



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DE TALUDES DE ROCA ENTRE
LOS KILÓMETROS 229+000 AL 231+000 DE LA CARRETERA
SANDIA A QUIQUIRA – PUNO

TESIS

PRESENTADA POR:

NANCY KARINA PUMA MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

A mis adorados padres **Luis** y **Rosa**, por haberme dado la vida, por su esfuerzo constante y confianza en mí, por haberme enseñado a luchar y apoyado en momentos buenos y adversos, por su cariño, consejos y preocupación en darme una formación profesional.

A mis hermanos; **Ferrer** y **Milagros** por ser mi modelo a seguir, **Luis Alfredo** por ser mi ángel guardián.

Nancy Karina Puma Mamani.



AGRADECIMIENTO

A mi Dios por permitirme a vivir y darme fortaleza en todo momento.

Mi eterna gratitud a mis padres por brindarme educación, por enseñarme a ser perseverante y fuerte.

A mis hermanos Ferrer y Milagros por su apoyo incondicional, Luis Alfredo por darme Fe.

A la Universidad Nacional del Altiplano, por ser mi alma mater y mentora durante el transcurso de mi formación profesional.

Al Dr. ERNESTO SAMUEL MACHACCA HANCCO, por haberme guiado y orientado en el presente trabajo de investigación.

A mis docentes formadores que me inspiraron a ser Ingeniero Geóloga.

Nancy Karina Puma Mamani.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
RESUMEN	15
ABSTRACT.....	16

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....	18
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.2.1. Pregunta general.....	18
1.1.2. Preguntas específicas	18
1.3. HIPÓTESIS.....	19
1.4. OBJETIVOS	19
1.4.1. Objetivo general.....	19
1.4.2. Objetivos específicos	19
1.5. JUSTIFICACIÓN	20

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE ESTABILIDAD DE TALUDES .	21
2.2. METODOLOGÍA Y SISTEMÁTICA.....	24
2.3. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA	26
2.3.1 Litología.....	27
2.4. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL	27



2.4.1 Mapeo superficial de estructuras	28
2.4.2 Orientación.....	29
2.4.3 Espaciado	30
2.4.4 Continuidad o Persistencia.....	32
2.4.5 Rugosidad	33
2.4.6 Abertura	36
2.4.7 Relleno	38
2.4.8 Filtraciones o agua en las discontinuidades	39
2.4.9 Resistencia de paredes	41
2.4.10 Número y orientación de las familias de discontinuidades.....	42
2.4.11 Tamaño de bloque e intensidad de fracturación	43
2.4.12 Grado de meteorización	44
2.5 HIDROGEOLOGÍA	45
2.5.1 Índice de designación de la calidad de la roca (RQD).....	47
2.5.2 Clasificación geotécnica del macizo rocoso	48
2.5.2.1 Sistemas de clasificación RMR	49
2.5.2.2 Método de índice GSI.....	51
2.5.3 Propiedades de las estructuras	53
2.5.4 Propiedades de la roca intacta.....	54
2.5.4.1 Ensayo de laboratorio	54
2.6 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES	55
2.7 MÉTODOS PARA ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUD.....	56
2.7.1 Métodos empíricos para la estabilidad de taludes	56
2.7.1.1. Ángulo de talud versus altura de talud.....	57
2.7.2. Método de proyección estereográficas o cinemático	58
2.7.2.1. Modos de falla o ruptura	59
2.7.3. Modos de equilibrio límite o analítico	62



2.7.3.1. Estabilidad de fallas plana	63
2.7.3.2. Estabilidad de fallas por cuña	65
2.7.3.3. Estabilidad de fallas por vuelco	66
2.8. CONDICIONES SÍSMICAS PARA LA ESTABILIDAD DE TALUD.....	68
2.9. DEFINICIONES CONCEPTUALES	69
2.9.1. Macizo Rocoso	69
2.9.2. Matriz Rocosa	70
2.9.3. Discontinuidades.....	70
2.9.4. Orientación.....	70
2.9.5. Meteorización	71
2.9.6. Alteración.....	71
2.9.7. Factor de Seguridad	72

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS	73
3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	73
3.2.1. Etapa de gabinete	73
3.2.2. Etapa de campo	74
3.2.2.1. Geológica	74
3.2.2.2. Clasificación Geomecánica.....	80
3.2.2.4. Valoración Geotécnica de la Roca Intacta	83
3.2.2.5. Análisis de Estabilidad de Taludes	84
3.2.3. Etapa de Trabajo en Laboratorio	85
3.2.4. Etapa de Procesamiento de datos en Gabinete II.....	85

CAPITULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN	86
--	----



4.1.1. UBICACIÓN	86
4.1.2. Accesibilidad.	86
4.2. GEOLOGÍA LOCAL	87
4.2.1. Formación Sandia (Os-s)	87
4.2.2. Formación Ananea (SD-a)	87
4.2.3. Formación Chichanaco	88
4.2.4. Cuaternario coluvial.....	88
4.3. GEOMORFOLOGÍA LOCAL	88
4.3.1. Sistema acuático	88
4.3.2. Sistema de montañas.....	89
4.3.3. Sistema antrópico.....	90

CAPITULO V

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. EVALUACIÓN Y CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA	92
5.1.1. Evaluación Geomecánica.....	92
5.1.1.1. Identificación de Sistema de Discontinuidades	92
5.1.1.2. Orientación e Inclinación.....	93
5.1.1.3. Espaciado de las discontinuidades	95
5.1.1.4. Persistencia	96
5.1.1.5. Apertura de las discontinuidades	96
5.1.1.6. JRC (Joint Roughness Coefficient).....	97
5.1.1.7. Rugosidad	97
5.1.1.8. Relleno	99
5.1.1.9. Meteorización o Alteración	100
5.1.1.10. Agua en Discontinuidades	101
5.1.1.11. Resistencia de las Paredes de las Discontinuidades.....	101
5.1.2. Clasificación geotécnica	105



5.1.2.1. índice de Designación de la Calidad de la Roca (RQD).....	106
5.1.2.2. Clasificación RMR Bieniawski 1989	107
5.1.2.3. Clasificación con el GSI	114
5.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUD.....	114
5.2.2.1. Ruptura por Cuña.....	116
5.2.2.2. Ruptura Planar	118
5.2.2.3. Ruptura por Vuelvo	118
5.2.3. Método de Equilibrio Limite o Analítico	119
5.2.4. Método de Estabilidad con Software Swedge v.4.0	119
VI CONCLUSIONES	120
VII RECOMENDACIONES	121
VIII REFERENCIAS	122
ANEXOS.....	124

Área : Ingeniería Geotécnica
Línea : Estabilidad de Talud en Rocas

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 22 de abril del 2022.



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Terminología de espaciados.....	32
Tabla 2. Descripción de continuidad o persistencia.....	33
Tabla 3. Descripción de la apertura	37
Tabla 4. Grado de filtración de una discontinuidad sin relleno	40
Tabla 5. Grado de filtración de una discontinuidad con relleno	40
Tabla 6. Estimación de resistencia de rocas mediante martillo de geólogo y navaja ..	41
Tabla 7. Clasificación de macizos rocosos por el n° de familias de discontinuidades	43
Tabla 8. Descripción del grado de meteorización.....	45
Tabla 9. Estimación de las resistencias medias de ciertas rocas	49
Tabla 10. Calidad del macizo rocoso con relación al índice RMR.....	50
Tabla 11. Caracterización del macizo rocoso para estimar su resistencia	52
Tabla 12. Índice de resistencia geológica de resistencia GSI.	53
Tabla 13. Zonas sísmicas	68
Tabla 14. Factor de seguridad recomendado (Ministerio de Fomento, 2001)	72
Tabla 15. Descripción del espaciado	75
Tabla 16. Descripción continuidad o persistencia	75
Tabla 17. Descripción de la Apertura	76
Tabla 18. Descripción de Rugosidad	76
Tabla 19. Descripción de JRC (Joint Roughness Coefficient)	77
Tabla 20. Descripción de Relleno	77
Tabla 21. Grado de meteorización en macizo rocoso	78
Tabla 22. Descripción de agua en discontinuidad	78
Tabla 23. Dureza de las rocas frente al martillo de geólogo.....	79
Tabla 24. Descripción índice de calidad de roca	80
Tabla 25. Descripción de parámetros de clasificación RMR.....	81
Tabla 26. Ubicación geográfica de la zona de estudio.....	86



Tabla 27.	Descripción de la accesibilidad.....	87
Tabla 28.	Unidades geomorfológicas	91
Tabla 29.	Descripción de DIP y DIP/DIR, obtenido desde estereograma	93
Tabla 30.	Descripción del espaciado	95
Tabla 31.	Descripción de la persistencia.....	96
Tabla 32.	Descripción de la Apertura	97
Tabla 33.	Descripción de JRC (Joint Roughness Coefficient)	97
Tabla 34.	Descripción de Rugosidad	98
Tabla 35.	Datos de compresión simple obtenidos en laboratorio	99
Tabla 36.	Datos de carga puntual obtenidos en laboratorio.....	99
Tabla 37.	Descripción de Relleno	100
Tabla 38.	Evaluación de grado de meteorización del macizo rocoso	100
Tabla 39.	Descripción de agua en discontinuidades	101
Tabla 40.	Descripción Resistencia de las paredes de las discontinuidades	101
Tabla 41.	Resultados de ensayos de Propiedades Físicas	102
Tabla 42.	Análisis del Factor de Seguridad	103
Tabla 43.	Descripción del índice da calidad de roca	105
Tabla 44.	Cálculo de RQD.....	106
Tabla 45.	Descripción del índice de calidad de roca	106
Tabla 46.	Descripción del índice de calidad de roca	107
Tabla 47.	Clasificación del macizo rocoso	107
Tabla 48.	Parámetro de Clasificación RMR para Estación – 1.....	108
Tabla 49.	Parámetro de Clasificación RMR para Estación – 2.....	110
Tabla 50.	Parámetro de Clasificación RMR para Estación – 3.....	112
Tabla 51.	Clasificación de GSI	114
Tabla 52.	Descripción fallas estructurales de estereograma del software Dips.....	116



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Etapas para realizar un estudio de estabilidad de talud.....	25
Figura 2.	Representación esquemática de propiedades geométricas de discontinuid. 29	
Figura 3.	(a) y (b). Terminología que define la orientación de discontinuidad: (a) vista isométrica del plano (inmersión y dirección de inmersión); (b) vista en planta del plano.....	30
Figura 4.	Medida del espaciado de discontinuidades.	31
Figura 5.	Distintos modelos de continuidad de familias de discontinuidades.	33
Figura 6.	Perfiles de Rugosidad, la longitud está entre 1m y 10m.	34
Figura 7.	Perfiles de rugosidad y el valor atribuido al coeficiente de rugosidad JRC. 35	
Figura 8.	Esquema para estimar JRC a partir del peine de Barton.	36
Figura 9.	Apertura de discontinuidad.	37
Figura 10.	Ejemplos de esquemas de discontinuidades rellenas.	39
Figura 11.	Representación del número de familias mediante bloques diagramas.	44
Figura 12.	Masa de roca con juntas verticales persistentes y conductividad hidráulica vertical relativamente alta.	47
Figura 13.	Estimación de RQD a partir de testigos de sondeo.	48
Figura 14.	Altura de talud v/s ángulo de talud	58
Figura 15.	Rotura planar.	60
Figura 16.	Rotura de cuña debido a intersección de dos discontinuidades.	61
Figura 17.	Rotura por Vuelco.	62
Figura 18.	Geometría del análisis estático de una falla plana con grieta de tracción... 63	
Figura 19.	Geometría de un análisis estático de solo fricción de una falla en cuña. ...	65
Figura 20.	Deslizamiento e inestabilidad de bloques por vuelco en un plano inclinado. 67	
Figura 21.	a) Modelo geométrico para análisis por equilibrio límite del vuelco de	



bloques en un talud, b) Fuerzas actuando sobre uno de los bloques frente vuelco y al deslizamiento, c) Fuerza de anclaje aplicada al Moque del pie del talud.....	67
Figura 22. Mapa de Zonificación de acuerdo a la Norma E 030.....	69
Figura 23. Metodología para la estabilidad de talud.....	85
Figura 24. Diagrama de planos mayores de discontinuidades, Estación 1.....	94
Figura 25. Diagrama de planos mayores de discontinuidades, Estación 2.....	94
Figura 26. Diagrama de planos mayores de discontinuidades, Estación 3.....	95
Figura 27. Cálculo del factor de seguridad mediante el software Swedge, Estación 1.	104
Figura 28. Cálculo del factor de seguridad mediante el software Swedge, Estación 2.	104
Figura 29. Cálculo del factor de seguridad mediante el software Swedge, Estación 3.	105
Figura 30. Falla de tipo cuña entre la familia 1 la familia 3, estación 1.....	117
Figura 31. Falla de tipo cuña entre la familia 1 la familia 2, estación 2.....	117
Figura 32. Falla de tipo cuña entre la familia 1 la familia 2, estación 3.....	118



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ASTM	: Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.
C	: Cohesión.
Dip	: Buzamiento.
Dip Direction	: Dirección de Buzamiento.
E	: Este.
EPP	: Equipo de Protección Personal.
FS	: Factor de Seguridad.
g/cm ³	: Gramos por Centímetro Cubico.
G	: Gravedad.
GSI	: Índice de Fuerza Geológica.
GPS	: Sistema de Posicionamiento Global.
ISRM	: Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas.
INGEMMET	: Instituto Geológico y Metalúrgico del Perú.
Jv.	: Numero de Juntas por Metro Cúbico.
Jn.	: Numero de Familia del Sistema de Discontinuidades.
Jr.	: Factor de Rugosidad de las Discontinuidades.
Ja.	: Factor de Alteración de las Discontinuidades.
Jw.	: Factor de Reducción de las Condiciones Hidrológicas.
JRC	: Nivel de Rugosidad de las Discontinuidades.
JCS	: Resistencia a Compresión Simple.
kPa	: Kilo Pascal.
KN/m ³	: Kilo Newton por Metro Cubico.
m.	: Metro.
mm.	: Milímetro.
MPa	: Mega Pascal.
MEL	: Método de Equilibrio Limite.
N	: Norte.
Q	: Calidad del Macizo Rocoso.
RMR	: Clasificación del Macizo Rocoso.
RQD	: Designación de Calidad de la Roca.
S	: Sur.
SRF	: Factor de Reducción.



Tn/m ³	: Tonelada por Metro Cubico.
UCS	: Resistencia a la Compresión Uniaxial.
UTM	: Universal Transversal Mercator.
W	: Oeste.
WGS 84	: Sistema Geodésico Mundial 1984.
γ	: Peso Específico.
Ø	: Angulo de Fricción.
°	: Grado.
+	: Suma.
>	: Mayor.
<	: Menor.
=	: Igual.
%	: Porciento.
&	: Ampersad.



RESUMEN

El trabajo de investigación se desarrolló entre las progresivas del Km 229+000 al 231+000 de la carretera Sandia a Quiquira - Puno, el cual se ubica en la Provincia y Distrito de Sandia. Los constantes deslizamientos que se producen en la zona, incrementándose sobre todo en épocas de fuerte avenida, llevó a realizar el presente trabajo de investigación, para ello se consideran tres taludes más importantes, el objetivo del trabajo es evaluar el comportamiento geomecánico, determinar las propiedades geofísicas, evaluar el análisis cinemático y calcular el factor de seguridad estático y pseudoestático en cada uno de las estaciones, para llevar a cabo la presente investigación se basa en métodos convencionales establecidos, para determinar el análisis de estabilidad de taludes en roca, se empleó el programa Dips para realizar el análisis cinemático y el software Swedge para determinar el factor de seguridad, para este trabajo se realizó, el mapeo geológico, mapeo geomecánico y toma de datos como DIP y DIP DIR de las discontinuidades, se extrajeron muestras representativas para cada estación geomecánica, los cuales fueron evaluados en laboratorio, obteniendo estos datos empleamos métodos empíricos, cinemático y analítico, los que permiten interpretar las condiciones de los taludes y la valoración geomecánica por: $RQD1 = 66$, $RQD2 = 70$, $RQD3 = 66$; $RMR1 = 56$, $RMR2 = 55$, $RMR3 = 52$; $GSI1 = 51$, $GSI2 = 54$, $GSI3 = 53$; y el factor de seguridad en condiciones estáticas se tiene: $FS1 = 1.4$, $FS2 = 1.3$, $FS3 = 1.4$, para condiciones pseudoestáticas: $FS1 = 1.0$, $FS2 = 1.1$, $FS3 = 1.2$, concluyendo que los taludes son inestables en épocas de fuertes lluvias.

Palabras clave: Deslizamiento, estabilidad de talud, estación geomecánica, factor de seguridad, roca.



ABSTRACT

The research work was carried out between the progressives from Km 229+000 to 231+000 of the Sandia to Quiquira - Puno highway, which is located in the Province and District of Sandia. The constant landslides that occur in the area, increasing especially in times of strong flood, led to carry out the present research work, for which three more important slopes are considered, the objective of the work is to evaluate the geomechanical behavior, determine the properties geophysics, evaluate the kinematic analysis and calculate the static and pseudostatic safety factor in each of the stations, to carry out the present investigation it is based on established conventional methods, to determine the stability analysis of rock slopes, the Dips program to perform the kinematic analysis and the Swedge software to determine the safety factor, for this work the geological mapping, geomechanical mapping and data collection as DIP and DIP DIR of the discontinuities were carried out, representative samples were extracted for each station geomechanics, which were evaluated in the laboratory, obtaining these data and We use empirical, kinematic and analytical methods, which allow us to interpret the conditions of the slopes and the geomechanical assessment by: $RQD1 = 66$, $RQD2 = 70$, $RQD3 = 66$; $RMR1=56$, $RMR2=55$, $RMR3=52$; $GSI1 = 51$, $GSI2 = 54$, $GSI3 = 53$; and the safety factor in static conditions is: $FS1= 1.4$, $FS2 = 1.3$, $FS3 = 1.4$, for pseudo-static conditions: $FS1= 1.0$, $FS2 = 1.1$, $FS3 = 1.2$, concluding that slopes are unstable in times of heavy rain.

Keywords: Geomechanical station, landslide, safety factor, slope stability, rock.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación, evaluación geomecánica de taludes de roca entre los kilómetros 229+000 al 231+000 de la carretera Sandia a Quiquira – Puno, surge a raíz de los constantes deslizamientos, desprendimientos de rocas y huaycos sobretodo en épocas de fuerte avenida llegándose a veces a quedar incomunicada la vía.

Las vías de comunicación que se encuentran con una pendiente agreste como el de la carretera Sandia a Quiquira, se ven frecuentemente afectadas por los deslizamientos, derrumbes, avalanchas y huaycos, esta acción crea problemas y dificultan la expansión y conservación de las carreteras.

La metodología empleada para este estudio se sustenta en la investigación no experimental de tipo descriptivo y cualitativo, basados en el diseño de taludes de roca, recopilación y análisis de información existente.

El propósito principal de la investigación es evaluar el comportamiento geomecánico de taludes de roca entre los kilómetros 229 al 231 de la carretera Sandia a Quiquira, identificándose tres taludes más críticos, para ello se realizó mapeo geomecánico del macizo rocoso, ensayos de muestras de roca en laboratorio, análisis cinemático con el programa Dips y la simulación de falla en cuña con el Software Swedge para conocer el factor de seguridad de cada estación geomecánica.



1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

La investigación es desarrollada en la carretera Sandia a Quiquira - Puno, entre los kilómetros 229+000 al 321+000, donde los factores geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos y topográficas, influyen en la estabilidad de taludes en los macizos rocosos, ocasionando inseguridad en la transpirabilidad de vehículos tanto de personas, el problema es mayor en épocas de fuertes avenidas ya que las intensas lluvias ocasionan movimiento de masas y desprendimiento de bloques de rocas, estas condiciones en años pasados y hasta la actualidad vienen generando pérdidas económicas y sociales, si no se logra controlar hasta podría ocasionar pérdidas humanas. es necesario identificar zonas con potencial de deslizamiento de rocas; ya sea del tipo falla planar, en cuña o por vuelco, hace necesario este tipo de investigaciones para delimitar específicamente un sector crítico, además poder usar los Softwares especializados, combinados en un trabajo de campo.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Este trabajo de investigación la idea es responder a las siguientes interrogantes.

1.2.1. Pregunta general

¿Cuáles son los factores que influyen en la estabilidad de taludes en roca entre los kilómetros 229 al kilómetro 231 en la carretera Sandia – Quiquira?

1.1.2. Preguntas específicas

- ¿Cuáles son las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos del tramo en estudio?



- ¿Qué importancia tienen los factores geotécnicos en la estabilidad de taludes en roca?
- ¿Cuáles son los factores de seguridad, de los taludes en roca comprendidos entre los Kilómetros 229 al 321 en la carretera Sandia – Quiquira?

1.3. HIPÓTESIS

Mediante la evaluación geomecánica, considerando las propiedades geomecánicas, propiedades físicas, método de análisis cinemático y el método analítico, se determina que los taludes en estudio comprendidos entre los kilómetros 229 al 231 son inestables.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Realizar una evaluación geomecánica de taludes en rocas entre los kilómetros 229 al 231 de la carretera Sandia a Quiquira – Puno.

1.4.2. Objetivos específicos

- Establecer las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos a partir de un mapeo geológico-geomecánico.
- Determinar la densidad y resistencia de las rocas que componen los taludes en estudio.
- Evaluar el análisis cinemático de las tres estaciones geomecánicas.
- Calcular el factor de seguridad en condiciones estático y pseudoestático para cada una de las estaciones geomecánicas.



1.5. JUSTIFICACIÓN

Una inestabilidad de talud en una carretera es normalmente un fenómeno que puede traer altos costos ya sea económicos y sociales, la misma debe ser considerada de vital importancia en las vías de acceso, sobre todo en rutas bastante transitadas.

El área de estudio es una zona que necesita una atención especial, debido al constante desprendimiento de rocas, derrumbes, que son ocasionados por las condiciones climáticas en épocas de lluvia, esto puede desencadenar graves accidentes, razón por el cual se decide realizar una evaluación geomecánica de las zonas más vulnerables.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE ESTABILIDAD DE TALUDES

Eberhardt, (2003). En la mayor parte de los casos, el estudio de la estabilidad de taludes no puede realizarse a nivel general, sino talud por talud, ya que las inestabilidades suelen ir asociadas a la presencia de discontinuidades concretas con orientaciones determinadas. Cuando el coeficiente de seguridad de un talud bien calculado sea inferior a 1, es probable que se produzca su falla o deslizamiento.

Manrique, V. L. & Tigrero, P. (2019). Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo rocoso en Anconcito, Provincia de Santa Elena. Tesis presentada en la Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador. Para optar el título de Ingenieros Civiles, el levantamiento de datos se realizó mediante el modelo geológico, siendo la muestra el macizo rocoso del sector 9 de octubre de la parroquia Anconcito del Cantón Salinas el investigador concluye que la calidad de la roca de acuerdo a la clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR) es de calidad media, pertenece a la clase III, tiene una cohesión de 2 – 3 Kpa/cm³ y un ángulo de rozamiento interno está entre 25°- 35°, el resultado de la clasificación geomecánica Slope Mass Rating (SMR) es 51, por lo tanto, globalmente las familias de las discontinuidades son parcialmente inestables a causa de la falla tipo cuña, el cual fue determinado mediante el análisis de las proyección estereográfica, se plantea estabilizar el talud con la construcción de muros de gaviones para reducir la erosión al pie del talud y agregar una protección costera (escolleras) que permitan la disminución de la energía de las olas al romperse contra el macizo rocoso. El presente trabajo de investigación está enfocado en el análisis de la estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo rocoso en



Anconcito llegando a la conclusión de acuerdo a la clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR), que la calidad de la roca es media y de acuerdo la clasificación geomecánica específica para taludes Slope Mass Rating es parcialmente inestable para fallas tipo cuña, este tipo de falla fue determinado mediante el análisis cinemático, se plantea para estabilizar el talud con la construcción de muros de gaviones y agregar una protección costera (escolleras) que permita la disminución de la energía de las olas al romperse contra el macizo rocoso.

