAL RMR | | | | | | 51 | |

Clasificación RMR.

Según la clasificación geomecánica RMR tenemos una roca de clase III, y calidad regular.

Cuadro 18. Clasificación de calidad de roca, según valor RMR para la E-05.

| VALOR RMR = | | | | | | 51 |
|------------------------|-------------|----------|-------------|---------|------------|---------|
| CLASE DE MACIZO ROCOSO | | | | | | |
| RMR | 100 - 81 | 80 - 61 | 60 - 41 | 40 - 21 | 20 - 0 | III |
| DESCRIPCIÓN | I MUY BUENA | II BUENA | III REGULAR | IV MALA | V MUY MALA | REGULAR |

Asignación de valor GSI.

| <p>ÍNDICE GEOLOGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strenth index</i>)</p> <p>A partir de la clasificacion obtenida seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI.</p> | | CONDICIÓN DEL FRENTE | | | | |
|--|--|---|--|---|---|--|
| ESTRUCTURA | | MUY BUENA (MB) Superficie muy rugosa sin alterar | BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación | MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas | POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos | MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos |
|  | <p>BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortoganales, sin relleno.</p> | 80 | 70 | | | |
|  | <p>BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o mas familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.</p> | | | 60 | 50 | |

GSI 46 (highlighted in a red box with an arrow pointing to the value 46 on the scale)

Figura 24. Asignación de GSI para el macizo rocoso de la Estación N° 05.

