

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Evaluación geomecánica del macizo rocoso para
determinar el ángulo de reposo del talud, carretera
tramo San Antonio puente Chiquiacc,
Huancavelica-2021**

Jorge Manuel Hizarra Samaniego
Jorge Eduardo Lopez Camargo
Jearly Francis Navarro Romo

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2021

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a todos los catedráticos e ingenieros de nuestra alma mater, la escuela de Ingeniería de Minas, por volcar sus conocimientos mediante sus experiencias para mi formación ética y profesional.

Seguidamente, agradecer al consorcio Wanka Wasi por haber confiado en nosotros para poder realizar esta investigación, así como también agradecer a todas aquellas personas que se vieron involucradas en la realización de esta.

Los autores

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a nuestros padres, familiares y a cada uno de nosotros por el compromiso con nuestra vocación profesional.

Los autores

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
INTRODUCCIÓN	XI
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	13
1.1. Planteamiento y formulación del problema	13
1.1.1. Problema general	14
1.1.2. Problemas específicos.....	14
1.2. Objetivos	14
1.2.1. Objetivo general.....	14
1.2.2. Objetivos específicos	14
1.3. Justificación e importancia	15
1.4. Hipótesis y descripción de variables	15
1.4.1. Hipótesis general	15
1.4.2. Hipótesis específicas	15
1.4.3. Descripción y operacionalización de variables	15
CAPÍTULO II MARCO TEORICO.....	17
2.1. Antecedentes del problema	17
2.1.1. A nivel nacional.....	17
2.1.2. A nivel internacional.....	20
2.2. Bases teóricas	20
2.2.1. Taludes.....	20
2.2.2. Mecánica de rocas.....	38
2.2.3. Evaluación geomecánica	41
2.3. Definición de términos básicos	53
CAPÍTULO III METODOLOGÍA.....	56
3.1. Método, y alcance de la investigación	56
3.1.1. Método de investigación	56
3.1.2. Tipo de investigación	56

3.1.3. Nivel de investigación	56
3.2. Diseño de la investigación	56
3.3. Población y muestra	57
3.3.1. Población.....	57
3.3.2. Muestra.....	57
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	57
3.4.1. Técnicas de recolección de datos.....	57
3.4.2. Instrumentos de recolección de datos	57
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
4.1. Generalidades del proyecto	58
4.1.1. Ubicación	58
4.1.1. Clima y vegetación	60
4.1.2. Geología regional	61
4.1.3. Geología local.....	64
4.1.4. Geología estructural	65
4.2. Resultados del tratamiento y análisis de la información	68
4.2.1. Clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR).....	68
4.2.1.1. Análisis estereográfico.....	68
4.2.1.2. Cálculo de la resistencia del material intacto	70
4.2.1.3. Evaluación del Índice RQD	72
4.2.1.4. Distancia entre discontinuidades	73
4.2.1.5. Condición de las discontinuidades	75
4.2.1.6. Flujo de agua subterránea.....	80
4.2.1.7. Ajuste de la puntuación para la orientación de las discontinuidades	80
4.2.2. Clasificación geomecánica Slope Mass Rating (SMR).....	81
4.3. Discusión de resultados	86
4.3.1. Clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR)	86
4.3.2. Clasificación geomecánica Slope Mass Rating (SMR)	87
CONCLUSIONES.....	91
RECOMENDACIONES	92
REFERENCIAS.....	93
ANEXOS.....	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores Influyentes en la inestabilidad de taludes	24
Tabla 2. Parámetros de resistencia a la compresión uniaxial.....	43
Tabla 3. Valoración de la orientación de las discontinuidades	49
Tabla 4. Valores correspondientes al factor F4	51
Tabla 5. Factores de ajuste de la clasificación SMR.	52
Tabla 6. Valores del SMR para cada tipo de rotura.....	52
Tabla 7. Descripción de clases de SMR.....	52
Tabla 8. Medidas de corrección de taludes en roca	53
Tabla 9. Lista de la orientación de discontinuidades	68
Tabla 10. Orientación de discontinuidades.	69
Tabla 11. Listado de datos con el esclerómetro	70
Tabla 12. Cálculo de densidad de la roca (KN/m ³).....	71
Tabla 13. Cálculo del índice de calidad de roca RQD.	73
Tabla 14. Listado de datos recopilados del espaciamiento de las discontinuidades	73
Tabla 15. Frecuencia del espaciamiento.	74
Tabla 16. Listado de datos recopilados de la persistencia de las discontinuidades.....	75
Tabla 17. Frecuencia de la persistencia de discontinuidades	75
Tabla 18. Listado de datos recopilados de la apertura de las discontinuidades.....	76
Tabla 19. Frecuencia de la apertura de discontinuidades	77
Tabla 20. Valor correspondiente al factor F ₄	83
Tabla 21. Valor correspondiente al factor F ₄	85
Tabla 22. Resumen clasificación RMR.....	86
Tabla 23. Clasificación del macizo rocoso RMR	87
Tabla 24. Descripción de las clases del SMR	88
Tabla 25. Descripción de las clases del SMR	88
Tabla 26. Clases de estabilidad según el SMR	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de un talud.....	22
Figura 2. Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos	23
Figura 3. Proceso de deterioro en macizos rocosos	25
Figura 4. Caídos de bloques por gravedad en roca fracturada	28
Figura 5. Caídos de bloques rodando	29
Figura 6. Algunos mecanismos de falla de caídos	30
Figura 7. Esquema de caídos de roca y residuos	30
Figura 8. Volteo o inclinación en materiales residuales.....	31
Figura 9. Proceso de falla al volteo	31
Figura 10. El volteo puede generar un desmoronamiento del talud o falla en escalera	32
Figura 11. Esquema de un proceso de reptación.....	32
Figura 12. Deslizamientos en suelos blandos	33
Figura 13. Esquema de un esparcimiento lateral	34
Figura 14. Flujos de diferentes velocidades	35
Figura 15. Tipos de rotura plana. Tomado de Ingeniería Geológica, 2002	36
Figura 16. Condiciones para la rotura plana y para la rotura en cuña.....	36
Figura 17. Esquema de taludes con estructura favorable al vuelco de estratos	37
Figura 18. Esquema de pandeo en estratos verticalizados, con flexión y fractura de los estratos	37
Figura 19. Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación.....	39
Figura 20. Ábaco para hallar la resistencia a la compresión uniaxial a partir del Martillo de Schmidt.....	44
Figura 21. Proceso comúnmente utilizado para evaluar el RQD a partir del mapeo de paredes de excavaciones subterráneas	46
Figura 22. Relación entre espaciamento de discontinuidad y RQD.....	47
Figura 23. Análisis de polos de las discontinuidades	69
Figura 24. Análisis estereográfico de los planos mayores	70

Figura 25. Cartilla de Schmidt	72
Figura 26. Gráfico de barras del espaciamiento.....	74
Figura 27. Gráfico de barras de la persistencia.....	76
Figura 28. Gráfico de barras de la apertura	77
Figura 29. Relleno de falla	78
Figura 30. Grado de meteorización	79
Figura 31. Estado de meteorización.....	79
Figura 32. Ajuste de puntuación para la orientación de discontinuidades	80
Figura 33. Efecto cuña en el talud.....	80
Figura 34. Medidas de corrección propuestas según SMR.....	90

RESUMEN

El presente trabajo de investigación planteó como objetivo general: establecer el resultado de la evaluación geomecánica del macizo rocoso para determinar el ángulo de reposo del talud, carretera tramo San Antonio - Puente Chiquiacc, Huancavelica 2021. La hipótesis general fue que el resultado de la evaluación geomecánica del macizo rocoso es heterogéneo para cada zona, para las cuales se determinaron diferentes ángulos de reposo de los taludes de la carretera tramo San Antonio- puente Chiquiacc.

El método de investigación fue el científico, tipo aplicada, nivel descriptivo de diseño causal; la población estuvo conformada por todos los taludes de macizo rocoso dentro de los 10 km de carretera desde el distrito San Antonio hasta el Puente Chiquiacc, Tayacaja – Huancavelica. y la muestra está conformada por el talud de macizo rocoso de las progresivas 10+430 - 10+440 de la carretera desde el distrito San Antonio hasta el puente Chiquiacc.

Producto de la investigación se concluye que según la evaluación geomecánica mediante la clasificación de Bieniawski, el macizo rocoso obtuvo una puntuación de 69, estableciéndose como Buena – IIb, posteriormente se realizó la clasificación de Romana tomando en cuenta la condición más desfavorable, siendo evaluado con una pendiente de talud de 10/1 (V/H), o su equivalente a 84.3°, el cual obtuvo un valor de 55.48 clasificándose como roca normal o parcialmente inestable; por lo tanto, puede presentar algunas o varias roturas de tipo cuña, donde se recomienda un sostenimiento de refuerzo, que puede constar de bulones o anclajes en mejor de los casos, y de gunita u hormigón proyectado en el peor de los escenarios

Palabras claves: evaluación geomecánica, macizo rocoso, ángulo de reposo del talud.

ABSTRACT

The present research work was raised as a general objective: to Establish the result of the evaluation geomechanics of rock mass to determine the angle of repose of a slope, road stretch of the San Antonio - Bridge Chiquiacc, Huancavelica 2021, whose general hypothesis was: the result of the evaluation geomechanics of rock mass is heterogeneous for each zone, for which we determined the angles of the rest of the slope of the road section between San Antonio - bridge Chiquiacc.

The research method was scientific, applied type, descriptive level of causal design; the population was made up of all the slopes of rocky massif within the 10 km of road from the San Antonio district to the Chiquiacc bridge, Tayacaja-Huancavelica. and the sample is made up of the rocky slope of the progressives 10+430 - 10+440 from the road from the San Antonio district to the Chiquiacc bridge.

Product of the research it is concluded that: According to the geomechanical evaluation by the Bieniawski classification, the rocky massif obtained a score of 69, establishing itself as Good – IIb, later the classification of Romana was made taking into account the most unfavorable condition, being evaluated with a slope of 10/1 (V/H), or its equivalent to 84.3° , which obtained a value of 55.48 classifying as normal or partially unstable rock, therefore, it may present some or several wedge-type breaks, where a reinforcement support is recommended, which may consist of bolts or anchors in the best case, and gunite or shotcrete in the worst case

Keywords: Geomechanical evaluation, slope rest angle, Rock Mass Rating (RMR), Slope Mass Rating (SMR).

INTRODUCCIÓN

La presente tesis fue concebida a raíz de los problemas que usualmente se presentan en la construcción de carreras, trochas y/o senderos con la presencia de macizos rocosos de grandes proporciones y poco grado de meteorización, el cual requiere de estudios geomecánicos para poder darte un tratamiento específico. Este problema también se presenta en el proyecto “Mejoramiento de la carretera cruce Salcahuasi – San Antonio – Puente Chiquiacc – Cruce Huachocolpa – Surcubamba – Abra Vista Alegre – Tintay Punco ruta HV 101, Tayacaja – Huancavelica”. En tal sentido vimos conveniente realizar la investigación de esta problemática, con el interés de conocer el ángulo del talud en los tramos de macizo rocoso de características similares, además de profundizar la indagación respecto a la clasificación geomecánica de Bieniawski y clasificación geomecánica Slope Mass Rating con interés académico y científico.

En tal sentido, el trabajo de investigación se estructura de la siguiente manera: en el capítulo I se realiza el planteamiento del estudio, donde se aborda de forma detallada el problema general, el objetivo del estudio, además, se detalla la justificación e importancia, la hipótesis, descripción y operacionalización de variables, la viabilidad del estudio y las limitaciones que este presenta.

En el capítulo II se desarrolla el marco teórico, el cual abarca estudios anteriores de problemas similares al que nos planteamos, además desarrollamos la teoría fundamental para la comprensión del tema, estudios geológicos y litológicos previos, como también planos y un conjunto de información del proyecto; por último, se desarrollan los conceptos fundamentales enfocados al objetivo de la investigación.

El capítulo III corresponde a la metodología, el método, tipo, nivel y diseño de la investigación; así como se detalla la población y muestra como también las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

El capítulo IV corresponde a los resultados, análisis y discusión de estos, estos en base a ambas clasificaciones geomecánicas, explicando los valores obtenidos en el estudio.

Posteriormente, se tiene las conclusiones y recomendaciones de la investigación, que fueron obtenidas después de la basta investigación teórico – práctico.

Finalmente, se adjuntan las referencias bibliográficas y anexos de la investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

Actualmente, en toda obra civil y/o minera como carreteras, labores mineras, túneles, puentes, entre otros; que involucre operaciones desarrolladas en la corteza terrestre, es de suma importancia llevar un control de la estabilidad del macizo rocoso y los taludes, debido al peligro que estos pueden presentar frente a la integridad de construcciones, patrimonios y de la sociedad.

El desarrollo de carreteras es de suma importancia; puesto que, permiten con facilidad la comunicación y desplazamiento entre locaciones distantes, incrementando el desarrollo económico y social, así como la generación de conocimientos y soluciones que propician el crecimiento a largo plazo. Sin embargo, la realización de este medio de transporte y comunicación, conlleva diferentes peligros durante y después de su construcción, tales como, deslizamiento de tierras y caída de rocas, por tal motivo es relevante realizar una evaluación geomecánica para conocer el comportamiento mecánico del macizo rocoso y poder prepararse ante cualquier evento, disminuyendo así el riesgo que estos pueden ocasionar, de tal manera que se pueda garantizar un normal, eficaz y un seguro desarrollo estos trabajos.

El proyecto “Mejoramiento de la carretera cruce Salcahuasi – San Antonio – Puente Chiquiacc – cruce Huachocolpa – Surcubamba – Abra Vista Alegre – Tintay Punco ruta HV 101, Tayacaja – Huancavelica” se viene ejecutando por el

consorcio Wanka Wasi; sin embargo, la remoción o extracción del material rocoso no cuenta con una evaluación geomecánica, el cual es de suma importancia para realizar los cálculos respectivos en diferentes procesos como perforación, voladura y la determinación del ángulo de reposo final del talud, los mismos que no fueron considerados inicialmente. Para poder dar solución a este problema nos formulamos la siguiente interrogante: ¿cuál es el resultado de la evaluación geomecánica del macizo rocoso para determinar el ángulo óptimo de reposo del talud, carretera tramo San Antonio - Puente Chiquiacc, Huancavelica 2021?

1.1.1. Problema general

¿Cuál es el resultado de la evaluación geomecánica del macizo rocoso para determinar el ángulo de reposo del talud, carretera tramo San Antonio - puente Chiquiacc, Huancavelica 2021?

1.1.2. Problemas específicos

- a) ¿Cuál es el resultado de la aplicación de la cartilla geomecánica de Bieniawski para determinar el ángulo de reposo del talud?
- b) ¿Cuál es el resultado de la aplicación de la cartilla geomecánica Slope Mass Rating para determinar el ángulo de reposo del talud?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Establecer el resultado de la evaluación geomecánica del macizo rocoso para determinar el ángulo de reposo del talud, carretera tramo San Antonio - Puente Chiquiacc, Huancavelica 2021.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Determinar el resultado de la aplicación de la cartilla geomecánica de Bieniawski para determinar el ángulo de reposo del talud.
- b) Determinar el resultado de la aplicación de la cartilla geomecánica Slope Mass Rating para determinar el ángulo de reposo del talud.

1.3. Justificación e importancia

El presente trabajo de investigación surge ante la necesidad de un estudio geomecánico del comportamiento del macizo rocoso en determinadas zonas del proyecto “Mejoramiento de la carretera Cruce Salcahuasi – San Antonio – Puente Chiquiacc – cruce Huachocolpa – Surcubamba – Abra Vista Alegre – Tintay Punco ruta HV 101, Tayacaja – Huancavelica” que viene siendo ejecutada por el consorcio Wanka Wasi, el cual es de vital importancia para realizar los cálculos respectivos en la determinación del ángulo de reposo del talud y los diferentes procesos como perforación y voladura, los mismos que no fueron considerados inicialmente en el presupuesto proyectado para la construcción de dicha carretera. Mediante este trabajo de investigación se busca solucionar el mencionado problema y así poder dar una base o sustento para los siguientes procesos en el desarrollo de este proyecto.

1.4. Hipótesis y descripción de variables

1.4.1. Hipótesis general

El resultado de la evaluación geomecánica del macizo rocoso es heterogéneo para cada zona, para las cuales se determinaron diferentes ángulos de reposo de los taludes de la carretera tramo San Antonio- Puente Chiquiacc.

1.4.2. Hipótesis específicas

- a) El resultado de la aplicación de la cartilla geomecánica de Bieniawski es importante para la determinación de la calidad del macizo rocoso, los cuales resultaron clasificaciones heterogéneas en cada zona.

- b) El resultado de la aplicación de la cartilla geomecánica Slope Mass Rating es el complemento para la determinación de las dimensiones geométricas de los taludes en excavaciones de macizos rocosos, las cuales fueron distintas en cada zona.

1.4.3. Descripción y operacionalización de variables

a) Variable independiente (X)

Evaluación geomecánica del macizo rocoso

- **Definición**

Es el proceso sistemático de caracterización estructural e hidrológico, con la aplicación de tablas que contienen parámetros geomecánicos, los cuales cuantifican la calidad y estabilidad del macizo rocoso.

- **Dimensión**

Caracterización estructural e hidrológico

- **Subdimensiones**

- Clasificación geomecánica de Bieniawski o RMR (Rock mass rating)
- Clasificación geomecánica Slope Mass Rating

- **Indicadores**

- Valoración geomecánica de Bieniawski o RMR (Rock mass rating).
- Valoración geomecánica Slope Mass Rating.

b) Variable dependiente (y)

Ángulo de reposo del talud

- **Definición**

Es una característica geométrica de una superficie inclinada de dimensiones determinadas de suelo o macizo rocoso respecto a la horizontal, evitando desplazamiento o caída del material.

- **Dimensión**

Característica geométrica

- **Subdimensión**

Dimensiones del talud

- **Indicadores**

- Angulo de talud
- Altura de talud

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. A nivel nacional

- Tesis titulada: “*Evaluación geomecánica de los taludes de la carretera Encañada – Celendín en el tramo Km. 32+000 - Km. 46+000*”. Investigación presentada para optar el grado académico de Ingeniero en la Universidad Nacional de Cajamarca. El trabajo llega a la conclusión de que la evaluación geomecánica de los taludes de la carretera Encañada - Celendín en el tramo km. 32+000 - km. 46+000, determina macizos rocosos homogéneos y heterogéneos. A través del cartografiado geológico se determinó el tipo de litología (ki-pa, Ks-yu, Qh-al, Qh-de, Qh-fl) que presenta de la carretera Encañada - Celendín en el tramo km. 32+000 - km. 46+000 (1).

- Tesis titulada: “*Evaluación geomecánica-geotécnica de la carretera El Tayal – Santa Isolina Bajo, provincia de Chota Cajamarca 2017*”. Investigación presentada para optar el grado académico de Ingeniero en la Universidad Nacional de Cajamarca. El trabajo llega a la conclusión de que la geología del área de investigación se caracteriza por presentar cuatro unidades geomorfométricas predominando la tipo ladera con pendientes que varían de 20° a 50°, constituidas por rocas de la formación Chúlec, formación Pariatambo y del grupo Pulluicana; así como depósitos cuaternarios recientes de origen aluvial, fluvio-aluvial y fluvial, asociadas en parte a problemas geodinámicos producto de las fuertes precipitaciones. (2)

- Tesis titulada: “*Estudio geomecánico para determinar el tipo de sostenimiento adecuado de los taludes en la carretera Trujillo - Otuzco Km. 10+000 al Km. 15+000*”. Investigación presentada para optar el grado académico de Ingeniero en la Universidad César Vallejo, con el problema de investigación: ¿Cuál sería el tipo de sostenimiento para prevenir el deslizamiento de roca en la carretera Trujillo- Otuzco km10+000 al km 15+000? Además, tiene como objetivo realizar el estudio geomecánico para determinar el tipo de sostenimiento adecuado en taludes en la carretera Trujillo- Otuzco km10+000 al km 15+000. Por otro lado, la hipótesis es que si se realiza el estudio geomecánico; entonces, se podrá determinar el tipo de sostenimiento adecuado en taludes en la carretera Trujillo- Otuzco km10+000 al km 15+000. Finalmente, se llega a la conclusión de que mediante un buen análisis y la utilización de guías de clasificación geomecánica se pudo deducir que, de los tramos de estudio, tres de ellos son los que requieren un tipo de sostenimiento ya que el tipo de roca que se encuentran es poca resistencia y, por ende, es propenso al deslizamiento de roca. Para ello se planteó el método de sostenimiento. (3)
- Tesis titulada: “*Estabilidad de taludes de la carretera longitudinal de la sierra; tramo Cochabamba-Cutervo-Chiple, Cajamarca-Perú*”. Investigación presentada para optar el grado académico de Magister en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, con el problema de investigación: ¿cómo evaluamos los parámetros geotécnicos, que influyen en la estabilidad de taludes sector de la carretera longitudinal de la sierra tramos Cochabamba-Cutervo, Chiple-Cajamarca? El objetivo del trabajo es evaluar los resultados de los parámetros geotécnicos de la interacción roca -suelo que afecte la estabilidad de los taludes sector de la carretera longitudinal de la sierra tramos Cochabamba- Cutervo, Chiple-Cajamarca- Perú., abril 2015. Además, la hipótesis es que los resultados de la evaluación de los parámetros geotécnicos, serán aplicados para conseguir la estabilidad de los taludes sector de la carretera longitudinal de la sierra tramos Cochabamba - Cutervo, Chiple-Cajamarca-Perú. Finalmente, se llegó a la conclusión: se determinó el aspecto cualitativo y cuantitativo de las juntas o fallas regionales y locales, así como también las microfallas que son rastros de desplazamiento de los

materiales de suelo y roca, se piensa que esta tesis está innovando al considerar el sentido del tratado directo de los materiales generados por un metamorfismo que desestabiliza el macizo rocoso o la estructura suprayacente, no existe bibliografía precedente en este tema. La arcilla y la infiltración de agua que favoreció los colapsos, subsidencias, reptaciones seguidas de post – fracturamientos. (4)

- Tesis titulada: “*Caracterización geotécnica y modos de falla estructural en el talud en roca del cerro Espinal Juliaca*”. Investigación presentada para optar el grado académico de Ingeniero en la Universidad Nacional del Altiplano, con el problema de investigación: ¿cómo es la caracterización geotécnica y los modos de falla estructural en el talud de roca del cerro Espinal Juliaca? El objetivo del trabajo es realizar una caracterización geotécnica e identificar los modos de falla estructural en el talud de roca del cerro Espinal Juliaca. Además, la hipótesis presentada es que la caracterización geotécnica estará relacionada con los modos de falla estructural presentes en el talud del cerro Espinal Juliaca. Finalmente, se llega a la conclusión: las características geotécnicas presentes en el talud del cerro Espinal están condicionadas a las características geológicas, estructurales y de macizo rocoso. En el presente trabajo se generalizo todo el talud de corte, en cuanto a la litología, alteración, parámetros estructurales, resistencia a la compresión simple, ángulo de fricción básico, presencia de agua, etc. Estas características fueron medidos e identificados en el campo. Debido a que todo el talud se encuentra en una roca muy competente y con un grado de fracturamiento regular analizamos los modos de falla estructural típicos en el talud con la ayuda de las proyecciones estereográficas del software Dips v.6.0. para finalizar con el análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite para un modo de falla por vuelco con la ayuda del software RocTopple v.1.0. (5)
- Tesis titulada: “*Análisis y diseño de la estabilidad de talud en el sector Sausacocha – Pallar Km. 8+000 Al 9+000 provincia de Sánchez Carrión, departamento de La Libertad, 2017*”. Investigación presentada para optar el grado académico de Ingeniero en la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Se llega a la conclusión: se realizó el estudio de mecánica de

suelos obteniendo como resultado que el talud presenta cuatro estratos diferentes, la primera compuesta por depósitos de material inconsolidado recientes y fragmentos rocosos coluviales, la segunda corresponde a una material de fragmentos rocosos grandes y con poca matriz limo arcillosa, la tercera lo conforma el material gravoso con arcilla limosa, y el ultimo estrato que es la roca madre. (6)

2.1.2. A nivel internacional

- Tesis titulada: “*Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada*”. Investigación presentada para optar el grado de Doctor en la Universidad Politécnica de Madrid, Se plantea como objetivo investigar la estabilidad de taludes en macizos rocosos, y desarrollar un procedimiento de cálculo que sea sencillo de utilizar basándose en un criterio de rotura no lineal y en leyes de fluencia no asociada; es decir, incorporando los factores clave que condicionan la rotura en un medio rocoso. El trabajo llega a la conclusión de que el método desarrollado en esta tesis es válido puesto que los resultados obtenidos mediante la metodología desarrollada en el capítulo V y dados en el capítulo VI en forma de ábacos son concordantes con los resultados obtenidos mediante el programa comercial geotécnico SlopeAV. La comparación viene dada en el Capítulo 7 de "contraste y validación del método". La similitud de los resultados obtenidos se verifica mediante la diferencia entre los valores de factores de seguridad (FS) calculados mediante estos dos procedimientos que es para 144 casos estudiados de deslizamiento plano claramente inferior al 2.5 % (salvo en 14 casos es hasta el 6 %), y para 27 casos analizados de deslizamiento circular no supera el 5 %. (7)

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Taludes

Un talud, es una masa de tierra inclinada que está compuesta de suelo o roca, adopta esta forma temporal o permanentemente.