Novoa, E. (2019). Evaluación geotécnica para determinar la inestabilidad de los taludes en roca en la carretera del tramo Chilete – Puente Mayuma. Tesis presentada en la Universidad Nacional de Cajamarca, Perú. Para optar el título de Ingeniero Geólogo, el nivel de investigación es descriptivo, el estudio se realizó mediante cartografiados geomecánicos en diez estaciones, por las caídas de rocas vinculadas al tipo del macizo rocoso, geoestructuras, infiltración y sismicidad, el tesista concluye que Las propiedades geomecánicas están definidas por las características de resistencia de la roca intacta, diaclasamiento y tipo de litología. Categorizándolos en cinco estaciones de medianamente resistentes (R3) y cinco estaciones resistentes (R4); con RQD dos de buena calidad (E-2 = 77 y E-4 = 80), seis de calidad regular (E-1 = 67, E-3 = 70, E-5 = 65, E-6 = 68 E-7 = 64 y E-8 = 57) y dos de calidad pobre (E-9 = 29 y E-10 = 42). Presentando correlaciones con: RMR (E-1 = 46, E-2 = 63, E-3 = 45, E-4 = 62, E-5 = 45, E-6 = 54, E-7 = 45, E-8 = 51, E-9 = 36 y E-10 = 37) y GSI (E-1 = 41, E-2 = 60, E-3 = 40, E-4 = 57, E-5 = 40, E-6 = 49, E-7 = 40, E-8 = 45, E-9 = 30 y E-10 = 30).

La probabilidad de ruptura está delimitada por las características geoestructurales del tramo analizado. Obteniendo cinco inestabilidades por ruptura planar (E-2, E-3, E-7, E-8 y E-10, con fluctuaciones de probabilidad de: 26.67% a 39.53%), una por ruptura en



cuña (E-1, con probabilidad de 30.56%) y dos por ambos tipos de ruptura cuña y planar (E- 5 y E-9 con probabilidades de: 40.00% a 61.36%).

Los Factores de Seguridad muestran resultados con el Dips, logrando obtener valores por debajo del valor sugerido de 1.50 (Factor de seguridad), aplicando el RocPlane y Swedge fluctuando desde 0.58 a 1.20.

Yupanqui, M. (2015). Diseño preliminar para taludes en roca en el tramo III - Sina Yanahuaya. Tesis presentada en la Universidad Nacional del Altiplano, Perú. Para optar el título de Ingeniero Minas, el nivel de investigación es no experimental, de tipo descriptivo orientándose a diseño de taludes, el estudio se realizó en el talud de roca del kilómetro 24+370 del cual se obtiene muestras de roca alteradas e inalteradas de la sub rasante como también del talud, en el análisis se determina que el macizo rocoso es bueno con RMR promedio de 61 de clase II con un GSI DE 56, mediante el análisis cinemático se determinó la probabilidad de una falla de tipo de cuña, asimismo en el ensayo de corte directo en discontinuidades se determinó $C = 0.44$ MPa y un $\varphi = 33.47^\circ$, el autor concluye que el diseño preliminar para taludes de roca con el análisis en cuña da un factor de seguridad de 2.1 para el talud de 75° .

Callo, H. (2019). Análisis de estabilidad de taludes en macizo rocoso de la carretera Sina Yanahuaya tramo III a partir de la caracterización geológica. Tesis presentada en la Universidad Nacional del Altiplano, Perú. Para optar el título de Ingeniero de Minas, el nivel de investigación es descriptivo, el análisis de estabilidad de taludes se realizó en tres tramos, la recolección de datos se realizó para cada estación geomecánica: Catarata km 1+400 al 1+700, Mirador km 2+500 al 2+760, y Huancoiri km 6+400 al 6+700, el investigador concluye que la calidad del macizo rocoso a través de la clasificación geomecánica RMR y GSI en cada tramo de análisis es: Catarata km 1+400



al 1+580 RMR=64, Clase II, GSI=59, km 1+580 al 1+700 RMR=54, Clase III, GSI=49; Mirador km 2+500 al 2+620 RMR=69, Clase II, GSI=59; km 2+620 al 2+760 RMR=72, Clase II, GSI=67; y Huancoiri km 6+400 al 6+700 RMR=43, Clase III, GSI=38. El análisis de estabilidad de taludes mediante el equilibrio límite, por métodos exactos se determinó el tipo de rotura y factor de seguridad para cada uno de los tramos analizados: km 1+400 al 1+580 rotura planar, FS=1.79, condición estable; km 1+580 al 1+700 rotura por cuña/vuelco, FS=1.02, condición inestable; km 2+500 al 2+620 rotura por cuña, FS=1.87, condición estable; km 2+620 al 2+760 rotura por cuña, FS=3.89, condición estable.

2.2. METODOLOGÍA Y SISTEMÁTICA

El desarrollo de los trabajos de campo en afloramientos permite obtener información necesaria para evaluar el comportamiento geotécnico de los macizos rocosos, planificar las fases de investigación más avanzadas e interpretar los resultados que se obtengan de las mismas. Debido a la gran variedad de condiciones y propiedades, la caracterización de los macizos puede ser una tarea compleja, sobre todo si se presentan conjuntamente materiales rocosos y suelos, zonas fracturadas, tectonizadas y/o meteorizadas (González de Vallejo, 2002).

Como la mayoría de los estudios geotécnicos, los de estabilidad de taludes se suelen efectuar en varias fases, que se corresponden con las de los proyectos de ingeniería de que forman parte. La metodología que se debe seguir es la misma en todas las fases y se presenta a continuación, pero la profundidad del estudio varía en proporción directa con lo avanzada que sea la fase; normalmente, la utilización de modelos numéricos para analizar la estabilidad de taludes se suele reservar para la fase de proyecto y no en todas

las zonas, pero la campaña de investigación geológico-geotécnica suele acometerse ya en la fase de viabilidad (Ramírez, O. P. & Alejano M. L. 2004).

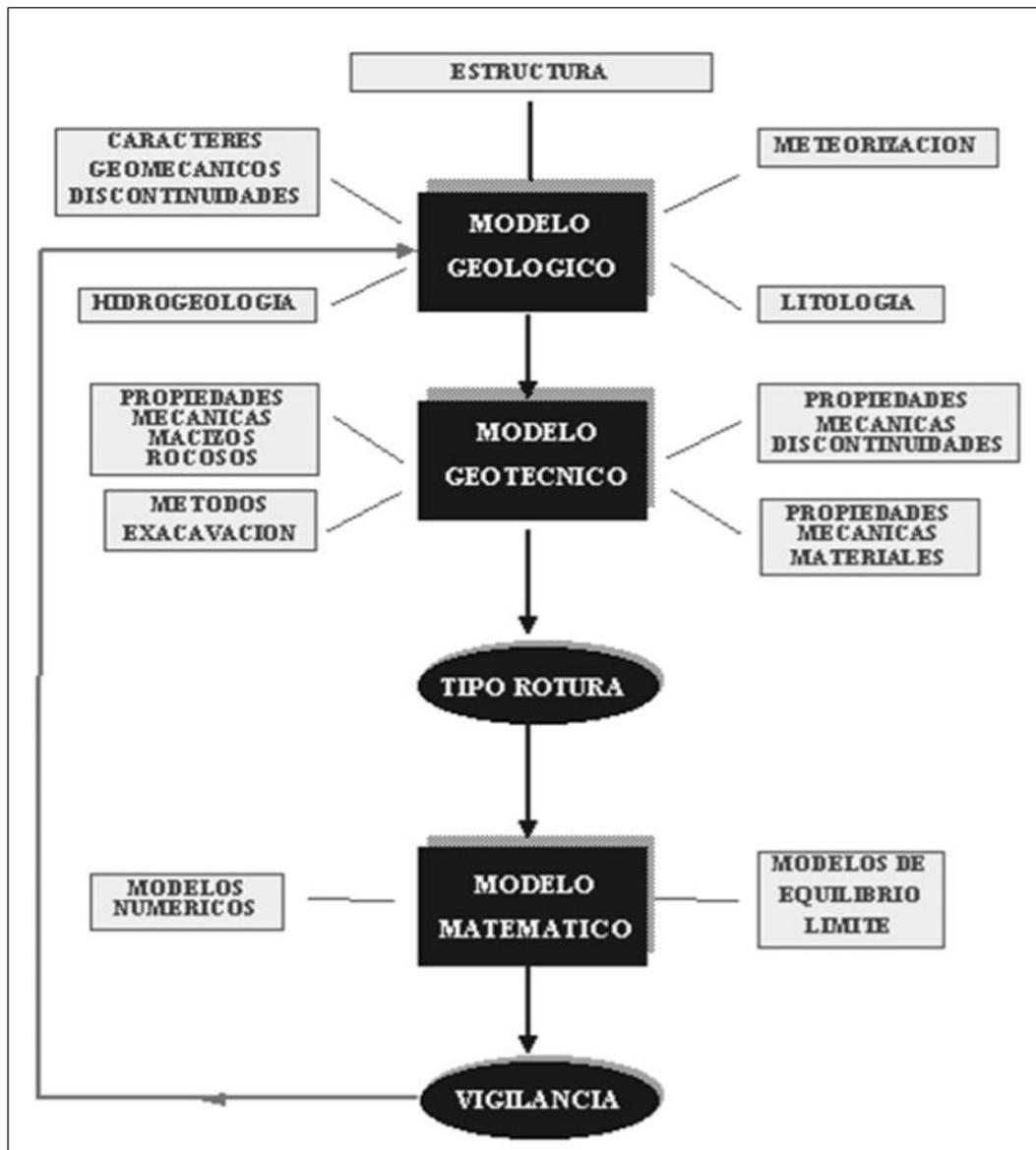


Figura 1: Etapas para realizar un estudio de estabilidad de talud.

Fuente: Ramírez, O. P. & Alejano M. L. 2004.

Para identificar un posible fallamiento es necesario realizar una serie de análisis, mapeos, ensayos de laboratorio, se recomienda realizar un estudio detallado.

Los métodos de investigación que se utilizaron son el descriptivo y cuantitativo, los cuales son realizados en cuatro etapas:



- Etapa de gabinete: Elaboración del plan de trabajo; recolección de la información relacionada al tema de investigación, estructuración del trabajo de gabinete y campo, diseño, análisis y procesamiento de información.
- Etapa de campo: Recolección de datos geomecánicos en puntos críticos con deslizamientos de roca, los que son analizados, permitiéndonos definir la cinemática de los taludes y resistencia a compresión simple (martillo de geólogo).
- Etapa de laboratorio: envié de las muestras de roca obtenidas en la etapa de campo al Laboratorio de Investigación & Ensayo de Materiales de la empresa G&C Consultores y Contratistas Generales S.A.C. – Puno, para realizar el ensayo de compresión simple, carga puntual y propiedades mecánicas.
- Etapa final: la información de campo es procesada e interpretada en gabinete, haciendo uso de métodos empíricos, cinemáticos y analíticos.

2.3. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

La caracterización geológica debe permitir no solo definir la geometría de superficie, en lo que dice relación con los contactos entre los diversos entre geológicos, sino también permitir una definición de los distintos tipos de unidades geotécnicas básicas que aparecen en el área de investigación (González de Vallejo, 2006).

Se recomienda hacer una descripción geológica local ya que muchos estudios de ingeniería de rocas no consideran esta importante fase, y saltan de la fase de la descripción geológica regional hacia la fase de investigación de ingeniería, situación que hace perder valiosa información al nivel de escala necesaria, que será de gran utilidad para entender el estado de conservación del macizo rocoso y en especial la configuración de las discontinuidades (Herrera, 2007).



2.3.1 Litología

La existencia de las diferentes formas de relieve, así como de los diferentes tipos y espesores de los estratos, tanto en las capas sedimentarias cuanto en los horizontes residuales, dependen fundamentalmente de la litología de los materiales constituyentes o que les dieron origen, es decir, de su composición, fabrica, textura, granulometría, tipo de cemento, partículas minerales, arcillo-minerales, etc. Tanto para suelos como para rocas.

La litología es un condicionante de las laderas en dos niveles: un primero, a marco-escala regional, en que en las laderas inclinadas o escarpas abruptas sobreviven gracias a la presencia de rocas más resistentes que son recortadas por los procesos erosivos en los tipos litológicos más débiles, erosión diferencial (Carnero, E. 2011).

2.4. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

Mediante la investigación estructural detallada de las áreas críticas del talud se podrá conocer la situación y orientación de las discontinuidades, que formando ciertos sistemas bajo unas mismas condiciones dentro del macizo rocoso. Hay la necesidad de llevar acabo:

- Un bosquejo geológico que proporcione datos y permita conocer las ocurrencias geológicas de la zona, y
- Un análisis detallado de las discontinuidades que es fundamental en la obtención de conclusiones.

La resistencia de un macizo rocoso puede depender fuertemente de la estructura primaria del macizo. Esta puede conferirle propiedades de isotropía, en el caso de ser una masa homogénea, o de anisotropía (positivas o negativas), y ambas deben tenerse en



cuenta, tanto en la faz de construcción como en la de diseño y cálculo de las estructuras (Carnero E. 2011).

2.4.1 Mapeo superficial de estructuras

Los métodos de mapeo estructural que examinarán sistemáticamente todas las características geológicas importantes son el mapeo “lineal” y “cuadrícula”. El mapeo lineal consiste en estirar una cinta métrica a lo largo de la cara del talud y mapear toda que intersectan con la línea; las longitudes de línea son generalmente entre 50 y 100 m. si se estudian los extremos de la línea, entonces la ubicación de todas las discontinuidades se puede determinar. El mapeo de ventana comprende realizar un mapeo de toda la discontinuidad dentro de un segmento representativo o “cuadros” de 10 m. aproximadamente un tamaño fijo espaciados a intercalar a lo largo de la cara del talud. Las áreas que intervienen se examinan por similitud de estructura (Wyllie, D. C. & Mah, 2004).

En la descripción de las diferentes familias de discontinuidades en un macizo roco-so se incluyen la siguientes características y parámetros geométricos: orientación, espaciado, continuidad o persistencia, rugosidad, abertura, relleno, filtraciones y resistencia de paredes. Algunos de ellos, como la rugosidad, abertura, relleno y resistencia de las paredes, determinan el comportamiento mecánico y la resistencia de los planos de discontinuidad (González de Vallejo, 2002).

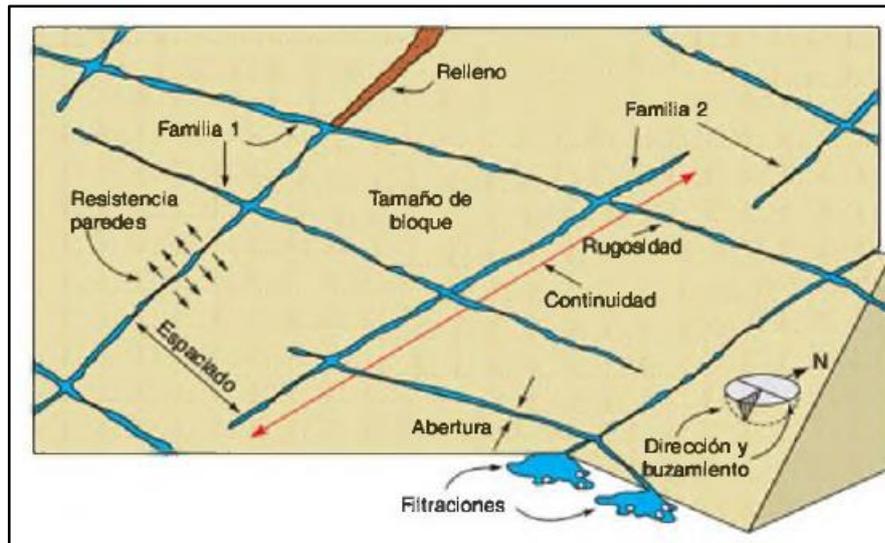


Figura 2: Representación esquemática de las propiedades geométricas de las discontinuidades.
Fuente: González de Vallejo, 2002. Adaptado de Hudson, 1989.

2.4.2 Orientación

La orientación de unas discontinuidades con respecto a otras determina la forma de los bloques de la roca existentes en el macizo rocoso y de su orientación con relación a los taludes depende el tipo de bloque que puede desprenderse en estos (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

La dirección de números de familias o sistemas de estructuras está relacionada directamente con la orientación de cada familia; lo cual se hace analizando la información estructural mediante proyecciones estereográficas, para representar cada estructura (plano) por un punto (polo) y luego, mediante técnicas, estadísticas analizadas las agrupaciones de polos y definir así las familias o sistemas principales y la familias o sistemas secundarios. En el campo de investigación se utilizan programas de computacionales para esta evaluación e interpretación de la información estructural (Arzúa, J. & Alejano, 2016).

Orientación de las discontinuidades el primer paso en la investigación de las discontinuidades en una pendiente es analizar su orientación e identificar conjuntos de

discontinuidades, o discontinuidades individuales que podrían formar bloques de roca potencialmente inestables. Se puede obtener información sobre la orientación de discontinuidad de fuentes tales como mapeo de superficie y subterráneo, núcleo de perforación diamantina y geofísica, y es necesario combine estos datos utilizando un procedimiento que sea fácilmente susceptible de análisis. Este análisis se facilita mediante el uso de un método simple y sin ambigüedades para expresar la orientación de una discontinuidad. La terminología recomendada para la orientación es la dirección de inmersión que se define de la siguiente manera y se muestra esquemáticamente en la Figura 3 (a) y (b).

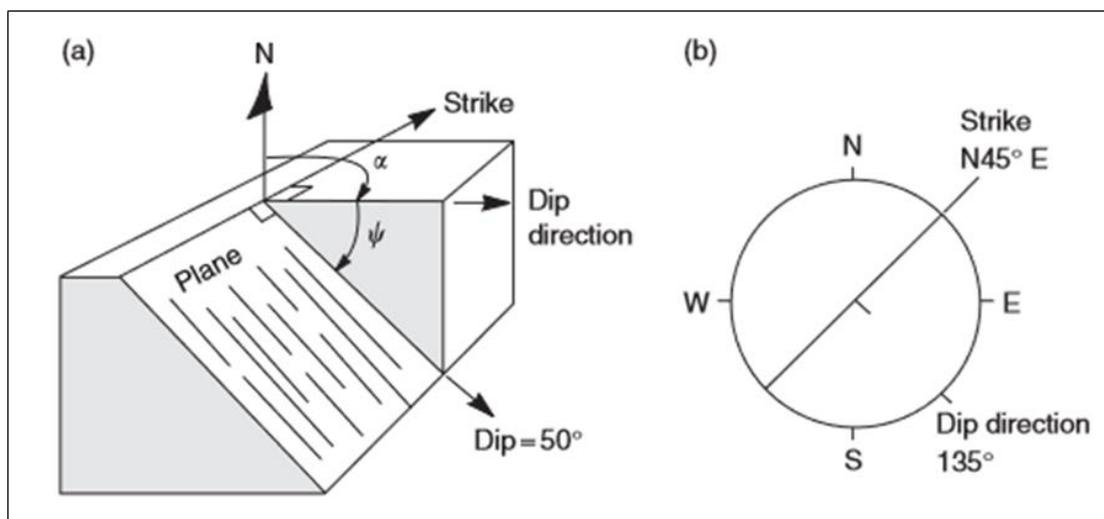


Figura 3: (a) y (b). Terminología que define la orientación de discontinuidad: (a) vista isométrica del plano (inmersión y dirección de inmersión); (b) vista en planta del plano.

Fuente: Wyllie, D. C., Mah, 2004.

2.4.3 Espaciado

El espaciado de las discontinuidades es el factor que más influye en el tamaño de los bloques que componen el macizo rocoso. Este aspecto cobra la máxima importancia cuando existen otros factores que contribuyen a aumentar la deformabilidad del macizo rocoso, como, por ejemplo, una pequeña resistencia al corte de las discontinuidades; tiene

también gran influencia en la permeabilidad del macizo rocoso y, por tanto, en la circulación del agua en el mismo. El espaciado se mide colocando una cinta métrica perpendicular a las discontinuidades en el afloramiento (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

Es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes, Figura 4. Este determina el tamaño de los bloques de roca intacta. Cuanto menos espaciado tengan, los bloques serán más pequeños y cuanto más espaciado tengan, los bloques serán más grande (Bieniawski, 1989).

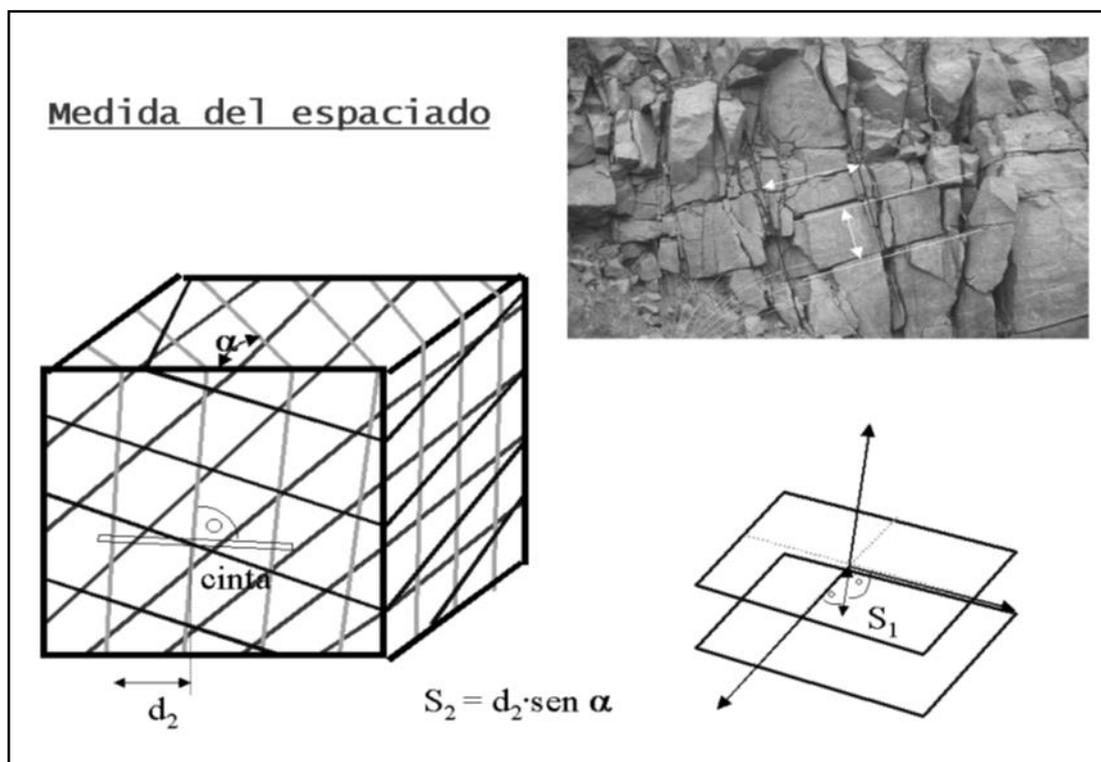


Figura 4: Medida del espaciado de discontinuidades.
Fuente: Ramírez, O. P. & Alejano, 2004.

De cada familia de discontinuidades se anota el espaciado máximo, el mínimo y el modal, aunque también se puede presentar un histograma con los espacios de todas las discontinuidades medidas. Para describir el espaciado se usa la terminología de la Tabla 1 recomendada por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (SIMR) (Brown, 1981).

Tabla 1

Terminología de espaciados

Descripción	Espaciado en mm
Extremadamente cerrado	< 20
Muy cerrado	20 – 60
Cerrado	60 – 200
Moderado	200 – 600
Abierto	600 – 2000
Muy abierto	2000 - 6000
Extremadamente abierto	> 6000

Fuente: Ramírez, O. P. & Alejano, 2004.