Interpretación Rock Lab V.1

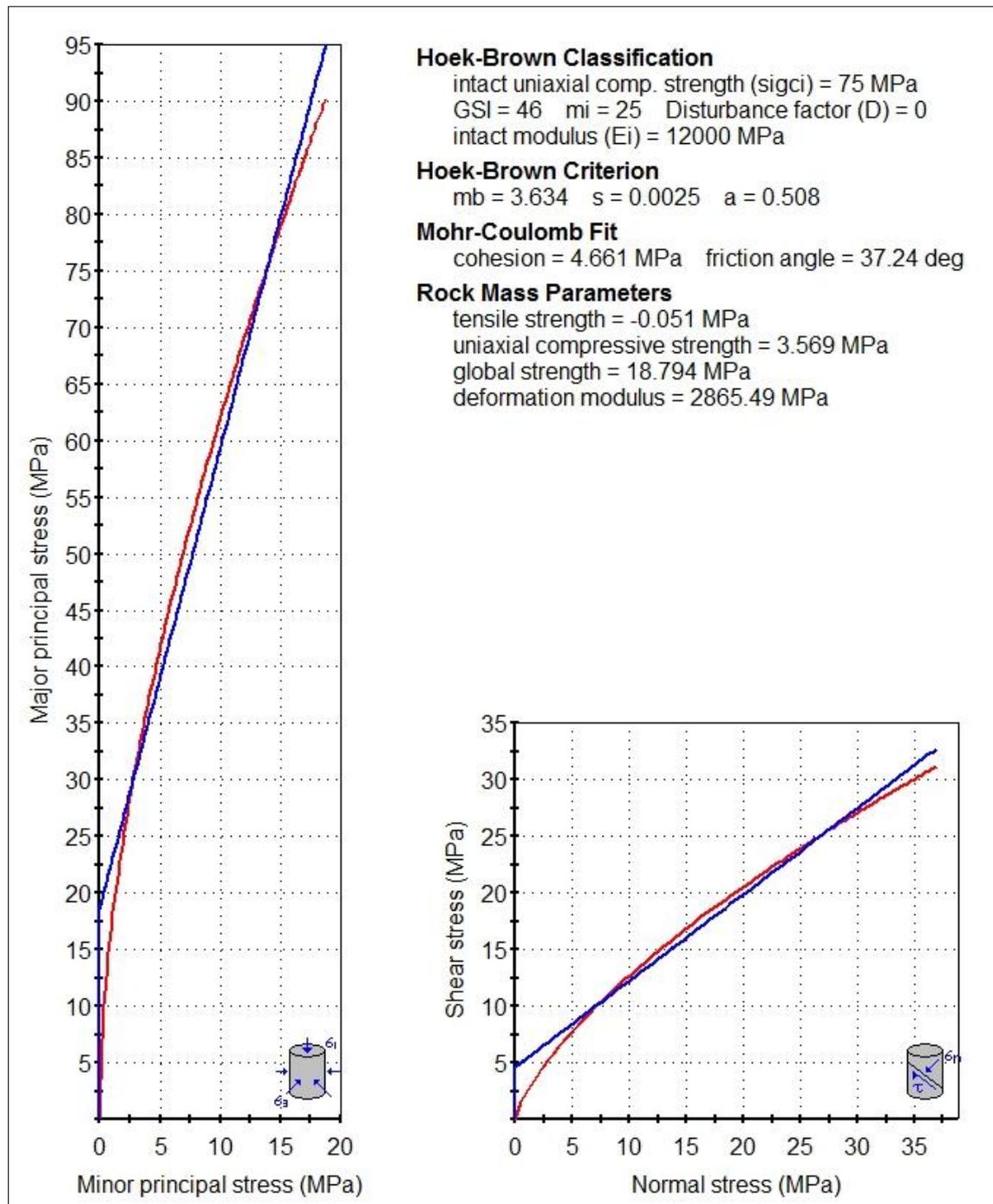


Figura 25. Grafica de esfuerzos para la Estación N° 05.

Interpretación Slide v.6.005.

Tomando las medidas reales del talud y su entorno, y considerando la roca constituyente del talud se encuentra erosionado por la presencia de agua, consideramos un GSI igual a 46.

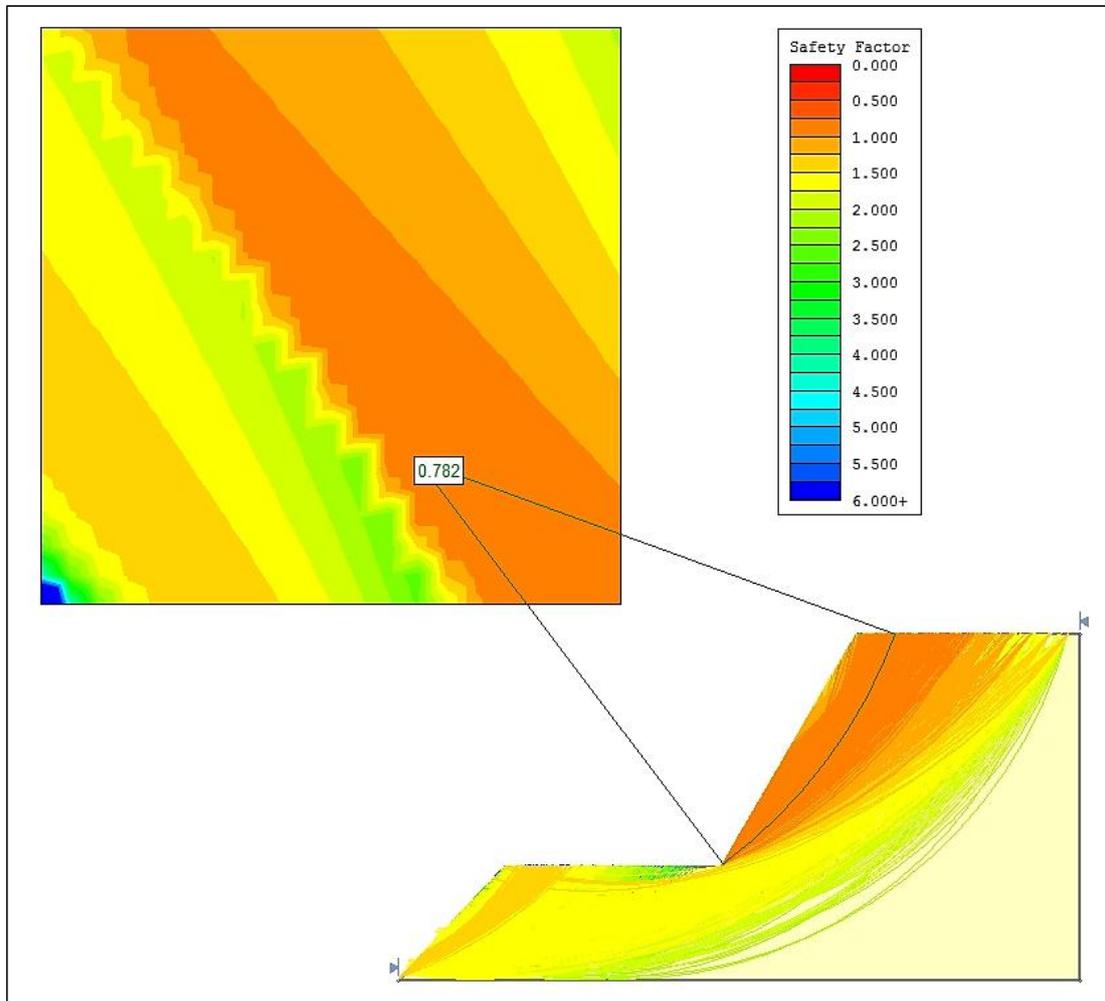


Figura 26. Método Bishop simplificado evalúa el talud (Estación N° 05), con un FS igual a 0.782.