“Se entiende como taludes a cualquier superficie inclinada, de un macizo rocoso o suelo, que forme un ángulo con la horizontal, los taludes se clasifican

en taludes naturales, que se presentan en forma de laderas, y en taludes artificiales que pueden ser los cortes y terraplenes”. (8 pág. 27)

2.2.1.1. Tipos de taludes

a) Naturales:

También llamado ladera, se produce cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural a lo largo de la historia geológica.

“Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad”. (8)

b) Artificiales

Se le denomina así cuando se conformó artificialmente, en otras palabras, cuando este se produjo con la intervención del hombre, siendo un componente esencial en la construcción de obras como carreteras, represas, ferrocarriles, entre otros.

2.2.1.2. Elementos de un talud

En un talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

a) Altura

Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados. (9)

b) Pie

Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior. (9)

c) Cabeza o escarpe

Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior. (9)

d) Altura del nivel freático

Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza. (9)

e) Pendiente:

Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación $m/1$, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. (9)

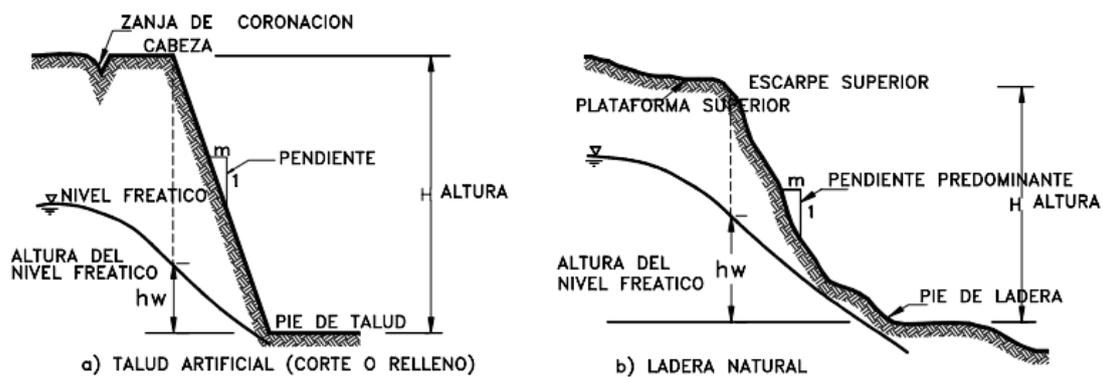


Figura 1. Elementos de un talud
Tomado de Díaz, Ing. Jaime Suárez

2.2.1.3. Estabilidad de taludes

Se entiende por estabilidad a la seguridad de una masa de tierra contra la ruptura del material o deslizamiento del material. Como primera medida es necesario definir criterios de estabilidad de taludes, entendiéndose por tales algo tan simple como el poder decir en un instante dado cuál será la inclinación apropiada en un corte o en un terraplén; casi siempre la más apropiada será la más escarpada que se sostenga el tiempo necesario sin caerse. Este es el centro del problema y la razón de estudio. (10)

El principal problema que se plantea a la hora de proyectar cualquier tipo de explanación es asegurar la estabilidad de sus taludes, ya que las características resistentes de ese suelo de nada servirán si se producen continuos deslizamientos que pongan en peligro la funcionalidad de la carretera a la que sirven de soporte. (10 pág. 16)

Parece claro que la estabilidad de un talud depende tanto de su geometría pendiente y altura como de las características Intrínsecas del propio suelo que conforma el ángulo de rozamiento interno y cohesión y que definen su resistencia a cizalla. (10 pág. 16)

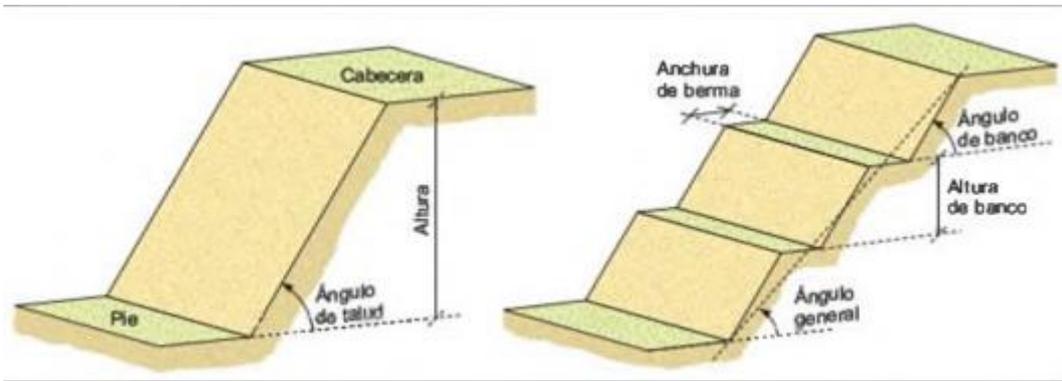


Figura 2. Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos. (11)

2.2.1.4. 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).

Los factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos se consideran factores condicionantes, y son intrínsecos a los materiales naturales. (11)

Junto a los factores condicionantes de la estabilidad de los taludes (también denominados «pasivos»), los factores desencadenantes o «activos» provocan la rotura una vez que se cumplen una serie de condiciones. Estos últimos son factores externos que actúan sobre los suelos o macizos rocosos, modificando sus características y propiedades y las condiciones de equilibrio del talud. (11)

Tabla 1. Factores Influyentes en la inestabilidad 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.

Tomado de Ingeniería Geológica, 2002. (11)

2.2.1.5. Procesos en la etapa de deterioro

El deterioro, con el tiempo puede dar lugar a la necesidad de mantenimiento o construcción de obras de estabilización. Al deterioro, sin embargo, se le da muy poca atención en el momento del diseño y el énfasis se dirige a evitar las fallas profundas, más que a evitar los fenómenos anteriores a la falla. (9)

Cuando un talud se corta, para la construcción de una vía o de una obra de infraestructura, ocurre una relajación de los esfuerzos de confinamiento y una exposición al medio ambiente, cambiándose la posición de equilibrio por una de deterioro acelerado. (9)

El deterioro comprende la alteración física y química de los materiales y su subsecuente desprendimiento o remoción. Este incluye la alteración mineral, los efectos de relajación y la abrasión. La iniciación y propagación de fracturas es de significancia particular en la destrucción de la superficie que puede conducir a caídos de roca o colapso del talud. (9)

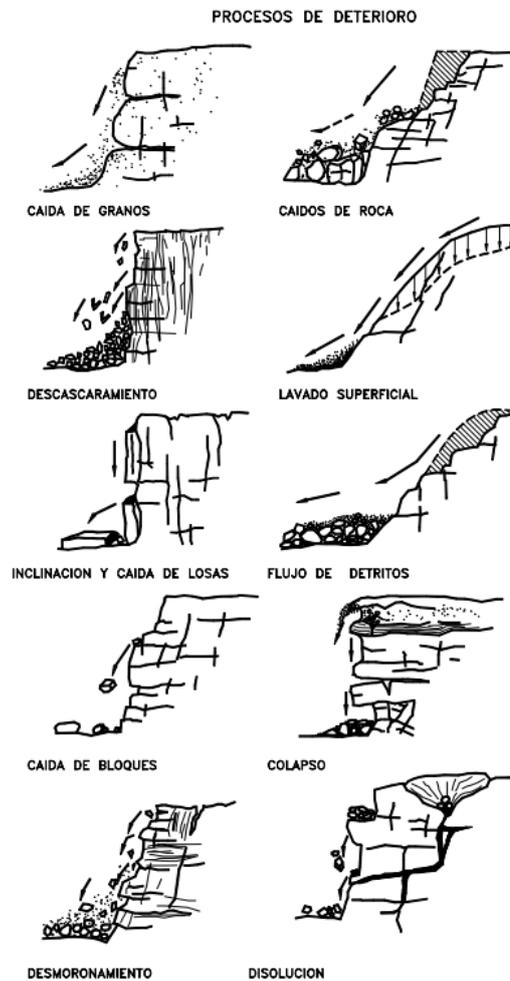


Figura 3. Proceso de deterioro en macizos rocosos
Tomado de Nicholson y Hencher, 1997

- **Caída de granos**

Consiste en la caída de granos individuales de la masa de roca con desintegración física a granos como prerequisite. Depende de la resistencia de las uniones intergranulares y las microgrietas relacionadas con los granos. Esto causa un debilitamiento general del material de roca; sin embargo, no representa una amenaza en sí misma, pero puede conducir a la pérdida de soporte y subsecuente colapso en pequeña escala. Los finos pueden sedimentarse y producir depósitos dentro de las estructuras de drenaje. Frente a esto, la solución se sugiere la limpieza de los residuos en el pie del talud y el cubrimiento con técnicas de bioingeniería concreto lanzado y refuerzo local, donde exista riesgo de colapso. (9)

- **Descascaramiento**

Caída de cáscaras de material de la masa de roca. Las cáscaras tienen forma de láminas con una dimensión significativamente menor a las otras dos dimensiones. Puede reflejar la litología, fisilidad, o puede reflejar la penetración de la meteorización. Los fragmentos en forma de láminas no son grandes y no constituyen una amenaza significativa, sin embargo, se produce un depósito de sedimentos en el pie del talud. (9)

- **Formación, inclinación y caída de losas de roca**

Se forman prismas o pequeñas placas con dimensión mínima de 50 mm, pudiendo existir deslizamiento y rotación o pandeo. Generalmente, las fracturas a tensión paralelas a la superficie del talud son prerequisite para su ocurrencia, seguidas por la pérdida de soporte. Pueden caer grandes bloques de material y pueden significar una amenaza importante, causando daño a los canales de drenaje, cercas, pavimentos o puede crear taludes negativos. Las inclinaciones pueden considerarse como un proceso de deterioro o como un movimiento del talud. (9)

- **Caída de bloques**

Pueden caer por gravedad, en forma ocasional bloques individuales de roca de cualquier dimensión, produciendo un deterioro en la estructura del talud. La amenaza es difícil de predecir debido al gran rango de tamaños que pueden caer y especialmente los bloques grandes pueden causar daño estructural. En ocasiones bajan saltando y rodando y pueden caminar grandes distancias. Estos caídos corresponden a los caídos de roca en la clasificación general de movimientos en taludes. (9)

- **Desmoronamiento del talud**

El desmoronamiento general del talud produce la caída de bloques de diversas dimensiones en forma semicontinua. Puede causar una amenaza significativa y crear grandes acumulaciones de detritos en el pie del talud. (9)

- **Caídos de roca**

La caída de muchos bloques de roca en un solo evento requiere que haya ocurrido un debilitamiento de la masa de roca, debido a la fragmentación y a la ausencia de soporte lateral. El volumen de la falla depende de los diversos planos de discontinuidad y puede cubrir en un solo momento varios planos (falla en escalera). (9)

- **Lavado superficial o erosión**

La erosión es el desprendimiento, transporte y el depósito de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua. El flujo puede concentrarse en canales produciendo surcos y cárcavas. Las gotas de lluvia pueden contribuir al desprendimiento de las partículas o granos. Puede producir sedimentación de materiales en el pie del talud. (9)

- **Flujo de detritos**

El desprendimiento y transporte de partículas gruesas y finas en una matriz de agua y granos en forma de flujo seco o saturado. Los flujos de detritos son impredecibles, mueven grandes volúmenes de material y pueden crear una amenaza moderada a alta. Se requiere un análisis especial de cada caso para su tratamiento. Generalmente no se les considera como procesos de deterioro sino como deslizamientos. Sin embargo, pueden generar grandes deslizamientos del macizo al producir cambios topográficos importantes. (9)

- **Colapso**

Bloques independientes de gran tamaño colapsan debido a la falta de soporte vertical. El tamaño de los bloques es de más de 500 mm e incluyen los taludes negativos (overhangs). Representa una escala grande de amenaza, de acuerdo a su tamaño y potencial de colapso. Las soluciones incluyen concreto dental, estructuras de refuerzo, submuración y otras estructuras de retención. (9)

- **Disolución**

La disolución de materiales solubles en agua que puede ser acelerado por las condiciones locales, especialmente la presencia de aguas agresivas. Puede producir cavidades internas que podrían colapsar o formar cárcavas kársticas. (9)

2.2.1.6. Clasificación de los movimientos en masa

La clasificación de los movimientos en masa puede presentarse de diversas formas, pero se presenta el sistema propuesto originalmente por Varnes (1978), el cual tipifica los principales tipos de movimiento. (9)

- **Caído**

En los caídos una masa de cualquier tamaño se desprende de un talud de pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte y desciende principalmente, a través del aire por caída libre, a saltos o rodando. (9)

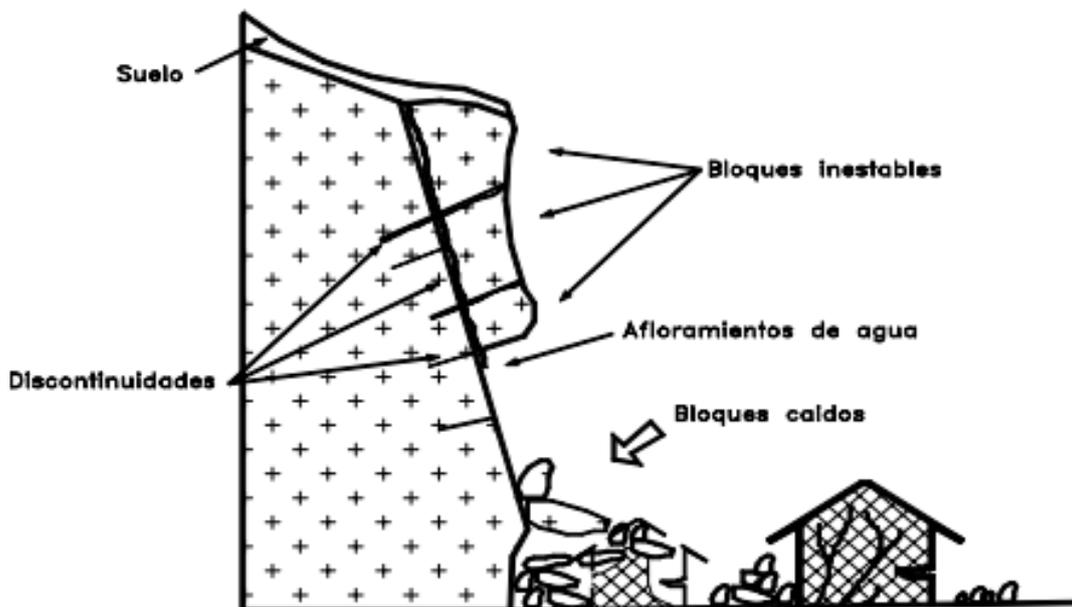


Figura 4. Caídos de bloques por gravedad en roca fracturada (9)

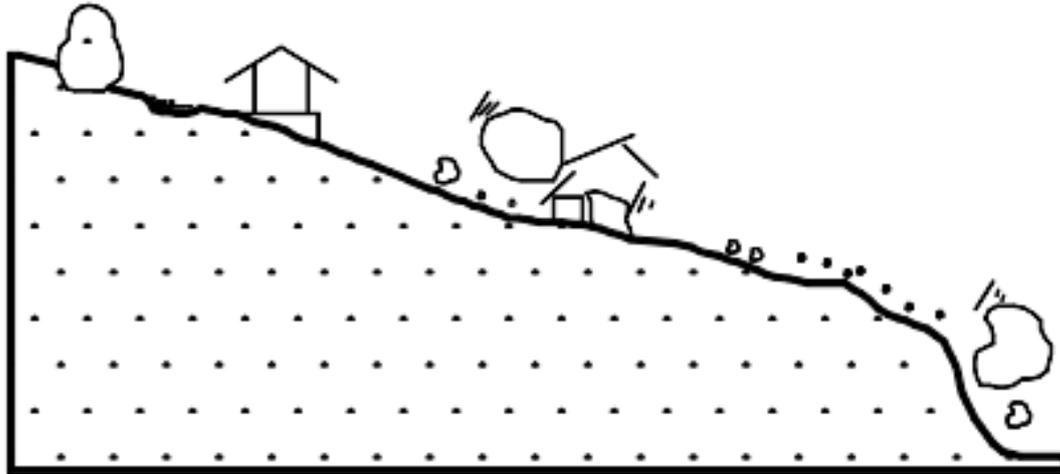


Figura 5. Caídos de bloques rodando (9)

El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido y puede o no, ser precedido de movimientos menores que conduzcan a la separación progresiva o inclinación del bloque o masa de material. La observación muestra que los movimientos tienden a comportarse como caídos de caída libre cuando la pendiente superficial es de más de 75 grados. En taludes de ángulo menor generalmente, los materiales rebotan y en los taludes de menos de 45 grados los materiales tienden a rodar. (9)

Los caídos de roca corresponden a bloques de roca relativamente sana, los caídos de residuos o detritos están compuestos por fragmentos de materiales pétreos y los caídos de tierra corresponden a materiales compuestos de partículas pequeñas de suelo o masas blandas. (9)

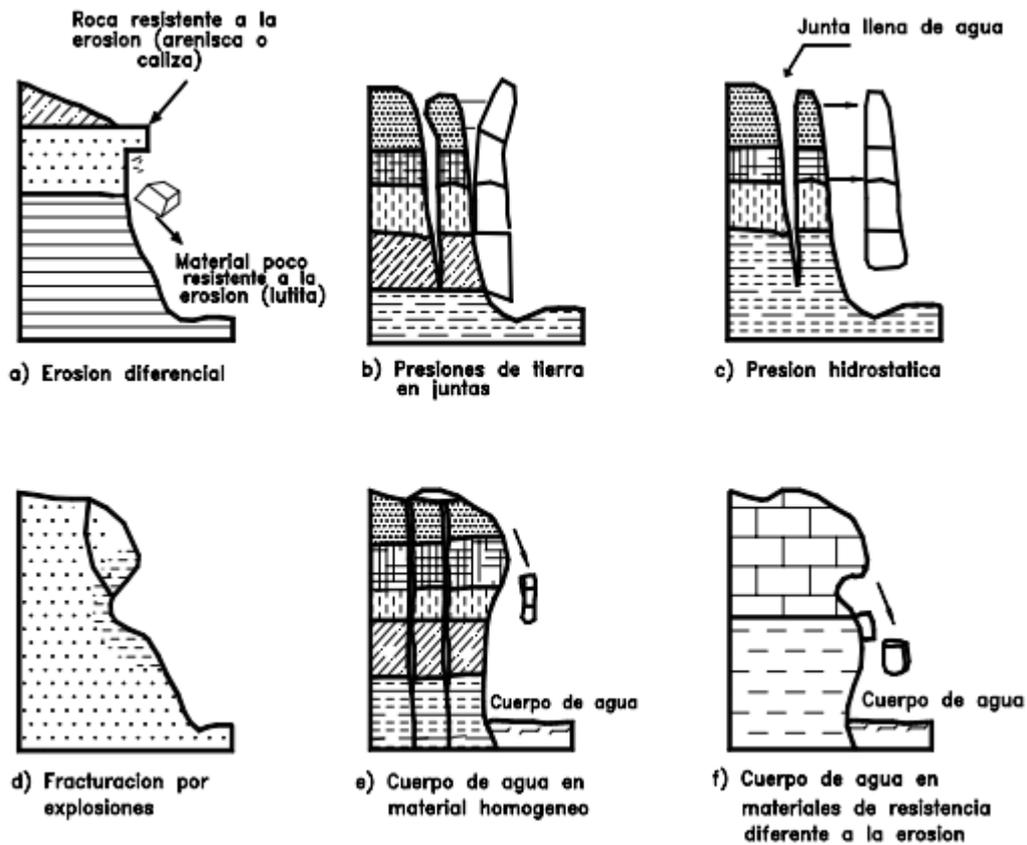


Figura 6. Algunos mecanismos de falla de caídos (9)

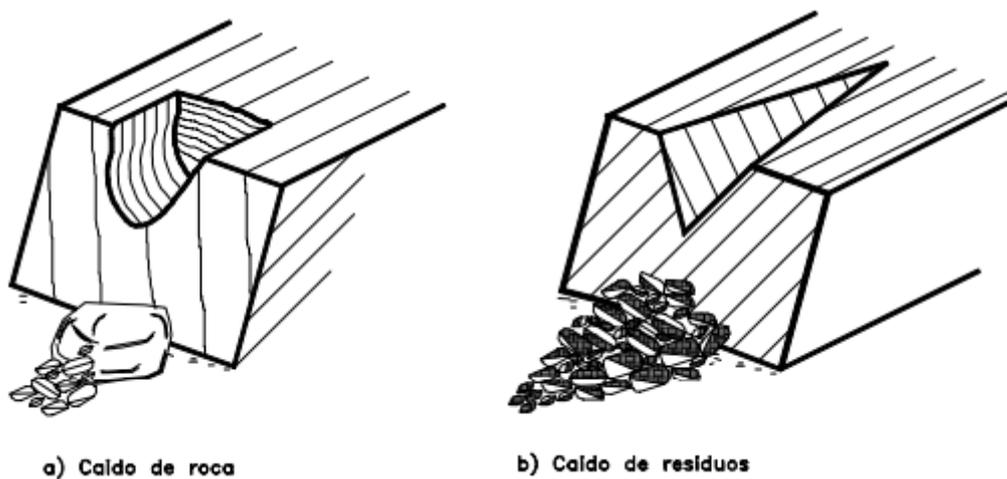


Figura 7. Esquema de caídos de roca y residuos (9)

▪ Inclinación o volteo

Este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia adelante de una unidad o unidades de material térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad y generalmente, ocurren en las formaciones rocosas. (9)