2.4.4 Continuidad o Persistencia

La continuidad o persistencia de un plano de discontinuidad es su extensión superficial, medida por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento. Es un parámetro de gran importancia, pero de difícil cuantificación a partir de la observación de afloramientos, en los que normalmente se ven las trazas de los planos de discontinuidad según un buzamiento aparente. Las dimensiones de las discontinuidades se pueden cuantificar observando su longitud en los afloramientos en la dirección de rumbo y en la del buzamiento ver Figura 5, es interesante realizar además un pequeño esquema que refleje gráficamente el tamaño relativo de las familias de discontinuidades (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

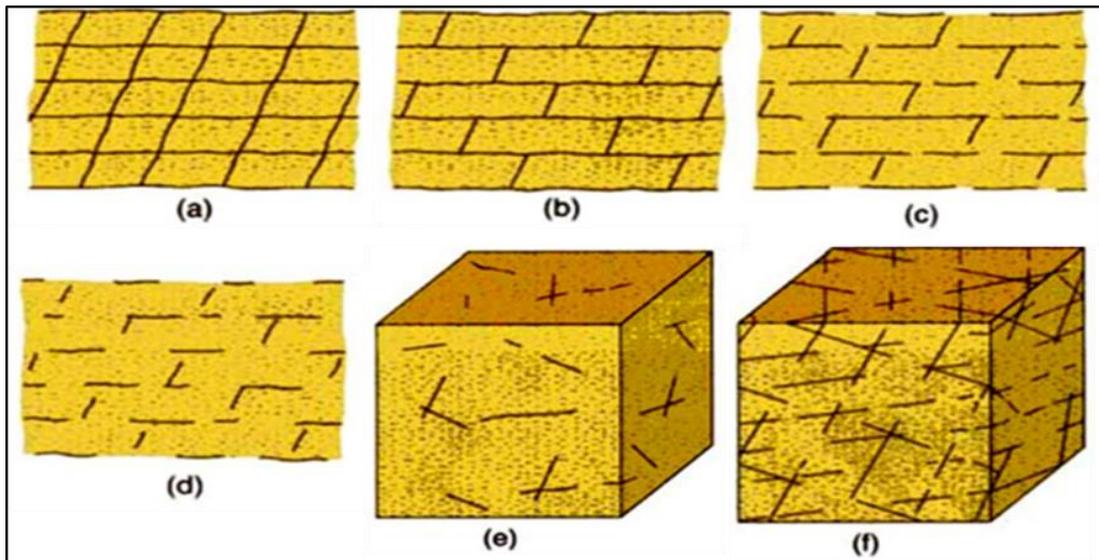


Figura 5: Distintos modelos de continuidad de familias de discontinuidades.

Fuente: (ISMR, 1981).

Las discontinuidades se pueden clasificar por el tamaño mediante la terminología del Tabla 2. recomendada por la SIMR (Brown, 1981).

Tabla 2

Descripción de continuidad o persistencia

Término	Continuidad en m
Muy pequeña	< 1
Pequeña	1 -3
Media	3 - 10
Grande	10 - 20
Muy grande	> 20

Fuente: Ramírez, O. P. & Alejano, 2004.

2.4.5 Rugosidad

Forma de las superficies que conforman la discontinuidad, una clasificación cualitativa de la rugosidad se basa en la observación de la superficie en dos escalas descriptivas. La escala intermedia (varios metros) que se divide en tres grados: escalonada, ondulada y plana y una escala pequeña (varios centímetros) que divide cada grado de la escala intermedia en: rugosa, lisa y pulida, ver Figura 6. Las escalas cuantitativas están basadas en las medidas de los cambios de inclinación tomadas con

discos de diferente diámetro colocados sobre la superficie de la discontinuidad (Hoek, 1985).

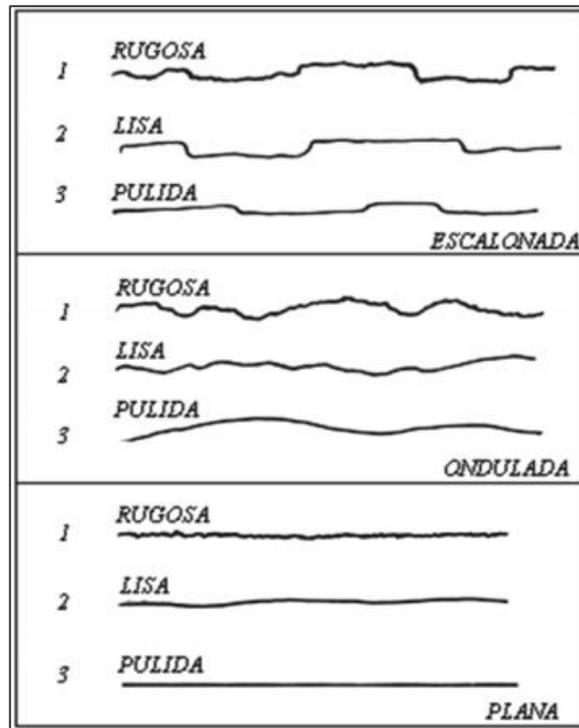


Figura 6: Perfiles de Rugosidad, la longitud está entre 1m y 10m.
Fuente: Hoek, 1981.

Barton y Choubey (1974), desarrollaron un modelo empírico para poder estimar la envolvente de la resistencia al corte para discontinuidades con cualquier tipo de rugosidad. Este criterio es una forma sencilla para poder estimar la resistencia al corte de una discontinuidad mediante ensayos relativamente simples. Se basa en la siguiente expresión:

$$\tau = \sigma_n \left(\tan (\phi_b + JRC) \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde JRC es el coeficiente de rugosidad de la discontinuidad y JCS es la resistencia a compresión simple de los labios en la discontinuidad. El valor de JRC depende del grado de rugosidad de la discontinuidad y varía desde cero para superficies

lisas, creciendo conforme el perfil de rugosidad aumenta hasta 20. La Figura 7 presenta una calificación de varios tipos de rugosidad.

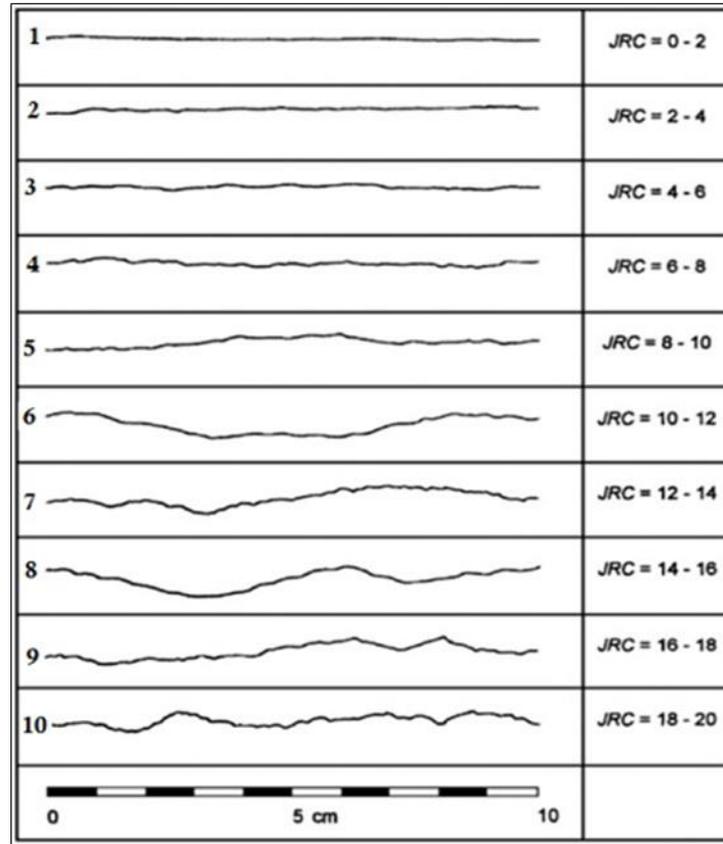


Figura 7: Perfiles de rugosidad y el valor atribuido al coeficiente de rugosidad JRC.
Fuente: Hoek, 2007.

El JRC (Joint Roughness Coefficient), se puede estimar mediante el peine de Barton y el gráfico adjunto en la Figura 8.

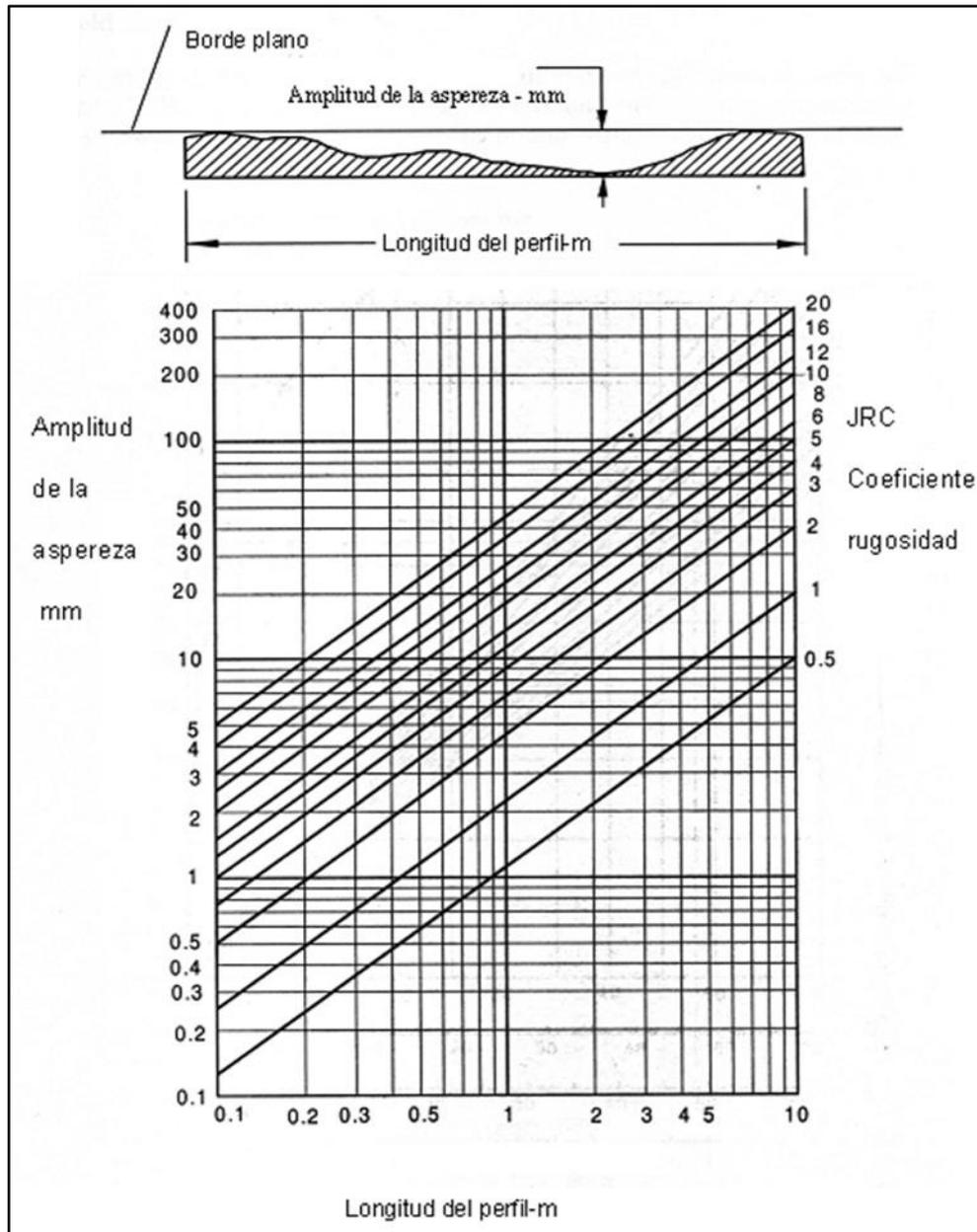


Figura 8: Esquema para estimar JRC a partir del peine de Barton.
Fuente: Barton, 1982.

2.4.6 Abertura

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.

Se define apertura como la distancia perpendicular que separa las paredes adyacentes de roca de una discontinuidad, cuando espacio intermedio tiene agua o aire. En esto se distingue la apertura del espesor del relleno (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

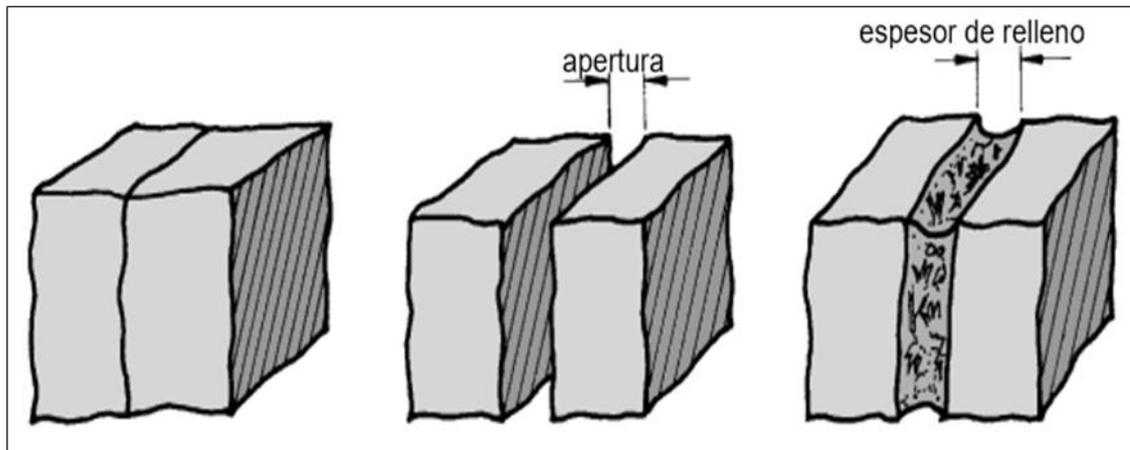


Figura 9: Apertura de discontinuidad.
Fuente: Ramírez, O. P. & Alejano, 2004.

La resistencia al corte de las discontinuidades con unas aperturas muy pequeñas apenas depende de la separación entre los labios y disminuye notablemente cuando hay agua en ellas, ya que la presión de esta puede reducir las tensiones efectivas normales en la discontinuidad. Para describir la apertura de las discontinuidades se puede emplear la terminología recomendada por la SIMR (Brown, 1981).

Tabla 3

Descripción de la apertura

Apertura	Descripción	Aspecto
< 0.1 mm	Muy cerrada	Aspecto cerrado
0.1 - 0.25 mm	Cerrada	
0.25 - 0.5 mm	Parcialmente abierta	
0.5 - 2.5 mm	Abierta	Aspecto de hendidura
2.5 - 10 mm	Moderadamente ancha	
>10 mm	Ancha	
1 - 10 cm	Muy ancha	Aspecto abierto
10 - 100 cm	Extremadamente ancha	
> 1 m	Cavernosa	

Fuente: Terminología de apertura recomendada por la SMIR Brown, 1981.

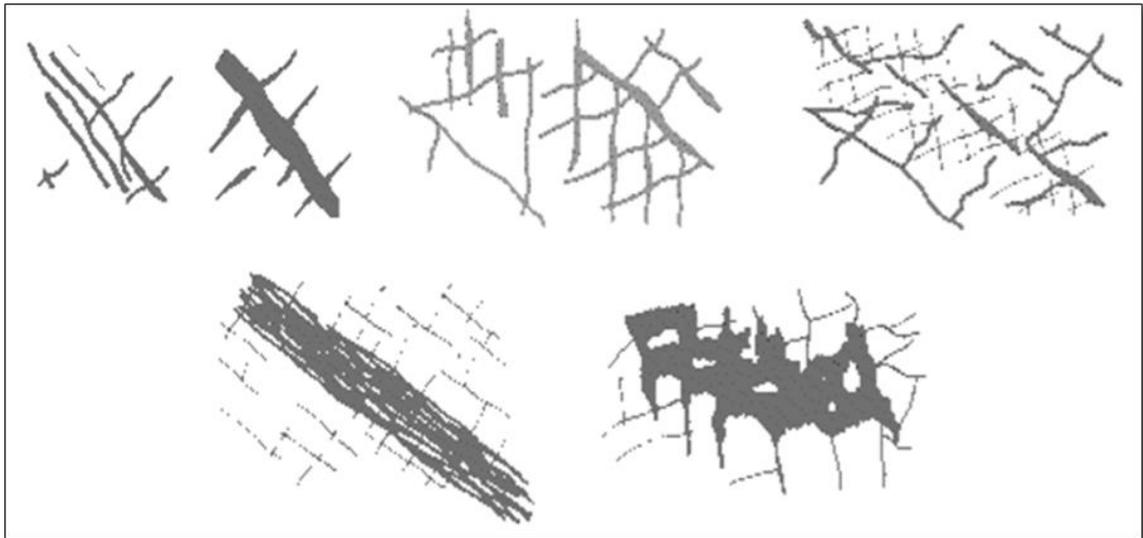


2.4.7 Relleno

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.

Las discontinuidades pueden aparecer rellenas de un material de naturaleza distinta a la roca de las paredes. Existe gran variedad de materiales de relleno con propiedades físicas y mecánicas muy variables. La presencia de relleno gobierna el comportamiento de la discontinuidad, por lo que deben ser reconocidos y descritos todos los aspectos referentes a sus propiedades y estado. Debe tenerse en cuenta que, si se trata de materiales blandos o alterados, éstos pueden sufrir variaciones importantes en sus propiedades resistentes a corto plazo si cambia su contenido en humedad o si tiene lugar algún movimiento a lo largo de las juntas (González de Vallejo, 2002).

Se deben hacer esquemas y fotografías de los rellenos, en la Figura 10 se muestran ejemplos de esquemas de discontinuidades rellenas (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).



*Figura 10: Ejemplos de esquemas de discontinuidades rellenas.
Fuente: Ramírez, O. P. & Alejano, 2004.*

2.4.8 Filtraciones o agua en las discontinuidades

Generalmente la circulación de agua en los macizos rocosos se realiza a lo largo de las discontinuidades (permeabilidad secundaria), excepto en las rocas sedimentarias con un alto índice de poros, en las cuales el agua circula por la propia roca (permeabilidad primaria). Esta permeabilidad necesita que los estratos permeables conecten unos con otros, frecuentemente a través de discontinuidades. La permeabilidad secundaria es más propia de los macizos de rocas ígneas y metamórficas (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

En las Tablas 4 y 5 se presentan unas escalas descriptivas, propuestas por la SIMR (Brown, 1981), que permiten evaluar el grado de filtración en una discontinuidad.

Tabla 4

Grado de filtración de una discontinuidad sin relleno

Discontinuidades sin relleno	
Grado de filtración	Descripción
I	La discontinuidad está muy cerrada y seca. El flujo de agua por la misma no parece posible.
II	La discontinuidad esta seca y no hay evidencia de flujo de agua.
III	La discontinuidad está seca, pero muestra evidencias de flujo de agua, por ejemplo manchas de roña, etc.
IV	La discontinuidad está húmeda, pero no se observa circulación de agua.
V	La discontinuidad muestra filtraciones de agua, gotas de agua ocasionales, pero no flujo continuo.
VI	La discontinuidad muestra un flujo continuo de agua. (Hay que estimar caudal en litros/minuto y describir la presión, por ejemplo: baja, media o alta).

Fuente: *Grado de filtración sin relleno. Ramírez, O. P. & Alejano, 2004.*

Tabla 5

Grado de filtración de una discontinuidad con relleno

Discontinuidades con relleno	
Grado de filtración	Descripción
I	Los materiales de relleno están fuertemente consolidados y secos, parece muy improbable la aparición de un flujo debido a que la permeabilidad es muy baja.
II	Los materiales de relleno están húmedos, pero no circula agua.
III	Los materiales de relleno están húmedos, con gotas ocasionales de agua.
IV	Los materiales de relleno muestran signos de lavado, con flujo continuo de agua. (se debe estimar el caudal en litros/minuto).
V	Los materiales de relleno están lavados localmente, y hay un considerable flujo de agua a lo largo de canales de erosión. (se debe estimar el caudal en litros/minuto y la presión: baja, media o alta).
VI	

Los materiales de relleno están completamente erosionados por el agua, que circula a presiones muy elevadas, especialmente en los afloramientos. (se debe estimar el caudal en litros/minuto y describir la presión).

Fuente: Grado de filtración con relleno. Ramírez, O. P. & Alejano, 2004.

2.4.9 Resistencia de paredes

La resistencia a compresión de las rocas se puede estimar a partir de la dureza superficial de las mismas. La cual se puede obtener mediante el martillo de Schmidt, este consiste en un dispositivo que registra el rebote de un cilindro metálico que, impulsado por el muelle, choca contra un vástago también metálico apoyado en la roca. El martillo tipo L permite medir valores de la resistencia a compresión simple de la roca comprendidos entre 20 MPa. y 300 MPa. (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

Las resistencias de las rocas se pueden estimar también en el campo utilizando una navaja y un matillo de geólogo, aunque con menos precisión que con el martillo de Schmidt. En la Tabla 6 se describe la forma de hacerlo según la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (Brown, 1981).

Tabla 6

Estimación de la resistencia de las rocas mediante martillo de geólogo y navaja (Brown, 1981).

Grado	Descripción	Identificación de campo	Valor aproximado de la resistencia a la compresión simple en Mpa.
R0	Extremadamente débil	Se puede penetrar con el dedo pulgar	0.25 - 1.0
R1	Muy débil	Deleznable bajo golpes fuertes con la parte puntiaguda del martillo geológico; puede cortarse con una navaja.	1.0 - 5.0
R2	Débil	Puede cortarse con dificultad con una navaja; se pueden hacer marcas poco profundas golpeado fuertemente la roca con la punta del martillo.	5.0 – 25



R3	Media	No se puede cortar con la navaja; las muestras se pueden romper con un golpe firme con el martillo.	25 - 50
R4	Resistente	Se necesita más de un golpe con el martillo geológico para romper la muestra.	50 – 100
R5	Muy resistente	Se necesita más de un golpe con el martillo geológico para romper la muestra.	100 – 250
R6	Extremadamente resistente	Solo se puede desprender esquirlas de la muestra con el martillo geológico.	> 250

Fuente: Estimación de resistencia de rocas. Brown, 1981 en Ramírez, O. P. & Alejano, 2004.

NOTA: Para la caracterización global del macizo rocoso a partir de datos de afloramientos, además de la descripción de sus componentes, la matriz rocosa y las discontinuidades, deben ser considerados otros factores representativos del conjunto (González de Vallejo, 2002), como son:

- Número y orientación de las familias de discontinuidades.
- Tamaño de bloque e intensidad de fracturación.
- Grado de meteorización.

2.4.10 Número y orientación de las familias de discontinuidades

El comportamiento mecánico del macizo rocoso, su modelo de deformación y sus mecanismos de rotura están condicionados por el número de familias de discontinuidades. La orientación de las diferentes familias con respecto a una obra o instalación sobre el terreno puede determinar, además, la estabilidad de la misma.

La orientación media de una familia se evalúa mediante la proyección estereográfica o la construcción de diagramas de rosetas con los datos de las orientaciones

medidas para cada discontinuidad. Actualmente existen programas informáticos para realizar estos trabajos de una forma rápida y exacta.

El macizo puede clasificarse por el número de familias según el Cuadro 7, variando entre macizos rocosos masivos o con una única familia de discontinuidades, por ejemplo, un macizo rocoso granítico, y macizos con cuatro o más familias de discontinuidades, como puede ser un afloramiento de pizarras plegado e intensamente fracturado. La presencia de tres familias principales de discontinuidades ortogonales entre sí es frecuente en los macizos rocosos sedimentarios, siendo una de las familias la estratificación (González de Vallejo, 2002).

Tabla 7

Clasificación de macizos rocosos por el número de familias de discontinuidades

Tipo de macizo rocoso	Número de familias
I	Masivo, discontinuidades ocasionales
II	Una familia de discontinuidad
III	Una familia de discontinuidades más otras ocasionales
IV	Dos familias de discontinuidades
V	Dos familias de discontinuidades más otras ocasionales
VI	Tres familias de discontinuidades
VII	Tres familias de discontinuidades más otras ocasionales
VIII	Cuatro o más familias de discontinuidades
IX	Brechificado

Fuente: SRM, 1981 en González de Vallejo, 2002.