3.12.6 Estación N° 06:

Descripción del talud.

El Talud tiene una altura de 15 m con una pendiente de 65°, presenta características de inestabilidad conformada por un macizo rocoso fracturado de dacita, la litología pertenece al volcánico San Pablo.



Foto 13. Talud por compuesto por dacita en la progresiva 51+500.

Caracterización del macizo

Asignación de puntaje. (Clasificación geomecánica Bieniawski 1989.)

Cuadro 19. Asignación de valores para el macizo rocoso. E-06.

| VALORACION DEL MACIZO ROCOSO (RMR) | | | | | | | |
|---|---------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|---|
| PARAMETRO | RANGO DE VALORES Y VALORACIONES | | | | | Val | |
| Resistencia a compresión uniaxial (Mpa) | >250 (15) | 250-100 (12) | 100-50 (7) | 50-25 (4) | <25 (2) <5 (1) <1(0) | 7 | |
| RDD (%) | 90 -100 (20) | 75 – 90 (17) | 50-75 (13) | 25-50 (8) | <25 (3) | 13 | |
| Espaciamiento (M) | >2 m (20) | 0.6 – 2 m (15) | 0.2–0.6 (10) | 0.06-0.2 (8) | <0.06 (5) | 5 | |
| Condición de las Juntas | Persistencia | < 1m (6) | 1-3 m (4) | 3-10 m (2) | 10-20m (1) | >20 m (0) | 1 |
| | Abertura | Cerrada (6) | < 0.01 mm (5) | 0.1-1.0 mm (4) | 1-5 mm (1) | >5mm (0) | 0 |
| | Rugosidad | Muy Rugosa (6) | Rugosa (5) | Lig. Rugosa (3) | Lisa (1) | Suave (0) | 5 |
| | Relleno | Ninguno (6) | Duro < 5mm (4) | Duro >5mm (2) | Suave <5mm (1) | Suave > 5mm (0) | 1 |
| | Alteración | Sana (6) | Lig. Alt (5) | Moder. Alt. (3) | Muy Alterada (2) | Descompuesta (0) | 3 |
| AGUA SUBTERRANEA | Seco (15) | Ligeramente Húmedo (10) | Húmedo (7) | Goteando (4) | Agua Fluyendo (0) | 10 | |
| VALOR TOTAL RMR | | | | | | 45 | |

Clasificación RMR.

Según la clasificación geomecánica RMR tenemos una roca de clase III, y calidad regular.

Cuadro 20. Clasificación de calidad de roca, según valor RMR para la E-06.

| | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|-------------------|----------------|
| VALOR RMR = | | | | | | 45 |
| CLASE DE MACIZO ROCOSO | | | | | | |
| RMR | 100 - 81 | 80 - 61 | 60 - 41 | 40 - 21 | 20 - 0 | III |
| DESCRIPCIÓN | I MUY BUENA | II BUENA | III REGULAR | IV MALA | V MUY MALA | REGULAR |

Asignación de valor GSI.