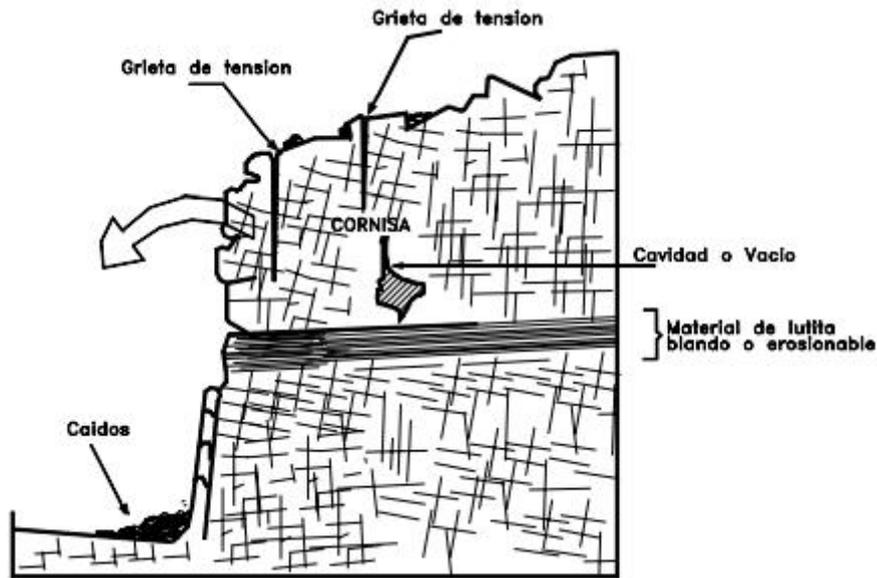


Figura 8. Volteo o inclinación en materiales residuales (9)

Las fuerzas que lo producen son generadas por las unidades adyacentes, el agua en las grietas o juntas, expansiones y los movimientos sísmicos. La inclinación puede abarcar zonas muy pequeñas o incluir volúmenes de varios millones de metros cúbicos. (9)

Dependiendo de las características geométricas y de estructura geológica, la inclinación puede o no terminar en caídos o en derrumbes. Las inclinaciones pueden variar de extremadamente lentas a extremadamente rápidas. Las características de la estructura de la formación geológica determinan la forma de ocurrencia de la inclinación. (9)

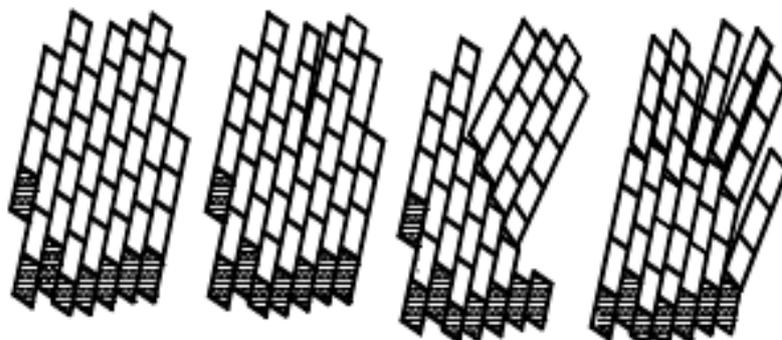


Figura 9. Proceso de falla al volteo (9)

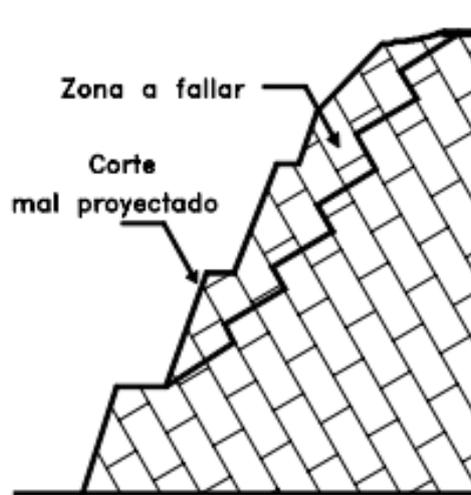


Figura 10. El volteo puede generar un desmoronamiento del talud o falla en escalera (9)

▪ **Reptación**

La reptación consiste en movimientos muy lentos a extremadamente lentos del suelo subsuperficial sin una superficie de falla definida. Generalmente, el movimiento es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno. Se le atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en suelos, usualmente, muy blandos o alterados. La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos. (9)

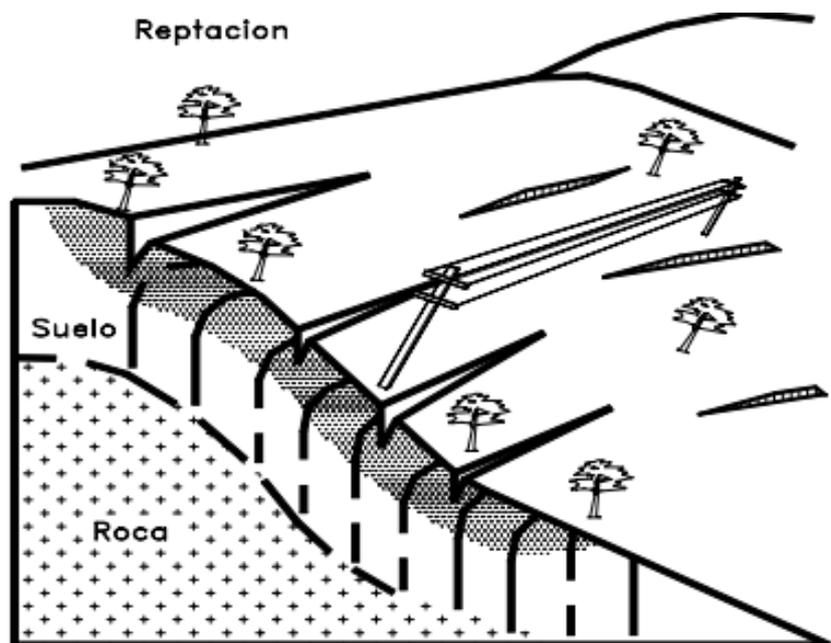


Figura 11. Esquema de un proceso de reptación (9)

- **Deslizamiento**

Este movimiento consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada. El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda, la que sería, la superficie de falla. Los deslizamientos pueden ser de una sola masa que se mueve o pueden comprender varias unidades o masas semiindependientes. Los deslizamientos pueden obedecer a procesos naturales o a desestabilización de masas de tierra por el efecto de cortes, rellenos, deforestación, etc. (9)

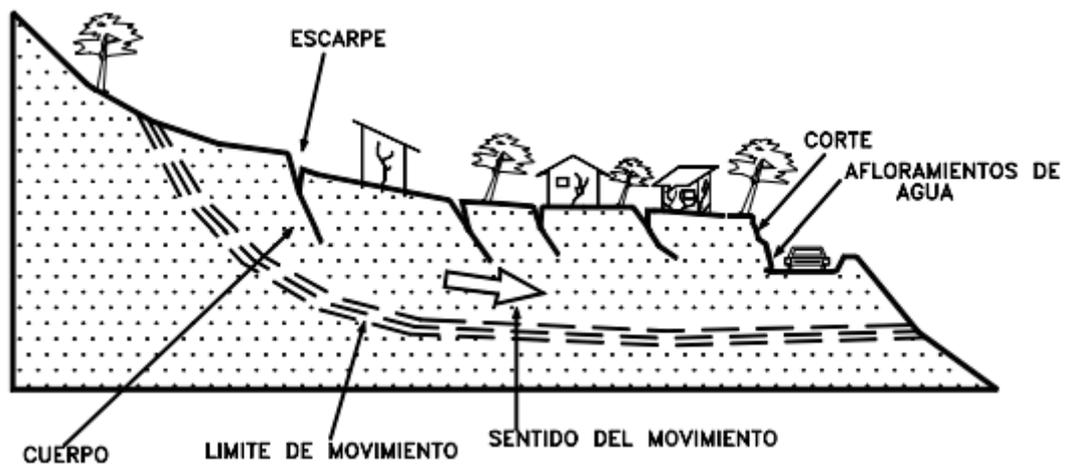


Figura 12. Deslizamientos en suelos blandos (9)

Los deslizamientos se pueden a su vez dividir en dos subtipos denominados deslizamientos rotacionales y traslacionales o planares.

- **Esparcimiento lateral**

En los esparcimientos laterales el modo de movimiento dominante es la extensión lateral acomodada por fracturas de corte y tensión. El mecanismo de falla puede incluir elementos no solo de rotación y translación sino también de flujo [...] Los esparcimientos laterales pueden ocurrir en masas de roca sobre suelos plásticos y también se forman en suelos finos, tales como arcillas y limos sensitivos que pierden gran parte de su resistencia al remodelarse. (9)

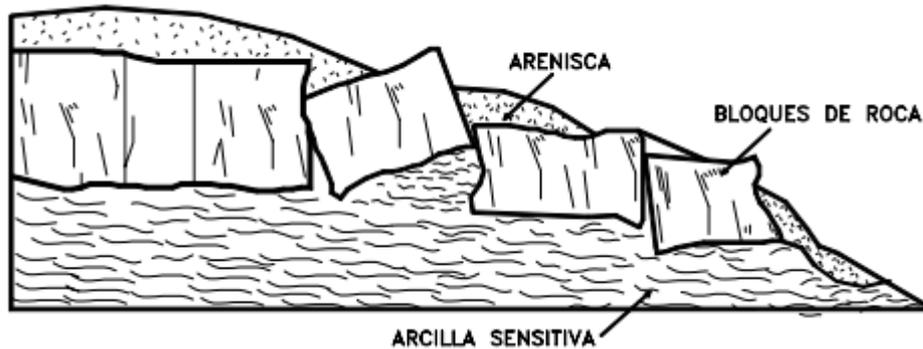


Figura 13. Esquema de un esparcimiento lateral (9)

▪ **Flujo**

En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos, así como secos o húmedos y los puede haber de roca, de residuos o de suelo o tierra.

a) Flujo en roca: los movimientos de flujo en roca comprenden las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas.

b) Flujo de residuos (Detritos): por lo general, un flujo de rocas termina en uno de residuos. Los materiales se van triturando por el mismo proceso de flujo y se puede observar una diferencia importante de tamaños entre la cabeza y el pie del movimiento.

c) Flujo de suelo: los flujos de suelo también pueden ser secos y más lentos de acuerdo a la humedad y pendiente de la zona de ocurrencia.

d) Flujos de lodo: dentro de los flujos de tierra están los “flujos de lodo”, en los cuales los materiales de suelo son muy finos y las humedades muy altas y ya se puede hablar de viscosidad propiamente dicha, llegándose al punto de suelos suspendidos en agua. Los flujos de lodo poseen fuerzas destructoras grandes que dependen de su caudal y velocidad.

e) **Avalanchas:** en las avalanchas la falla progresiva es muy rápida y el flujo desciende formando una especie de ríos de roca y suelo. Estos flujos comúnmente se relacionan con lluvias ocasionales.

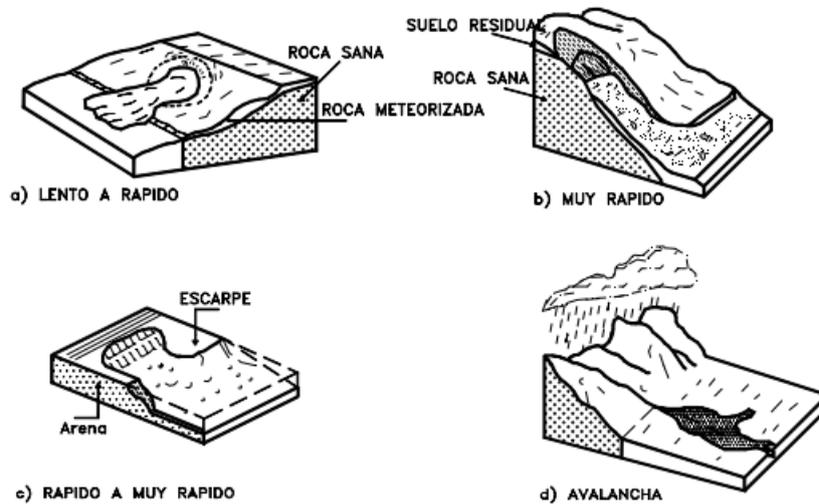


Figura 14. Flujos de diferentes velocidades (9)

2.2.1.7. Tipos de roturas de taludes en roca.

Los diferentes tipos de roturas están condicionados por el grado de fracturación del macizo rocoso y por la orientación y distribución de las discontinuidades con respecto al talud, quedando la estabilidad definida por los parámetros resistentes de las discontinuidades y de la matriz rocosa. (11)

✓ **Rotura plana.** Se produce a favor de una superficie preexistente, que puede ser la estratificación, una junta tectónica, una falla, etc. La condición básica es la presencia de discontinuidades buzando a favor del talud y con su misma dirección [...]. (11)

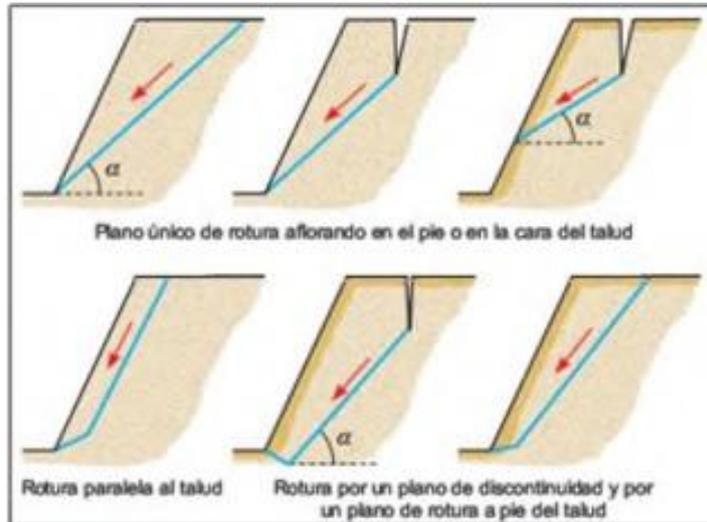


Figura 15. Tipos de rotura plana. Tomado de Ingeniería Geológica, 2002 (11)

- ✓ **Rotura en cuña.** Corresponde al deslizamiento de un bloque en forma de cuña, formado por dos planos de discontinuidad, a favor de su línea de intersección. Para que se produzca este tipo de rotura, los dos planos deben aflorar en la superficie del talud. (11)

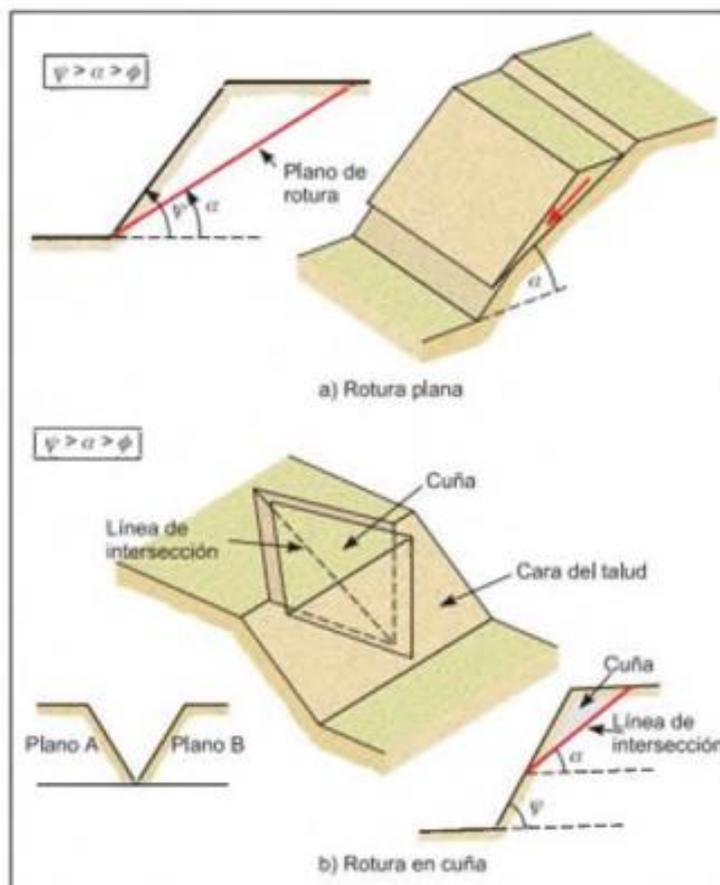


Figura 16. Condiciones para la rotura plana y para la rotura en cuña Tomado de Ingeniería Geológica, 2002 (11)

- ✓ **Vuelco por estratos.** Se produce en taludes de macizos rocosos donde los estratos presentan buzamiento contrario a la inclinación del talud y dirección paralela o subparalela al mismo. En general, los estratos aparecen fracturados en bloques a favor de sistemas de discontinuidades ortogonales entre sí [...].
(11)

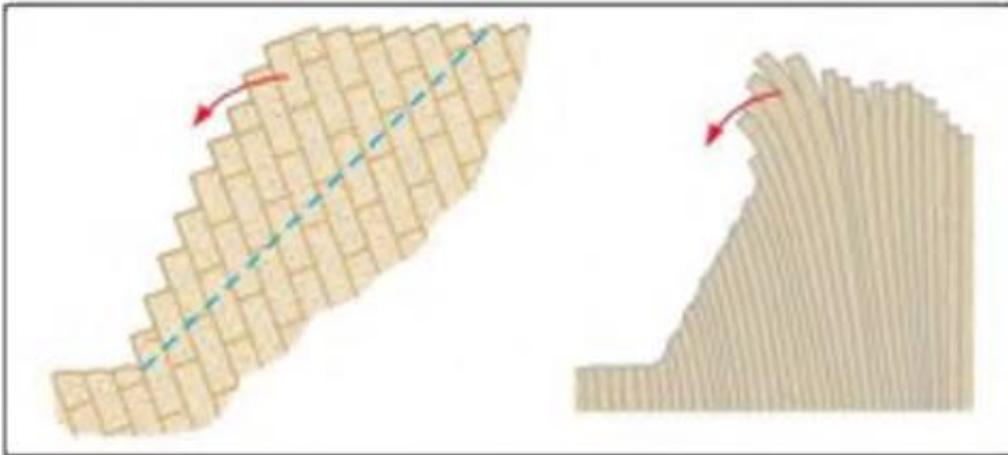


Figura 17. Esquema de taludes con estructura favorable al vuelco de estratos
Tomado de Ingeniería Geológica, 2002 (11)

- ✓ **Rotura por pandeo.** Este tipo de rotura se produce a favor de planos de estratificación paralelos al talud con buzamiento mayor que el ángulo de rozamiento interno. La rotura puede ocurrir con o sin flexión del estrato; la condición necesaria es que los estratos sean suficientemente esbeltos, en relación con la altura del talud, para poder pandear.

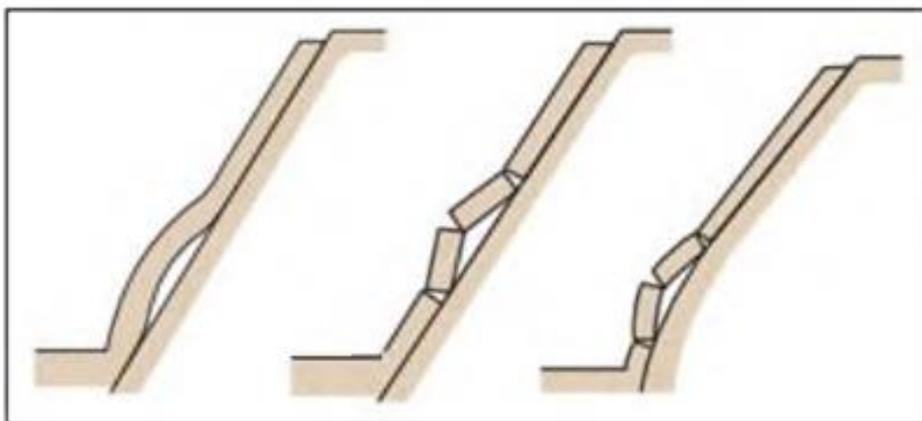


Figura 18. Esquema de pandeo en estratos verticalizados, con flexión y fractura de los estratos
Tomado de Ingeniería geológica, 2002 (11)

2.2.2. Mecánica de rocas

Es la ciencia teórica y aplicada que estudia el comportamiento mecánico de las rocas y de los macizos rocosos. Sería pues la rama de la ingeniería dedicada al estudio de la respuesta de las rocas y macizo rocosos al campo de fuerzas que actúan en su entorno. (12)

Así definida, esta disciplina es básica para la minería y la ingeniería civil, ya que el hecho de realizar excavaciones modifica los campos de fuerza en el entorno físico de las rocas. Como se podrá ver en el desarrollo de este libro, el estudio de la respuesta de los materiales requiere la aplicación de un buen número de técnicas analíticas desarrolladas específicamente para la materia y que hoy día forman parte de su cuerpo de doctrina. La mecánica de rocas forma a su vez parte de la geotecnia o geomecánica, que estudia el comportamiento de todos los materiales de origen geológicos por sí solos y en su interacción con estructuras y de la que también forma parte la mecánica de suelos. (12)

El problema ingenieril del diseño estructural de excavaciones, ya sean subterráneas o a cielo abierto, que trata de resolver la mecánica de rocas es la predicción del comportamiento mecánico del macizo rocoso en una determinada obra o explotación sujeta a las cargas que se le apliquen a lo largo de toda su vida operativa; contemplada desde este punto de vista la mecánica de rocas se debería llamar más propiamente ingeniería de los macizos rocosos. (12)

La mecánica de rocas aplicada a la práctica minera y a la de ingeniería civil parte de la ingeniería mecánica clásica y de la mecánica de medios continuos, pero la naturaleza variable de los materiales que analiza, la confieren un elevado número de factores específicos que la identifican como una disciplina diferente y coherente del campo de las ingenierías de minas y civil. (12)

2.2.2.1. Propiedades físicas y mecánicas de las rocas

Las propiedades físicas de las rocas son el resultado de su composición mineralógica, fábrica e historia geológica, deformacional y ambiental, incluyendo los procesos de alteración y meteorización [...] estas propiedades se reflejan en comportamientos mecánicos diferentes frente a las fuerzas que se aplican sobre las rocas, comportamientos que quedan definidos por la resistencia del material

y por su modelo de deformación; así mientras un granito sano se comporta de forma elástica y frágil frente a elevadas cargas, una marga o una lutita pueden presentar un comportamiento dúctil ante esfuerzos moderados o bajos. (11)

En las propiedades y en el comportamiento mecánico de los macizos rocosos competentes influye el grado de fracturación y de meteorización, la presencia de agua, la orientación y tipo de discontinuidades, el tamaño de bloques, etc. (11)

	Propiedades	Métodos de determinación
Propiedades de identificación y clasificación	Composición mineralógica. Fábrica y textura. Tamaño de grano. Color.	Descripción visual. Microscopía óptica y electrónica. Difracción de rayos X.
	Porosidad (n).	Técnicas de laboratorio.
	Peso específico (γ).	
	Contenido en humedad.	
	Permeabilidad (coeficiente de permeabilidad, k).	Ensayo de permeabilidad.
Durabilidad. Alterabilidad (índice de alterabilidad).	Ensayos de alterabilidad.	
Propiedades mecánicas	Resistencia a compresión simple (σ_c).	Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de carga puntual. Martillo Schmidt.
	Resistencia a tracción (σ_t).	Ensayo de tracción directa. Ensayo de tracción indirecta.
	Velocidad de ondas sísmicas (V_p , V_s).	Medida de velocidad de ondas elásticas en laboratorio.
	Resistencia (parámetros c y ϕ).	Ensayo de compresión triaxial.
	Deformabilidad (módulos de deformación elástica estáticos o dinámicos: E , ν).	Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de velocidad sísmica.