2.4.11 Tamaño de bloque e intensidad de fracturación

El tamaño de bloques es un indicador muy importante de la calidad de un macizo rocoso. Viene determinado por el número de familias, el espaciado de las discontinuidades y su tamaño.

El tamaño de los bloques juntamente con la resistencia al corte de las discontinuidades y de la roca determina el comportamiento mecánico del macizo rocoso. Los macizos rocosos compuesto por grandes bloques tienden a ser como deformables, mientras que si el tamaño de estos es suficientemente pequeño pueden llegar a fluir, en casos excepcionales (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

El tamaño de los bloques que forman el macizo rocoso condiciona de forma definitiva su comportamiento y sus propiedades resistentes y deformacionales. La dimensión y la forma de los bloques están definidas por el número de discontinuidades, su orientación, su espaciado y su continuidad (González de Vallejo, 2002), La descripción del tamaño de bloque se puede realizar de las familias de siguientes formas:

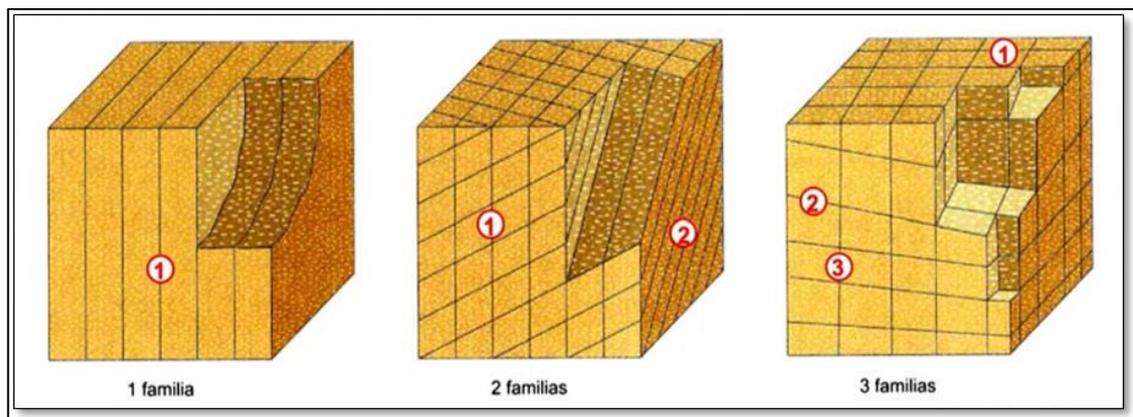


Figura 11: Representación del número de familias mediante bloques diagramas.
Fuente: González de Vallejo, 2002.

2.4.12 Grado de meteorización

Se denomina meteorización de las rocas a las modificaciones experimentadas en su composición o estructura por la acción de los agentes atmosféricos. La importancia que tiene la meteorización desde un punto de vista de la mecánica de rocas se debe a que produce profundos cambios en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales rocosos. Existen dos clases de meteorización: física y química. El hecho que una u otra

predomine depende del clima, ya que ambas se producen simultáneamente (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

La evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso se realiza por observación directa del afloramiento y comparación con los índices estándares recogidos, en ocasiones puede ser necesario fragmentar un trozo de roca para observar la meteorización de la matriz rocosa.

Tabla 8

Descripción del grado de meteorización

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

Fuente: Evaluación de grado de meteorización del macizo rocoso. ISRM, 1981 en Gonzáles de Vallejo, 2002.

2.5 HIDROGEOLOGÍA

El agua subterránea influye el comportamiento de las rocas de dos maneras distintas. La primera que tiene lugar en rocas porosas (areniscas) es la gobernada por el



principio de Terzaghi o de la tensión efectiva. La segunda, que se dan en macizos rocosos formados por materiales poco porosos (la mayor parte de las rocas), se manifiesta en el agua sometida a presión en las juntas que separan bloques de roca, reduce la presión efectiva entre ambos labios de la junta, y disminuye por tanto la potencial resistencia al corte que origina la fricción.

Un último efecto más sutil de las aguas en su acción degradante en sus diversas zonas del macizo, lo que hace que para ciertos materiales se produzca un deterioro significativo de sus propiedades mecánicas (menor resistencia y mayor deformabilidad) (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

El flujo de agua subterránea en masas de rocas fracturadas ocurre predominantemente a lo largo de las discontinuidades debido a la baja conductividad hidráulica primaria, de la mayoría de las rocas intactas. Por lo tanto, la conductividad de las masas rocosas estará influenciada por las características de las discontinuidades, con una condición necesaria para el flujo que es que la persistencia de las discontinuidades es mayor que la separación. La figura 12 muestra una masa de roca que contiene dos conjuntos de juntas verticales y un conjunto horizontal en el que la persistencia de las juntas verticales es mucho mayor que el espaciado, pero la persistencia del conjunto horizontal es menor que el espaciado. Para estas condiciones, la conductividad hidráulica sería significativamente mayor en la dirección vertical que en la dirección horizontal (Wyllie, D. C., Mah, 2004).

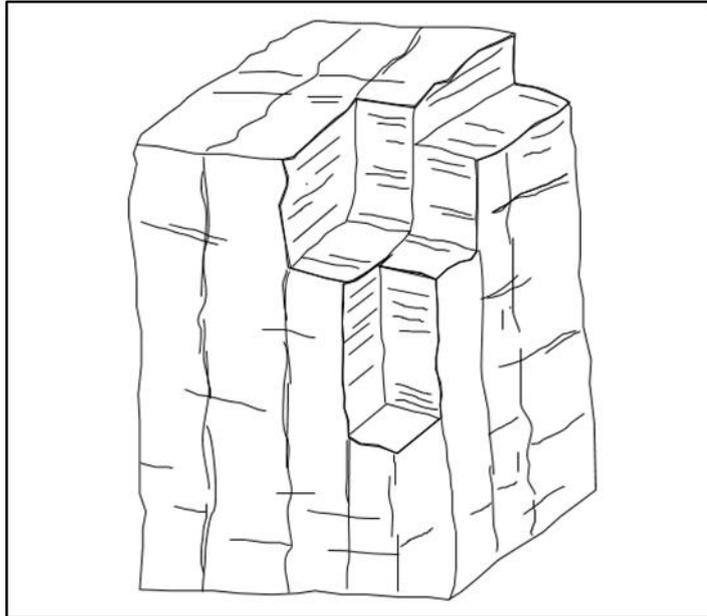


Figura 12: Masa de roca con juntas verticales persistentes y conductividad hidráulica vertical relativamente alta.

Fuente: Wyllie, D. C., Mah, 2004.

2.5.1 Índice de designación de la calidad de la roca (RQD)

Deere en 1967, propuso un sistema de diseño de sostenimientos basado en el RQD. Este parámetro se obtiene a partir del porcentaje de trozos del testigo mayores de 10 cm recuperado en un sondeo, tal y como se muestra en la figura 13 y permite estimar el grado de facturación del macizo rocoso (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

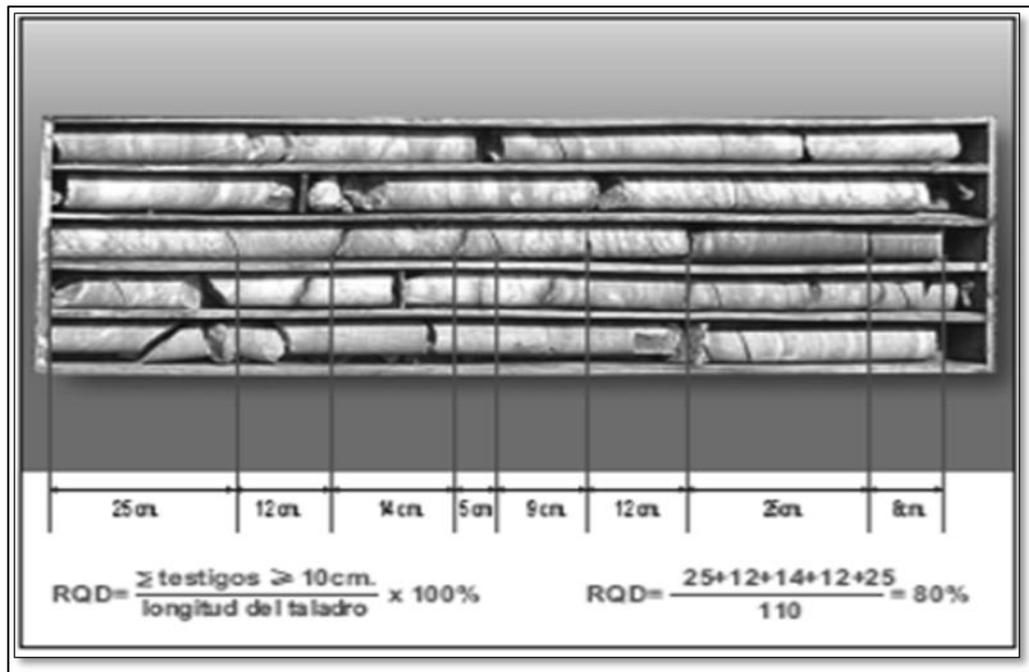


Figura 13: Estimación de RQD a partir de testigos de sondeo.
Fuente: Ramírez, O. P. & Alejano, 2004.

Para el cálculo del RQD en función del número de fisuras por metro lineal, determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural en la zona predeterminada de la operación.

RQD a partir de la densidad de discontinuidades o frecuencia de las discontinuidades (λ) por (Hudson, 1989).

$$RQD = 100e^{-0.1(\lambda)}(0.1\lambda + 1) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde: $\lambda = N^\circ$ de fisuras/espacio.

2.5.2 Clasificación geotécnica del macizo rocoso

Para determinar la calidad del macizo rocoso, se divide este en dominios estructurales, dentro de las cuales la estructura es prácticamente homogénea. La estructura del macizo comprende el conjunto de fallas, diaclasas, pliegues y demás características geológicas propias de una determinada región. El índice que define la

clasificación es el denominado RMR (Rock Mass Rating), que evalúa la calidad del macizo rocoso a partir de los parámetros siguientes:

Resistencia a compresión simple del macizo rocoso, en la Tabla 9, se presenta una estimación de las resistencias medias de ciertas rocas (Bieniawski, 1973).

Tabla 9

Estimación de las resistencias medias de ciertas rocas

Tipo de roca	Resistencia a compresión simple (Mpa)		
	Mínima	Máxima	Media
Esquisto	31	70	43
Pizarra	33	150	70
Lutita	36	172	95
Arenisca	40	179	95
Gneis	159	256	195
Cuarcita	200	304	252
Sílice	587	683	635

Fuente: Adaptado de Bieniawski, 1973.

2.5.2.1 Sistemas de clasificación RMR

Para la clasificación geomecánica del macizo rocoso, en las excavaciones subterráneas, se ha considerado utilizar los parámetros propuestos por Bieniawsky (1979), sistema de valoración del macizo rocoso (Rock Mass Rating), comúnmente denominado RMR, cuyo procedimiento consta de los siguientes parámetros.

1. Resistencia a la compresión uniaxial del material rocoso
2. Índice de calidad de roca RQD
3. Espaciamiento de las juntas
4. Condición de las discontinuidades
5. Condiciones hidrogeológicas
6. Corrección de las orientaciones de las discontinuidades

La existencia de los parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por el índice de calidad RMR, que varía de 0 – 100. Para la clasificación de RMR se divide el macizo rocoso en zonas o tramos que presentan características geológicas más o menos uniformes de acuerdo con las observaciones hechas en campo, en las que se lleva a cabo la toma de datos y medidas referentes a las propiedades y características de la matriz rocosa y de las discontinuidades.

La clasificación geomecánica constituye un procedimiento para la caracterización de los macizos rocosos a partir de datos de afloramiento y sondeos, y se aplican principalmente a los túneles, dado la dificultad del estudio de los macizos rocosos a profundidad. Pero igualmente se aplica a la caracterización de los macizos en forma general, como medio para clasificar geotécnicamente las rocas (ver Tabla 10). El cálculo del índice RMR permite estimar los parámetros de resistencia y deformabilidad del macizo.

Tabla 10

Calidad del macizo rocoso con relación al índice RMR

Clase	Calidad	Valoración RMR
I	Muy buena	100 - 81
II	Buena	80 - 61
III	Media	60 - 41
IV	Mala	40 - 21
V	Muy mala	<20

Fuente: Bieniawsky, 1979.

Cálculo RMR, esta clasificación proporciona una estimación inicial de los parámetros del macizo rocoso a bajo coste y de manera sencilla, no obstante, debe ser considerada como una simplificación, ya que no tiene en cuenta otros aspectos como la deformabilidad del macizo y debe ser aplicada con criterio y en base al conocimiento y experiencia previa (Bieniawski, 2014).



2.5.2.2 Método de índice GSI

Hoek recomienda hacer siempre referencia a un rango numérico y nunca a un solo valor del GSI y también sugiere la posibilidad, a falta de una apreciación directa en campo y solo para macizos rocosos caracterizados por un $GSI > 25$, de estimar este a partir del RMR de Bieniawski, depurándolo del factor orientación de las discontinuidades y asignando 10 al factor agua.

Hoek (1995) han propuesto un índice geológico de resistencia, GSI (geological strength index), que evalúa la calidad del macizo rocoso en función del grado y las características de la fracturación, estructura geológica, tamaño de los bloques y alteración de las discontinuidades.

La evaluación del GSI se hace por comparación del caso que interesa con las condiciones típicas que se muestran en la Tabla 11 y 12, y el mismo puede variar de 0 a 100, lo que permite definir 5 clases de macizos rocosos:

- Macizos de calidad MUY MALA (Clase V, $0 \leq GSI \leq 20$).
- Macizos de calidad MALA (Clase IV, $20 < GSI \leq 40$).
- Macizos de calidad REGULAR (Clase III, $40 < GSI \leq 60$).
- Macizos de calidad BUENA (Clase II, $60 < GSI \leq 80$).
- Macizos de calidad MUY BUENA (Clase I, $80 < GSI \leq 100$).

Tabla 11

Caracterización del macizo rocoso para estimar su resistencia

CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO PARA ESTIMAR SU RESISTENCIA Basándose en el aspecto de la roca elegir la categoría que mejor describa las condiciones del macizo previo a la excavación. Tener en cuenta que las voladuras pueden crear una impresión falsa sobre la calidad del macizo rocoso, en cuyo caso será necesario realizar algún tipo de ajuste por daños debidos a voladuras; la observación de testigos de sondeos y de frentes de roca en zonas afectadas y no afectadas por voladuras puede ser de ayuda. Para la definición del grado de fracturación (<i>blockiness</i>) debe considerarse la relación entre el tamaño del bloque y la dimensión del frente de excavación.		CONDICIÓN DEL FRENTE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con pátinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
	BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	BR/MB	BR/B	BR/M	BR/P	BR/MP
	BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.	BI/MB	BI/B	BI/M	BI/P	BI/MP
	BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.	BC/MB	BC/B	BC/M	BC/P	BC/MP
	FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.	FI/MB	FI/B	FI/M	FI/P	FI/MP

Fuente: *Caracterización del macizo rocoso en base a su grado de fracturación y estado de las juntas. Hoek y Brown, 1997.*

Tabla 12

Índice de resistencia geológica de resistencia GSI. (*geological strength index*)

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI (<i>geological strength index</i>) A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del Índice GSI.		CONDICIÓN DEL FRENTE				
ESTRUCTURA		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente alteradas, con patinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas	POBRE (P) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos rocosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos
<p>BLOQUES REGULARES (BR) Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.</p>	80 70					
<p>BLOQUES IRREGULARES (BI) Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.</p>		60 50				
<p>BLOQUES Y CAPAS (BC) Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.</p>			40 30			
<p>FRACTURACIÓN INTENSA (FI) Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.</p>				20 10		

Fuente: Estimación de índice GSI en base a descripciones geológicas. Hoek y Brown. 1997.

2.5.3 Propiedades de las estructuras

Es evidente que el método in situ constituye la mejor aproximación para predecir la deformabilidad del macizo rocoso. Sin embargo, los ensayos in situ son relevante caros y no siempre proporcionan resultados fiables, debido a distintas razones. Para una discusión detallada sobre las propiedades de las estructuras pueden consultarse los trabajos de (Goodman, 1989), Priest (1993) y (Hoek (2000); sin embargo, en lo que se



resumen los criterios de caracterización y se presentan algunas recomendaciones prácticas en (González de Vallejo, 2002).

2.5.4 Propiedades de la roca intacta

Para definir las propiedades mecánicas de la roca intacta deberán obtenerse probetas de cada unidad geotécnica básica y someterlas a ensayos de laboratorio, para realizar estos ensayos se podrían seguirse las recomendaciones de la ISRM (Brown, 1981) y/o la Norma ASTM (1999). Las propiedades geomecánicas de la roca intacta que se encuentran entre defectos estructurales en un típico macizo rocoso son medidas en laboratorio de muestras representativas de roca intacta. La necesidad de obtener muestras representativas es muy importante (Hoek, 2000).

2.5.4.1 Ensayo de laboratorio

A gran escala un macizo rocoso se comporta de forma muy diferente que una muestra en un ensayo de laboratorio, por lo que inevitable tener en cuenta este efecto de escala (Peres Rodríguez, 1993).

A nivel de ensayo de laboratorio, el efecto escala se evidencia cuando al ensayar muestras del mismo macizo y de diferente tamaño se obtienen resultados variables y dispersos, según la ISRM existe efecto cuando conjuntos de muestras del mismo universo con diferentes tamaños de distribuciones estadísticas con diferentes parámetros para una misma propiedad.

Sobre la base de datos experimentales, se ha observado que a partir de un determinado volumen de la muestra los resultados de los ensayos son independientes del tamaño (González de Vallejo, 2002).



2.6 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

En análisis de estabilidad de taludes existen diversas formas de definir el coeficiente de seguridad (CS) frente a la caída. La manera más tradicional se basa en el análisis por métodos de equilibrio limite (MEL). Otra manera utilizada para definir el CS es la relación entre la resistencia al corte real de los materiales y la mínima necesaria para evitar la rotura del talud. Así el CS se definirá mediante la comparación de dos materiales o dos conjuntos de materiales, uno real y otro ficticio, uno con las 423 propiedades reales de resistencia a la rotura y otro con unas propiedades reducidas hasta unos valores tales en los que se produzca la rotura del talud (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

Los análisis de estabilidad se aplican al diseño de taludes o cuando estos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir un coeficiente de seguridad adecuado, dependiendo de la finalidad de la excavación y el carácter temporal o definitivo del talud, combinando los aspectos de seguridad, costes de ejecución, consecuencias o riesgos que podría ocasionar su causar su rotura. Para taludes permanentes, el coeficiente de seguridad a adoptar debe ser igual o superior a 1,5, e incluso 2,02, dependiendo de la seguridad exigida y de la confianza que se tengan los datos geotécnicos que intervienen en los cálculos; para taludes temporales el factor de seguridad está en torno a 1,3, pero en ocasiones pueden adoptarse valores inferiores (González de Vallejo, 2002).

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico-matemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre un talud y que determinan sus comportamiento y condiciones de estabilidad se pueden agrupar en métodos determinísticos y métodos probabilísticos (González de Vallejo, 2002).



2.7 MÉTODOS PARA ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUD

Según PATTON & DEERE (1970) la estabilidad de taludes en consecuencia principalmente de factores geológicos, que generan problemas de estabilidad en roca y en suelo. El segundo factor sería la condición del agua subterránea.

El buen conocimiento del comportamiento de un talud frente a sus posibles roturas, repercute enormemente en los costes y en la seguridad, por ello, las investigaciones de campo (in situ) y de laboratorio, deben ser suficientes, como para poder caracterizar en medida de lo posible las características geomecánicas del terreno, así como los posibles mecanismos de ruptura.

Varios son los métodos para el análisis de estabilidad de taludes en macizos rocosos, algunos más expeditos, otros más elaborados, siendo el uso de uno u otro, función principalmente del número de informaciones obtenidas, tiempo y disponibilidad de recursos (Carnero, E. 2001).

2.7.1 Métodos empíricos para la estabilidad de taludes

Los métodos empíricos proporcionan una aproximación al sostenimiento de los túneles y no se consideran un método de cálculo; sin embargo, pueden ser muy útiles en macizos rocosos fracturados, y como medio de establecer las propiedades del macizo y los sostenimientos requeridos. También son útiles para estimar costes del sostenimiento en las etapas de anteproyecto (González de Vallejo, 2002)

La utilización de los métodos empíricos como los índices RMR de Bieniawski (1976, 1989) y Q de Barton (Barton et al., 1974 -1994), cuya principal ventaja frente a las clasificaciones geomecánicas más antiguas, es que reducen las probabilidades en tanto en cuanto al revés que los seres humanos ni olvidan ni se cansan. La aplicación de estas



metodologías empíricas por personal culificado, está resultando fundamental en el sentido que las excavaciones mineras y civiles mundo adelante son demasiadas como para acudir a análisis más detallados (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

2.7.1.1. Ángulo de talud versus altura de talud

El principal gráfico empírico que se usa como referencia es el gráfico de Hoek que relaciona el ángulo de talud con la altura de talud, basado en taludes estables e inestables. Sin embargo, este gráfico no tiene asociado la caracterización de los datos geotécnicos de los taludes y por lo tanto tiene un gran nivel de incertidumbre. Teniendo en cuenta estas limitaciones, el gráfico de Hoek puede proveer una primera aproximación. Por ejemplo, permite ver que un talud de 200 metros con un ángulo global de 65° sería difícilmente estable.

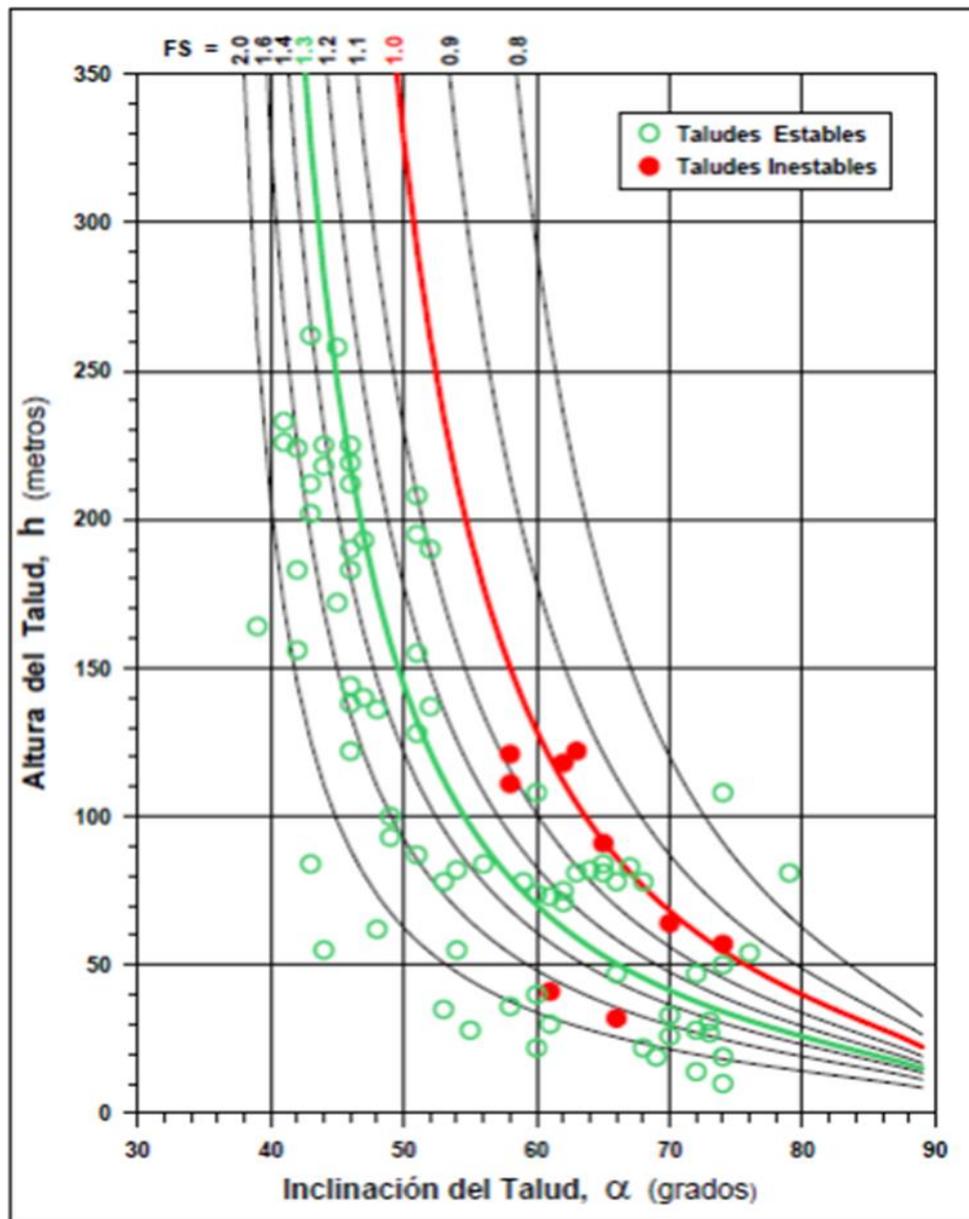


Figura 14: Altura de talud v/s ángulo de talud para el gráfico empírico de estabilidad de taludes.