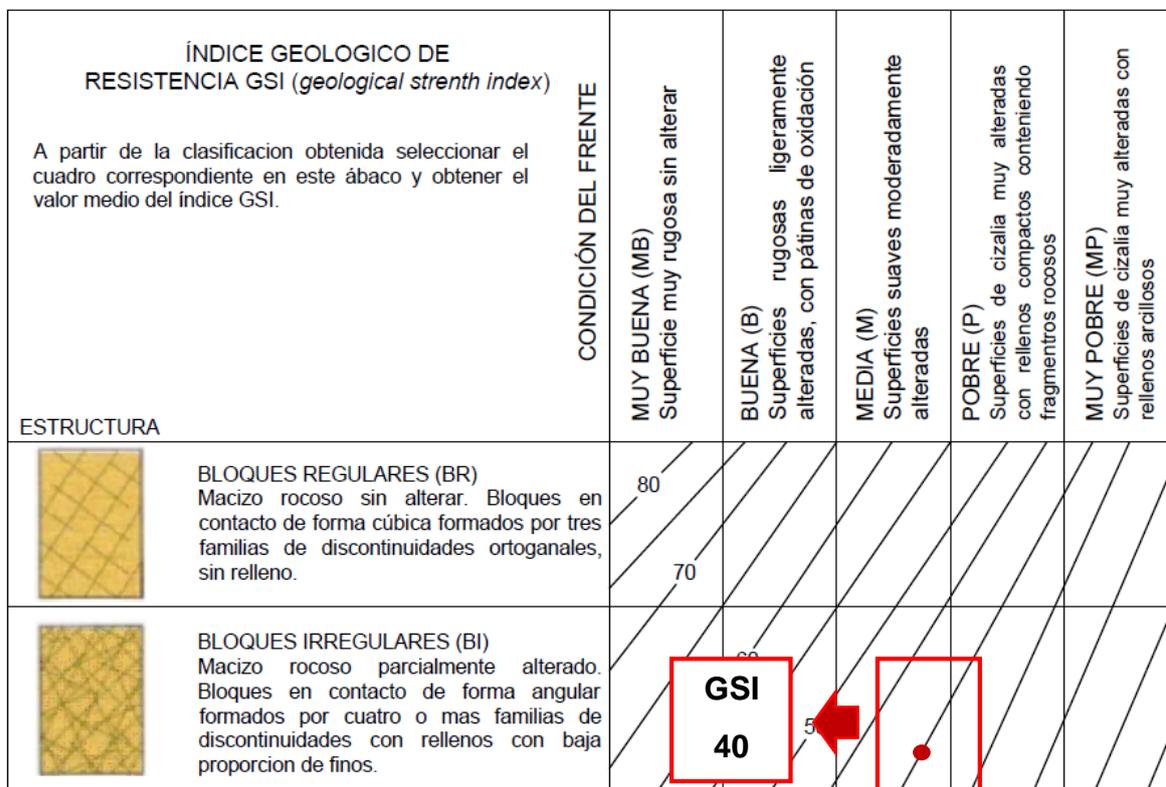


Figura 27. Asignación de GSI para el macizo rocoso de la Estación N° 06.