Figura 19. Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación (11)

2.2.2.2. Meteorización de macizos rocosos

Los procesos de meteorización que actúan sobre el macizo rocoso afectan tanto a los bloques de matriz rocosa como a los planos de debilidad o discontinuidad existentes. Como consecuencia de la meteorización mecánica o física de los macizos rocosos se pueden abrir las discontinuidades existentes o crearse otras nuevas por fractura de la roca, al romperse los contactos entre granos o producirse la rotura de los minerales de la matriz rocosa. Las discontinuidades son caminos preferentes para el agua, contribuyendo a incrementar la meteorización física y química. (11)

2.2.2.3. Discontinuidades

Las superficies o planos de discontinuidad de los macizos rocosos condicionan de una forma definitiva sus propiedades y comportamiento resistente, deformacional e hidráulico. Las discontinuidades imprimen un carácter discontinuo y anisótropo a los macizos, haciéndolos más deformables y débiles, lo que supone una gran dificultad para evaluar el comportamiento mecánico de los mismos frente a las obras de ingeniería. Las discontinuidades representan planos preferentes de alteración, meteorización y fractura, y permiten el flujo de agua. (11)

La orientación relativa de las discontinuidades con respecto a una instalación u obra de ingeniería (excavación, cimentación, etc.) puede suponer que el terreno sea o no estable [...]. (11)

- **Tipos de discontinuidades**

- ✓ **Las diaclasas o juntas**, son los planos de discontinuidad más frecuentes en los macizos rocosos, y corresponden a superficies de fracturación o rotura de la roca a favor de las cuales no ha habido desplazamiento o ha sido muy pequeño. Afectan a cualquier tipo de roca. Atendiendo a su origen se distinguen varios. (11)
- ✓ **Los planos de estratificación**, son las superficies que limitan los estratos en las rocas sedimentarias. Se trata de discontinuidades sistemáticas con una continuidad elevada, y cuyo espaciado oscila generalmente entre unos pocos centímetros y varios metros. (11)
- ✓ **Las superficies de laminación**, son discontinuidades sistemáticas que aparecen en las rocas sedimentarias, correspondiendo a los planos que limitan las láminas o los niveles megascópicos más pequeños de una secuencia sedimentaria. (11)
- ✓ **Los planos de esquistosidad**, de origen tectónico, aparecen en rocas que han sufrido una deformación importante, disponiéndose perpendicularmente a la dirección compresiva del máximo acortamiento. Estas discontinuidades

sistemáticas se desarrollan mejor cuanto más pequeño es el grano de la roca, presentan una frecuencia alta y espaciados de orden milimétrico. (11)

- ✓ **Las superficies de contacto litológico**, son planos singulares de separación entre diferentes litologías de un macizo rocoso.

- ✓ **Las fallas**, son discontinuidades singulares que corresponden a planos de rotura o fracturación con desplazamiento relativo entre los bloques.

2.2.3. Evaluación geomecánica

2.2.3.1. Mapeo geomecánico

El primer paso es el acopio de la información geomecánica que se debe llevar a cabo mediante diferentes tipos de mapeos geotécnicos. Los métodos de mapeo geotécnico más confiables son los que se realizan directamente sobre afloramientos de macizos rocosos, estos métodos son los convencionales y comprenden el “método de líneas en detalle” y el “método de celdas en detalle”. En el primer caso el mapeo se lleva a cabo a través de una línea extendida a través del afloramiento rocoso, y en el segundo caso el mapeo se realiza sobre un área de afloramiento rocoso de extensión variable, sea en superficie o en subterráneo. Los lugares del mapeo, denominados también estaciones de medición, deberán ser colocados en los planos geológicos – geomecánicos. (13)

Además, se indica que cuando no se dispone de afloramientos rocosos, se pueden aprovechar los testigos de las perforaciones diamantinas para realizar sobre ellos el mapeo geotécnico de la masa rocosa en donde se ubican estas perforaciones. Quedan también las alternativas de realizar el mapeo geotécnico en el interior de taladros perforados en la masa rocosa, utilizando mecanismos de endoscopia, y el mapeo geotécnico utilizando la fotogrametría. (13)

Finalmente, lo recomendable es que los parámetros de observación y medición deben ser obtenidos en formatos de registro diseñados para cada evaluación, adecuándolos a las normas sugeridas. Los parámetros más importantes a ser mapeados, sin ser limitativos, son: tipo de roca, tipo de sistema de discontinuidad, orientación, espaciado, persistencia, apertura, rugosidad, tipo

de relleno, espesor del relleno, intemperización y presencia de agua. Adicionalmente se deben registrar datos sobre el RCU y la frecuencia de fracturamiento, en este último caso para obtener el RQD. (13)

2.2.3.2. Clasificaciones geomecánicas

a) Sistema de clasificación Rock Mass Rating (RMR) desarrollado por Bieniawski

El sistema Rock Mass Rating (RMR) es una referencia mundial para clasificar geomecánicamente el macizo rocoso. Desarrollado inicialmente por Bieniawski en 1973, posteriormente, actualizado en 1989, el sistema RMR ha sido nuevamente actualizado en 2014, modificando los criterios de valoración e incorporando el efecto de la alterabilidad de la matriz rocosa por el agua, el cual ofrece un enfoque más acertado para calificar el macizo rocoso. (14)

Geocontrol en el año 2000 realizó una modificación al sistema RMR89, la cual consistió en la sustitución de la valoración del RQD y del espaciado de discontinuidades por la valoración del número de juntas por metro en el frente y una ampliación de los criterios de valoración de las características de las discontinuidades, ello implicó la eliminación de las dificultades para calcular el RQD en los frentes de la excavación y mejora de la valoración del estado de juntas en el macizo rocoso. (14)

La estructura del RMR₁₄ se basa en cinco parámetros, de los cuales se mantienen constantes las valoraciones de tres de los parámetros de los establecidos en el RMR₈₉: la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta, número de juntas por metro y efecto del agua. Los dos nuevos parámetros que se incluyen en el RMR₁₄ son: la resistencia de las discontinuidades y la alterabilidad de la matriz rocosa por efecto del agua. (14)

Mediante este nuevo sistema, los parámetros RQD y espaciado de juntas, aparentemente han dejado de ser considerados en la valoración del RMR₁₄, por ello, es necesario aclarar que estos han sido englobados dentro del parámetro número de juntas por metro; mientras que el parámetro que el parámetro de

alterabilidad de la matriz rocosa por efecto del agua ofrece un enfoque más completo y acertado para la calificación del macizo rocoso. (14)

- **Resistencia a la compresión uniaxial**

Parámetros que permiten clasificar y clasificar la roca matriz. La resistencia determina la competencia de la roca matriz para mantener unidos sus componentes, y depende fundamentalmente de su composición mineral y del grado de alteración. (15)

Esta se puede obtener por criterios de campo, por ensayos de resistencia en laboratorio, o por correlaciones con el Martillo Schmidt.

Tabla 2. Parámetros de resistencia a la compresión uniaxial

Parámetro		Rango de valores						
Resistencia del material de la roca intacta	Índice de resistencia de carga puntual >8 Mpa	4-8 Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa	Para este bajo rango es preferible un ensayo de compresión simple			
	Resistencia a la compresión simple >200 Mpa	100-200 Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	10-25 Mpa	3-10 Mpa	1-3 Mpa	
Puntuación		15	12	7	4	2	1	0

- **Martillo de Schmidt**

El martillo de Schmidt o esclerómetro es un instrumento diseñado para realizar ensayos de dureza, siendo éste un método no destructivo [...] Aunque en un principio se creó para estimar la resistencia a la compresión simple del concreto, el martillo se ha modificado convenientemente para dar lugar a nuevos modelos, algunos de los cuales resultan apropiados para estimar la compresión simple en roca, ya que por su tamaño y la manejabilidad del aparato puede aplicarse sobre la matriz de la roca y sobre las caras de las discontinuidades. Por medio de éste, se mide la resistencia al rebote de la superficie de la roca, dato utilizado para hallar la resistencia a la compresión uniaxial, correlacionándolo mediante el

gráfico de Miller (1965) que contempla la densidad de la muestra y la orientación del martillo respecto al plano ensayado. (16)

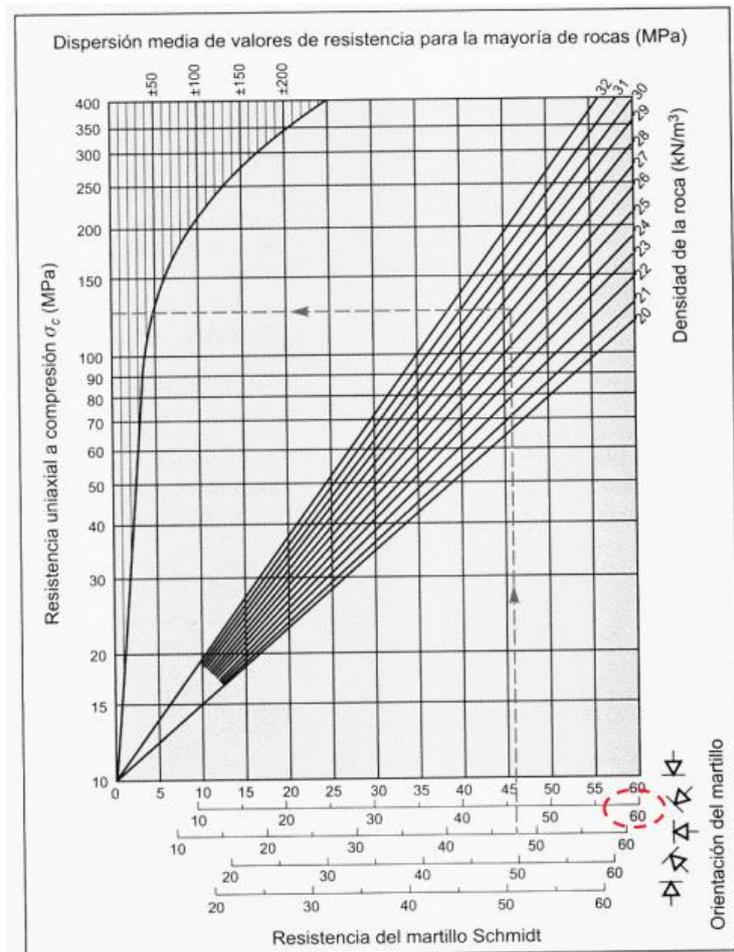


Figura 20. Ábaco para hallar la resistencia a la compresión uniaxial a partir del Martillo de Schmidt
Tomado de Antonio Lozano

- **Rock Quality Designation (RQD)**

Existe la necesidad de cuantificar la competencia del macizo rocoso como una base común para la comunicación de este tipo de información y el desarrollo de guías de diseño de ingeniería de rocas. El índice de calidad de roca, conocido como RQD elaborado por Deere en 1964, es uno de los sistemas más empleados para caracterizar la competencia del macizo rocoso. (14)

El sistema se basa en medir la frecuencia del número de fracturas naturales presentes en el macizo rocoso, en la dirección que se mide. Si la frecuencia de fracturas aumenta, la valoración del RQD disminuye. Originalmente, el sistema de RQD fue desarrollado para taladros de perforación diamantina de diámetro mayor o igual a 54 mm. Sin embargo, las perforaciones de exploración

comúnmente utilizan diámetros menores de perforación, tales como BQ y NQ (diámetros de 47.6 mm y 50.5 mm respectivamente). Aunque, los testigos de perforación diamantina menores son más propensos a sufrir fracturas inducidas a partir del proceso de perforación manipuleo, Brown (1978) afirmó que los diámetros de testigos mencionados anteriormente (BQ y NQ) son apropiados para la recolección de datos geotécnicos. El valor del RQD es la relación expresada como un porcentaje de la suma de todas las partes de longitudes mayores a 10 cm dividido por la longitud total de la corrida de perforación. El RQD se mide normalmente para cada corrida de perforación. Sin embargo, a veces este es registrado para distintas longitudes de taladro, como por ejemplo cada 10 m. Lo importante es medirlo dentro de un mismo dominio geotécnico que es definido por el tipo litológico. (14)

El RQD debe considerarse como una estimación rápida y preliminar de las condiciones del macizo rocoso que deberá ser complementada posteriormente con métodos de clasificación de macizo rocoso más sofisticados según sea necesario. Asimismo, el RQD tiene algunas limitaciones, por ejemplo: no tiene en cuenta la resistencia al corte de las discontinuidades y puede ser muy sensible a la orientación del testigo de perforación con respecto a las estructuras. (14)

Se han propuesto métodos alternativos para calcular el RQD a partir del mapeo de juntas o discontinuidades en las paredes de excavaciones subterráneas. Uno de ellos consiste en emular el cálculo convencional del RQD en testigos, pero aplicándolo a lo largo de una "línea de detalle" o una regla colocada contra la pared de una excavación como se muestra en la figura. (14)

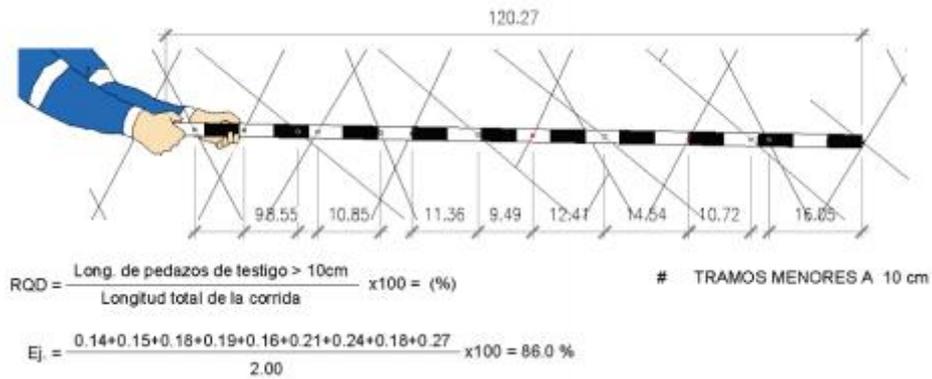


Figura 21. Proceso comúnmente utilizado para evaluar el RQD a partir del mapeo de paredes de excavaciones subterráneas

A menudo, se necesita una estimación del RQD en áreas donde se ha realizado el mapeo de línea de detalle o mapeo por celdas. En estas áreas no es necesario usar testigos ya que se puede obtener una mejor imagen del macizo rocoso a partir del mapeo. (14)

Para el presente trabajo se utilizó el siguiente método para la estimación del RQD: para los datos de mapeo por línea de detalle, se puede obtener un espaciamiento promedio de las juntas (número de discontinuidades divididas por longitud transversal). Bieniawski (1989) ha vinculado el espaciamiento promedio de las discontinuidades al RQD (Figura 3-5). Las calificaciones en la figura se refieren a RMR89. Cabe señalar que el RQD máximo, corresponde a la relación propuesta por Priest y Hudson. El RQD se puede estimar a partir del espaciamiento promedio de las discontinuidades basado en la siguiente ecuación de Priest y Hudson. (14)

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

Donde:

$$\lambda = \frac{1}{\text{frecuencia de discontinuidades}}$$

Relacionar el espaciamiento de las discontinuidades con el RQD promedio usando la Figura 15 probablemente conducirá a estimaciones conservadoras. En consecuencia, el uso de la ecuación para hallar el RQD es probablemente lo más

apropiado. Sin embargo, debe observarse que esta relación también depende de la dirección del eje de la medición. Para un espaciamiento de discontinuidades promedio dado existe un rango significativo de valores de RQD posibles. (14)

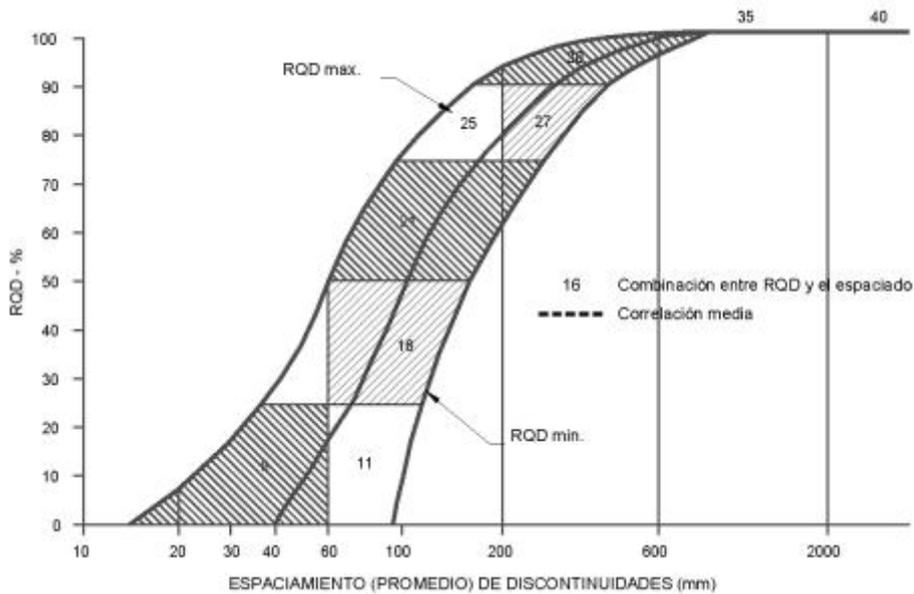


Figura 22. Relación entre espaciamiento de discontinuidad y RQD

- **Espaciamiento de discontinuidades (o juntas)**

El término junta se refiere a las discontinuidades estructurales: fallas, diaclasas, planos de estratificación, etc., y su espaciado es la distancia media entre los planos de discontinuidad de cada familia, es decir, de cada conjunto con las mismas características geomecánicas. Entre este parámetro y el anterior existe una relación clara, por lo que, a no ser por razones históricas, o sea por la abundante información relacionada con el RQD que existía antes de la aparición de las clasificaciones geomecánicas RMR y Q, quizás éstas no habrían incluido el RQD. (12)

La resistencia del macizo rocoso se va reduciendo al aumentar el número de juntas, o sea, cuando disminuyen los espaciados de cada familia. A continuación, se muestra gráficamente la variación de resistencia del macizo, en función del espaciado de las juntas y de la resistencia a compresión simple del material rocoso. (12)

- **Aguas subterráneas**

El agua procede mayoritariamente del flujo en discontinuidades (permeabilidad secundaria), en rocas sedimentarias puede haber también filtración en la matriz rocosa (permeabilidad primaria). Las filtraciones influyen en la resistencia del macizo rocoso. (15)

En un macizo rocoso diaclasado, el agua tiene mucha influencia en su comportamiento, debiendo estimarse el flujo de agua en litros/min cada 10 m de túnel. La descripción utilizada es la siguiente: completamente seco, húmedo, agua a presión moderada y agua a presión fuerte. (12)

- **Condición de las discontinuidades**

- ✓ **Persistencia.** Longitud o extensión superficial del plano de la discontinuidad. Corresponde a la extensión en área o tamaño de una discontinuidad en el macizo rocoso, es así que cuanto menor sea la persistencia, la estabilidad de la masa rocosa es mayor y si la persistencia es mayor, la estabilidad del macizo rocoso es menor. (17)

- ✓ **Apertura.** La abertura o apertura corresponde a la separación que existe entre las paredes o superficies rocosas de una discontinuidad, es así que, a menor abertura, la estabilidad y condición del macizo rocoso será mayor y a mayor abertura, la estabilidad y condición del macizo rocoso será menor. (17)

Distancia perpendicular que separa las paredes de una discontinuidad, sin relleno. Puede variar mucho de unas zonas a otras del macizo y disminuir con la profundidad. (15)

- ✓ **Rugosidad.** Ondulación de la superficie en la discontinuidad o irregularidades a pequeña escala, la cual tiene gran influencia en el comportamiento geomecánico, sobre todo en la resistencia al corte. (15)

- ✓ **Relleno.** Material distinto de la roca que aparece entre las paredes de una discontinuidad. Se deben describir todos los aspectos referentes a su estado y sus propiedades, si sus materiales son blandos o alterados. (15)

✓ **Alteración.** El grado de meteorización responde a factores medioambientales y procesos físicos, químicos y biológicos que descomponen la masa rocosa in situ, la evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso se lo puede hacer directamente sobre el afloramiento. (17)

- **Corrección por orientación de las discontinuidades**

Para aplicar el RMR a la estabilidad de taludes, Bieniawski propone sustituir el factor de ajuste por orientación de las discontinuidades dado en su tabla original para túneles por otro que varía de 0 a 60, pero no define el significado de cada tipo de orientación. (12)

a) Slope Mass Rating SMR (Romana 1985)

Es una clasificación geomecánica desarrollado por Romana (1985) para evaluar la estabilidad de los taludes rocosos. El SMR se obtiene corrigiendo el RMR básico de Bieniawski (1989) a través de una serie de factores dependientes de la geometría del talud. (18)

Donde:

- ✓ (F1) el paralelismo entre los rumbos de las discontinuidades y del talud
- ✓ (F2) el buzamiento de las discontinuidades
- ✓ (F3) la relación de buzamientos entre las discontinuidades y el talud
- ✓ (F4) el método de excavación empleado

Para aplicar el RMR a la estabilidad de taludes, Bieniawski propone sustituir el factor de ajuste por orientación de las discontinuidades dado en su tabla original para túneles por otro que varía de 0 a 60, según se muestra en la siguiente tabla, pero no define el significado de cada tipo de orientación. (12)

Tabla 3. Valoración de la orientación de las discontinuidades

Orientación de las discontinuidades	Valor del Parámetro de ajuste
Muy favorable	0
Favorable	-5
Normal	-25

Desfavorable	-50
Muy desfavorable	-60

El índice SMR se obtiene restando del RMR primario un factor de ajuste F que depende de la orientación de las discontinuidades y sumando un factor de excavación F4 que es función del método de excavación utilizado. A su vez, el factor F es el producto de tres subfactores que consideran: la orientación relativa del rumbo del plano del talud con respecto al de las discontinuidades, F1, la diferencia entre el buzamiento de las discontinuidades y del talud, F3, y el propio buzamiento de las discontinuidades, F2. (12)

$$SRM = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

- **Factores de ajuste**

F1: depende del paralelismo entre el rumbo de las discontinuidades y el de la cara del talud. Se le asigna un valor de 1 cuando los dos rumbos son paralelos y 0,15 cuando éstos difieren en más de 30°. Empíricamente, Romana (1985) ha obtenido la siguiente relación: (12)

$$F_1 = [1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s)]^2$$

Donde:

α_j : es la dirección de buzamiento de las discontinuidades.

α_s : es la dirección de buzamiento del talud.

F2: depende del buzamiento de la discontinuidad si la rotura plana es el mecanismo más probable de fallo del talud. Cuando la discontinuidad tiene un buzamiento de 45° o superior, al factor F2 se le asigna un valor de 1 y de 0,15 cuando dicho buzamiento es inferior a 20°. (12)

$$F_2 = \tan^2 \beta_j$$

Donde:

β_j es el buzamiento de la discontinuidad

F3: depende de la relación entre los buzamientos del talud (β_s) y las discontinuidades (β_j). Este parámetro mantiene los valores propuestos originalmente por Bieniawski (desde 0 hasta -60 puntos) que son siempre negativos y expresan la posibilidad de que las discontinuidades afloren en la superficie del talud para roturas planas. Para el caso de rotura por vuelco no se considera que puedan darse situaciones “Desfavorables” o “Muy desfavorables” dado que este mecanismo de rotura generalmente no produce roturas súbitas e incluso, en ocasiones, los taludes pueden ser estables pese a verse afectado por este modo de rotura. (18)

F4: Es un factor de ajuste por el método de excavación empleado. Incluye talud natural, precorte, voladura suave, voladura normal o excavación mecánica y voladura deficiente. Este factor considera que los taludes naturales son más estables debido al equilibrio natural alcanzado a lo largo del tiempo. El precorte y las voladuras suaves (recorte) bien ejecutados incrementan la estabilidad de los taludes en media clase respectivamente. Las voladuras normales y las excavaciones mecánicas, generalmente realizadas mediante ripado acompañado o no de pre voladuras poco cuidadas, no tienen influencia alguna en la estabilidad del talud definitivo, por lo que el factor F4 adopta el valor de 0 puntos. (18)

Tabla 4. Valores correspondientes al factor F4

Método de excavación	F4
Talud natural	+15
Pre corte	+10
Voladura suave	8
Voladura normal o excavación mecánica	0
Voladura deficiente	-8

- Valores de los factores

Tabla 5. Factores de ajuste de la clasificación SMR.