Fuente: Hoek, 1997.

2.7.2. Método de proyección estereográfica o cinemático

Una vez que el tipo de falla se ha identificado en el estereograma, el mismo diagrama también se puede utilizar para examinar la dirección en la que un bloque se deslizará y dará una indicación de las condiciones de estabilidad. Este procedimiento se conoce como análisis cinemático. Esta relación entre la dirección en la que el bloque de roca se deslizará y la orientación de la cara es fácilmente evidente en el estereograma. Sin



embargo, mientras que el análisis del estereograma es un buen indicador de las condiciones de estabilidad, que no tiene en cuenta las fuerzas externas tales como presiones de agua o de refuerzo que comprende pernos de roca tensados, que pueden tener un efecto significativo en la estabilidad. El procedimiento de diseño habitual es utilizar el análisis cinemático para identificar bloques potencialmente inestables, seguido de un análisis de estabilidad detallada de estos bloques usando el método de equilibrio límite (Wyllie, D. C., Mah, 2004).

2.7.2.1. Modos de falla o ruptura

Existen posibles modos de falla como vuelco, planar, cuña estos son aplicables a los macizos rocosos fracturados. En roca muy fracturada o descomprimida, producirá fallas circulares. Ocurrencias de cualquier modo de una fractura o combinación de los mismos está controlado por la orientación relativa de cara de la cantera / plano de junta dominante, conjuntos de junta dominantes, las características de resistencia al corte de juntas, y su continuidad / frecuencia (González de Vallejo, 2002).

a. Modo de rotura planar

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, cumpliéndose la condición de que la discontinuidad debe estar descalzada por el talud y su buzamiento debe ser mayor que su ángulo de rozamiento interno en taludes excavados paralelos a la estratificación, pueden tener lugar roturas planas por deslizamiento de los estratos; este tipo de rotura es típica en macizos lutíticos o pizarrosos, generándose los planos de rotura a favor de la esquistosidad los diferentes tipos de roturas planas dependen de la distribución y características de las discontinuidades en el talud (González de Vallejo, 2002).

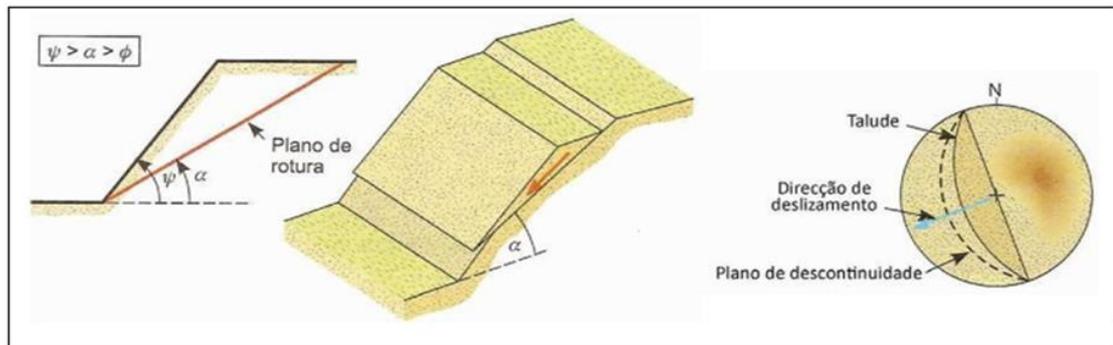


Figura 15: Rotura planar.
Fuente: Gonzales de Vallejo, 2002.

b. Modo de Rotura por 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, y se deben cumplir iguales condiciones que para la rotura plana, Este tipo de rotura suele presentarse en macizos con varias familias de discontinuidades, cuya orientación, espaciado y continuidad determina la forma y el volumen de la cuña.

Se produce siguiendo dos planos de discontinuidad, de manera que el buzamiento de la línea de intersección de ambos planos tenga un buzamiento inferior al ángulo de talud, lo que descalza un tetraedro o cuña de roca que podrá eventualmente deslizar. Se ilustra este mecanismo en la Figura 16 (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

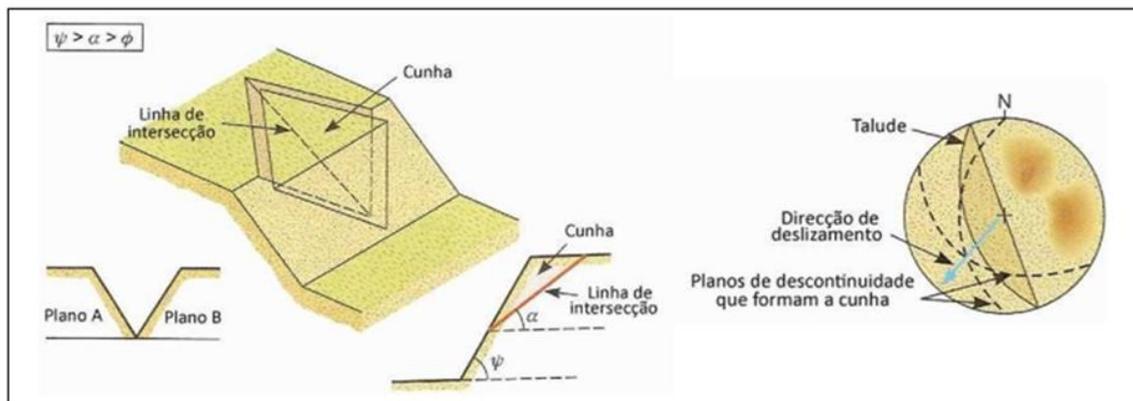


Figura 16: Rotura de cuña debido a intersección de dos discontinuidades.
Fuente: Gonzales de Vallejo, 2002.

c. Modo de Rotura por vuelco

Se produce en taludes de macizos rocosos donde los estratos presentan buzamiento contrario a la inclinación del talud y dirección paralela o subparalela al mismo. En general, los estratos aparecen fracturados en bloques a favor de sistemas de discontinuidades ortogonales entre sí (Figuras 19). Este tipo de rotura implica un movimiento de rotación de los bloques, y la estabilidad de los mismos no está únicamente condicionada por su resistencia al deslizamiento (González de Vallejo, 2002).

La rotura por vuelco se produce si se tiene una familia de discontinuidades muy persistentes y relativamente poco espaciadas que tengan un rumbo paralelo al del talud (típicamente estratificación o esquistosidad), pero que bucen contra éste con una inclinación más bien alta. A veces este fenómeno se ve catalizado por la presencia de otra familia de discontinuidades perpendicular a la anterior que permita la formación de una base escalonada sobre la que vuelquen los prismas de roca que se formen (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

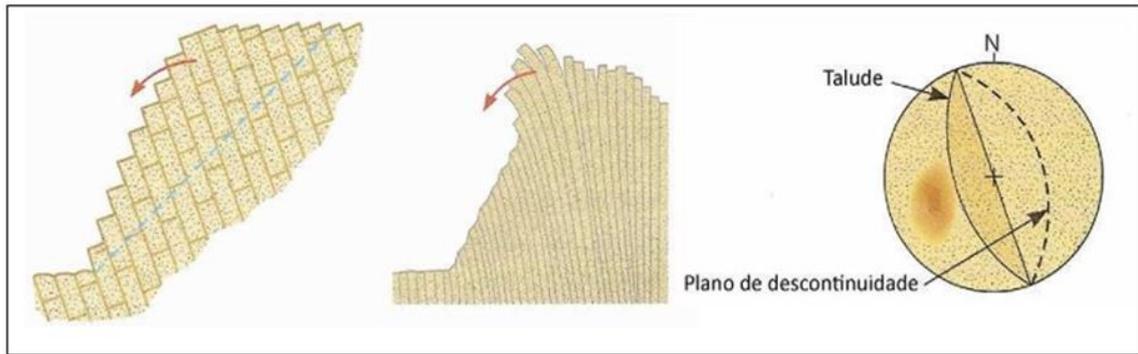


Figura 17: Rotura por Vuelco.
Fuente: Gonzales de Vallejo, 2002.

2.7.3. Modos de equilibrio límite o analítico

Los métodos de equilibrio límite para el cálculo de estabilidad de taludes son más utilizados en la práctica común, debido a su sencillez, y porque el valor del coeficiente de seguridad obtenido no dista demasiado del valor real.

El método de equilibrio limite establece que la rotura del terreno se produce a través de una línea que presenta la superficie de rotura. De esta forma, se interpreta que la masa de terreno por encima de dicha línea se desplaza respecto a la masa inferior, produciéndose, así, la rotura del terreno. En el momento de producirse la rotura, la resistencia al corte a lo largo de la superficie de deslizamiento esta movilizadada, y el terreno se encuentra, en su totalidad, en equilibrio estático (Carnero, E. 2001).

El método de Equilibrio Limite tiene la ventaja de ser simple y de fácil entendimiento y de requerir datos como: conocimiento de la superficie de ruptura, resistencia al cizallamiento a lo largo de esta fractura, peso específico de la roca, presión del agua y fuerzas dinámicas actuantes, relativamente más fáciles de obtener que las características del macizo tales como deformabilidad y resistencia. Sin embargo, su precisión y confiabilidad son limitadas., primero, por la dificultad en prever la persistencia de las discontinuidades, la cual tiene gran influencia en la resistencia al cizallamiento; segundo por el efecto escala, en extrapolar los valores de resistencia de

laboratorio para el campo; tercero, por la posibilidad de modificaciones de la resistencia y de la presión de agua con el desplazamiento a lo largo de la superficie (Franklin & Dusseault, 1989).

El método de equilibrio limite, se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable.

2.7.3.1. Estabilidad de fallas plana

En el caso de la falla planar el factor de seguridad F.S. Se obtiene de forma directa como cociente entre las fuerzas que tienden a producir deslizamiento y las fuerzas resistentes del terreno que se oponen al mismo, proyectadas todas según la dirección del plano de falla (Díaz S. J. 1998).

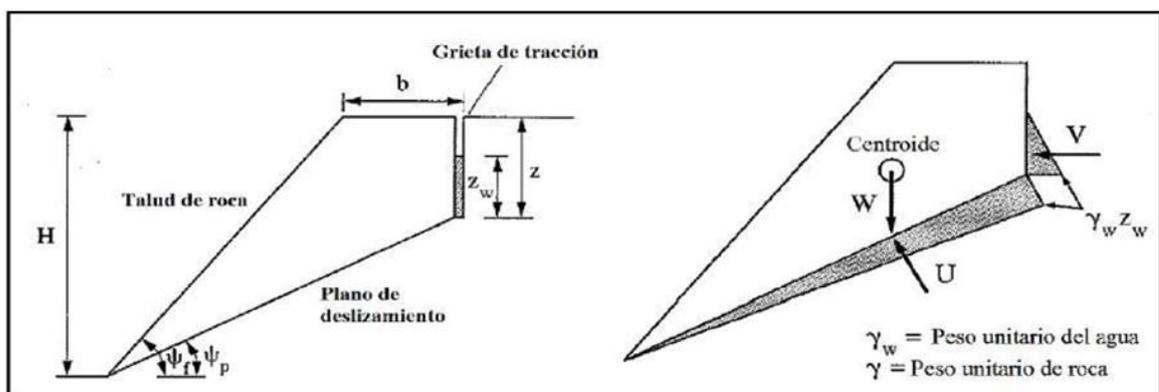


Figura 18: Geometría del análisis estático de una falla plana con grieta de tracción.

Fuente: Hudson, J.A. & Harrison, 2000.

En donde se tiene:

FS = factor de seguridad.

H = altura del talud.

b = longitud de grieta de tracción desde el plano de coronación, o desde la superficie del talud, hasta el plano de discontinuidad.



Z_w = altura del agua en la grieta de tracción.

c = cohesión efectiva de la superficie de deslizamiento.

φ = ángulo de fricción efectivo de la superficie de deslizamiento.

Z = distancia de la grieta de tracción a la cresta del talud.

W = peso de la masa deslizante, supuesta de anchura unidad según el rumbo.

ψ_f = buzamiento de talud.

ψ_p = buzamiento del plano del deslizamiento.

U = fuerza resultante de las presiones intersticiales que actúan sobre el plano de deslizamiento.

V = fuerza resultante de las presiones intersticiales que actúan sobre la grieta de tracción.

γ = peso específico de la masa inestable.

γ_w = peso específico del agua.

g = aceleración de la gravedad.

El coeficiente de seguridad viene dado por.

$$FS = \frac{c(H - z) + csc \psi_p + (W \cos \psi_p - U - \tan \varphi)}{V \cos \psi_p + W \sin \psi_p} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Esta expresión es una de las más generales y la que se viene utilizando en las últimas décadas para analizar y resolver problemas de plana con razonable éxito (Ramírez, O. P. & Alejano, 2007).

2.7.3.2. Estabilidad de fallas por cuña

Para que se produzca el deslizamiento de la cuña es necesario que la línea de intersección de los dos planos de discontinuidad tenga menor inclinación que el plano del talud, que aflore en éste y, además, que los planos que forman la cuña afloren en el terreno natural, o que exista algún plano que individualice la cuña del resto del macizo rocoso.

El coeficiente de seguridad de la rotura en cuña viene definido, como en la rotura plana, por el cociente entre las fuerzas que se oponen al deslizamiento y las que lo inducen. Las fuerzas que intervienen son las mismas que en la rotura plana, es decir, peso de la cuña, empujes de agua, esfuerzos sísmicos, fuerzas de anclaje, fuerzas de reacción y fuerzas resistentes: cohesión y fricción (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

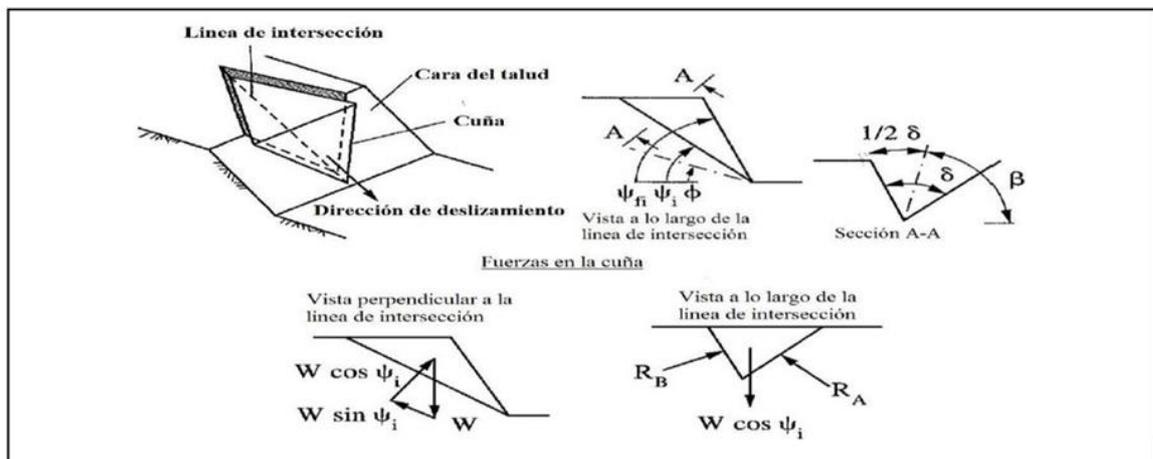


Figura 19: Geometría de un análisis estático de solo fricción de una falla en cuña.

Fuente: Hudson, J. A. & Harrison, 2000.

$$FS = \frac{(R_A + R_B) \tan \varphi}{W \sin \psi_i} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$y R_A + R_B = \frac{W \cos \psi_i \sin \beta}{\sin(0.5\delta)} \quad (\text{Ecuación 5})$$



En donde se tiene:

FS = Factor de seguridad.

φ = Ángulo de fricción.

ψ_i = Buzamiento de la línea de intersección.

W = Peso del bloque.

β, δ = Factores geométricos de la cuña.

2.7.3.3. Estabilidad de fallas por vuelco

El análisis de la rotura por vuelco de bloques se lleva a cabo estudiando las condiciones de equilibrio de cada uno de los bloques que forman el talud. Para realizar los cálculos se establecen las relaciones entre todos ellos considerando sus acciones mutuas y las relaciones geométricas de los bloques y del talud. Goodman y Bray (1976) y Hoek y Bray (1981) han desarrollado el análisis para casos sencillos y taludes con bloques esquemáticos. Los casos más complejos no pueden ser representados por modelos simples y no pueden ser analizados mediante métodos de equilibrio límite (González de Vallejo, 2002).

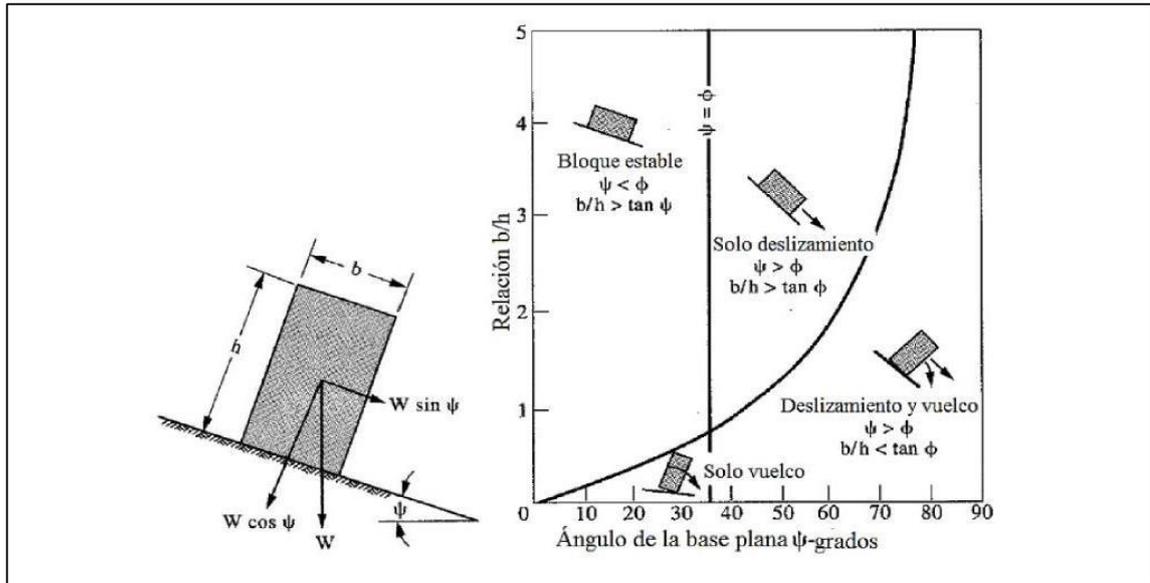


Figura 20: Deslizamiento e inestabilidad de bloques por vuelco en un plano inclinado.

Fuente: Hoek, E. & Bray, 1991.

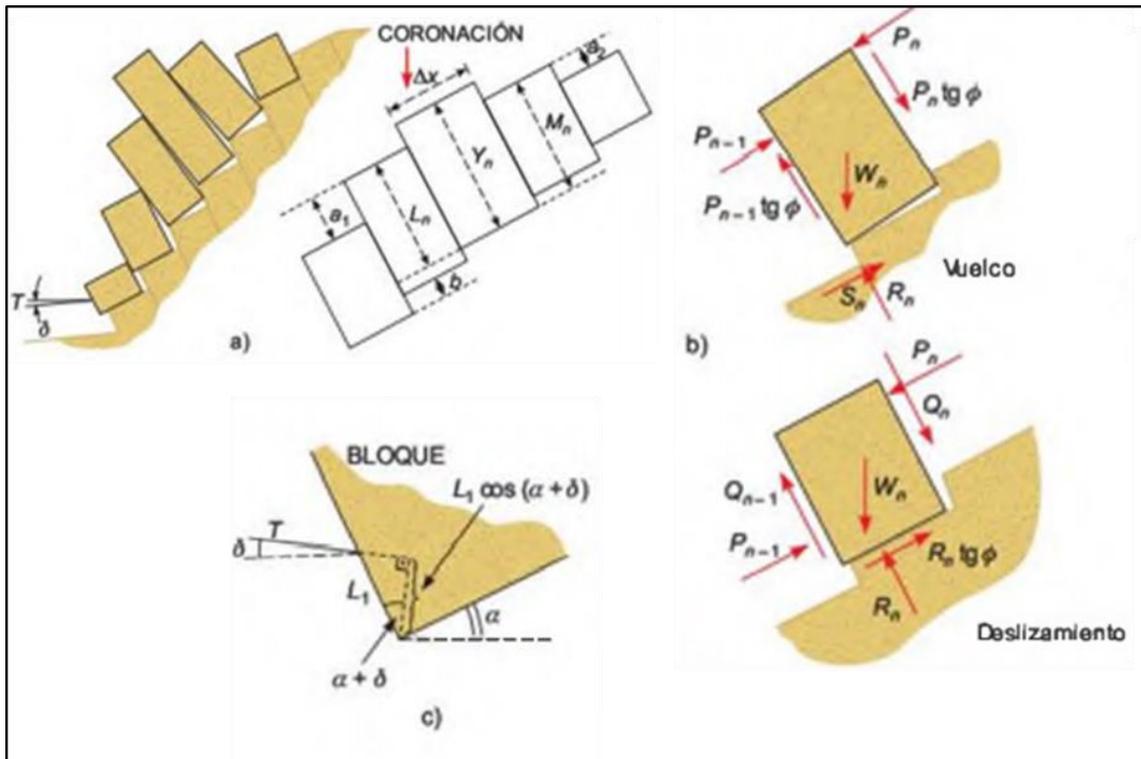


Figura 21: a) Modelo geométrico para análisis por equilibrio límite del vuelco de bloques en un talud, b) Fuerzas actuando sobre uno de los bloques frente al vuelco y al deslizamiento, c) Fuerza de anclaje aplicada al Moque del pie del talud.

Fuente: Gonzáles de Vallejo, 2002.

El análisis de equilibrio limite por vuelco esta por la siguiente formula:

$$P_{n-1} = \frac{P_n(M_n - \Delta x \tan \varphi) + \left(\frac{W_n}{2}\right)(\gamma_n \text{sen} \alpha - \text{sen} \alpha)}{L_n} \quad (\text{Ecuación 6})$$

El deslizamiento de bloques por vuelco está dado por la siguiente formula:

$$P_{n-1} = P_n \frac{W_n(\tan \varphi \cos \alpha - \text{sen} \alpha)(\gamma_n \text{sen} \alpha - \text{sen} \alpha)}{1 - \tan^2 \varphi} \quad (\text{Ecuación 7})$$

2.8. CONDICIONES SÍSMICAS PARA LA ESTABILIDAD DE TALUD

De acuerdo a la Norma Peruana E-030, la zonificación sísmica se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada. La región de Puno se ubica en la zona 2 y zona 3, debido a la ocurrencia de sismos sobretodo en la zona sur de Puno, la Provincia de Sandia se encuentra en la zona 2 de acuerdo a esta clasificación la zona de estudio presenta aceleraciones del orden de 0.25, no obstante, no está ajena a la ocurrencia de este fenómeno natural, el mapa de distribución sísmica se observa en la Figura 22.