Interpretación Rock Lab V.1

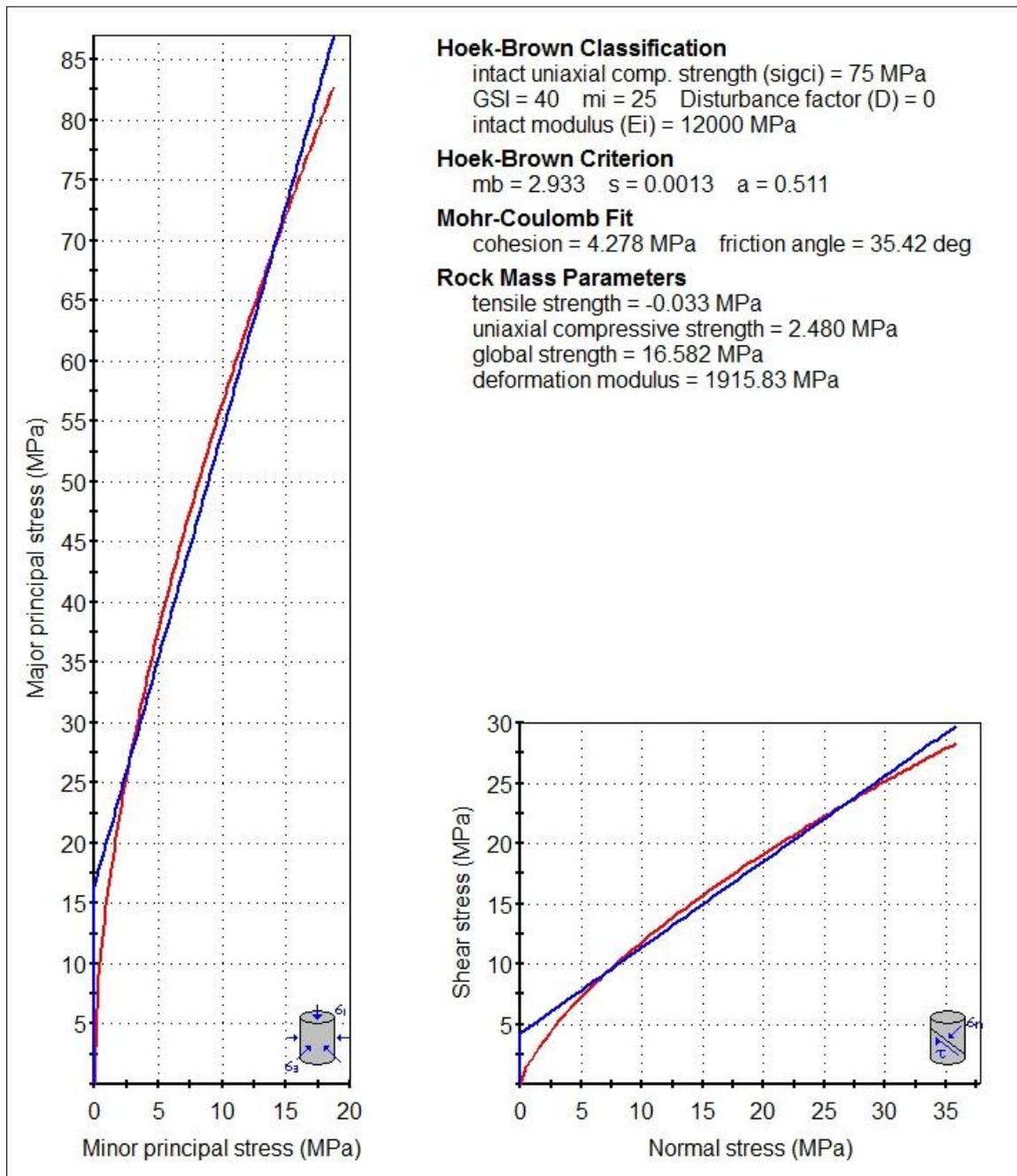


Figura 28. Grafica de esfuerzos para la Estación N° 06.

Interpretación Slide v.6.005.

Tomando las medidas reales del talud y su entorno, y considerando la roca constituyente del talud se encuentra erosionado por la presencia de agua, consideramos un GSI igual a 40.