$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$ (ROMANA, 1985)

FACTORES DE AJUSTE DE LAS JUNTAS (F_1, F_2, F_3)	TALUD		JUNTA			
	α_1 / β_1		α_s / β_s		α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA	α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD
					β_j = BUZAMIENTO DE LA JUNTA	β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD
	MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE	
ROTURA PLANA $ \alpha_j - \alpha_s =$	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$	
VUELCO $ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ =$						
VALORES	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00	
AJUSTE ANALÍTICO	$F_1 = (1 - \text{sen } \alpha_j - \alpha_s)^2$					
	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$	
VALORES	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00	
AJUSTE ANALÍTICO	$F_2 = \text{tg}^2 \beta_j$					
ROTURA PLANA $\beta_j - \beta_s =$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< (-10^\circ)$	
VUELCO $\beta_j + \beta_s =$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	-	-	
VALORES	0	-6	-25	-50	-60	
AJUSTE ANALÍTICO	$F_3 = (\text{SE MANTIENEN LOS VALORES PROPUESTOS POR BIENIAWSKI, 1976 / 79})$					
	$F_4 = \text{VALORES EMPÍRICOS ESTABLECIDOS PARA CADA MÉTODO DE EXCAVACIÓN}$					
FACTOR DE AJUSTE POR EL MÉTODO DE EXCAVACIÓN	TALUD NATURAL	PRECORTE	VOLADURA SUAVE	VOLADURA ó MECÁNICO	VOLADURA DEFICIENTE	
	+ 15	+ 10	+ 8	0	Activar Windows	

Tomado de Romona, 1985

- Valores del SMR.

Tabla 6. Valores del SMR para cada tipo de rotura

TIPO DE ROTURA	INTERVALOS SMR	FRECUENCIA
PLANAS	$SMR > 60$ $60 > SMR > 40$ $40 > SMR > 15$	Ninguna Importantes Muy grandes
EN CUÑA	$SMR > 75$ $75 > SMR > 49$ $55 > SMR > 40$	Muy pocas Algunas Muchas
POR VUELCO	$SMR > 65$ $65 > SMR > 50$ $40 > SMR > 30$	Ninguna Menores Importantes
COMPLETAS	$SMR > 30$ $30 > SMR > 10$	Ninguna Posible

Tomado de Romona, 1985

- Clases de estabilidad según SMR

Tabla 7. Descripción de clases de SMR

CLASE Nº	Vb	Va	IVb	IVa	IIIb	IIIa	IIb	IIa	Ib	Ia
DESCRIPCIÓN	MUY MALA		MALA		NORMAL		BUENA		MUY BUENA	
ESTABILIDAD	TOTALMENTE INESTABLE		INESTABLE		PARCIALMENTE INESTABLE		ESTABLE		TOTALMENTE ESTABLE	
ROTURAS	GRANDES ROTURAS POR PLANOS CONTINUOS O POR LA MASA		JUNTAS O GRANDES CUÑAS		ALGUNAS JUNTAS O MUCHAS CUÑAS		ALGUNOS BLOQUES		NINGUNA	
SOSTENIMIENTOS	REEXCAVACIÓN		IMPORTANTES		SISTEMÁTICOS		OCASIONALES		NINGUNO	

Tomado de Romona, 1985

- **Clases de estabilidad según SMR**

Tabla 8. Medidas de corrección de taludes en roca

Sin sostenimiento	Ninguno
Protección	Saneamiento
	Zanja de pie
Refuerzo	Vallas de pie o de talud
	Redes y/o mallas sobre la superficie del talud
	Bulones
Hormigón	Anclajes
	Gunita.
Drenaje	Hormigón dental
	Contrafuertes y/o vigas
	Superficial
Re excavación	Profundo
	Tendido del talud.
	Muros de contención

Tomado de Romona, 1985

2.3. Definición de términos básicos

Los siguientes términos se relacionan de manera directa con la investigación.

- **Roca:** se define roca como un agregado sólido, formado por uno o varios minerales, que se encuentra ocupando grandes extensiones de la corteza terrestre. (12)
- **Roca intacta:** [...] elemento (trozo, bloque, probeta) de roca que no presenta discontinuidades observables.(12)
- **Macizo rocoso:** se define macizo rocoso como la forma en la que se presentan las rocas en el medio natural y está definido por la roca y la estructura, que a su vez contiene planos de estratificación, fallas, juntas, pliegues y otros caracteres estructurales, por lo tanto, son discontinuos y pueden presentar propiedades heterogéneas.
- **Discontinuidad:** son las discontinuidades geológicas (superficies de estratificación, juntas, fallas, diques, etc.) las que cambian la continuidad de las propiedades mecánicas de los bloques rocosos, lo que confiere al macizo rocoso un comportamiento geomecánico e hidráulico discontinuo. (17)

- **Talud:** superficie inclinada respecto a la horizontal que adoptan permanentemente las estructuras de tierra, bien sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana en una obra de ingeniería. (8)
- **Estabilidad física:** es el comportamiento estable en el corto, mediano y largo plazo de los componentes o frente a factores exógenos y endógenos, que evita el desplazamiento de materiales, con el propósito de no generar riesgos de accidentes o contingencias para el ambiente y para la integridad física de personas y poblaciones y de las actividades que éstas desarrollan. (19)
- **Orientación:** la orientación de las discontinuidades se mide o define por su rumbo y buzamiento y corresponde a la posición espacial de los planos de debilidad (juntas, diaclasas, fallas, estratificación, etc.), es así que cuando un grupo de discontinuidades presentan similitudes o son paralelas entre sí se dice que son familias de discontinuidades.(17)
- **Rock Mass Rating (RMR):** es un sistema de clasificación del macizo rocoso sustituyen un enfoque para estimar las propiedades del macizo rocoso a gran escala. Este sistema de clasificación geomecánica es un intento de representar con un solo valor las propiedades de resistencia de un macizo rocoso ya que este es usualmente un material altamente anisotrópico y puede ser representado por más de un sistema de clasificación.
- **Resistencia a la compresión:** es una propiedad mecánica de la roca intacta la cual se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo.
- **Rock Quality Designation (RQD):** índice de calidad de la roca es uno de los sistemas más empleados para caracterizar la competencia del macizo rocoso desarrollado por Deere en 1964.
- **Espaciamiento de las discontinuidades:** el espaciado corresponde a la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes, es así que, entre menos espaciado los bloques de matriz rocosa (roca intacta) serán más

pequeños y entre más espaciado, los bloques de matriz rocosa serán más grandes. (17)

- **Persistencia:** la persistencia o continuidad corresponde a la extensión en área o tamaño de una discontinuidad en el macizo rocoso, es así que cuanto menor sea la persistencia, la estabilidad de la masa rocosa es mayor y si la persistencia es mayor, la estabilidad del macizo rocoso es menor. (17)
- **Apertura:** la abertura o apertura corresponde a la separación que existe entre las paredes o superficies rocosas de una discontinuidad, es así que, a menor abertura, la estabilidad y condición del macizo rocoso será mayor y a mayor abertura, la estabilidad y condición del macizo rocoso será menor. (17)
- **Rugosidad:** la rugosidad corresponde a la aspereza o irregularidad que ocurre en la superficie de las discontinuidades, es así que, entre menor rugosidad tenga una discontinuidad, la competencia del macizo rocoso es menor y entre mayor rugosidad tenga la discontinuidad, la competencia del macizo rocoso es mayor. (17)
- **Relleno:** el relleno corresponde a los materiales que se alojan en los espacios de las discontinuidades, es así que, cuando los materiales de relleno son suaves (arcillas), la competencia del macizo rocoso es menor y cuando el relleno consiste de materiales duros (sílice), la competencia del macizo rocoso es mayor. (17)
- **Grado de meteorización:** el grado de meteorización responde a factores medioambientales y procesos físicos, químicos y biológicos que descomponen la masa rocosa in situ, la evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso se lo puede hacer directamente sobre el afloramiento. (17)
- **Slope Mass Rating (SMR):** [...] es una clasificación geomecánica desarrollado por Romana (1985) para evaluar la estabilidad de los taludes rocosos. (17)

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1. Método, y alcance de la investigación

3.1.1. Método de investigación

El método científico “es un conjunto de procedimientos para verificar o refutar hipótesis o proposiciones sobre hechos o estructuras de la naturaleza”. (20)

3.1.2. Tipo de investigación

La presente tesis es aplicada porque se preocupa por la aplicación del conocimiento científico, producto de la investigación básica. Es un primer esfuerzo para transformar el conocimiento científico en tecnología. El propósito fundamental es dar solución a problemas práctico. (21)

3.1.3. Nivel de investigación

La investigación es de nivel descriptivo – explicativo porque tiene como propósito describir, sistemática, completa, cualitativa y cuantitativamente los fenómenos. También, tiene la finalidad de explicar el comportamiento de una variable en función a otras”. (22)

3.2. Diseño de la investigación

Presenta un diseño de investigación causal, debido a que, “se utiliza cuando se requiere utilizar el grado de influencia de una variable independiente sobre la variable dependiente. (23)

M: OX

M: Muestra

O: Variable dependiente

X: Variable independiente

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población es de tipo finita y está constituido por todos los taludes de macizo rocoso dentro de los 10 km de carretera desde el distrito San Antonio hasta el puente Chiquiacc, Tayacaja – Huancavelica.

3.3.2. Muestra

Para el presente trabajo de investigación se realizará un muestreo no probabilístico por juicio, donde la muestra está conformada por el talud de macizo rocoso de las progresivas 10+430 - 10+440 de la carretera desde el distrito San Antonio hasta el puente Chiquiacc.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.4.1. Técnicas de recolección de datos

- ✓ Observación
- ✓ Revisión de expedientes del proyecto
- ✓ Mapeo geomecánico

3.4.2. Instrumentos de recolección de datos

- ✓ Ficha técnica de recolección de datos
- ✓ Uso de softwares
- ✓ Cartillas de clasificación geomecánica

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Generalidades del proyecto

4.1.1. Ubicación

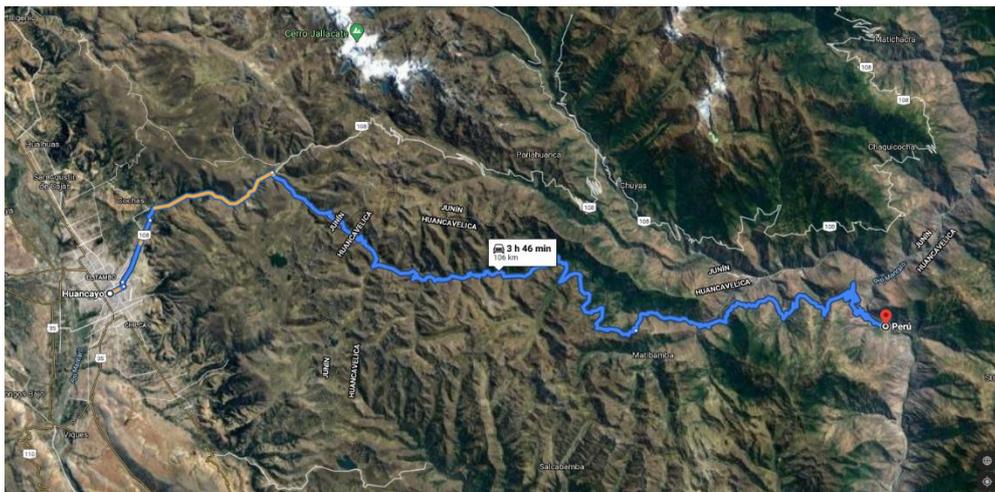
El proyecto en estudio se encuentra ubicado al nororiente del departamento de Huancavelica, el cual comprende a los distritos de Salcahuasi, Surcubamba y Tintay Punco, en la provincia de Tayacaja. La carretera en estudio corresponde a un tramo de la ruta N° HV-101. Donde inicia desde la ciudad de Huancayo utilizando la ruta N° JU-108 hasta la repartición en la localidad de Acopalca, luego pasa a la localidad de Huari - San Isidro de Acobamba (distrito de San Marcos de Rochacc), Matibamba (Distrito de Salcabamba), Manchay (distrito de Salcahuasi) y La Loma (distrito de Salcahuasi), luego del cual se llega hasta el cruce o repartición para las localidades de San Antonio y Salcahuasi, esto corresponde al punto inicial del tramo en estudio. Las altitudes de las progresivas de la carretera en estudio varían entre 1,150.00 msnm, y 2,930.00 msnm aproximadamente.

- Departamento: Huancavelica
- Provincia: Tayacaja
- Distritos: Salcahuasi, Surcubamba y Tintay Punco
- Localidades: San Antonio, Surcubamba, Vista Alegre, Tablahuasi, Sihui, Uchuy Sihui, Lihuapampa, Tintay Punco y Puerto San Antonio
- Región geográfica: sierra

- ✓ Altitud del distrito Salcahuasi: 3,150 m s. n. m.
- ✓ Altitud distrito Surcubamba: 2,585 m.s.n.m.
- ✓ Altitud distrito Tintay Punco: 2,350 m.s.n.m.

▪ **Accesibilidad**

Para llegar al proyecto se toma como punto de referencia la ciudad de Huancayo. Desde allí, se toma la ruta N° HV-101, hasta la repartición en la localidad de Acopalca. Luego, pasa a la localidad de Huari – San Isidro de Acobamba (distrito de San Marcos de Rochacc), Matibamba (distrito de Salcabamba), Manchay (distrito de Salcahuasi) y La Loma (distrito de Salcahuasi). Después, se llega hasta el cruce o repartición para la localidad de San Antonio, esto corresponde al punto inicial del tramo en estudio. Las altitudes de las progresivas de la carretera en estudio varían entre 1150 m s. n. m. y 2930 m s. n. m. aproximadamente.



- Departamento: Huancavelica
- Provincia: Tayacaja
- Distritos: Salcahuasi, Surcubamba y Tintay Punco
- Localidades: San Antonio, Surcubamba, Vista Alegre, Tablahuasi, Sihui, Uchuy Sihui, Llihuapampa, Tintay Punco y Puerto San Antonio.

4.1.1. Clima y vegetación

El clima presenta variaciones según la localización geográfica, altitud y topografía del lugar. Se puede reconocer hasta tres zonas de vida natural, según la clasificación de Holdridge, y son los siguientes:

Bosque seco montano bajo tropical: (bs - MBT) que tiene una biotemperatura media anual máxima de 18°C y una biotemperatura media anual mínima de 11°C; con un promedio máximo de precipitación total anual de 950 mm y un promedio mínimo de precipitación total anual de 450 mm.

Bosque húmedo montano tropical: (bh - MT) que tiene una biotemperatura media anual máxima de 13°C y una biotemperatura media anual mínima de 6°C; con un promedio máximo de precipitación total anual de 1,100 mm y un promedio mínimo de precipitación total anual de 490 mm.

Páramo muy húmedo subalpino tropical: (pmh – SaT) que tiene una biotemperatura media anual de 3°C con un promedio máximo de precipitación total anual de 1,200 mm y un promedio mínimo de precipitación total anual de 500 mm.

En conjunto, el clima es predominantemente frío y seco en las comunidades altas, y de templado a cálido hacia los pisos más cercanos al centro poblado de Chucllaccasa.

▪ Región natural y paisaje

Los pisos ecológicos identificados, según la clasificación del Dr. Javier Pulgar Vidal son:

- ✓ Región natural Quechua: se localiza entre los 2,980 a 3,600 metros sobre el nivel del mar. De clima semicálido a templado. Las mañanas suelen ser tibias, las tardes y las noches frescas. A partir de junio a agosto, se perciben temperaturas más bajas y las lluvias aparecen a partir del mes de octubre. Se tiene un aire seco, que es propicio para la buena salud. El relieve es accidentado, y en el fondo del valle están instalados los cultivos bajo riego más rentables: frutales, maíz amiláceo y hortalizas.

- ✓ Región natural Suni: región que se localiza por encima de los 3,600 hasta los 3,900 metros sobre el nivel del mar. De clima frío, con marcada diferencia en la temperatura ambiental, bajo la sombra y bajo el sol; y, mucha más entre el día y la noche. El relieve es de quebradas con frecuentes acantilados. Las tierras agrícolas son escasas y principalmente de secano. Los cultivos más difundidos son la papa, la oca, el olluco, la mashua y la cebada.
- ✓ Región natural Puna: región comprendida entre los 3,900 hasta los 4,600 metros sobre el nivel del mar. De clima frío, con temperaturas negativas entre los meses de mayo a agosto. Con presencia de lluvias y nevadas esporádicas desde octubre a abril. El relieve es variado, presentándose lluvias alto andinas apropiadas para la ganadería.

- **Relieve**

Las formas del relieve en la zona del proyecto generado por las fuerzas internas o tectónicas que fueron modificadas en la superficie por la influencia del medio ambiente, las interacciones entre la geología y el clima, que hicieron posible la actuación de otros agentes, donde el ser humano fue y es un agente muy activo debido al desarrollo de actividades agrícolas.

El relieve más evidente en este territorio es la profunda incisión que han labrado los ríos como consecuencia del levantamiento tardío que sufrieron los Andes a finales del Terciario; el segundo hecho geomorfológico importante es el modelado del territorio por la acción de los glaciares.

El terreno presenta físicamente pendientes moderadas, por ende, en épocas de verano cuando se presentan lluvias intensas, se observa presencia de aguas pluviales, lodo y barro, esto en los meses de diciembre a abril, los eventos naturales negativos son las inundaciones generadas por las intensas lluvias.

4.1.2. Geología regional

El departamento de Huancavelica en su estructura geológica, ocasionado por los cambios sucesivos que han operado en los reinos orgánicos e inorgánicos en la naturaleza. Desde el punto de vista litológico, ocurren afloramientos de tipo

sedimentarlo, conformados por areniscas, calizas, lutitas, conglomerados, dolomitas y travertinos; de tipo metamórfico, como pizarras, cuarcitas, esquistos y filitas; y rocas ígneas extrusivas, representadas por derrames andesíticos, brechas volcánicas, tufos, cenizas, etc. Las rocas ígneas intrusivas son de composición predominante granitoide (granito, granodiorita, diorita, etc.) y forman parte de intrusiones batolíticas. Es evidente, asimismo, la ocurrencia de depósitos morrénicos y material aluvial, sobre los cuales la acción erosiva imprimió los detalles topográficos del paisaje andino actual, caracterizado por su gran irregularidad. La edad de las rocas mencionadas es estimada entre el Paleozoico Inferior y el Cuaternario reciente.

Las rocas más antiguas son los metasedimentos del grupo Excélsior del Devoniano los cuales han experimentado varias fases de tectonismo, resultando un metamorfismo regional leve. Inmediatamente encima en discordancia angular se presenta el grupo Ambo y una gruesa secuencia de lutitas, areniscas y calizas del Carbonífero-Permiano Inferior, la cual no se ha diferenciado, y que corresponde a los grupos Tarma y Copacabana. Suprayace en discordancia angular una gruesa serie de capas rojas molásicas pertenecientes al grupo Mitú del Permiano Superior Triásico.

La secuencia mesozoica comienza con las calizas del grupo Pucará de edad Triásico Superior Jurásico Inferior, que suprayacen al grupo Mitu en discordancia angular e infrayacen a las calizas Chunumayo del Jurásico Medio. Discordantemente encima de la secuencia jurásica se halla la secuencia del grupo Goyllarisquizga perteneciente al Cretáceo Inferior y sobre él tenemos facies pelíticas carbonatadas, correspondientes a las formaciones Chulec y Pariatambo. La secuencia mesozoica experimentó plegamiento y levantamiento por varias fases tectónicas, levantando toda la región a un ambiente erosional.

Discordantemente encima se tiene a las capas rojas molásicas de la formación Casapalca del Cretáceo superior-Paleógeno.

Hacia el oeste a manera de franjas alargadas afloran las formaciones volcánicas Tantará y Sacsaquero del Eoceno constituidas por lavas, brechas y

piroclásticos y subyaciendo en discordancia a las secuencias volcánico-sedimentarias de la formación Castrovirreyna del Mioceno Inferior y hacia el noreste se tiene equivalente en tiempo a la formación Volcano sedimentaria Rumichaca.

Las secuencias volcánicas y volcano-sedimentarias del Paleógeno-Neógeno se encuentran plegadas y falladas en la parte occidental del cuadrángulo, limitado hacia el este por un sistema de fallas regionales (Chonta) y con un bloque del Paleozoico Mesozoico levantado.

Paralelamente, en la parte occidental (cuenca de Castrovirreyna se manifiesta el volcanismo mio pliocénico de las formaciones Auquivilca y Astobamba.

Las ignimbritas pliocénicas de la formación Rumihuasi presentan afloramientos hacia la esquina noreste de la hoja, teniendo mayor desarrollo en los cuadrángulos de Huanta y Ayacucho.

Los depósitos clásticos cuaternarios se han acumulado desde el Pleistoceno al reciente y se debe a distintos orígenes; siendo los más antiguos las morrenas debido a la glaciación cuaternaria y seguida por depósitos aluviales y fluviales más recientes.

En la zona de Cordova, las rocas más antiguas del área, corresponden a gneises y esquistos del complejo Basal de la costa, que afloran en forma aislada. El Paleozoico está representado por las calizas marmolizadas de la formación Marcona, de edad cambriana o precambriana, y por tres pequeños afloramientos de areniscas, pertenecientes al grupo Ambo, del Misisiplano.

Las unidades jurásicas afloran exclusivamente en la zona costera. El Jurásico Inferior consta de una secuencia netamente volcánica, denominada formación Chocolate, sobre la cual descansa, aparentemente en concordancia, la formación Guaneros, unidad volcánica sedimentaria de edad Jurásico Superior. Esta formación, a su vez, con igual relación, está cubierta por areniscas cuarzosas del grupo Yura, perteneciente al Jurásico Superior Neocomiano.

4.1.3. Geología local

En el Perú central McLaughlin (1925) describe con la denominación de serie Excelsior una potente secuencia de lutitas oscuras con intercalaciones de areniscas pizarrosas, que regionalmente se presentan alteradas y ligeramente metamorfizadas. Como su mejor exposición del área de la mina Excelsior (Cerro de Pasco) de donde viene su nombre; señala otros afloramientos en los valles de Tarma, Huancayo y en las vecindades de Yauli, en los cuales su posición es claramente inferior a calizas mesozoicas y en otros casos subyace a conglomerados y areniscas de probable edad carbonífera.

En la hoja de Pampas hay un extenso afloramiento de lutitas con proporciones subordinadas de areniscas que son correlacionales con las descritas por McLaughlin como serie Excelsior. La secuencia de lutitas pasa gradualmente hacia las partes inferiores a esquistos y localmente hasta gneis, en estos últimos hay pequeñas ocurrencias de anfibolitas.

El límite entre lutitas y esquistos no es bien definido, antes de pasar a filitas y esquistos netos aparecen entre las lutitas horizontes de pizarras satinadas, filitas y esquistos, sugiriendo que el grupo Excelsior representa una secuencia de sedimentación continua, cuyas capas han sufrido metamorfismo variable según su profundidad.

Por esto, en el campo no ha sido posible establecer una separación precisa entre las rocas metamórficas y los sedimentos normales, el límite que se muestra en el mapa geológico es aproximado.

En el presente estudio, ambas clases de rocas se describen bajo la denominación de "grupo Excelsior". El piso del grupo es desconocido, en cambio su contacto superior con las formaciones más modernas es una discordancia angular o una falla.

En general, toda la secuencia está fuertemente deformada, presentando plegamientos apretados que difícilmente pueden ser seguidos por distancias considerables.