Tabla 13

Zonas sísmicas

Factores de zona "Z"		
Zona		Z
	4	0.45
	3	0.35
	2	0.25
	1	0.1

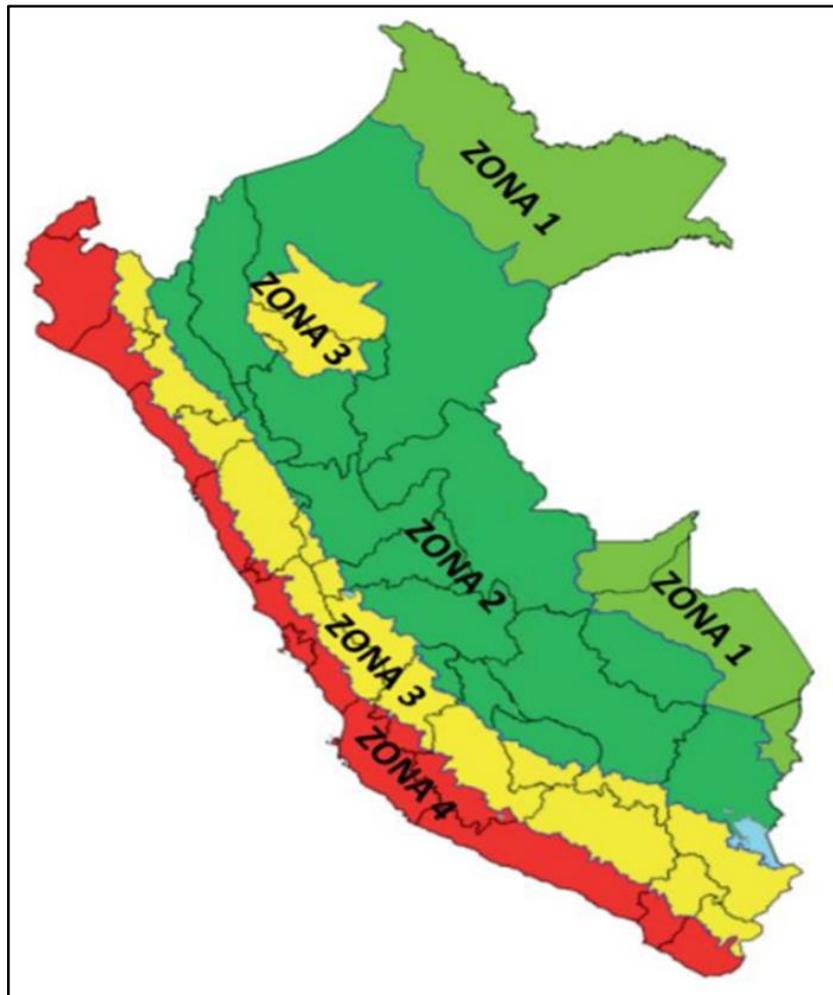


Figura 22: Mapa de Zonificación de acuerdo a la Norma E 030.

Fuente: Plan de contingencias por sismo region Puno, 2012.

2.9. DEFINICIONES CONCEPTUALES

2.9.1. Macizo Rocosó

Las masas rocosas se presentan en la naturaleza afectadas por una serie de planos de discontinuidad o debilidad que separan bloques de matriz rocosa, formando los macizos rocosos. Para el estudio del comportamiento mecánico del macizo rocoso deben estudiarse las propiedades tanto de la matriz como de las discontinuidades.

Macizo rocoso es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de diverso tipo que afectan al medio rocoso. Mecánicamente los macizos rocosos son medios discontinuos, anisótopos y heterogéneos. Prácticamente



puede considerarse que presentan una resistencia a la tracción nula (González de Vallejo, 2002).

2.9.2. Matriz Rocosa

Matriz rocosa es el material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de «roca intacta» que quedan entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral. Mecánicamente queda caracterizada por su peso específico, resistencia y deformabilidad (González de Vallejo, 2002).

2.9.3. Discontinuidades

La presencia de discontinuidades (superficies de estratificación, juntas, fallas, diques, etc.) rompe la continuidad de las propiedades mecánicas de los bloques rocosos, confiriendo al macizo un comportamiento geomecánico e hidráulico discontinuo, condicionado por la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad (González de Vallejo, 2002).

2.9.4. Orientación

En geotecnia lo más habitual es definir las discontinuidades mediante la dirección del buzamiento y la pendiente del plano con la horizontal. Así, por ejemplo, 210/32 indica que la dirección de buzamiento se encuentra a 210° del norte verdadero en el sentido de las agujas del reloj y que el plano tiene una pendiente de 32°. Para realizar la medida de la dirección de buzamiento se coloca en primer lugar la tapa de la brújula geotécnica apoyada sobre la discontinuidad y se cala la burbuja. En el caso de que la discontinuidad buce hacia fuera (hacia fuera del talud), la medida de la aguja que marca al norte será la dirección de buzamiento de la discontinuidad (por estar las brújulas geotécnicas



numeradas en sentido anti-horario). En el caso de que la discontinuidad buce hacia el macizo, la dirección de buzamiento vendrá marcada por la aguja que buza al sur (suelen tener distintos colores en la brújula geotécnica). Para medir el buzamiento, se coloca la brújula geotécnica en vertical apoyada sobre la discontinuidad y se mide el buzamiento mediante el clinómetro que lleva la brújula (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

2.9.5. Meteorización

Se denomina meteorización de las rocas a las modificaciones experimentadas en su composición o estructura por la acción de los agentes atmosféricos. La importancia que tiene la meteorización desde el punto de vista de la mecánica de rocas se debe a que produce profundos cambios en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales rocosos. Existen dos clases de meteorización: física y química. El hecho de que una u otra predomine depende del clima, ya que ambas se producen simultáneamente (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

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 (González de Vallejo, 2002).

2.9.6. Alteración

El grado de alteración de la matriz rocosa permite clasificar las rocas cualitativamente, y aporta una idea sobre sus características mecánicas o geotécnicas. La alteración aumenta la porosidad, la permeabilidad y la deformabilidad del material rocoso, y disminuye su resistencia (González de Vallejo, 2002).



La resistencia se irá reduciendo a medida que aumente el nivel de alteración de las superficies de discontinuidad y también el tamaño de la discontinuidad.

La alteración se manifiesta por manchas de óxidos de hierro y ligera descomposición de los feldespatos, pero la resistencia es muy similar a la de la roca sana.

2.9.7. Factor de Seguridad

El Factor de Seguridad es una medida para conocer cuál es el factor de amenaza de que talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el talud se diseña. Fellenius (1927) presenta al factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla (Suarez, 1998).

Tabla 14

Factor de seguridad recomendado (Ministerio de Fomento, 2001)

Situación de calculo	Normal	Reducido
Permanente	1.50	1.30
Transitoria	1.30	1.20
Accidentales	1.1	1.05

Fuente: Factores de seguridad. Ramírez, O. P. & Alejano, 2004.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

Contar con una laptop es indispensable ya que requerimos de programas como el Dips 6.008, Swedge 4.0, ArgMap 10.2 y Microsoft Office 2016. Estos programas nos permitieron procesar los datos e información obtenida de campo y laboratorio. Para el mapeo geomecánico en campo se utilizó equipos básicos como: GPS, brújula, martillo de geólogo, lápiz de dureza, flexómetro, protractor, libreta de campo y equipo de protección personal básicos.

3.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología empleada para este estudio se sustenta en la investigación no experimental de tipo descriptivo y cualitativo, basados en el diseño de taludes de roca, recopilación y análisis de información existente, los cuales serán desarrollados en cuatro etapas:

3.2.1. Etapa de gabinete

Se recopiló una serie de información concerniente al estudio, información sobre la geología y estratigrafía, el Boletín N° 84 detalla la geología de Limbani, Boletín N° 82 geología de Sandia y San Ignacio. asimismo, se tomó en cuenta los métodos para realizar mapeos in situ, para una caracterización estructural, mapeo geológico, mapeo geomecánico en taludes de roca. Existe una serie de métodos para realizar una evaluación geomecánica de un talud en roca, tomando en cuenta los que se acomodan en nuestra interpretación final.



3.2.2. Etapa de campo

Se realizó un mapeo geológico – geomecánico.

3.2.2.1. Geológica

El mapeo geológico se desarrolló in situ, llegando a identificar que la estación geomecánica 1 aflora en la Formación Ananea, las estaciones geomecánicas 1 y 2 afloran en la Formación Sandia. Ver Anexo 1.

a. Caracterización superficial de estructuras

Registro lineal (Caracterización del Macizo Rocos), de forma descriptivo y detallando los siguientes parámetros: Buzamiento, Dirección de buzamiento, UCS, RQD, Espaciamiento, Persistencia, Apertura, Rugosidad, Relleno, Alteración, Agua subterránea. Los cuales son registrados en el formato de Mapeo Geomecánico, ver Anexo 3.

Toma de actitudes de las discontinuidades de cada una de las estaciones; Primera estación (51) actitudes, Segunda estación (54) actitudes y Tercera estación (60), dichos datos fueron alimentados a la base de datos del Software Dips v. 6.008, este nos permite realizar el análisis estereográfico por lo tanto conocer la distribución de las familias de discontinuidades.

b. Familias de discontinuidades

Cada una de las tres estaciones geomecánicas requiere un tratamiento especial, conocer el comportamiento estructural de cada estación nos permite relacionar el talud en transcurso del tramo en estudio.

c. Espaciamiento de la estructura

Con un flexómetro en campo podemos determinar la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes, este determina el tamaño del bloque en una roca intacta, la toma de espaciamiento se adjunta en el Anexo 3 en el formato de mapeo geomecánico.

Tabla 15

Descripción del espaciado

Descripción	Espaciado en mm
Extremadamente cerrado	< 20
Muy cerrado	20 – 60
Cerrado	60 – 200
Moderado	200 – 600
Abierto	600 – 2000
Muy abierto	2000 - 6000
Extremadamente abierto	> 6000

Fuente: Ramírez, O. P. & Alejano, 2004.

a. Continuidad o persistencia

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.

Tabla 16

Descripción continuidad o persistencia

Término	Continuidad en m
Muy pequeña	< 1
Pequeña	1 - 3
Media	3 – 10
Grande	10 – 20
Muy grande	> 20

Fuente: Ramírez, O. P. & Alejano, 2004.

e. Apertura de las estructuras

La abertura 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, para determinar la abertura emplearemos el protractor la realizar la medición.

Tabla 17

Descripción de la Apertura

Apertura	Descripción	Aspecto
< 0.1 mm	Muy cerrada	Aspecto cerrado
0.1 - 0.25 mm	Cerrada	
0.25 - 0.5 mm	Parcialmente abierta	
0.5 - 2.5 mm	Abierta	Aspecto de hendidura
2.5 - 10 mm	Moderadamente ancha	
>10 mm	Ancha	
1 - 10 cm	Muy ancha	Aspecto abierto
10 - 100 cm	Extremadamente ancha	
> 1 m	Cavernosa	

Fuente: Terminología de apertura recomendada por la SMIR. Brown, 1981.

f. Rugosidad

Muy importante para la resistencia al corte, aumenta la resistencia total de las discontinuidades. En campo empleamos nuestro perfil de rugosidad, según ello se dio la valoración de rugosidad in situ, Perfil de rugosidad se muestra en la Figura 7.

Tabla 18

Descripción de Rugosidad

N°	Rugosidad	Valores
1	Muy rugosa	6
2	Rugosa	5
3	Ligeramente rugosa	3
4	Ondulada	1
5	Suave	0

Fuente: Considerado en González de Vallejo, 2002.

g. JRC (Joint Roughness Coefficient)

Los perfiles de rugosidad conjunta de roca son determinados a partir del rango de JRC se muestra a continuación.

Tabla 19

Descripción de JRC (Joint Roughness Coefficient)

Nº	JRC (Joint Roughness Coefficient)	Valores
1	Espejo de Falla	0 - 2
2	Ondulada	2 - 6
3	Ligeramente rugosa	6 - 12
4	Rugosa	12 - 16
5	Muy Rugosa	16 - 20

Fuente: JRC (Joint Roughness Coefficient) en (Barton, 2013).

h. Relleno

El relleno es una condición muy importante en el comportamiento de la discontinuidad, dependerá si este existe, es blanda o dura, en campo determinamos con la ayuda del lápiz rayador.

Tabla 20

Descripción de Relleno

Nº	Relleno	Valores
1	Ninguna	6
2	Relleno duro < 5 mm	4
3	Relleno duro > 5 mm	2
4	Relleno blando < 5 mm	1
5	Relleno blando > 5 mm	0

Fuente: Bieniawski, Z. T. 1989.

i. Meteorización de las juntas o alteración

Condición mapeada muy importante ya que este tiene un lugar determinante en las discontinuidades.

Tabla 21

Grado de meteorización en macizo rocoso

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

Fuente: Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso. Gonzáles de Vallejo, 2002.

j. Agua en discontinuidades

La zona en estudio por ser un lugar tropical, se conserva entre húmedo a mojado y en épocas de avenida estos presentan goteo.

Tabla 22

Descripción de agua en discontinuidad

N°	Agua en discontinuidad	Valores
1	Seco	15
2	Ligeramente húmedo	10
3	Húmedo	7
4	Goteando	4
5	Agua fluyendo	0

Fuente: Bieniawski, Z. T.1989.

k. Resistencia de las paredes de las discontinuidades

Durante el mapeo geomecánico empleamos el martillo de geólogo para la estimación de la resistencia de las paredes de las discontinuidades.

MILLER (1965) presenta una clasificación de la dureza de las rocas en seis grupos según su comportamiento frente al martillo de geólogo (Tabla 23).

Tabla 23

Dureza de las rocas frente al martillo de geólogo

Grado	Descripción	Identificación de campo	Valor aproximado de la resistencia a la compresión simple MPa
R1	Roca muy débil	Deleznable bajo golpes fuertes con la parte puntiaguda del martillo geológico; puede desconcharse con la navaja.	1 - 5
R2	Roca débil	Se desconcha con dificultad con una navaja; se pueden hacer marcas poco profundas golpeando fuertemente la roca con la punta del martillo.	5 - 25
R3	Roca media	No se raya con una navaja; las muestras se pueden romper con un golpe firme con el martillo.	25 - 50
R4	Roca dura	Se necesita más de un golpe con el martillo geológico para romper la muestra.	50 - 100
R5	Roca muy dura	Se necesitan muchos golpes con el martillo geológico para romper la muestra.	100 - 250
R6		Solo se pueden romper esquirlas de la muestra con el martillo geológico.	> 250

Fuente: Miller, 1965.

l. Ángulo de fricción básica

Para determinar el ángulo de fricción nos basamos en la clasificación geomecánica RMR de Bieniawski, realizando una estricta correlación con la resistencia de la roca evaluada el laboratorio y con el mapeo geomecánico in situ.

3.2.2.2. Clasificación Geomecánica

Cada tipo de roca tienen sus propias características, propiedades físicas tanto mecánicas, por ello se realizó la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, deberá incluir las propiedades de la matriz rocosa, así como de las discontinuidades.

Los sistemas que aplicamos para la clasificación geomecánica de la roca son los siguientes.

a. Índice de calidad de la roca (RDQ)

Deere, al no disponer sondeos hay que estimar el RQD a partir de datos en afloramientos, siempre en cuando las trazas de las discontinuidades sean visibles o fáciles de descubrir, el RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen (por metro lineal).

Tabla 24

Descripción índice de calidad de roca

Índice De Calidad De Roca	Calidad
0 - 25 %	Muy malo
25 - 50 %	Malo
50 - 75 %	Regular
75 - 90 %	Bueno
90 - 100 %	Muy bueno

Fuente: Deere, 1967.

b. Clasificación RMR (Bieniawski)

Para determinar la calidad del macizo rocoso, se divide éste en dominios estructurales, es decir, en zonas delimitadas por discontinuidades geológicas, dentro de las cuales la estructura es prácticamente homogénea. La estructura del macizo comprende el conjunto de fallas, diaclasas, pliegues y demás características geológicas propias de una determinada región. El índice que define la clasificación es el denominado RMR

(Rock Mass Rating), que evalúa la calidad del macizo rocoso (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).

En el Anexo 3 se adjunta detalles del mapeo lineal en campo, específicamente de las 3 estaciones geomecánicas, basándonos en la tabla RMR (Bieniawski, 1989).

Tabla 25

Descripción de parámetros de clasificación RMR

Parámetros		ESCALA DE VALORES							
1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	carga puntual	> 10 MPa	10 - 4 MPa	4 - 2 MPa	2 - 1 Mpa	Compresión Simple (Mpa)		
		Compresión simple	> 250 MPa	250 - 100 Mpa	100 - 50 MPa	50 - 25 Mpa	25 - 5	5 - 1	< 1
	Puntuación	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%			
	Puntuación	20	17	13	6	3			
3	Separación entre diaclasas	> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.006 m			
	Puntuación	20	15	10	8	5			
4	Estado de discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Ninguno	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	4	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5 mm		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua freático	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 Litros/min	10 - 25 Litros/min	25 - 125 Litros/min	> 125 Litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		



Estado general		Seco	Ligerament e húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo
Puntuación		15	10	7	4	0
Ajustes la orientación de las discontinuidades						
Orientación del rumbo y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Regulares	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntaje	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tipos de macizos rocosos determinados a partir de la evaluación total					
Puntuación	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20
Tipo de roca	I	II	III	IV	V
Descripción	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala
Significado de los tipos de roca					
Tipo de roca	I	II	III	IV	V
Tiempo medio de sostén	20 años, claro de 15 m	1 año, claro de 10 m	1 semana, claro de 5m	10 horas, claro de 2.5 m	30 min, claro de 1 m
Cohesión del macizo rocoso (KPa)	>400	300 – 400	200 - 300	100 - 200	<100
Angulo de fricción del macizo rocoso (°)	>45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	<15

Fuente: Clasificación geomecánica RMR. Bieniawski, 1989.

c. Clasificación con el índice GSI

La clasificación GSI se basa en una observación cuidadosa del macizo rocoso y, por consiguiente, es esencialmente cualitativa. Este índice incorpora la estructura del mismo y las características geomecánicas de las superficies de discontinuidad existentes en él y se obtiene a partir de un examen visual del macizo rocoso en afloramientos y sondeos. El GSI combina los dos aspectos fundamentales del comportamiento de los macizos rocosos, es decir: su fracturación, o sea, el tamaño y la forma de los bloques, y la resistencia al corte de las discontinuidades (Ramírez, O. P. & Alejano, 2004).



3.2.2.4. Valoración Geotécnica de la Roca Intacta

Para la valoración geotécnica de la roca intacta que constituye el macizo rocoso de la carretera Sandía – Quiquira Km: 229 al 231, se realizó con el cumplimiento de normas y estándares de calidad para la preparación y ejecución de ensayos en el laboratorio tales como las dadas por el ISRM y las normas ASTM D7012-14e01. Las pruebas fueron certificadas por el Laboratorio de Investigación & Ensayo de Materiales de la empresa G&C Consultores y Contratistas Generales S.A.C. – Puno.

b. Ensayo de propiedades físicas

Para obtener las propiedades físicas de las rocas, los ensayos se realizaron según la norma ASTM C 97 – 18 y la norma correspondiente ISRM.

c. Resistencia

Para determinar la resistencia de la roca intacta se recurrió a los ensayos de laboratorio, para lo cual se realizaron, pruebas de resistencia a la compresión simple o no confinada, ensayo de carga puntual, para la determinación de estas propiedades intrínsecas de la roca intacta.

d. Resistencia a la compresión simple (UCS)

El equipo de laboratorio utilizado para estos ensayos fue una prensa hidráulica manual de 2000kN de capacidad, que se presenta en el Anexo 6, las muestras son perforados y obtenidos en el testigo para el ensayo, los ensayos fueron realizados cumpliéndose todos los procedimientos y protocolos de trabajos en laboratorio normados por la ASTM D 7012-14e01 y la norma ISRM.



e. Ensayo de carga puntual

Los ensayos fueron realizados cumpliéndose todos los procedimientos y protocolares del trabajo en el laboratorio de acuerdo a las normas por la ASTM D 5731 – 16 y la norma ISRM. El equipo de laboratorio utilizado para realizar los ensayos de carga puntual fue una prensa hidráulica manual de 5000psi de capacidad, como se presenta en el Anexo 6, con testigos listos para ser ensayados.

3.2.2.5. Análisis de Estabilidad de Taludes

a. Análisis de estabilidad por el método estereográfico o cinemático

Para el análisis de estabilidad por el método estereográfico en los taludes de la carretera Sandia – Quiquira Km: 229 – 231, Se hizo la medición de dirección de buzamiento y buzamiento (toma de actitudes), que son adjuntados en el Anexo 2, y mediante el programa Dips versión 6.008, con la ayuda de este software determinamos en número de familias como también los modos de fallas más recurrentes en los taludes establecidos.

b. Análisis de estabilidad por el método equilibrio límite

Para los análisis de estabilidad por el método equilibrio límite se utilizó el Software Swedge para el estudio de la rotura por vuelco, para las tres estaciones geomecánicas.

c. Software Swedge

El Swedge nos permite evaluar la posibilidad de ruptura por cuña, en la actualidad los taludes se presentan inestables, teniendo mayores riesgos, pero con la aplicación de los nuevos cortes para el talud, es normal que algunas zonas se

desestabilicen, por condiciones de carga, altura, medio ambiente y presencia de estructuras; así como por la influencia de infiltraciones de agua o nivel freático, especialmente en época de lluvias.

3.2.3. Etapa de Trabajo en Laboratorio

Las muestras obtenidas de cada estación son evaluadas en el Laboratorio de Investigación & Ensayo de Materiales de la empresa G&C Consultores y Contratistas Generales S.A.C. – Puno. Los ensayos realizados son: Ensayos de propiedades físicas, ensayo de compresión simple y ensayo de carga puntual.

3.2.4. Etapa de Procesamiento de datos en Gabinete II

El procesamiento de datos obtenidos en campo y los resultados de laboratorio, permiten conocer las condiciones de los taludes en estudio, el trabajo final de esta tesis.

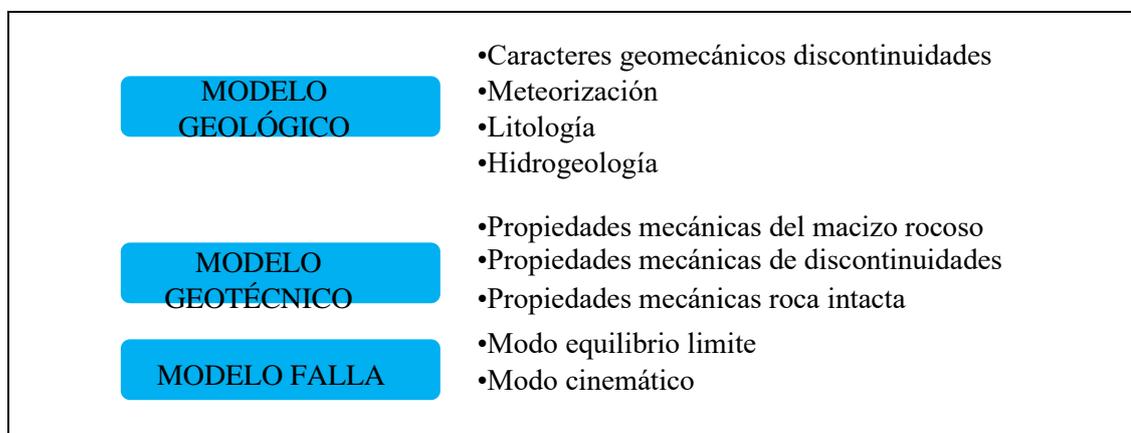


Figura 23: Metodología para la estabilidad de talud.
Fuente: Ramírez, O. P. & Alejano M.L. 2007.



CAPITULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación se realizó en la carretera Sandia - Quiquira, ubicada a 3 kilómetros de la localidad de Sandía, el cual corresponde desde el kilómetro 229+000 al 231+000. Se hizo al mapeo geológico y caracterización geomecánica de las zonas críticas en deslizamientos de roca. Los cuales han sido evaluados para alcanzar a nuestros objetivos; definiendo el análisis cinemático, el factor de seguridad para cada estación geomecánica.