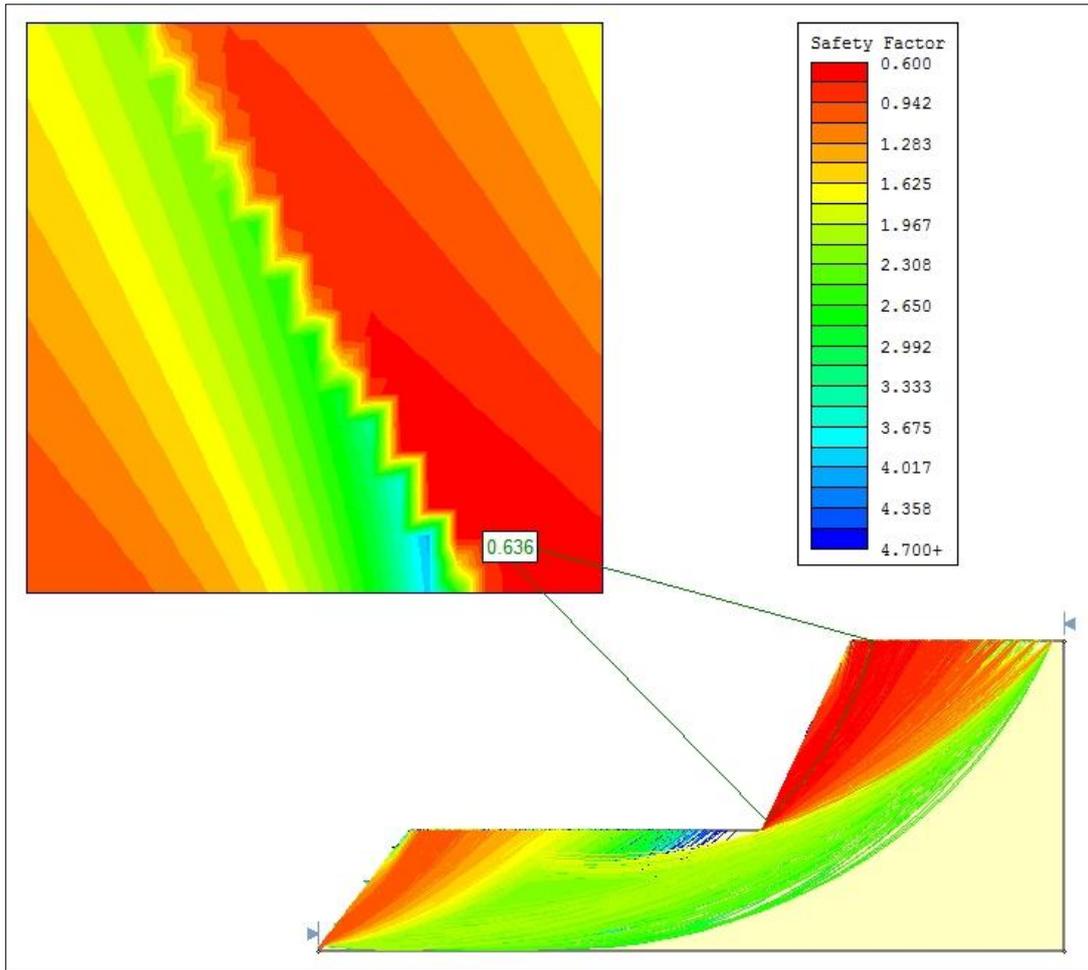


Figura 29. Método Bishop simplificado evalúa el talud (Estación N° 06), con un FS igual a 0.636.

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados han determinado Factores de Seguridad en los taludes de rocas y suelos ubicados en las progresivas de la carretera Kuntur Wasi, de las zonas de inestabilidad identificadas en la carretera Kuntur Wasi, van desde moderado hasta muy inestables, las cuales sumado a las intensas precipitaciones en los meses de estiaje generan deslizamientos y caída de rocas, esto significa que las organizaciones encargadas del mantenimiento, ya sean la Municipalidad de San Pablo, así como el MTC, deben tener en cuenta lo antes posible este problema que se presenta de manera continua y peligrosa a lo largo de toda el zona de estudio.

4.1 Procesamiento de la información y presentación de resultados

4.1.1 Análisis Slide v. 6.0

Para realizar la interpretación de la información recopilada de los taludes se han elaborado modelamientos de perfiles en 2D, determinando el factor de seguridad que tiene los distintos tipos de materiales en los taludes. Los parámetros usados por el programa informático geotécnico Slide v. 6.0, para dicho análisis son:

El tipo de litología, que en la investigación se ha determinado rocas ígneas y algún tipo de suelo según la clasificación SUCS, el método de análisis que en este caso se usara Bishop Simplificado.

4.1.2 Análisis Rock Lab v. 1.0

Para el análisis de los macizos rocosos usamos el método de análisis de Mohr – Coulomb, donde interviene el GSI, hallado en campo. Y así determinamos el ángulo de fricción expresado en grados y la cohesión expresado en Mpa,

4.2 Clasificación geotécnica de los taludes

Se obtuvieron los parámetros geotécnicos requeridos, descritos con anterioridad, logrando una clasificación de los taludes en: suelos y rocas. Para esta clasificación se tuvo en cuenta Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), Rock Mass Rating (RMR1989), Geological Strength Index (GSI).

4.2.1 Tramo 01 – Progresiva Km 52+000 – Km 52+050

Talud constituido por gravas limosas, presentando en la curva granulométrica los siguientes coeficientes: Cu: 42.50, Cc: 0.95, representando un suelo heterogéneo, para esto se ha teniendo en cuenta: D10: 0.18, D30: 1.13, D60: 7.58. El talud tiene una altura de 26 m., con una pendiente de 45°; muy erosionado, en la parte superior los suelos presentan vegetación. Se observa un deslizamiento en toda la cara del talud arrastrando consigo suelos, de la parte superior y depositándolos en la parte inferior.

| TRAMO 1 | | | | | | |
|---------------------|------|--------|--------|------|------|-------|
| Litología | SUCS | AASHTO | Ws | Cu | Cc | Fs |
| Coluvio - aluviales | ML | A-7-6 | 1291.4 | 42.5 | 0.95 | 0.827 |

Al identificar que se trata de una zona crítica, se analizó mediante el Software Slide obteniendo un factor de seguridad de 0.700, lo cual nos indica que es una zona crítica moderadamente inestable.

4.2.2 Tramo 02 – Progresiva Km 45+500 – Km 45+540

Talud inestable, conformado por rocas dacitas, de color gris blanquecino, de grano fino, existe presencia de óxidos, intensamente fracturado y meteorizado, al realizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso se obtiene un valor RMR de 49, lo cual indica que es una roca tipo III lo cual nos indica que regular, además se le asigna un valor RQD (%) de < 25.