Analizando la distribución de los afloramientos del grupo Excelsior dentro del cuadrángulo se aprecia que los metamórficos ocupan la posición central con orientación NW, quedando a ambos lados fajas de lutitas normales a débilmente metamorfizadas. Esta disposición de los afloramientos y la deformación en pliegues apretados, sugieren la presencia de una estructura mayor, probablemente un sinclinorio. Posteriormente el batolito granítico de Villa Azul se ha emplazado aproximadamente en la parte central de esta estructura.

Edad y correlación. Las rocas que componen el grupo Mitu son de origen continental, en el área de Pampas se encuentran subyaciendo con ligera discordancia a las calizas del grupo Pucará del Triásico superior-Jurásico inferior, mientras que su contacto inferior es ligeramente discordante con las calizas Copacabana, del Permiano medio a inferior, y en grandes sectores traslapa al grupo Excelsior del Paleozoico Inferior.

Al sudeste de la hoja de Pampas, en el área de Huanta, Newell (1949) señala que las rocas del grupo Mitu se encuentran reposando con discordancia sobre las calizas Copacabana con parafusulinas del Leonardino Inferior.

4.1.4. Geología estructural

La zona estudiada ha sido intensamente afectada por movimientos orogénicos y epirogénicos que trajeron como consecuencia plegamientos y fallamientos. Se siguió de acuerdo al cuadrante de Pampas.

- **Pliegues:**

De SW a NE se reconocen las siguientes estructuras plegadas:

- ✓ **Serie de anticlinales y sinclinales de la sierra de Pampas**

Para los efectos de esta descripción se denomina “sierra de Pampas” a la porción montañosa de la península de Tayacaja que se extiende con dirección NW-SE, por el lado occidental de la ciudad de Pampas.

Esta parte del cuadrángulo está formada principalmente por las rocas del grupo Excelsior fuertemente deformadas en un sistema de pliegues apretados

de dirección dominante noroeste. Los ejes de los anticlinales y sinclinales que se encuentran en toda la extensión de esta faja sólo pueden seguirse por cortas distancias, pues a menudo desaparecen por replegamientos confusos y fallas.

En algunas localidades, estos pliegues están volcados mostrando pronunciado arrugamiento de sus flancos, en otros sitios donde el buzamiento de las capas es más o menos uniforme por trechos considerables, se nota que algunas capas están invertidas y el plegamiento que conforman es de tipo isoclinal.

Como los esquistos y lutitas Excelsior infrayacen con discordancia angular a las formaciones del Paleozoico Inferior, se infiere que su deformación y metamorfismo tuvieron lugar en las primeras fases de la orogenia herciniana. Su estilo tectónico es marcadamente diferente al que muestran las formaciones del Paleozoico superior y del Mesozoico.

Las fases posteriores del movimiento herciniano y principalmente la orogenia andina, son seguramente en parte responsables de la fuerte deformación que tienen estas rocas.

✓ **Serie de anticlinales y sinclinales de la sierra Surcubamba-Huischccana.**

Esta sierra se extiende de Norte a Sur en la parte oriental del cuadrángulo, sus cimas constituyen la divisoria de aguas entre las vertientes de la segunda curva del río Mantaro.

Toda esta región está formada por esquistos y lutitas del grupo Excelsior, intruidos por stocks de diorita y granitos.

Las rocas del grupo Excelsior de esta zona se presentan intensa y complejamente plegadas, con características similares a las ya descritas para las estructuras que forman la sierra de Pampas.

- **Fallas:**

En el área de estudio se reconocen diferentes fallas inversas de rumbo general NW de acuerdo al cuadrángulo de pampas, además existen fallas normales que afectan a las anteriores.

La falla inversa más importante atraviesa diagonalmente el cuadrángulo denominado falla Pampas. Fallas del mismo tipo, probablemente subsidiarias de aquella, son la falla Huari en el extremo NW y al de Arhuayaco que se encuentra al oeste del pueblo de Colcabamba.

- ✓ **Falla Pampas**

Esta falla se reconoce por un rumbo promedio de N 45° W, prolongándose en ambos extremos a los cuadrángulos adyacentes de Huancayo y Huancavelica. La falla en varios lugares muestra inclinaciones entre 50 y 75° al SW.

En todo su trayecto, esta falla sobrepone las rocas del grupo Excelsior del Paleozoico Inferior, a unidades más jóvenes como los grupos Mitu y Pucará del Paleozoico Superior y del Triásico-Jurásico, respectivamente. Teniendo en cuenta las formaciones puestas en contacto se infiere que la falla debe tener un desplazamiento considerable, cuya magnitud es difícil determinar en las actuales condiciones de nuestro conocimiento.

En la parte central de la hoja existen varias fallas normales de rumbo general NE que afectan ligeramente a la falla Pampas, el mayor desplazamiento ha sido causado por la falla Jabonillos de rumbo casi N-S.

Las rocas más jóvenes que afecta la falla Pampas corresponden al grupo Pucará, por consiguiente, la falla es definitivamente post-Liásica y probablemente se ha originado durante el período de mayor plegamiento de la orogenia andina.

- ✓ **Falla Jabonillos**

Es una falla normal de traza ligeramente curva que se reconoce por cerca de 20 km. Aproximadamente en la parte media de su trayecto se encuentra emplazado el stock diorítico de Jabonillos. De Jabonillos hacia el norte la falla tiene rumbo N15W y termina contra el stock diorítico de Patay, en este tramo

pone en contacto, el grupo Mitu con las calizas Copacabana y las lutitas Excelsior. De Jabonillos al sur, la falla sigue con dirección promedio S25E dislocando a las rocas del grupo Excelsior.

4.2. Resultados del tratamiento y análisis de la información

4.2.1. Clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR)

4.2.1.1. Análisis estereográfico

Los datos recolectados en la zona de estudio fueron las siguientes:

Tabla 9. *Lista de la orientación de discontinuidades*

DATOS		
#	Buzamiento	Rumbo
1	54°NE	N 34° W
2	41°NW	N 23° E
3	58°NE	N 33° W
4	48°NW	N 20° E
5	56°NE	N 32° W
6	36°NW	N 35° E
7	55°NE	N 36° W
8	38°NW	N 21° E
9	56°NE	N 31° W
10	53°NW	N 32° E
11	46°NE	N 15° W

De los cuales se transformaron los datos del rumbo a la forma azimutal mediante el siguiente parámetro:

- Rumbo (NW) y buzamiento NE: 90-R
- Rumbo (NE) y buzamiento NW: 270+R
- Rumbo (NE) y buzamiento SE: R+90
- Rumbo (NW) y buzamiento SW: 270 - R

Dándonos como resultado los siguientes datos:

Tabla 10. Orientación de discontinuidades.

#	DIP	DIP DIRECCION
1	54°	56°
2	41°	293°
3	58°	57°
4	48°	290°
5	56°	58°
6	36°	305°
7	55°	54°
8	38°	291°
9	56°	59°
10	53°	58°
11	46°	285°

La siguiente tabla de datos fue sometida a un análisis de dominio geotécnico mediante el análisis estereográfico.

En el análisis estereográfico se detecta dos concentraciones de los polos como se aprecia en el siguiente gráfico:

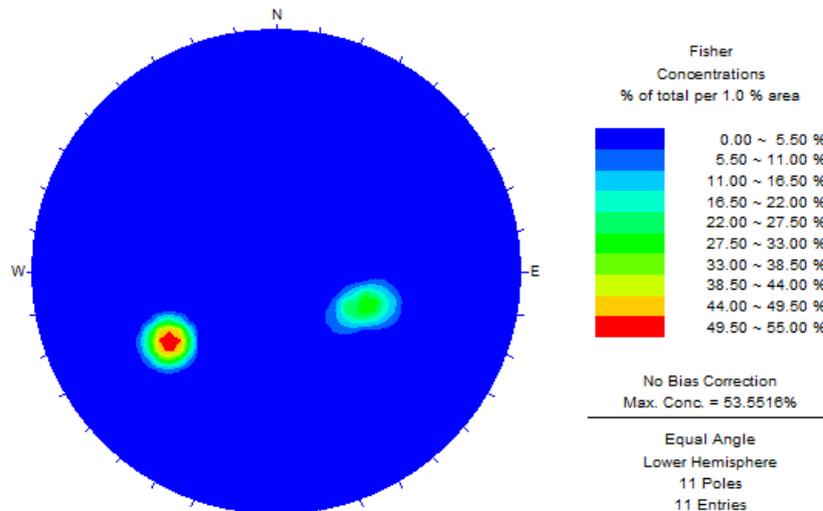


Figura 23. Análisis de polos de las discontinuidades

Del cual se identifican los planos mayores o las familias más predominantes las cuales se observan en la siguiente figura:

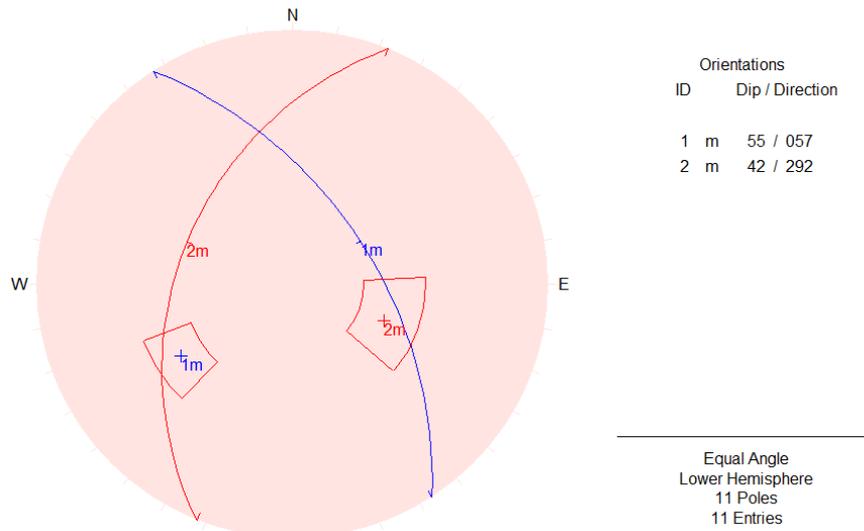


Figura 24. Análisis estereográfico de los planos mayores

4.2.1.2. Cálculo de la resistencia del material intacto

Para el cálculo de la resistencia del macizo rocoso, se recolectaron un conjunto de valores que actúan sobre el determinado material puesto a prueba, es así que al no poder analizar todo el macizo en su conjunto se extraen pequeñas muestras las cuales son analizadas en laboratorios, para realizar los ensayos de resistencia se obtuvieron los siguientes datos con su respectiva orientación:

Tabla 11. Listado de datos con el esclerómetro

#	Tipo de roca	Sentido de golpe	Rebotes	Densidad de la roca (KN/m ³)
1	CALIZA	←	60	26.19
2	CALIZA	←	61	26.19
3	CALIZA	←	61	26.19
4	CALIZA	←	57	26.19
5	CALIZA	←	61	26.19
6	CALIZA	←	59	26.19
7	CALIZA	←	62	26.19
8	CALIZA	←	60	26.19
9	CALIZA	←	62	26.19
10	CALIZA	←	59	26.19
11	CALIZA	←	60	26.19

12	CALIZA	←	59	26.19
13	CALIZA	←	61	26.19
14	CALIZA	←	58	26.19
15	CALIZA	←	62	26.19
16	CALIZA	←	63	26.19
PROMEDIO			60	

En primer lugar, realizamos el cálculo de la densidad de la roca mediante una prueba simple de cálculo de volumen y masa, luego reemplazamos en la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad de la roca } (\vartheta) = \frac{\text{Masa de la roca (Kg)}}{\text{volumen de la roca (m}^3\text{)}}$$

$$\text{Densidad de la roca } (\vartheta) = \frac{1.015}{0.0003798}$$

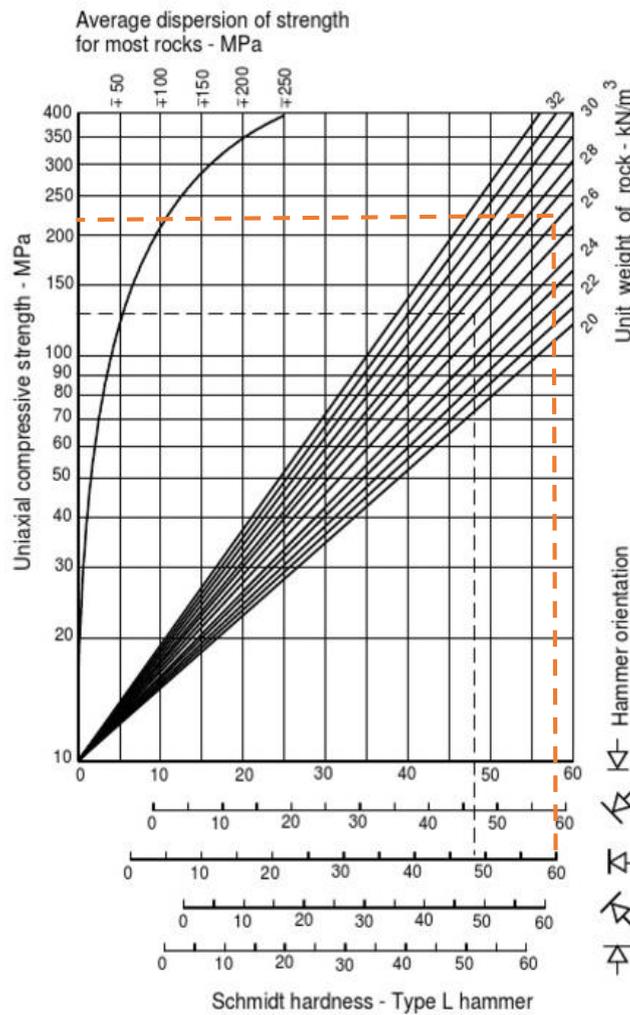
$$\vartheta = 2672.459 \text{ Kg/m}^3$$

Para el uso de la cartilla del martillo de Schmidt es necesario transformar dicha densidad de Kg/m^3 a kN/m^3 .

Tabla 12. Cálculo de densidad de la roca (KN/m^3)

Cálculo densidad de la roca	
Volumen(m^3)	0.0003798
Masa (kg)	1.015
Peso (kN)	0.009947
Densidad (kN/m^3)	26.19

Se lleva la media de la dureza al rebote al eje de las X correspondiente a la inclinación del martillo y se traza la vertical hasta que corte a la línea correspondiente a la densidad de la roca. A partir de este punto se traza una línea horizontal hasta cortar al eje de ordenadas, obteniéndose la estimación de la resistencia a compresión de la roca en MPa.



**Figura 25. Cartilla de Schmidt
Tomado de Osinergmin**

Mediante la operación descrita anteriormente, se determinó la resistencia a la compresión uniaxial de 220MPa.

4.2.1.3. Evaluación del Índice RQD

Se ha contabilizado el número de fracturas por metro lineal en dos líneas de detalle 1 y 2 estableciendo una relación en lambda para luego reemplazarlo en la siguiente fórmula:

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

Donde:

$$\lambda = \frac{1}{\text{frecuencia de discontinuidades}}$$

En la siguiente tabla, se muestra los resultados del índice de calidad de roca para ambas líneas de detalle, la cual posteriormente ambas se promediaron, la cual será utilizada para la clasificación.

Tabla 13. Cálculo del índice de calidad de roca RQD.

CÁLCULO DEL INDICE DE CALIDAD DE LA ROCA (RQD)				
PARAMETROS		Est 1	Est 2	
Número de fracturas		10	9	
Distancia de línea de detalle		2	2	
Espaciamiento promedio	X	0.20	0.22	
Fracturas/metro lineal	λ	5	4.5	
Índice de Calidad de la Roca	RQD (%)	90.98	92.46	91.72

4.2.1.4. Distancia entre discontinuidades

Se recolectaron datos del espaciamiento en ambas líneas de detalle siendo de:

Tabla 14. Listado de datos recopilados del espaciamiento de las discontinuidades

ESPACIAMIENTO DE DISCONTINUIDADES			
#	Línea de detalle 1	Línea de detalle 2	
1	0.17	0.20	
2	0.21	0.18	
3	0.22	0.21	
4	0.25	0.22	
5	0.27	0.27	
6	0.20	0.23	
7	0.21	0.21	
8	0.05	0.26	
9	0.21	0.22	
10	0.21	-	
11	-	-	
Total (m)	2.00	2.00	
PROMEDIO	0.20	0.22	0.21

Se realizó un análisis estadístico de frecuencias agrupados en intervalos dados en la cartilla de Bieniawski.

Tabla 15. Frecuencia del espaciamiento.

Espaciamiento de discontinuidades					
Intervalos	f1	f2	fr1	fr2	
>2m	0	0	0.00	0.00	
0.6m - 2 m	0	0	0.00	0.00	
0.2m - 0.6m	7	7	0.70	0.78	
0.06m - 0.2m	2	2	0.20	0.22	
<0.06m	1	0	0.10	0.00	
Total	10	9	1.00	1.00	

f: frecuencia absoluta

fr: frecuencia relativa

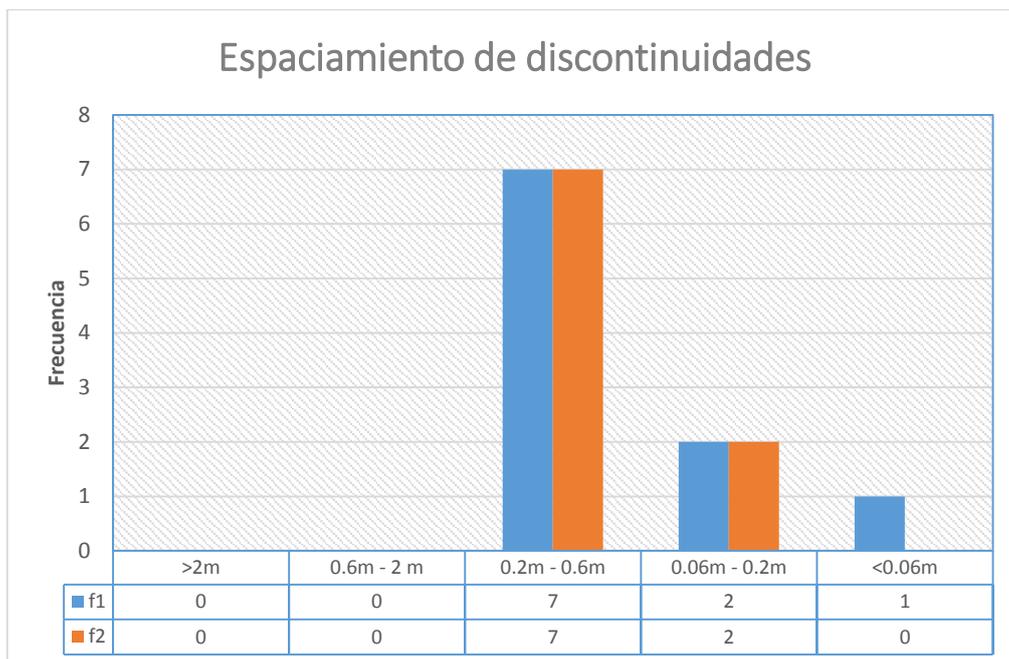


Figura 26. Gráfico de barras del espaciamiento

En el gráfico anterior se determina que la mayor concentración de datos se encuentra en el intervalo de 0.2m - 0.6m, la cual tiene una puntuación de 10 en la cartilla de la clasificación de Bieniawski.

4.2.1.5. Condición de las discontinuidades

a) Persistencia de las discontinuidades

Al igual que el espaciamiento, también se realizó un análisis estadístico para los datos registrados de la persistencia o longitud de la discontinuidad.

Tabla 16. Listado de datos recopilados de la persistencia de las discontinuidades.

Persistencia	
#	Datos (m)
1	2.50
2	2.00
3	1.50
4	3.00
5	1.00
6	2.00
7	1.00
8	1.00
9	3.00
10	15.00
PROMEDIO	
3.20	

En la siguiente tabla se muestra la frecuencia por intervalos según la cartilla:

Tabla 17. Frecuencia de la persistencia de discontinuidades

PERSISTENCIA DE LAS DISCONTINUIDADES		
Intervalos	f	Fr
<1 m	0	0.00
1m - 3 m	7	0.70
3 - 10 m	2	0.20
10 - 20 m	1	0.10
>20 m	0	0.00
Total	10	1.00

f: frecuencia absoluta

fr: frecuencia relativa

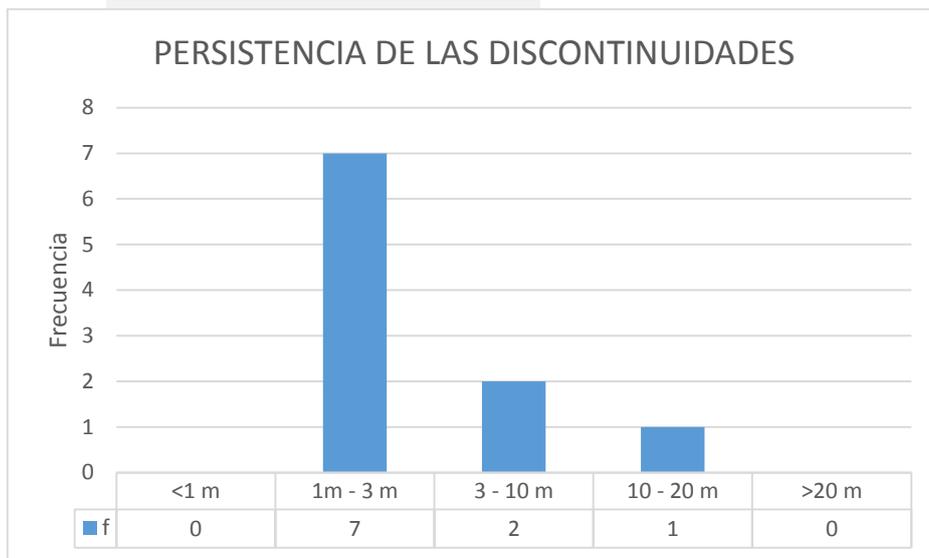


Figura 27. Gráfico de barras de la persistencia

En el grafico anterior, se puede determinar que la mayor concentración de datos se encuentra en el intervalo de 1 - 3 m, el cual tiene una puntuación de 4 en la cartilla.

b) Apertura o separación

De la misma manera, se realiza el mismo procedimiento para la apertura con los siguientes datos:

Tabla 18. Listado de datos recopilados de la apertura de las discontinuidades

APERTURA	
#	DATOS (mm)
1	4.0
2	1.0
3	3.0
4	3.0
5	2.0
6	6.0
7	3.0
8	4.0
9	3.0
10	0.1
PROMEDIO	

Para el cual también se realiza el análisis estadístico de la siguiente manera:

Tabla 19. Frecuencia de la apertura de discontinuidades

APERTURA DE LAS DISCONTINUIDADES		
Intervalos	f	Fr
Ninguna	0	0.00
<0.1 mm	0	0.00
0.1 - 1.0 mm	1	0.10
1.0 - 5.0 mm	8	0.80
>5 mm	1	0.10
Total	10	1.00

f: frecuencia absoluta

fr: frecuencia relativa

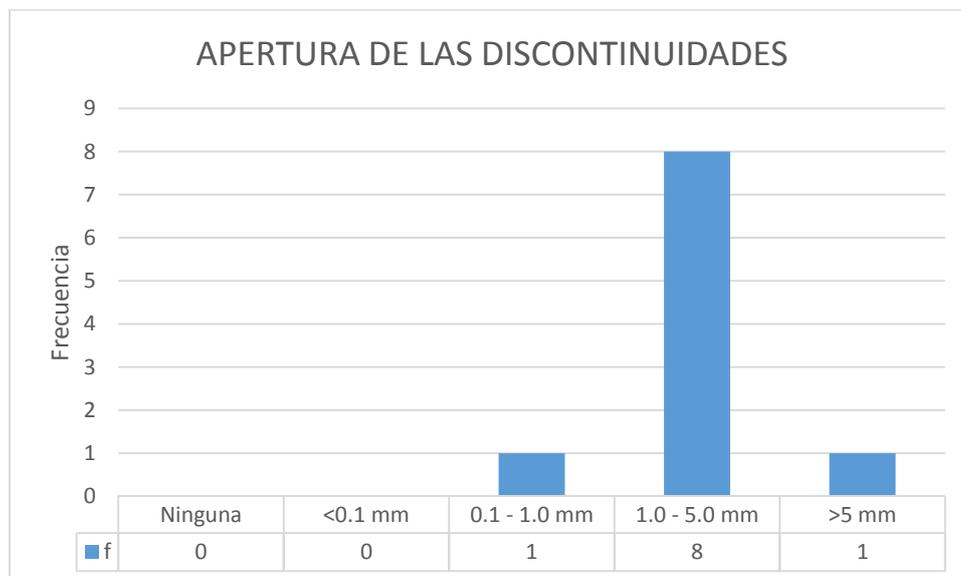


Figura 28. Gráfico de barras de la apertura

En el gráfico anterior se puede apreciar que las mayores concentraciones de datos recolectados se encuentran en el intervalo de 1.0 - 5.0 mm, teniendo este una puntuación de 1 en la cartilla.

c) Rugosidad

Para determinar la rugosidad se realizaron pruebas in situ a criterio de los investigadores las cuales fueron pruebas cualitativas de la forma de la superficie de la discontinuidad, tratándose de ligeramente rugosas.

d) Relleno de falla

Para determinar el relleno se realizaron pruebas in situ a criterio de los investigadores además de utilizar los datos recolectados de la apertura, determinando así un rango de relleno duro <5 mm, teniendo una puntuación de 4 en la cartilla.