4.1.1. UBICACIÓN

El presente trabajo de investigación se ubica en el Distrito y Provincia de Sandia Departamento de Puno, el trayecto comprende desde el Kilómetro 229 al 231 en la carretera de Sandia a Quiquira.

Tabla 26

Ubicación geográfica de la zona de estudio

Puntos	Norte	Oeste
A	8417330	450921
B	8419027	452248

4.1.2. Accesibilidad.

La zona en estudio está situada a tres kilómetros de la localidad de Sandia en la misma vía de Sandia a Quiquira – Puno.

Tabla 27

Descripción de la accesibilidad

Tramo	Distancia	Tiempo	Tipo de vía	Vía principal
Juliaca - Sandia	229 Km	5 Hras	Asfaltado	Juliaca - Sandia
Sandia - Paraje	3 Km	8 min.	Asfaltado	Juliaca - Sandia

4.2. GEOLOGÍA LOCAL**Paleozoico****4.2.1. Formación Sandia (Os-s)**

Definida en el valle de Sandia por Laubacher (1974), la Formación Sandia está formada por una secuencia de cuarcitas y areniscas grises de grano fino a medio intercaladas con limo arcillas de coloración gris oscuras con presencia de micropliegues ya fallas locales, en el trayecto de la carretera se ubica en varios sectores se localiza suprayaciendo a la Formación Purumpata e infrayaciendo a la Formación Ananea.

4.2.2. Formación Ananea (SD-a)

Las rocas que afloran en la estación 1 está compuesta por una secuencia de pizarras gris oscuras finamente laminadas y alteradas con intercalación de esquistos de la Formación Ananea, los estratos se visualizan perfectamente con una dirección de NO-SE, de igual forma existen fallas locales con dirección NS, esta unidad secciona al cerro Chichanaco y también se puede apreciar en el trayecto a Queneque. Estratigráficamente subyace en concordancia a la Formación Sandia e infrayace a la Formación Chichanaco.

Cenozoico



4.2.3. Formación Chichanaco

Esta Formación se encuentra justo al Norte del pueblo de Sandia adosada al flanco inferior del valle de Sandía, debido a que sido depositado en el cauce mismo del río Sandia éste ha sido fuertemente erosionado. Actualmente, restos de esta Formación afloran en el Norte de la carretera que vá de Sandia-San Juan del Oro al Oeste y Noreste del estadio, y en la margen derecha del río Sandia.

La litología está constituida por una secuencia clásica esencialmente pizarrosa de buena a regular selección clasificada, sus relaciones estratigráficas con las rocas subyacentes en discordancia angular, aunque no se observa la base de esta Formación se sabe que sobreyace a la Formación Sandia e infrayace a depósitos coluviales (Ingemmet, 1996).

4.2.4. Cuaternario coluvial

Son acumulaciones constituidas por materiales de diverso tamaño, pero de litología homogénea, englobados en una matriz arenosa que se distribuye irregularmente en las vertientes del territorio montañoso, habiéndose formado por alteración y desintegración in situ de las rocas ubicadas en las laderas superiores adyacentes y la acción de la gravedad (Serrano, 2015).

4.3. GEOMORFOLOGÍA LOCAL

4.3.1. Sistema acuático

a. Unidad ríos

El río chichanaco, el río Sandia que nace desde los nevados de las alturas de Cuyo Cuyo, el drenaje de las quebradas tributarias, son el principal colector que alimenta el río



Inambari, el caudal va incrementando aguas abajo por ello la carga sedimentaria también, creando una acción erosiva considerable cuando la energía del agua incrementa en épocas de lluvia.

b. Unidad valles en V

Las pendientes abruptas característicos de Sandia forman excelentes valles en forma de V, estas formas son típicas de valles juveniles, en algunos casos presentan fondos o causes limitados, los valles son aprovechados para la agricultura ya que son excelente para la producción de café, granadilla, chirimoya, maíz, entre otros frutales que se adaptan al clima.

4.3.2. Sistema de montañas

a. Sub unidad de montañas altas

Esta sub unidad geomorfológica se encuentra como una faja continua que se dispone en forma paralela al río Inambari en el cuadrángulo 29–y Sandia, sus desniveles se encuentran comprendidos entre los 1800 y 5,200 m.s.n.m. ubicándose sobre esta unidad pequeñas comunidades campesinas (Ingemmet,1996).

En la zona de estudio las cumbres más altas lo conforman el cerro Chichanaco, cerro Japuna y el cerro Collpani, laderas con pendientes mayores a 60° cubiertos por vegetación y arbustos naturales, sembríos de maíz y algunos frutales.

b. Sub unidad de montañas medias

Se denominan así a las montañas con elevaciones no mayores a los 2 500 m.s.n.m., se emplazan en la parte central y baja de la zona de estudio (Álvarez, 2015).



Se observa laderas con pendientes mayores a 30°, a lo largo del trayecto de la carretera paralela al río Inambari, cubiertos por vegetación y arbustos naturales como también por cultivos de café, granadilla y chirimoya.

c. Sub unidad de terrazas bajas

Esta sub unidad geomorfológica está compuesta de material aluvional con matriz arcillo limosa y clastos angulosos a subangulosos de metasedimentitas, se ubica en las áreas donde han ocurrido deslizamientos antiguos a la fecha estabilizados, son de extensiones reducidas y emplazadas principalmente en las partes bajas de las laderas de montaña; sobre ella se desarrollan actividades agrícolas y en muchos de los casos alberga asentamientos humanos (Álvarez, 2015).

d. Sub unidad de depósito de deslizamientos

Laderas con morfología paralela a la pendiente, formadas por acumulación de depósitos de remoción originadas por procesos movimientos de masa, derrumbes y deslizamientos que se viene dando acta la actualidad, estos depósitos de deslizamientos son aprovechados para la agricultura en algunos casos.

4.3.3. Sistema antrópico

a. Unidad urbana

Compuesta por edificaciones antiguas hasta resientes y algunas modernas, Sandia es una localidad que cuenta con instituciones principales como banco de la nación, comisaria, hospital, poder judicial e instituciones educativas, el movimiento comercial es regular siendo los días domingos la feria local, Sandia está situada al pie se los cerros Chichanaco y Japuna formado ambos un valle urbano hermoso y peligroso a la vez, los ríos Sandia, Chichanaco e Inambari transcurren por medio de la ciudad. La morfología

que presenta este valle hace propenso a riesgos y desastres naturales que ya estos últimos años son comunes los huaycos y deslizamientos.

b. Unidad rural

En las partes medias de las laderas hasta donde se tienen vías de transporte, se encuentran situadas viviendas de familias de manera esparcida, en la actualidad se cuenta con servicios básicos como electricidad y agua potable no en su totalidad, el sostén de las familias es la minería, la producción agrícola y de muy pocos la producción ganadera.

Tabla 28

Unidades geomorfológicas

Unidad	Sub unidad	Símbolo	Descripción
Acuático	Ríos	R	La intersección de los ríos Sandía y Chichanaco forman el río Inambari, este río tiene un caudal bastante considerable en épocas de lluvia.
Terrestre	Valle en V	Vv	Las pendientes abruptas característicos de Sandía forman excelentes valles en forma de V, estas formas son típicas de valles juveniles.
	Montaña alta	Mo-at	Formadas por el cerro Chichanaco, cerro Japuna y el cerro Collpani, laderas con pendientes mayores a 60° cubiertos por vegetación y arbustos.
	Montaña media	Mo-me	Presentes a lo largo del trayecto de la carretera paralela al río Inambari, cubiertos por vegetación y arbustos.
	Terrazas bajas	Tb	principalmente en las partes bajas de las laderas de montaña; sobre ella se desarrollan actividades agrícolas y en muchos de los casos alberga asentamientos humanos.
	Depósito de deslizamiento	Dd	formadas por acumulación de depósitos de remoción originadas por procesos movimientos de masa, derrumbes y deslizamientos.
Antropogénico	Urbano		Sandía está situada al pie de los cerros Chichanaco y Japuna formando ambos un valle urbano.
	Rural		En las partes medias de las laderas se encuentran situadas viviendas de familias de manera esparcida.



CAPITULO V

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. EVALUACIÓN Y CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA

En la evaluación geomecánica de cada uno de los taludes de macizo rocoso, se consideraron factores muy importantes que deben ser obtenidos in situ como son; resistencia a la compresión, rugosidad, relleno, alteración y presencia de agua subterránea, los afloramientos en estudio corresponden a la Formación Sandia siendo está compuesta por roca meta-arenisca de color gris. Las características de resistencia y deformación de los macizos rocosos, dependen fundamentalmente de las características que presentan las discontinuidades estructurales, las cuales actúan como planos débiles. Esta condición es común en la zona ya que los cortes de talud son pronunciados por la misma topografía abrupta que es característico de la zona.

5.1.1. Evaluación Geomecánica

5.1.1.1. Identificación de Sistema de Discontinuidades

Para la determinación del sistema de discontinuidades dominantes, se realizó el mapeo correspondiente de las estructuras existentes. Para la caracterización de todos los parámetros geomecánicos, las familias de discontinuidades que forman en la matriz rocosa del macizo, se procede la toma de datos de juntas, dirección, orientación de los planos de ruptura y otras características de las discontinuidades; valores que sirven para clasificar las familias de dominio estructural, a la que está sometido el macizo rocoso.

La identificación de las discontinuidades, su evaluación influye en el comportamiento y la estabilidad, que dependerá únicamente de los parámetros físicos y comportamiento mecánico. Las descripciones detalladas de las características de discontinuidades se observan en el registro lineal para la estación geotécnica zonificada, para ello se ha considerado la rugosidad, resistencia de paredes, apertura y relleno, que determinan el comportamiento mecánico y la resistencia a la corte de las discontinuidades.

5.1.1.2. Orientación e Inclinación

Durante el mapeo geomecánico in situ se ha obtenido datos como son; la orientación de estructuras, por el medio se determinó cuantas familias de discontinuidades forman dichas estructuras, con datos de buzamiento y dirección de buzamiento, ver Anexo 5, esta actividad nos permite identificar si los taludes son favorables o desfavorables.

Tabla 29

Descripción de DIP y DIP/DIR, obtenido desde estereograma

Estación	N° Familia	Buzamiento	Dir/Buzamiento
229+180 - 229+230	Familia 1	77	12
	Familia 2	76	115
	Familia 3	35	292
231+280 - 231+334	Familia 1	51	176
	Familia 2	48	291
	Familia 3	58	59
	Familia 4	80	337
231+400 - 231+460	Familia 1	77	31
	Familia 2	39	123
	Familia 3	46	298

Diagrama de planos mayores de discontinuidades, estación 1 con Dip y Dip/Dir; para la Familia 1 = 77/12, Familia 2 = 76/115 y Familia 3 = 35/292.

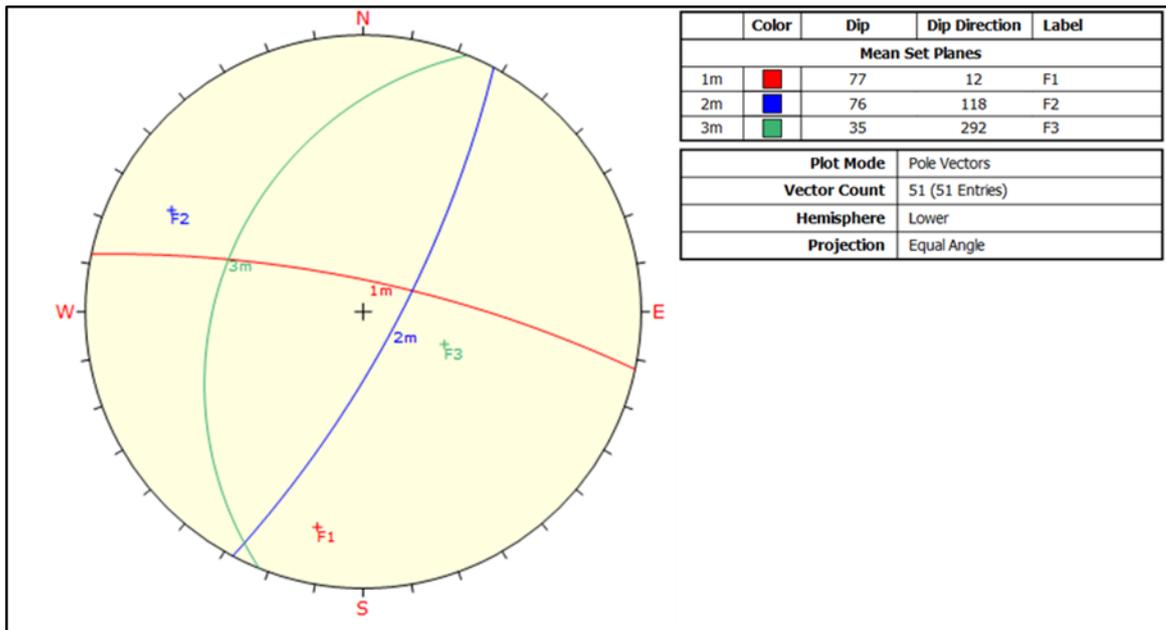


Figura 24: Diagrama de planos mayores de discontinuidades, Estación 1.

Diagrama de planos mayores de discontinuidades, elaborada en el programa Dips, se tiene 4 familias de discontinuidades para la estación 2.

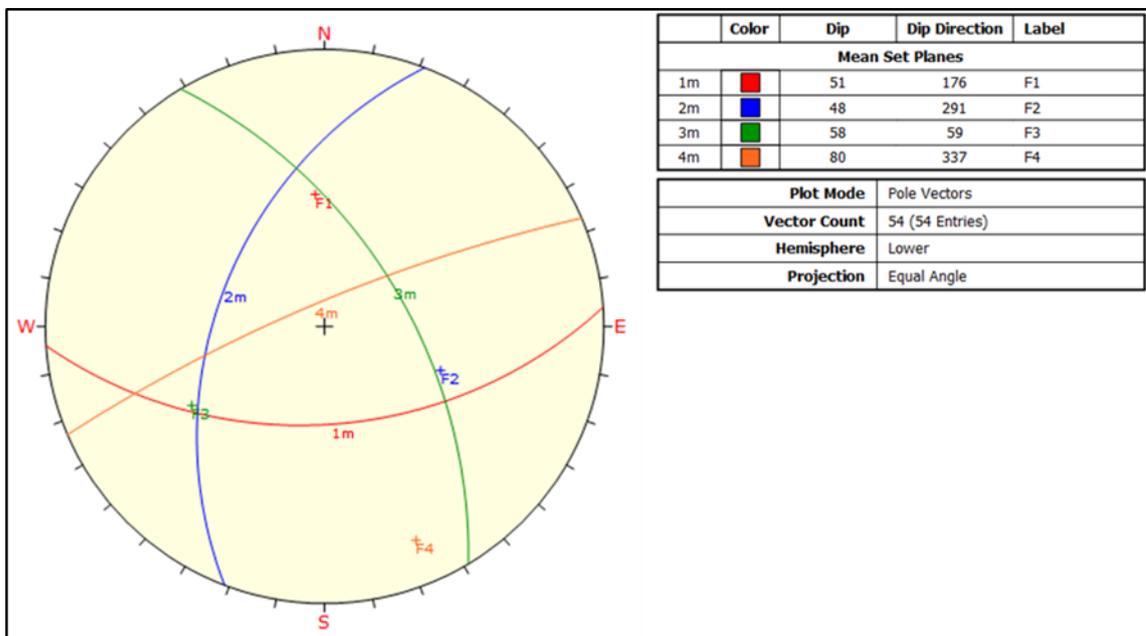


Figura 25: Diagrama de planos mayores de discontinuidades, Estación 2.

Diagrama de planos mayores de discontinuidades, elaborada en el programa Dips, se tiene 3 familias de discontinuidades para la estación 3.

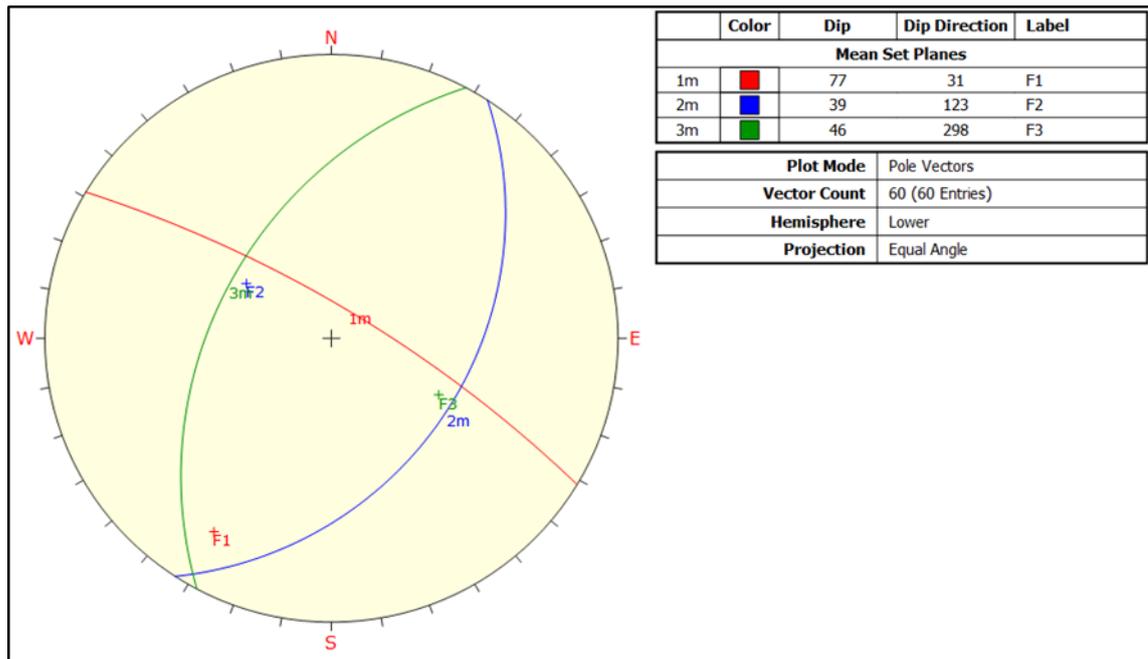


Figura 26: Diagrama de planos mayores de discontinuidades, Estación 3.

5.1.1.3. Espaciado de las discontinuidades

Los espaciamientos entre las discontinuidades son considerados en la zona más visibles de rocas y fueron medidos con un flexómetro, según el mapeo realizado se pudo identificar en campo 3 familias existentes los cuales son resumidos en la siguiente Tabla.

Tabla 30

Descripción del espaciado

Estación	N° de Familias	Descripción	Espaciado	Valoración
229+180 - 229+230	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Moderadamente juntas	200 - 600 mm	10
231+280 - 231+334	Familia 1 Familia 2 Familia 3 Familia 4	Moderadamente juntas	200 - 600 mm	10
231+400 - 231+460	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Moderadamente juntas	200 - 600 mm	10

5.1.1.4. Persistencia

Se utilizó un flexómetro de 5 metros, considerando zonas más visibles de rocas teniendo en cuenta criterios relativos en campo, comparándose las longitudes a lo largo del buzamiento y dirección de buzamiento.

Tabla 31

Descripción de la persistencia

Estación	N° de Familias	Descripción	Persistencia	Valoración
229+180 - 229+230	Familia 1 Familia 2 Familia 3	continuidad media	3 - 10 m	2
231+280 - 231+334	Familia 1 Familia 2 Familia 3 Familia 4	continuidad media	3 - 10 m	2
231+400 - 231+460	Familia 1 Familia 2 Familia 3	continuidad media	3 - 10 m	2

5.1.1.5. Apertura de las discontinuidades

Es la distancia perpendicular que separa las paredes adyacentes de una discontinuidad abierta, en el cual el espacio intermedio puede contener aire, agua, suelo o material de alteración.

La apertura se mide a través de una regla graduada, los valores son dados según términos de la Tabla 32.

Tabla 32

Descripción de la Apertura

Estación	N° de Familias	Descripción	Apertura	Valoración
229+180 - 229+230	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Angosta	0.1 – 1.0 mm	4
231+280 - 231+334	Familia 1 Familia 2 Familia 3 Familia 4	Angosta	0.1 – 1.0 mm	4
231+400 - 231+460	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Angosta	0.1 – 1.0 mm	4

5.1.1.6. JRC (Joint Roughness Coefficient)

El valor de JRC depende del grado de rugosidad de la discontinuidad y varía desde cero para superficies lisas, creciendo conforme el perfil de rugosidad aumenta llegando a un valor de 20 para superficies altamente rugosas.

Para obtener el valor de JRC para el presente estudio, empleamos el diagrama de Hoek, de la Figura 7.

Tabla 33

Descripción de JRC (Joint Roughness Coefficient)

Estación	N° de Familias	Descripción	Parámetro	Valor
229+180 - 229+230	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Ligeramente Rugosa	6 - 12	8
231+280 - 231+334	Familia 1 Familia 2 Familia 3 Familia 4	Ligeramente Rugosa	6 - 12	10
231+400 - 231+460	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Ligeramente Rugosa	6 - 12	10

5.1.1.7. Rugosidad

La rugosidad de las paredes de las discontinuidades es un componente muy importante de su resistencia al cizallamiento en la estabilidad de taludes en roca, las

paredes de las discontinuidades de nuestros taludes en estudio son ligeramente rugosas, siendo estas favorables al auto sostenimiento.

Para dar valores a la rugosidad se emplearon métodos fotográficos en donde evaluamos las sombras producidas por una escuadra y determinamos el padrón de rugosidad.

En la tabla 34 se presenta el resultado característico de rugosidad para cada estación.

Tabla 34

Descripción de Rugosidad

Estación	N° de Familias	Descripción	JRC	Valoración
229+180 - 229+230	Familia 1 Familia 2 Familia 3	4 	6 - 8	3
231+280 - 231+334	Familia 1 Familia 2 Familia 3 Familia 4	5 	8 - 10	3
231+400 - 231+460	Familia 1 Familia 2 Familia 3	5 	8 - 10	3

a. Resistencia a la Compresión Simple (UCS)

Los ensayos de Compresión Simple fueron realizados en el Laboratorio de Investigación & Ensayo de Materiales de la Empresa G&C Consultores Y Contratistas Generales S.A.C. – Puno, se adjunta en el Anexo 6.

Tabla 35

Datos de compresión simple obtenidos en laboratorio

Estación	Sondeo	UCS (MPa)
229+180 - 229+230	CS_C - SQ 01	92.90
231+280 - 231+334	CS_C - SQ 02	91.50
231+400 - 231+460	CS_C - SQ 03	94.13

Según los resultados obtenidos de la compresión simple, obtenemos rocas de tipo Regular, de clase III. Para cada una de las estaciones.

b. Ensayo de Carga Puntual (PLT)

Este ensayo también nos permite clasificar la resistencia de la roca, los resultados de laboratorio se muestran en el Anexo 6.

Tabla 36

Datos de carga puntual obtenidos en laboratorio

Estación	Sondeo	PLT (MPa)
229+180 - 229+230	CP_C - SQ 01	1.71
231+280 - 231+334	CP_C - SQ 02	3.19
231+400 - 231+460	CP_C - SQ 03	6.72

5.1.1.8. Relleno

El relleno es el material que separa las paredes adyacentes de las discontinuidades, en campo se encontró en su mayoría rellenos de material blando, en algunos casos rellenos duros.

Dependiendo al tipo de relleno que gobierna en el talud influirá sobre la resistencia al cizallamiento, deformabilidad y permeabilidad.

Tabla 37

Descripción de Relleno

Estación	N° de Familias	Descripción del Relleno	Valoración
229+180 - 229+230	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Relleno blando < 5mm	1
231+280 - 231+334	Familia 1 Familia 2 Familia 3 Familia 4	Relleno duro < 5mm	4
231+400 - 231+460	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Relleno duro < 5 mm	4

5.1.1.9. Meteorización o Alteración

En la zona de estudio la condición climática juega un rol muy importante ya que es agente principal en la meteorización y que esta define las propiedades mecánicas en la roca, al según avanza el proceso de meteorización aumentan la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del macizo rocoso, al tiempo que disminuye su resistencia.