Luego de realizar el análisis mediante el Software Rock Data, con los resultados obtenidos en campo, se obtiene:

| TRAMO 02 | | | | |
|-----------------|------------|-----------|---------|-----------|
| σ_{ci} | GSI | C' | ϕ' | Em |
| 75 Mpa | 44 | 4.532 | 36.63° | 12000 |

Analizando en el Software Slide no da un factor de seguridad igual a 0.675, lo cual nos indica que es un tramo de la carretera altamente inestable.

4.2.3 Tramo 03 – Progresiva Km 46+900 – Km 46+950.

El Talud se encuentra altamente inestable, conformado por rocas dacitas, de color gris blanquecino, de grano fino, intensamente fracturado y meteorizado, al realizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso se obtiene un valor RMR de 35, lo cual indica que es una roca tipo III lo cual nos indica que regular, además se le asigna un valor RQD (%) de 50 – 100.

Luego de realizar el análisis mediante el Software Rock Data, con los resultados obtenidos en campo, se obtiene:

| TRAMO 03 | | | | |
|-----------------|------------|-----------|---------|-----------|
| σ_{ci} | GSI | C' | ϕ' | Em |
| 15Mpa | 30 | 0.727 | 32.36° | 12000 Mpa |

Analizando en el Software Slide no da un factor de seguridad igual a 0.459, lo cual nos indica que es un tramo de la carretera altamente inestable.

4.2.4 Tramo 04 – Progresiva Km 48+700 – Km 48+780.

Al realizar el cartografiado de macizo rocoso en campo, se pudo determinar que las rocas que conforman el talud, tienen las siguientes características: dacitas altamente alteradas por la presencia de agua; la litología pertenece al volcánico San Pablo. Según la clasificación geomecánica RMR se asigna un valor de 28 y determina una roca de clase IV de calidad Mala.

Al realizar el análisis en el Software Rock Data, nos da los siguientes valores:

| TRAMO 04 | | | | |
|-----------------|------------|-------|---------|-----------|
| σ_{ci} | GSI | c' | ϕ' | Em |
| 15 Mpa | 23 | 0.631 | 30.16 | 12000 Mpa |

Mediante el Software Slide se obtiene un factor de seguridad de 0.464, lo cual nos indica que el talud es altamente inestable.

4.2.5 Tramo 05 – Progresiva Km 50+100 – Km 50+140

En el talud está constituido por dacitas erosionadas; la litología pertenece al volcánico San Pablo tiene una altura de 15 m., con una pendiente de 60°, en la parte superior presentan vegetación. Según la clasificación geomecánica RMR se asigna un valor de 51 y determina una roca de clase III de calidad regular.

Al realizar el análisis en el Software Rock Data, nos da los siguientes valores:

| TRAMO 05 | | | | |
|-----------------|------------|-------|---------|-----------|
| σ_{ci} | GSI | c' | ϕ' | Em |
| 75 Mpa | 46 | 4.661 | 37.24 | 12000 Mpa |

Mediante el Software Slide se obtiene un factor de seguridad de 0.782, lo cual nos indica que el talud es moderadamente inestable.

4.2.6 Tramo 06 – Progresiva Km 51+500 – Km 51+100

Talud con características de inestabilidad conformado por dacitas, moderadamente fracturados y con presencia de óxidos, la litología pertenece al volcánico San Pablo. Según la clasificación geomecánica RMR se asigna un valor de 45 y determina una roca de clase III de regular calidad.

Al realizar el análisis en el Software Rock Data, nos da los siguientes valores:

| TRAMO 06 | | | | |
|---------------------------------|------------|-----------|---------------------------|------------|
| σ_{ci} | GSI | C' | ϕ' | Em |
| 75 Mpa | 40 | 4.278 | 35.42 | 12 000 Mpa |

Mediante el Software Slide se obtiene un factor de seguridad de 0.636, lo cual nos indica que el talud es medianamente inestable.

4.3 Contrastación de la hipótesis

Las características litológicas como el tipo de roca; las características morfológicas; las características estructurales; están relacionadas de manera directa con el comportamiento geomecánico y geotécnico. Esto en conjunto generaran un macizo rocoso y deposito cuaternarios con ciertas características de inestabilidad, que al interactuar con las intensas precipitaciones características y vibraciones que generan los vehículos de transporte pesado; dan como resultado una inestabilidad de taludes, ya sea de bajo, mediano y alto grado de peligrosidad. La hipótesis planteada es aceptada como válida.