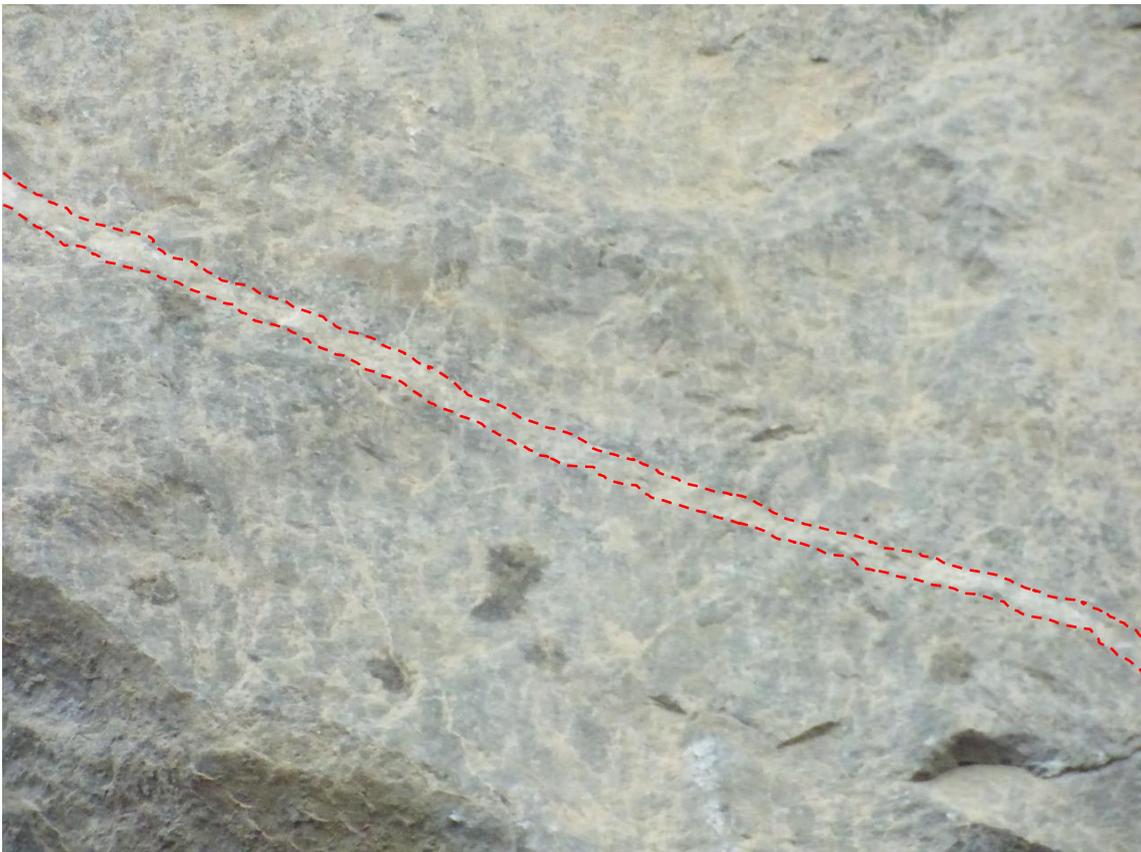


Figura 29. Relleno de falla

e) Meteorización

Para determinar el grado de meteorización se utilizó como guía el siguiente cuadro:

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

Figura 30. Grado de meteorización
Tomado de Rubén I. Ayala Omaña

En la siguiente figura se observa decoloración en la superficie lo cual indica meteorización de la roca y en las superficies de las discontinuidades, pero el macizo en su totalidad puede estar decolorado por la meteorización y puede estar externamente más débil que en su condición fresca.

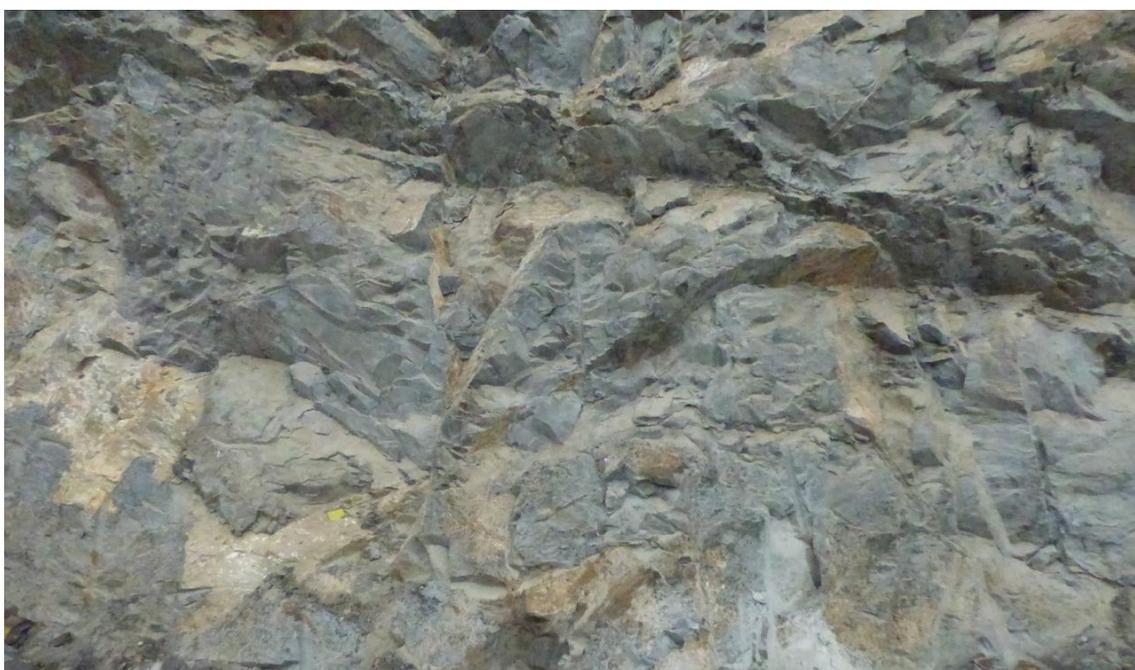


Figura 31. Estado de meteorización

4.2.1.6. Flujo de agua subterránea

La condición del flujo de agua subterránea se determinó mediante condiciones generales a criterio de los investigadores, la cual cualitativamente es húmedo, teniendo una puntuación de 10 en la cartilla.

4.2.1.7. Ajuste de la puntuación para la orientación de las discontinuidades

B. AJUSTE DE LA PUNTUACIÓN PARA LA ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES (Ver F)						
Orientaciones de rumbo y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
Puntuaciones	Túneles y minas	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-

**Figura 32. Ajuste de puntuación para la orientación de discontinuidades
Tomado de RMR 89**

Se realizó una simulación gráfica con la orientación del talud y de las discontinuidades para apreciar de mejor manera el efecto cuña que se genera siendo de la siguiente manera:

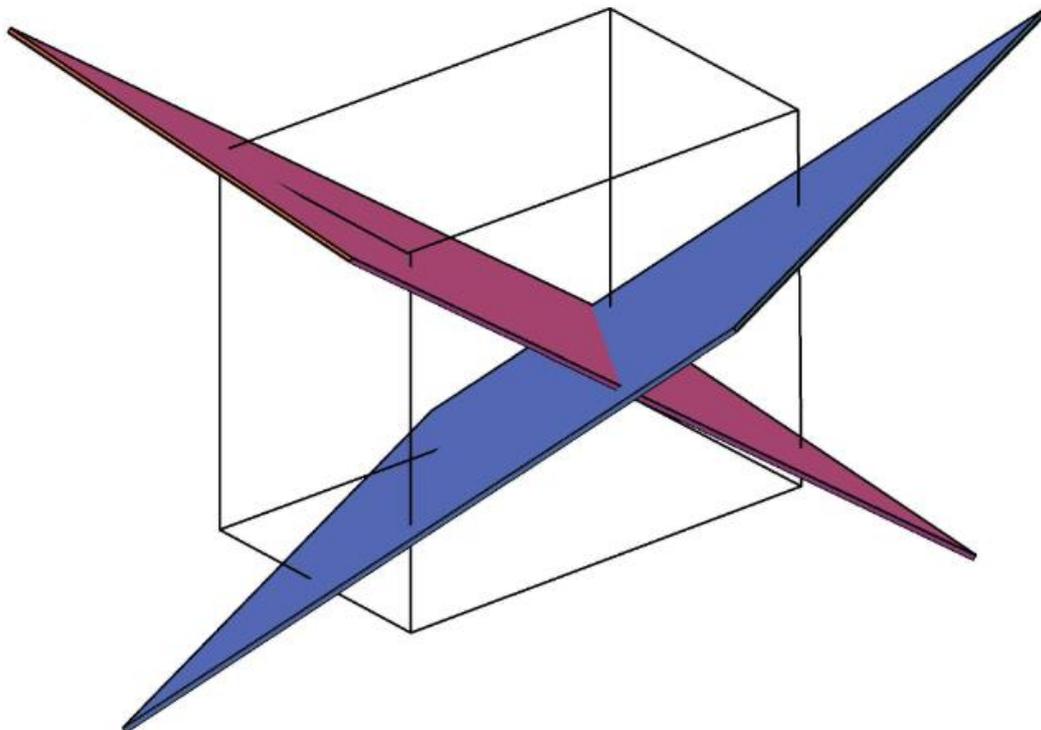


Figura 33. Efecto cuña en el talud

Mediante el siguiente esquema gráfico se puede deducir que la condición del talud respecto a la orientación del rumbo y buzamiento es desfavorable, teniendo un ajuste en la puntuación de -50.

4.2.2. Clasificación geomecánica Slope Mass Rating (SMR)

- **Familia 1**

El SMR se obtiene corrigiendo el RMR básico de Bieniawski a través de los factores dependientes de la geometría del talud y de las continuidades y añadiendo el factor dependiente del método de excavación mediante la expresión:

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

Se procede a calcular los factores F_1 , F_2 y F_3 :

El factor F_1 se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$F_1 = [1 - \sin|\alpha_j - \alpha_s|]^2$$

Donde:

α_j : es la dirección de buzamiento de las discontinuidades.

α_s : es la dirección de buzamiento del talud.

Entonces procedemos a realizar el cálculo con los siguientes datos recolectados en campo ($\alpha_j = 56^\circ$ y $\alpha_s = 140^\circ$)

Calculando:

$$F_1 = [1 - \sin|56^\circ - 140^\circ|]^2$$

$$F_1 = [1 - \sin 84^\circ]^2$$

$$F_1 = 0.00003$$

Debido a que el valor hallado es muy bajo se considera un valor de $F_1 = 0.15$ según la tabla.

El factor F_2 se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$F_2 = \tan^2 \beta_j$$

Donde:

β_j : es el buzamiento de la discontinuidad

Entonces procedemos a realizar el cálculo con los siguientes datos recolectados en campo ($\alpha_j = 56^\circ$ y $\beta_j = 54^\circ$)

Calculando:

$$F_2 = \tan^2 54^\circ$$

$$F_2 = 1.894$$

Como el factor de ajuste es mayor a 1 y en la cartilla el valor máximo es 1, entonces se considera $F_2 = 1$

Para hallar el valor F_3 depende de la relación entre los buzamientos del talud β_s y las discontinuidades β_j según el tipo de rotura, para el caso de rotura plana se calcula C mediante: $\beta_j - \beta_s$ es en este parámetro en el cual podemos analizar un ángulo de 10/1 (V/H), el cual es equivalente a 84.289° .

$$C = \beta_j - \beta_s$$

$$C = 54^\circ - 84.289^\circ$$

$$C = -30.289^\circ$$

P	C =	$\beta_j - \beta_s$	$>10^\circ$	$10-0^\circ$	0°	$0-(-10^\circ)$	$<(-10^\circ)$
T		$\beta_s - \beta_j$	$<110^\circ$	$110-120^\circ$	$>120^\circ$	-	-
P/T	F_3		0	-6	-25	-50	-60

En el cuadro de Romana se puede determinar que el valor C se encuentra en parámetro $< (-10^\circ)$ F_3 es de - 60.

Por lo tanto, el valor de $F_3 = - 60$.

Para el valor de F_4 usamos la siguiente tabla:

Tabla 20. Valor correspondiente al factor F_4

Método de excavación	F_4
Talud natural	+15
Precorte	+10
Voladura suave	+8
Voladura normal o excavación mecánica	0
Voladura deficiente	-8

Tomado de Romana, 1985

Para la realización del proyecto se utiliza una voladura normal o excavación mecánica; por lo tanto, el factor $F_4 = 0$.

Entonces para finalizar se realizó el cálculo del SMR reemplazando los datos calculados de los factores en la formula anterior:

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$
$$SMR = 69 + (0.15 \times 1 \times - 60) + 0$$
$$SMR = 60$$

- **Familia 2**

El SMR se obtiene corrigiendo el RMR básico de Bieniawski a través de los factores dependientes de la geometría del talud y de las continuidades y añadiendo el factor dependiente del método de excavación mediante la expresión:

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

Se procede a calcular los factores F_1 , F_2 y F_3 :

El factor F_1 se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$F_1 = [1 - \sin|\alpha_j - \alpha_s|]^2$$

Donde:

α_j : es la dirección de buzamiento de las discontinuidades.

α_s : es la dirección de buzamiento del talud.

Entonces procedemos a realizar el cálculo con los siguientes datos recolectados en campo ($\alpha_j = 293^\circ$ y $\alpha_s = 140^\circ$)

Calculando:

$$F_1 = [1 - \sin|293^\circ - 140^\circ|]^2$$

$$F_1 = [1 - \sin 153^\circ]^2$$

$$F_1 = 0.298$$

Debido a que el valor hallado es muy bajo se considera un valor de $F_1 = 0.30$ según la tabla.

El factor F_2 se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$F_2 = \tan^2 \beta_j$$

Donde:

β_j : es el buzamiento de la discontinuidad.

Entonces procedemos a realizar el cálculo con los siguientes datos recolectados en campo ($\alpha_j = 293^\circ$ y $\beta_j = 41^\circ$)

Calculando:

$$F_2 = \tan^2 41^\circ$$

$$F_2 = 0.756$$

Para hallar el valor F_3 depende de la relación entre los buzamientos del talud β_s y las discontinuidades β_j según el tipo de rotura, para el caso de rotura plana se calcula C mediante: $\beta_j - \beta_s$ es en este parámetro en el cual podemos analizar un ángulo de 10/1 (V/H), el cual es equivalente a 84.289° .

$$C = \beta_j - \beta_s$$

$$C = 41^\circ - 84.289^\circ$$

$$C = -47^\circ$$

P	C =	$\beta_j - \beta_s$	$>10^\circ$	$10-0^\circ$	0°	$0-(-10^\circ)$	$<(-10^\circ)$
T		β_j, β_s	$<110^\circ$	$110-120^\circ$	$>120^\circ$	-	-
P/T	F_3		0	-6	-25	-50	-60

En el cuadro de romana se puede determinar que el valor C se encuentra en parámetro $< (-10^\circ)$ F_3 es de -60.

Por lo tanto, el valor de $F_3 = -60$.

Para el valor de F_4 usamos la siguiente tabla:

Tabla 21. Valor correspondiente al factor F_4 .

Método de excavación	F_4
Talud natural	+15
Precorte	+10
Voladura suave	+8
Voladura normal o excavación mecánica	0
Voladura deficiente	-8

Tomado de Romana, 1985

Para la realización del proyecto se utiliza una voladura normal o excavación mecánica; por lo tanto, el factor $F_4 = 0$.

Entonces, para finalizar se realizó el cálculo del SMR reemplazando los datos calculados de los factores en la formula anterior:

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

$$SMR = 69 + (0.298 \times 0.756 \times -60) + 0$$

$$\mathbf{SMR = 55.483}$$

Después del análisis de ambas familias con la clasificación geomecánica SMR, se procede a considerar la condición más desfavorable, el cual es SMR = 55.483.

4.3. Discusión de resultados

4.3.1. Clasificación geomecánica de Bieniawski (RMR)

4.3.1.1. Análisis estereográfico

El dominio geotécnico que presenta la estación de análisis para la caracterización geomecánica, de roca caliza predominante, está dada del mismo modo por dos familias de discontinuidades que se interceptan entre sí, generando así una falla por efecto cuña, las cuales se dan con mayor frecuencia en las estructuras de macizos rocosos resistentes con discontinuidades pronunciadas.

4.3.1.2. Sistema RMR

Tabla 22. Resumen clasificación RMR

Parámetro		Puntuación	
SISTEMA RMR	Resistencia a la compresión	12	
	RQD	20	
	Espaciamiento	10	
	Condición de las discontinuidades	Persistencia	4
		Apertura	1
		Rugosidad	3
		Relleno	4
		Alteración	5
	Presencia de agua	10	
	TOTAL	69	

El resultado de la puntuación en el sistema de Bieniawski es de 69 siendo clasificada en la siguiente tabla:

Tabla 23. Clasificación del macizo rocoso RMR
Clasificación del macizo rocoso RMR

RMR	Clase	Descripción	
91-100	Ia	Excelente	Muy buena
81-90	Ib	Muy buena	Buena
71-80	IIa	Buena a muy buena	Buena
61-70	IIb	Buena a media	
51-60	IIIa	Media a buena	Media
41-50	IIIb	Media a mala	
31-40	IVa	Mala a media	Mala
21-30	IVb	Mala a muy mala	
11-20	Va	Muy mala	Muy mala
0-10	Vb	Pésima	

Según la clasificación de Bieniawski el macizo rocoso estudiado está clasificado como Buena – IIB, según esta clase tendría una cohesión del macizo rocoso 300 – 400 kPa y un ángulo de fricción del macizo rocoso entre 35° a 45°.

4.3.2. Clasificación geomecánica Slope Mass Rating (SMR)

Para poder tener un estudio más preciso y así poder clasificar de mejor manera el macizo rocoso, se realizó el análisis en ambas familias, obteniendo los siguientes resultados:

- **Familia 1**

		Valor
SISTEMA SMR	RMR	69
	F ₁	0.15
	F ₂	1
	F ₃	-60
	F ₄	0
	SMR	60

El resultado de la puntuación en el sistema SMR es de 60 siendo clasificada en la siguiente tabla:

Tabla 24. Descripción de las clases del SMR

Clases →	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy Buena
Estabilidad	Completamente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Completamente estable
Roturas	Grandes planos o circular	Plana o grandes cuñas	Plana a lo largo de algunas juntas o algunas cuñas	Algunas roturas en bloque	Sin roturas
Probabilidad de rotura	0,9	0,6	0,4	0,2	0

Tomado de Romana, 1985

Según la clasificación de Romana el macizo rocoso estudiado está clasificado como Normal, según esta clase es parcialmente estable con una probabilidad de rotura de 0.4, además de que confirma que puede haber roturas planas a lo largo de algunas juntas y ocasionando cuñas que previamente se determinó en el análisis estereográfico.

- **Familia 2**

		Valor
SISTEMA SMR	RMR	69
	F ₁	0.298
	F ₂	0.756
	F ₃	-60
	F ₄	0
	SMR	55.483

El resultado de la puntuación en el sistema SMR es de 55 siendo este la más desfavorable clasificada en la siguiente tabla:

Tabla 25. Descripción de las clases del SMR

Clases →	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy Buena
Estabilidad	Completamente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Completamente estable
Roturas	Grandes planos o circular	Plana o grandes cuñas	Plana a lo largo de algunas juntas o algunas cuñas	Algunas roturas en bloque	Sin roturas
Probabilidad de rotura	0,9	0,6	0,4	0,2	0

Tomado de Romana, 1985

Según la clasificación de Romana el macizo rocoso estudiado está clasificado como Normal, según esta clase es parcialmente estable con una probabilidad de rotura de 0.4, además de que confirma al igual que en la familia 1, que puede haber roturas planas a lo largo de algunas juntas y ocasionando cuñas que previamente se determinó en el análisis estereográfico.

Después del análisis de ambas familias y considerando la condición más desfavorable (familia 2), podemos comprobar y afirmar que mediante un análisis del ángulo del talud de 10/1 (V/H) o su equivalente a 84.3°, su clasificación SMR se encuentra en la escala “Normal” el cual sería el más óptimo en cuanto a movimiento de material, costos y viabilidad, el cual para reducir la probabilidad de rotura en el diseño se realizan cortes cerrados con taludes redondeados.

En la siguiente tabla podemos observar la descripción de la clasificación SMR, el cual el resultado establecido se encuentra en la clase III.

Tabla 26. Clases de estabilidad según el SMR

DESCRIPCIÓN DE LAS CLASES SMR										
CLASE Nº	Vb	Va	IVb	IVa	IIIb	IIIa	IIb	IIa	Ib	Ia
DESCRIPCIÓN	MUY MALA		MALA		NORMAL		BUENA		MUY BUENA	
ESTABILIDAD	TOTALMENTE INESTABLE		INESTABLE		PARCIALMENTE INESTABLE		ESTABLE		TOTALMENTE ESTABLE	
ROTURAS	GRANDES ROTURAS POR PLANOS CONTINUOS O POR LA MASA		JUNTAS O GRANDES CUÑAS		ALGUNAS JUNTAS O MUCHAS CUÑAS		ALGUNOS BLOQUES		NINGUNA	
SOSTENIMIENTOS	REEXCAVACIÓN		IMPORTANTES		SISTEMÁTICOS		OCASIONALES		NINGUNO	

Tomado de Romana, 1985

Por consiguiente, Romana nos muestra un cuadro para el sostenimiento o refuerzo del talud, el cual se observa en el siguiente gráfico.