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La evaluación concluyo que la carretera presenta zonas inestables, debido a la presencia de pendientes pronunciadas, presencia de agua, litología perteneciente a rocas ígneas y estructuras fuertemente disturbadas que originan alto fracturamiento y erosión en los macizos rocosos, tomando en cuenta estas condiciones se generan condiciones de inestabilidad en los taludes.

Los Factores de seguridad obtenidos mediante el análisis en el Software Slide 6.0 de los taludes inestables son los siguientes: tramo 01 = 0.700, tramo 02 = 0. 0.675, tramo 03 = 0.459, tramo 04 = 0.464, tramo 05 = 0.782, tramo 06 = 0. 0.636.

Las zonas críticas se identificaron de la siguiente manera:

Zona de alta peligrosidad, sectorizando en 2 tramos: Tramo 03, tramo 04 caracterizados por presentar deslizamientos, caída de rocas y agrietamiento en la carretera.

Zona de media peligrosidad, sectorizando en 2 tramos: Tramo 02, tramo 06 caracterizados por presentar: deslizamientos y caída de rocas.

Zona de baja peligrosidad: Tramo 01, tramo 05; caracterizado por presentar caída de rocas y deslizamientos de suelos.

Los resultados para la caracterización geomecánica y geotécnica del macizo rocoso y depósitos cuaternarios, de mayor influencia para los taludes que presentan inestabilidad son: estimación del factor de seguridad, resistencia a la compresión simple (MPa), índice geológico de resistencia (GSI), clasificación del macizo rocoso (RMR)

El principal agente identificado es el agua producto de las intensas precipitaciones entre los meses diciembre y abril, siendo la causa fundamental de inestabilidad en los taludes de la carretera Kuntur Wasi, ya que mediante la infiltración produce el fracturamiento de la roca.

5.2 Recomendaciones

Realizar la estabilización de los taludes inestables en la carretera Kuntur Wasi en el tramo Km. 45+000 –Km 52+000, ya que pueden colapsar en su totalidad y generar pérdidas económicas y humanas.

La empresa Concesionaria Vial Sierra SA - Norte (Convial Sierra Norte) encargada del mantenimiento de la carretera Kuntur Wasi adoptar medidas de recuperación y control inmediatas, así como el mantenimiento y limpieza de cunetas para evitar manera que se ocasionen peligros a futuro.

Realizar monitoreo de las zonas críticas en los tramos 3,4 de forma continua, para evaluar su peligrosidad y prevenir futuros deslizamientos, tomando las medidas de seguridad necesarias para la circulación de vehículos de transporte y evitar accidentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amer Ali Al-Rawas & Mattheus F.A. Goosen. (2006), "Expansive Soils".
- Bieniawski, Z. (1989). "Engineering rock mass classifications". Edit. John Wiley and Sons.
- Braja M. Das, (2001), Fundamentos de ingeniería geotécnica, Thomson Editores S.A. de C.V.
- Gavilanes, H. et. al. (2004), Introducción a la Ingeniería de Túneles, Edit. AIME, Quito – Ecuador.
- González, L. I. (2004). Ingeniería Geológica. Madrid: Isabel Capella.
- E. Hoek, C. Carranza-Torres, B. Corkum. "Criterio de Hoek – Brown" – Edición 2002
- L.U. De Sitter (1976), "Geología Estructural". Ediciones Omega. Barcelona.
- Montoya, F. (2014). "Evaluación Geotécnica de los taludes de la carretera Cruz Blanca – El Gavilán". Tesis de pregrado Universidad Nacional de Cajamarca.
- MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Perú) 2013. Manual de ensayos de materiales.
- Provias Nacional - Perú (2007). Rehabilitación y mejoramiento de la carretera Chilete – San Pablo – empalme ruta 3N (Km25 carretera Cajamarca – Bambamarca).
- Ramirez Oyanguren, P., y Alejano Monge, L. (2007). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Ocon, V. (2015). Evaluación geotécnica de inestabilidad de taludes en la carretera Hualgayoc – Apan Alto. 90p.
- Zavaleta, A. (2016). En su tesis: Evaluación geotécnica en zonas críticas de la carretera Cajabamba – Cauday. 76p.

ANEXOS