VALORES DEL SMR PARA CADA FORMA DE ROTURA (EMPÍRICOS)																
ROTURAS PLANAS	MUY GRANDES					IMPORTANTES					NINGUNA					
ROTURAS EN CUNA						MUCHAS					ALGUNAS					
ROT. POR VUELCO						IMPORT.					NINGUNA					
ROT. COMPLETAS	POSIBLES										NINGUNA					
SMR →	0	10	15	20	30	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100
REEXCAVACIÓN	REEXCAVACIÓN MUROS DE CONTENCIÓN															
DRENAJE	DRENAJE SUPERFICIAL DRENAJE PROFUNDO															
HORMIGÓN	HORMIGÓN PROYECTADO HORMIGÓN DENTAL CONTRAFUERTE y/o VIGAS MUROS DE PIE															
REFUERZO	BULONES ANCLAJES															
PROTECCIÓN	ZANJA DE PIE VALLAS (DE PIE O DE TALUD) REDES y/o MALLAS (DE TALUD)															
SIN SOSTENIMIENTO	SANEAMIENTO NINGUNO															
MÉTODOS DE SOSTENIMIENTO SUGERIDOS																

**Figura 34. Medidas de corrección propuestas según SMR
Tomado de Romana, 1985**

Romana, según este gráfico, sugiere Bulones o anclajes en el mejor de los casos como refuerzo y hormigón proyectado o shotcrete, hormigón dental, contrafuertes y/o vigas, entre otros para el peor de los escenarios.

Para el proyecto se sugiere el refuerzo con bulones o pernos de anclaje o en todo caso un revestimiento con shotcrete, además de que los taludes estén redondeados en el escape superior, para lo cual el diseño se propuesto se adjunta en los anexos.

CONCLUSIONES

1. Según la evaluación geomecánica mediante la clasificación de Bieniawski, el macizo rocoso obtuvo una puntuación de 69, estableciéndose como Buena – IIb. Posteriormente, se realizó la clasificación de Romana tomando en cuenta la condición más desfavorable, siendo evaluado con una pendiente de talud de 10/1 (V/H), o su equivalente a 84.3° , el cual obtuvo un valor de 55.48 clasificándose como roca normal o parcialmente inestable, por lo tanto, puede presentar algunas o varias roturas de tipo cuña, donde se recomienda un sostenimiento de refuerzo, que puede constar de bulones o anclajes en mejor de los casos, y de gunita u hormigón proyectado en el peor de los escenarios.
2. La evaluación geomecánica aplicada mediante la cartilla de Bieniawski al talud dio como resultado el valor de 69, clasificada como Buena – IIB, según esta clase tendría una cohesión del macizo rocoso aproximada de 300 – 400 kPa y un ángulo de fricción del macizo rocoso entre 35° a 45° .
3. Se determinó el resultado según la clasificación de Romana con el ángulo del talud de 10/1 o de 84.3° , el macizo rocoso estudiado se clasificó como Normal, según esta clase es parcialmente estable con una probabilidad de rotura de 0.4, después del análisis de ambas familias, podemos deducir que existen roturas planas a lo largo de algunas juntas y que estas de alguna manera están ocasionando cuñas como se determinó en el análisis estereográfico.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar ensayos en laboratorio para obtener resultados más precisos en cuanto a resistencia a la compresión, el cual daría mayor validez a los resultados.
2. Se recomienda continuar con un mapeo geomecánico en todos los tramos del proyecto, esto permitirá identificar las zonas de baja resistencia y mayor rapidez en el diseño de los taludes, así como en la toma de decisiones para los problemas que se puedan presentar más adelante en el proyecto, que requieran un tratamiento específico.
3. Se recomienda realizar un diseño de taludes que consideren bermas o banquetas y estas deben tener sendero de acceso para el empleo de equipo de mantenimiento, esto para asegurar una mayor seguridad debido a las condiciones del terreno.
4. Se recomienda el refuerzo con bulones o pernos de anclaje o en todo caso un revestimiento con shotcrete, además de que los taludes estén redondeados en el escape superior.
5. Se recomienda llevar a cabo un estudio detallado para una voladura eficiente en el macizo rocoso, de tal manera que se evite una sobreexcavación o creación de nuevas fracturas en la cara del talud, para mantener así su estabilidad física.

REFERENCIAS

1. CARUANAMBO, Yovany. Evaluación geomecánica de los taludes de la carretera Encañada-Celendín en el tramo Km. 32+00 - Km. 46+00. Tesis (Título de Ingeniero Geólogo). Cajamarca - Perú: Universidad Nacional de Cajamarca, 2017, 63 pp.
2. VALDERA, Antony. Evaluación geomecánica - geotécnica de la carretera El Tayal - Santa Isolina Bajo, provincia de Chota Cajamara 2017 . Tesis (Título de Ingeniero Geólogo). Cajamarca - Perú: Universidad Nacional de Cajamarca, 2019, 188 pp.
3. ARROYO, José y RODRIGO, Willian. Estudio geomecánico para determinar el tipo de sostenimiento adecuado de los taludes en la carretera Trujillo - Otuzco Km. 10+000 al Km. 15+000. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Chiclayo - Perú: Universidad César Vallejo, 2020, 197 pp.
4. BREÑA, Christian. Estabilidad de taludes de la carretera longitudinal de la sierra; tramo Cochabamba - Cutervo - Chiple, Cajamarca - Perú. Tesis (Grado Académico de Magíster en Geología con mención en Geotecnia). Lima: Universidad Mayor de San Marcos, 2019, 178 pp.
5. VALERIANO, Fredy. Caracterización geotécnica y modos de falla estructural en el talud en roca del cerro Espinal Juliaca. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Puno: Universidad Nacional del Altiplano, 2015, 116 pp.
6. CARRIÓN, Carlos. Análisis y diseño de la estabilidad de talud en el sector sausacocha – pallar km 8+000 al 9+000 provincia de Sánchez Carrión, departamento de La Libertad, 2017. Tesis (Título de Ingeniero Civil Ambiental). Chiclayo: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, 2019, 212 pp.

7. SVETLANA, Melentijevic. Estabilidad de taludes en macizos rocosos con criterios de rotura no lineales y leyes de fluencia no asociada. Tesis Doctoral. Madrid :Universidad Politécnica de Madrid, 2005,571 pp.
8. TURPO, Jaime. Determinación de los parámetros geométricos del talud, para garantizar la estabilidad del tajo superficial del área de explotación en la unidad minera Moises Randy 2010. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Moquegua : Universidad Nacional de Moquegua, 2018, 204 pp.
9. SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Ingeniería de Suelos Ltda. Bucaramanga, 1998.
10. QUEA, Lucio. Diseño de estabilidad de taludes para el nivel de resistencia al corte en el frente de minado del proyecto San Antonio y María – Ananea. Tesis (Magister Scientiae en Geotecnia y Geomecánica Minera) Puno : Universidad Nacional del Altiplano, 2016, 119 pp.
11. GONZÁLEZ, Luis y otros. *Ingeniería Geológica*. Madrid : Pearson Educación, 2002. ISBN: 84-205-3104-9.
12. RAMÍREZ, Pedro y ALEJANO, Leandro. *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. [Citado el: 25 de agosto de 2021.] Recuperado de: file:///C:/Users/User/Downloads/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf
13. CAHUANA, Roger. Evaluación geomecánica para el diseño de voladura controlada en el talud de la carretera Chontabamba - Consevidayoc, progresivas del km 05+100 al km 06+300. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Puno: Universidad Nacional del Altiplano de Puno, 2021, 143 pp.
14. OSINERGMIN. *Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión, y cierre de labores subterráneas*. [En línea] Inversiones Iakob S.A.C. , Lima- Perú, 2017 [Citado el: 04 de julio de 2021.] Recuperado de: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Guia-Criterios-Geomecanicos.pdf

15. RODRÍGUEZ, Javier. *Caracterización de macizos rocosos*. [En línea] Universidad de Oviedo. Madrid, 2007. [Citado el: 16 de julio de 2021] Recuperado de: https://www.academia.edu/7560586/CARACTERIZACION_DE_MACIZOS_ROCOSOS
16. LOZANO, Antonio. *Martillo de Schmidt (Esclerómetro)*. [En línea] Geoengineering Services & Consulting E.I.R.L. [Citado el: 25 de junio de 2021.] Recuperado de: https://www.academia.edu/12187503/MARTILLO_SCHMIDT_ESCLEROMETRO
17. MALDONADO, Yandry. *Geología web*. [En línea] 01 de 01 de 2018. [Citado el: 15 de marzo de 2021.] Recuperado de: <https://geologiaweb.com>.
18. TOMÁS, Roberto , ROMANA, Manuel y SERÓN, José. *Review of the Current Status of the Geomechanic Classification Slope Mass Rating (SMR)*. Valencia : Boletín de la Sociedad Española de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica, 2017, Ingeniería Civil.
19. FONAM. Reglamento para el cierre de minas. [En línea] 12 de Diciembre de 2019. Recuperado de: <https://fonamperu.org.pe/download/reglamento-para-el-cierre-de-minas/>.
20. SANZ, Julio. Introducción a la ciencia. [En línea] [Citado el: 15 de 07 de 2021.] Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/396978068/Introduccion-a-La-Ciencia-Julio-Sanz>
21. CASTRO, Eusebio. *Teoría y práctica de la investigación científica*. Huancayo : PERÚGRAPH SRL, 2016.
22. HERNÁNDEZ, Roberto, COLLADO, Carlos y BAPTISTA, Pilar. *Metodología de la investigación*. 6ta ed. México : MCGRAW-HILL, 2014. ISBN: 978-1-4562-2396-0
23. SANCHEZ, Hugo y REYES, Carlos. *Metodología y diseño de la investigación científica*. Lima : Visión Univesitaria, 1984. ISBN 978-9972-9695-3-9

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia.

Título: Evaluación geomecánica del macizo rocoso para determinar el ángulo de reposo del talud, carretera tramo San Antonio Puente Chiquiacc, Huancavelica-2021		
Problema	Objetivo	Hipótesis
¿Cuál es el resultado de la evaluación geomecánica del macizo rocoso para determinar el ángulo de reposo del talud, carretera tramo San Antonio - puente Chiquiacc, Huancavelica 2021?	Establecer el resultado de la evaluación geomecánica del macizo rocoso para determinar el ángulo de reposo del talud, carretera tramo San Antonio - Puente Chiquiacc, Huancavelica 2021.	El resultado de la evaluación geomecánica del macizo rocoso es heterogéneo para cada zona, para las cuales se determinaron diferentes ángulos de reposo de los taludes de la carretera tramo San Antonio- Puente Chiquiacc.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas
<ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es el resultado de la aplicación de la cartilla geomecánica de Bieniawski para determinar el ángulo de reposo del talud? ¿Cuál es el resultado de la aplicación de la cartilla geomecánica Slope Mass Rating para determinar el ángulo de reposo del talud? 	<ul style="list-style-type: none"> Determinar el resultado de la aplicación de la cartilla geomecánica de Bieniawski para determinar el ángulo de reposo del talud. Determinar el resultado de la aplicación de la cartilla geomecánica Slope Mass Rating para determinar el ángulo de reposo del talud. 	<ul style="list-style-type: none"> El resultado de la aplicación de la cartilla geomecánica de Bieniawski es importante para la determinación de la calidad del macizo rocoso, los cuales resultaron clasificaciones heterogéneas en cada zona. El resultado de la aplicación de la cartilla geomecánica Slope Mass Rating es el complemento para la determinación de las dimensiones geométricas de los taludes en excavaciones de macizos rocosos, las cuales fueron distintas en cada zona.

Anexo 2

Operacionalización de variables

VARIABLES	DEFINICIÓN	DIMENSIÓN	SUB-DIMENSIÓN	INDICADORES
VI: Evaluación geomecánica del macizo rocoso	Es el proceso sistemático de caracterización estructural e hidrológico, con la aplicación de tablas que contienen parámetros geomecánicos, los cuales cuantifican la calidad y estabilidad del macizo rocoso.	Caracterización estructural e hidrológico	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificación geomecánica de Bieniawski o RMR (Rock mass rating). • Clasificación geomecánica Slope Mass Rating 	<ul style="list-style-type: none"> • Valoración geomecánica de Bieniawski o RMR (Rock mass rating). • Valoración geomecánica Slope Mass Rating
VD: Ángulo de reposo del talud	Es una característica geométrica de una superficie inclinada de dimensiones determinadas de suelo o macizo rocoso respecto a la horizontal, evitando desplazamiento o caída del material.	Característica geométrica	Dimensiones del talud	<ul style="list-style-type: none"> • Ángulo de talud • Altura de talud

Anexo 3

Cartilla Slope Mass Rating – SMR

$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$ (ROMANA, 1985)					
FACTORES DE AJUSTE DE LAS JUNTAS (F_1, F_2, F_3)			α_j = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DE LA JUNTA α_s = DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO DEL TALUD β_j = BUZAMIENTO DE LA JUNTA β_s = BUZAMIENTO DEL TALUD		
	MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
ROTURA PLANA $ \alpha_j - \alpha_s =$ VUELCO $ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ =$ VALORES	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
AJUSTE ANALÍTICO	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
$F_1 = (1 - \text{sen } \alpha_j - \alpha_s)^2$					
VALORES $ \beta_j =$ ROTURA PLANA VUELCO AJUSTE ANALÍTICO	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
$F_2 = \text{tg}^2 \beta_j$					
ROTURA PLANA $\beta_j - \beta_s =$ VUELCO $\beta_j + \beta_s =$ VALORES	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< (-10^\circ)$
AJUSTE ANALÍTICO	0	-6	-25	-50	-60
$F_3 =$ (SE MANTIENEN LOS VALORES PROPUESTOS POR BIENIAWSKI, 1976 / 79)					
FACTOR DE AJUSTE POR EL MÉTODO DE EXCAVACIÓN	$F_4 =$ VALORES EMPÍRICOS ESTABLECIDOS PARA CADA MÉTODO DE EXCAVACIÓN				
	TALUD NATURAL	PRECORTE	VOLADURA SUAVE	VOLADURA ó MECÁNICO	VOLADURA DEFICIENTE
	+ 15	+ 10	+ 8	0	Activar Windows

Anexo 4

Cartilla de Bieniawski 1989

SISTEMA DE RMR (Según Bieniawski 1989).									
A. PARÁMETROS DE CLASIFICACIÓN Y SUS VALORACIONES									
Parámetro		Rango de valores							
1	Resistencia del material de la roca intacta	índice de resistencia bajo carga puntual	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Para este rango es preferible un ensayo de compresión simple		
		Resistencia a la compresión simple	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Puntuación	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD Calidad del testigo de perforación		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	<25%		
	Puntuación		20	17	13	8	3		
3	Espaciado entre discontinuidades		>2 m	0.6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Condiciones de las discontinuidades (Ver E)		Superficies muy rugosas	Superficies ligeramente rugosas	Superficies ligeramente rugosas	Superficies pulidas o relleno de falla < 3mm de espesor	Relleno de falla suave > 3mm de espesor o separación > 3mm		
			Discontinuas No hay separación Paredes intactas	Separación <1mm Paredes ligeramente meteorizadas	Separación <1mm Paredes altamente meteorizadas	separación 1-5mm Continuas	Continuas		
Puntuación		30	25	20	10	0			
5	Agua subterránea	Afluencia por 10 m de longitud del túnel (l/m)	Ninguna	<10	10-25	25-125	>125		
		(Presión de agua en las juntas) / (σ principal mayor)	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
	Condiciones generales		Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteando	Fluyendo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		
B. AJUSTE DE LA PUNTAJACIÓN PARA LA ORIENTACIÓN DE DISCONTINUIDADES (Ver F)									
Orientaciones de rumbo y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable			
Puntuaciones	Túneles y minas	0	-2	-5	-10	-12			
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25			
	Taludes	0	-5	-25	-30	-			
C. CLASES DE MACIZOS ROCOSOS DETERMINADOS A PARTIR DE LA PUNTAJACIÓN TOTAL									
Valoración		100←-81	80←-61	60←-41	40←-21	<21			
Categoría		I	II	III	IV	V			
Descripción		Roca muy buena	Roca buena	Roca regular	Roca mala	Roca muy mala			

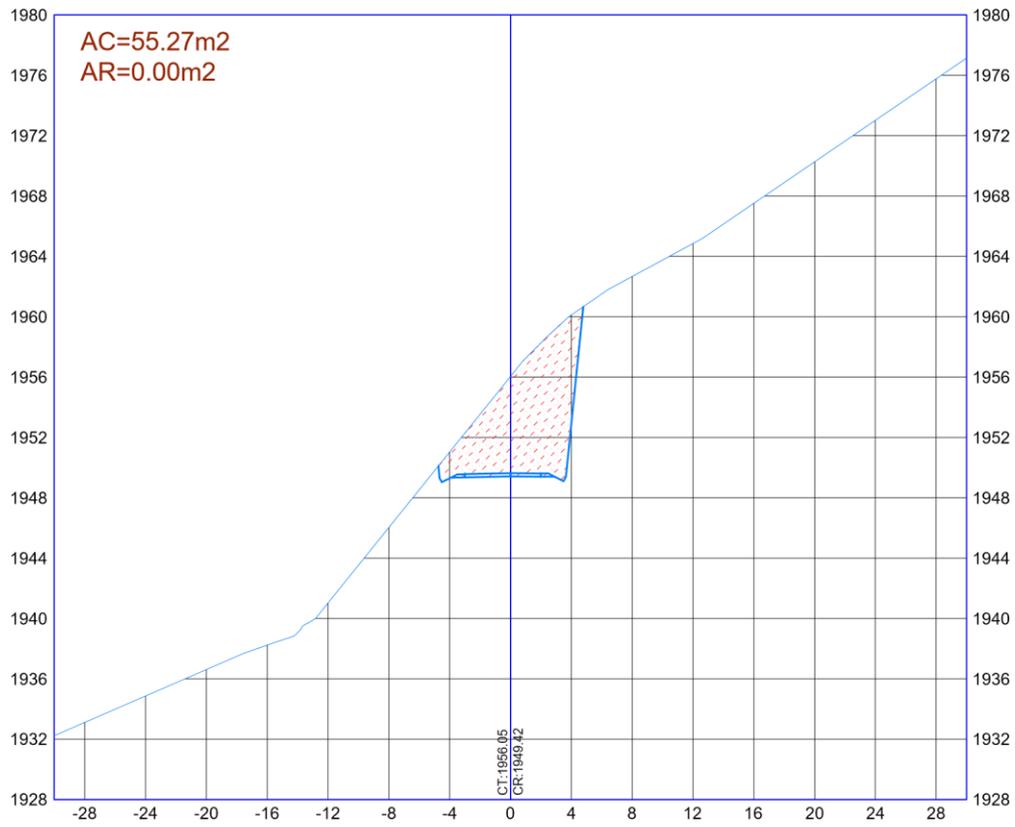
D. SIGNIFICADO DE LAS CLASES DE ROCA					
Categoría	I	II	III	IV	V
Tiempo promedio de auto soporte	20 años para tramo de 15 m	1 año para un tramo de 10 m	1 semana para tramo de 3m	10 hrs. Para tramo de 2.5 m	30 min para tramo de 1 m
Cohesión del macizo rocoso (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Ángulo de fricción del macizo rocoso (grados)	>45	35-45	25-35	15-25	<15
E. LINEAMIENTOS PARA CLASIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE DISCONTINUIDAD					
Longitud de discontinuidad (persistencia) Puntuación	<1 m 6	1-3 m 4	3-10 m 2	10-20 m 1	>20 m 0
Separación (apertura) Puntuación	Ninguna 6	<0.1 mm 5	0.1-1.0 mm 4	1-5 mm 1	>5 mm 0
Rugosidad Puntuación	Muy rugosa 6	Rugosa 5	Ligeramente rugosa 3	Lisa 1	Pulida 0
Relleno (relleno de falla) Puntuación	Ninguna 6	Relleno duro<5mm 4	Relleno duro>5mm 2	Relleno blando<5mm 2	Relleno blando>5mm 0
Meteorización Puntuación	No meteorizada 6	Ligeramente meteorizada 5	Moderadamente meteorizada 3	Altamente meteorizada 1	Descompuesta 0
F. EFECTO DE LA ORIENTACIÓN DE RUMBO Y BUZAMIENTO DE LAS DISCONTINUIDADES EN LA PERFORACIÓN DE TÚNELES**					
Rumbo perpendicular al eje del túnel			Rumbo paralelo al eje del túnel		
Excavación hacia el buzamiento-buz. 45-90°	Excavación hacia el buzamiento-buz. 20-45°		Buzamiento 45-90°	Buzamiento 20-45°	
Muy favorable	Favorable		Muy desfavorable	Regular	
Excavación contra el buzamiento-buz. 45-90°	Excavación contra el buzamiento-buz. 20-45°		Buzamiento 0-20° - independiente del rumbo		
Regular	Desfavorable		Regular		

Algunas condiciones se excluyen mutuamente. Por ejemplo, si hay relleno presente, la rugosidad de la superficie será opacada por la influencia del relleno de falla. En dichos casos utilice A4 directamente.

** Modificado según Wickham et al. (1972).

Anexo 5

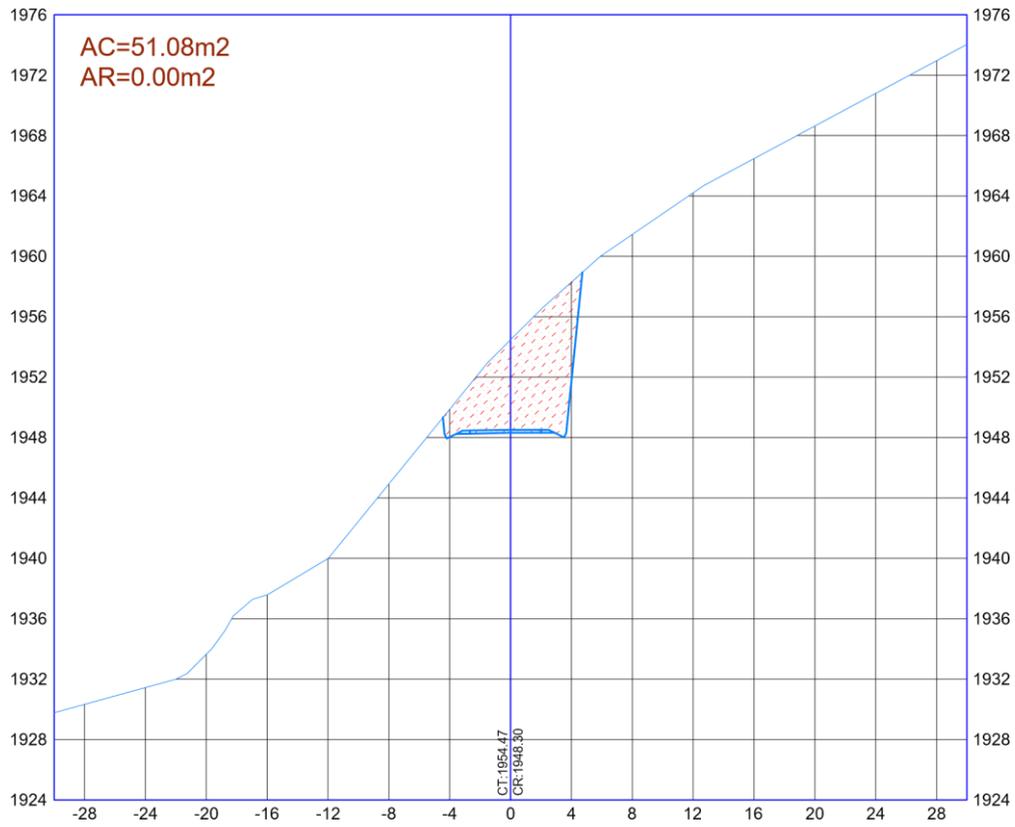
Diseño del talud con escarpe redondeado en sección 10+430.00 – vista frontal,
escala 1/50, área total de corte = 55.27 m².



Escala 1:50

Anexo 6

Diseño del talud con escarpe redondeado en sección 10+440.00 – vista frontal,
escala 1/50, área total de corte = 51.08 m²



Escala 1:50

Anexo 8

Abaco para determinar la resistencia a la compresión con el esclerómetro,
martillo de Schmidt

Shear strength of rock discontinuities