Para determinar la evaluación del grado de meteorización se realiza por observación directa del afloramiento.

Tabla 38

Evaluación de grado de meteorización del macizo rocoso

Estación	N° de Familias	Grado de meteorización	Descripción Meteorización	Valoración
229+180 - 229+230	Familia 1 Familia 2 Familia 3	III	Moderadamente meteorizada	3
231+280 - 231+334	Familia 1 Familia 2 Familia 3 Familia 4	III	Moderadamente meteorizada	3
231+400 - 231+460	Familia 1 Familia 2 Familia 3	III	Moderadamente meteorizada	3

5.1.1.10. Agua en Discontinuidades

En la zona de estudio el agua percola básicamente a través de las discontinuidades (porosidad secundaria), otra proporción considerable también se da a través de los poros de las rocas (porosidad primaria).

Tabla 39

Descripción de agua en discontinuidades

Estación	N° de Familias	Descripción de agua en discontinuidad	Valoración
229+180 - 229+230	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Húmedo	10
231+280 - 231+334	Familia 1 Familia 2 Familia 3 Familia 4	Húmedo	10
231+400 - 231+460	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Húmedo	10

5.1.1.11. Resistencia de las Paredes de las Discontinuidades

La resistencia de pared de las discontinuidades incluye en su resistencia al corte y de su deformabilidad, también dependerá del tipo de su matriz rocosa, del material de relleno y el grado de alteración, afectan en mayor cuantía a las discontinuidades.

Tabla 40

Descripción Resistencia de las paredes de las discontinuidades

Estación	N° de Familias	Descripción	Compresión Uniaxial	Valoración
229+180 - 229+230	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Muy resistente	100 - 250 Mpa	12
231+280 - 231+334	Familia 1 Familia 2 Familia 3 Familia 4	Muy resistente	100 - 250 Mpa	12
231+400 - 231+460	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Muy resistente	100 - 250 Mpa	12

a. Ensayo de Propiedades Físicas

Los resultados de las propiedades físicas son obtenidos gracias al Laboratorio de Investigación & Ensayo de Materiales de la Empresa G&C Consultores Y Contratistas Generales S.A.C. – Puno, se presenta en el Anexo 6.

Tabla 41

Resultados de ensayos de Propiedades Físicas

Estación	Muestra	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)
229+180 - 229+230	C - SQ 01	2.76	0.2
231+280 - 231+334	C - SQ 02	2.68	0.2
231+400 - 231+460	C - SQ 03	2.69	0.2

b. Densidad o peso específico

Este valor se obtiene a partir de los ensayos de propiedades físicas, de los cuales tenemos: para la primera estación una densidad de 2.76 g/cm³, segunda estación 2.68 g/cm³ y para tercera estación 2.69 g/cm³, estos resultados son obtenidos en el Laboratorio de Investigación & Ensayo de Materiales de la Empresa G&C Consultores Y Contratistas Generales S.A.C. – Puno.

c. Angulo de fricción interna

Para determinar el ángulo de fricción se considera la Tabla 26, se realiza una correlación según el RMR y estos son los valores que se establecen: 28° para la primera estación, 30° para la segunda estación y 30° para la tercera estación.

d. Cohesión

Para estimar la cohesión se recurrió a la revisión bibliográfica de investigaciones realizados, Yupanqui, M. (2019). Realizó ensayos de corte directo en discontinuidades de rocas de la Formación Sandía, Formación Ananea y Grupo San José, obteniendo como promedio $C = 0.44$ MPa. Gonzales de Vallejo, L. (2002). Según la clasificación geomecánica RMR (Bieniawki, 1989), considera para rocas de clase III de calidad media $0.19 - 0.29$ MPa de cohesión. Ramírez, P. & Alejano, L. (2004). Sustenta, para roca metamórficas pizarra finamente laminada y alterada 0.05 MPa de cohesión, para esquistos y cuarcitas con relleno arcilloso $0.03 - 0.08$ MPa.

En base a esta data y el análisis estructural se determina la cohesión: $C1 = 0.08$ MPa, $C2 = 0.09$ MPa y $C3 = 0.09$ MPa respectivamente.

e. Factor de seguridad

El factor de seguridad cuantifica la diferencia entre las condiciones existentes reales de cómo se encuentra un talud, así mismo las condiciones que generan la ruptura, uno de los objetivos es determinar el Factor de Seguridad para cada una de las estaciones, en donde se determina la resistencia del macizo rocoso sobre la fuerza actuante.

Tabla 42

Análisis del Factor de Seguridad

Estación	Coficiente sísmico	Factor de seguridad estático	Factor de seguridad pseudoestático	Talud
229+180 - 229+230	0.25	1.35	0.98	Inestable
231+280 - 231+334	0.25	1.29	1.10	Inestable
231+400 - 231+460	0.25	1.38	1.24	Inestable

Para calcular el factor de seguridad se empleó el Software Swedge, considerando para la condición pseudoestático el coeficiente sísmico de 0.25 que está determinada para la zona 2, lugar donde se ubica la zona en estudio.

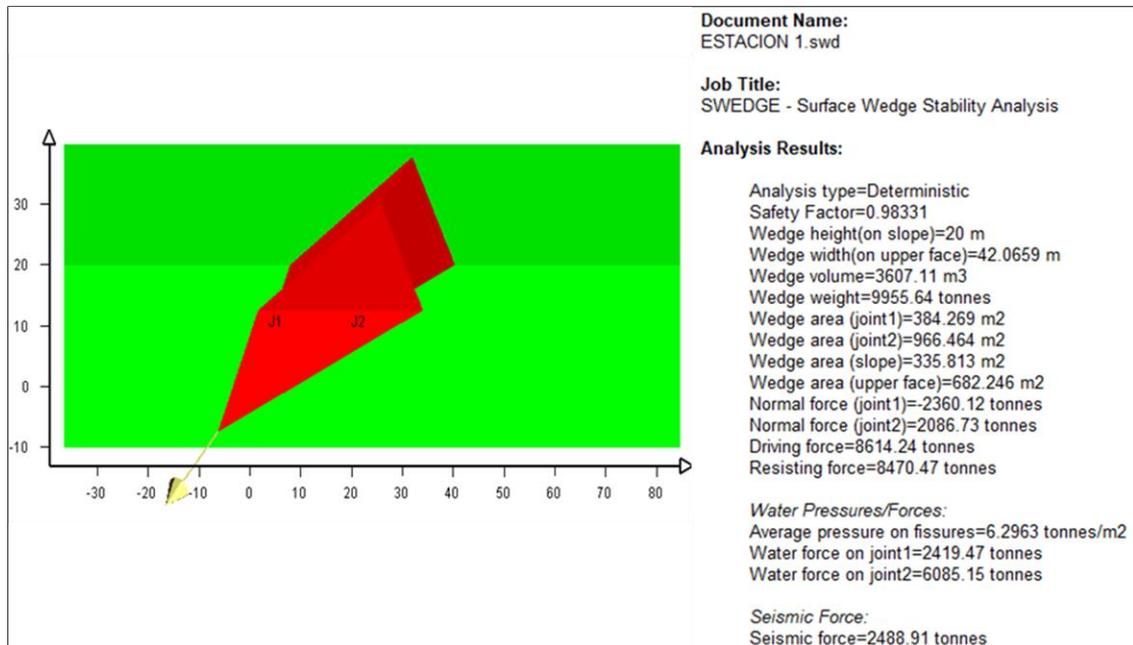


Figura 27: Cálculo del factor de seguridad mediante el software Swedge, Estación 1.

En la figura se muestra la posibilidad que exista fallamiento por vuelco.

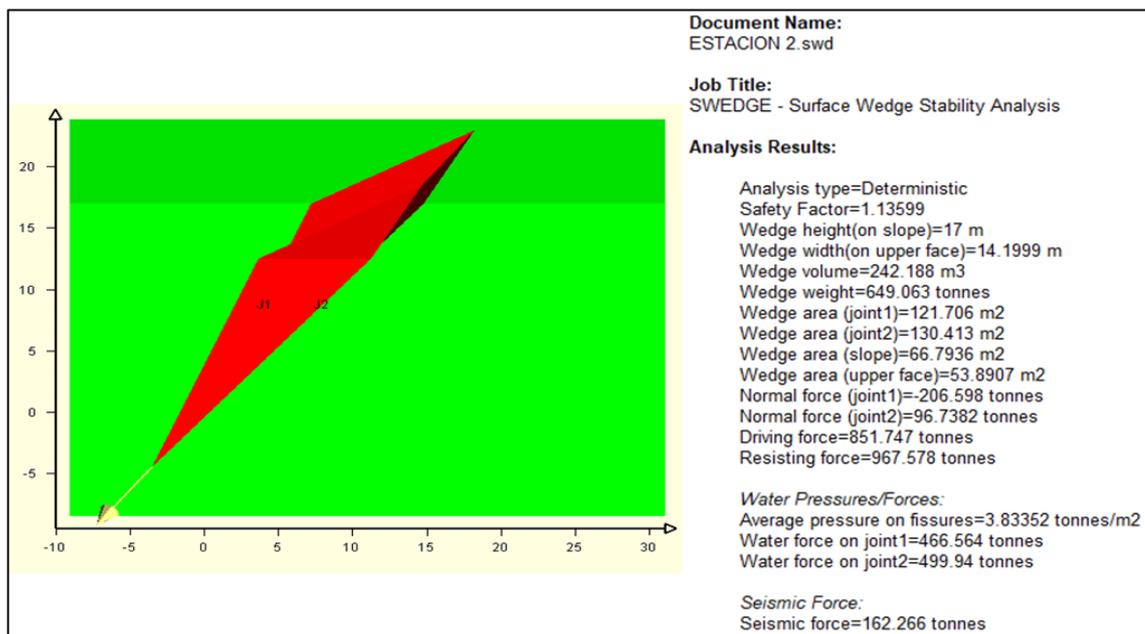


Figura 28: Cálculo del factor de seguridad mediante el software Swedge, Estación 2.

Talud con posibilidad que ocurra falla por vuelco.

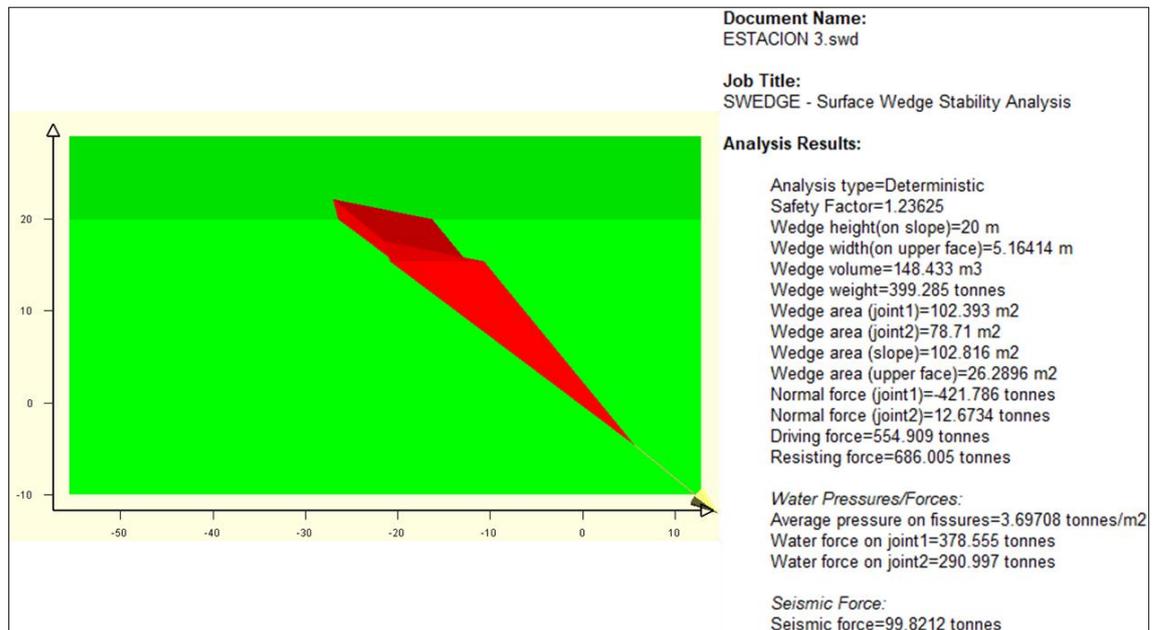


Figura 29: Cálculo del factor de seguridad mediante el software Swedge, Estación 3.

5.1.2. Clasificación geotécnica

El mapeo minucioso in situ nos permitió realizar una caracterización geomecánica verídica de cada talud en estudio, teniendo en cuenta las condiciones de las discontinuidades, así como las propiedades mecánicas del macizo rocoso obteniendo una muestra representativa para que estas sean tratadas en laboratorio y posteriormente procesadas en gabinete.

Se llega a determinar que los macizos rocosos son de tipo III, el cual indica que son rocas de regular calidad, se detalla en la tabla 42.

Tabla 43

Descripción del índice da calidad de roca

Estación	RQD	RMR	GSI
229+180 - 229+230	66	56	51
231+280 - 231+334	70	55	54
231+400 - 231+460	66	52	53

5.1.2.1. índice de Designación de la Calidad de la Roca (RQD)

Para determinar el índice de calidad de la roca, realizamos un mapeo lineal en donde registramos cada una de las discontinuidades existentes en el tramo.

Nos basamos en la ecuación de Hudson para calcular el índice de la calidad de la roca, mediante la siguiente ecuación:

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

Dónde: $\lambda = N^{\circ}$ de fisuras/espacio.

Tabla 44

Cálculo de RQD

Estación	λ	$RQD = 100e^{-0.1(\lambda)}(0.1\lambda + 1)$
229+180 - 229+230	12	66
231+280 - 231+334	11	70
231+400 - 231+460	12	66

Tabla 45

Descripción del índice de calidad de roca

Estación	N° de Familias	Calidad	Índice de calidad de roca	Valoración
229+180 - 229+230	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Regular	50 - 75 %	13
231+280 - 231+334	Familia 1 Familia 2 Familia 3 Familia 4	Regular	50 - 75 %	13
231+400 - 231+460	Familia 1 Familia 2 Familia 3	Regular	50 - 75 %	13

5.1.2.2. Clasificación RMR Bieniawski 1989

Para obtener el RMR es necesario considerar la resistencia a la compresión simple, el índice de calidad de la roca RQD, espaciamiento entre discontinuidad, condición de las discontinuidades, agua subterránea y orientación de discontinuidades, la suma de cada uno de los parámetros mencionados nos dará el RMR.

$$\text{RMR} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 - B$$

Tabla 46

Descripción del índice de calidad de roca

Parámetros	Descripción	Valores		
		E - 1	E - 2	E - 3
A1	Resistencia a la compresión simple	12	12	12
A2	Índice de la calidad de roca RQD	13	13	13
A3	Espaciamiento entre discontinuidad	10	10	10
A4	Condición de las discontinuidades	16	15	12
A5	Agua subterránea	10	10	10
B	Orientación de discontinuidades	-5	-5	-5
TOTAL	RMR	56	55	52

Tabla 47

Clasificación del macizo rocoso

Estación	N° de Familias	Clase	Calidad	Parámetros
229+180 - 229+230	Familia 1 Familia 2 Familia 3	III	Regular	60 - 41
231+280 - 231+334	Familia 1 Familia 2 Familia 3 Familia 4	III	Regular	60 - 41
231+400 - 231+460	Familia 1 Familia 2 Familia 3	III	Regular	60 - 41

Fuente. Clasificación geomecánica RMR, considerando (Bieniawski.1989).

Tabla 48

Parámetro de Clasificación RMR para Estación – 1

Parámetros		ESCALA DE VALORES							
1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Carga puntual	> 10 MPa	10 - 4 MPa	4 – 2 MPa	2 – 1 Mpa	Compresión Simple (Mpa)		
		Compresión simple	> 250 MPa	250 - 100 Mpa	100 - 50 MPa	50 -25 Mpa	25 - 5	5 - 1	< 1
	Puntuación	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.006 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Ninguno	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	4	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5 mm		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua freático	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 Litros/min	10 - 25 Litros/min	25 - 125 Litros/min	> 125 Litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación	15	10	7	4	0		



Ajustes la orientación de las discontinuidades						
Orientación del rumbo y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Regular	Desfavorable	Muy desfavorable
Puntaje	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-20	-50	-60

Tipos de macizos rocosos determinados a partir de la evaluación total					
puntuación	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20
Tipo de roca	I	II	III	IV	V
Descripción	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala

Significado de los tipos de roca					
Tipo de roca	I	II	III	IV	V
Tiempo medio de sostén	20 años, claro de 15 m	1 año, claro de 10 m	1 semana, claro de 5m	10 horas, claro de 2.5 m	30 min, claro de 1 m
Cohesión del macizo rocoso (KPa)	>400	300 – 400	200 - 300	100 - 200	<100
Angulo de fricción del macizo rocoso (°)	>45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	<15

Fuente: Clasificación geomecánica RMR, (Bieniawski. 1989).

Tabla 49

Parámetro de Clasificación RMR para Estación – 2

Parámetros		ESCALA DE VALORES							
1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	carga puntual	> 10 MPa	10 - 4 MPa	4 - 2 MPa	2 - 1 Mpa	Compresión Simple (Mpa)		
		Compresión simple	> 250 MPa	250 - 100 Mpa	100 - 50 MPa	50 -25 Mpa	25 - 5	5 - 1	< 1
	Puntuación	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.006 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Ninguno	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	4	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5 mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
Puntuación	6	5	3	1	0				
5	Agua freático	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 Litros/min	10 - 25 Litros/min	25 - 125 Litros/min	> 125 Litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación	15	10	7	4	0		



Ajustes la orientacion de las discontinuidades						
Orientacion del rumbo y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Regulares	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntaje	Tuneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-20	-50	-60

Tipos de macizos rocosos determinados a partir de la evaluacion total					
Puntuacion	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20
Tipo de roca	I	II	III	IV	V
Descripcion	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala

Significado de los tipos de roca					
Tipo de roca	I	II	III	IV	V
Tiempo medio de sosten	20 años, claro de 15 m	1 año, claro de 10 m	1 semana, claro de 5m	10 horas, claro de 2.5 m	30 min, claro de 1 m
Cohesion del macizo rocoso (KPa)	>400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	<100
Angulo de friccion del macizo rocoso (°)	>45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	<15

Fuente. Clasificación geomecánica RMR, considerando (Bieniawski.1989).

Tabla 50

Parámetro de Clasificación RMR para Estación – 3

Parámetros		ESCALA DE VALORES							
1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	carga puntual	> 10 MPa	10 - 4 MPa	4 - 2 MPa	2 - 1 Mpa	Compresión Simple (Mpa)		
		Compresión simple	> 250 MPa	250 - 100 Mpa	100 - 50 MPa	50 -25 Mpa	25 - 5	5 - 1	< 1
	Puntuación	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.006 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Ninguno	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	4	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando > 5 mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua freático	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 Litros/min	10 - 25 Litros/min	25 - 125 Litros/min	> 125 Litros/min		
		Relación: Presión de agua/Tensión principal mayor	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación	15	10	7	4	0		



Ajustes la orientación de las discontinuidades						
Orientación del rumbo y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Regulares	Desfavorables	Muy desfavorables
Puntaje	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-20	-50	-60

Tipos de macizos rocosos determinados a partir de la evaluación total					
Puntuación	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 20
Tipo de roca	I	II	III	IV	V
Descripción	Muy buena	Buena	Regular	Mala	Muy mala

Significado de los tipos de roca					
Tipo de roca	I	II	III	IV	V
Tiempo medio de sosten	20 años, claro de 15 m	1 año, claro de 10 m	1 semana, claro de 5m	10 horas, claro de 2.5 m	30 min, claro de 1 m
Cohesión del macizo rocoso (KPa)	>400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	<100
Angulo de fricción del macizo rocoso (°)	>45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	<15

Fuente. Clasificación geomecánica RMR, considerando (Bieniawski.1989).

La interpretación se basa en el método de Bieniawski (1989), para determinar la clasificación del macizo rocoso de cada talud en estudio, teniendo en cuenta los parámetros como: carga puntual, compresión simple, RQD, separación entre diaclasas, longitud de las discontinuidades, abertura, rugosidad, relleno, alteración, presencia del agua y la orientación de las discontinuidades.

5.1.2.3. Clasificación con el GSI

Para estimar el valor del GSI, nos basamos en el postulado de (Hoek y Brown, 1997), donde se toma en cuenta el grado de fracturación y estado de las juntas.

Tabla 51

Clasificación de GSI

Estación	N° de Familias	Estructura (RQD 50 – 75%)	Condiciones del frente 60 - 50	GSI
229+180 - 229+230	Familia 1 Familia 2 Familia 3	13	51	BI/I
231+280 - 231+334	Familia 1 Familia 2 Familia 3 Familia 4	13	54	BR/M
231+400 - 231+460	Familia 1 Familia 2 Familia 3	13	53	BR/M

5.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUD

Para poder evaluar el talud realizamos una serie de mapeos in situ tanto ensayos en laboratorio, considerando la topografía del sitio, la geología, la geomecánica, la resistencia de los materiales, a fin de conocer parámetros que nos permite conocer el estado de cada talud.

Para definir si un talud presenta inestabilidad o si este es estable es necesario conocer el factor de seguridad, la importancia dependerá del tipo de estructura.

Nuestro proyecto de investigación abarca tres zonas las cuales consideramos importantes ya que los taludes son bastante dinámicos sobre todo en épocas de avenida, para ello los factores de seguridad estáticos obtenidos son: 1.4 para la primera estación, 1.3 para para segunda estación y 1.4 para la tercera estación, en condiciones pseudoestático se tiene: 1.0 para la primera estación, 1.1 para la segunda estación y 1.2 para la tercera estación.



5.2.1. Método Empírico

Existen tablas, cuadros, ábacos, figuras que nos facilitan interpretar y determinar la situación de estabilidad de un talud, estos métodos nos llevan a resultados muy próximos a la realidad, así mismo nos permite determinar el modo de falla que se pueda presentar.

El análisis cinemático permitió identificar los modos de falla existentes en cada talud, y estos son de tipo cuña.

Los métodos de equilibrio límite para el cálculo de estabilidad de taludes son los más utilizados en la práctica común, debido a su sencillez, y porque el valor del coeficiente de seguridad obtenido no dista demasiado del valor real.

5.2.2. Método de Análisis Cinemático

Este método es muy importante puesto que nos permite realizar el análisis estructural desde la toma de actitudes en campo, para conocer la concentración polos, diagrama de familias, diagrama de planos y modos de fallas. Para realizar este análisis emplearemos el programa Dips.

Tabla 52

Descripción fallas estructurales de estereograma del software Dips.

Fallas estructurales de estereograma de Software Dips v.6.008	Valores		
	Estación 1	Estación 2	Estación 3
Numero de datos total (Dip/DipDir)	51	54	60
Familia de discontinuidades principales 01 (Dip/DipDir)	77/12	51/176	77/31
Familia de discontinuidades principales 02 (Dip/DipDir)	76/115	48/271	39/123
Familia de discontinuidades principales 03 (Dip/DipDir)	35/292	58/59	46/298
Familia de discontinuidades principales 04 (Dip/DipDir)	-	80/337	-
Altura del talud (m)	51 m	54 m	60 m
Pendiente del talud (°)	75°	75°	82°
Dirección de buzamiento del talud (Dip/DipDir)	255	210	185
Angulo de fricción (°)	28°	30°	30°

5.2.2.1. Ruptura por Cuña

Para el análisis del método estereográfico de rotura por cuña, el software Dips v. 6.008 requiere plotear los polos para posteriormente generar los planos de cada discontinuidad, las intersecciones de planos que se presenten en la zona crítica, determinan el tipo de falla de rotura por cuña.

En el presente estudio se determina que el tipo de falla para las tres estaciones son de tipo cuña, la representación estereográfica se presenta en el Anexo 7.

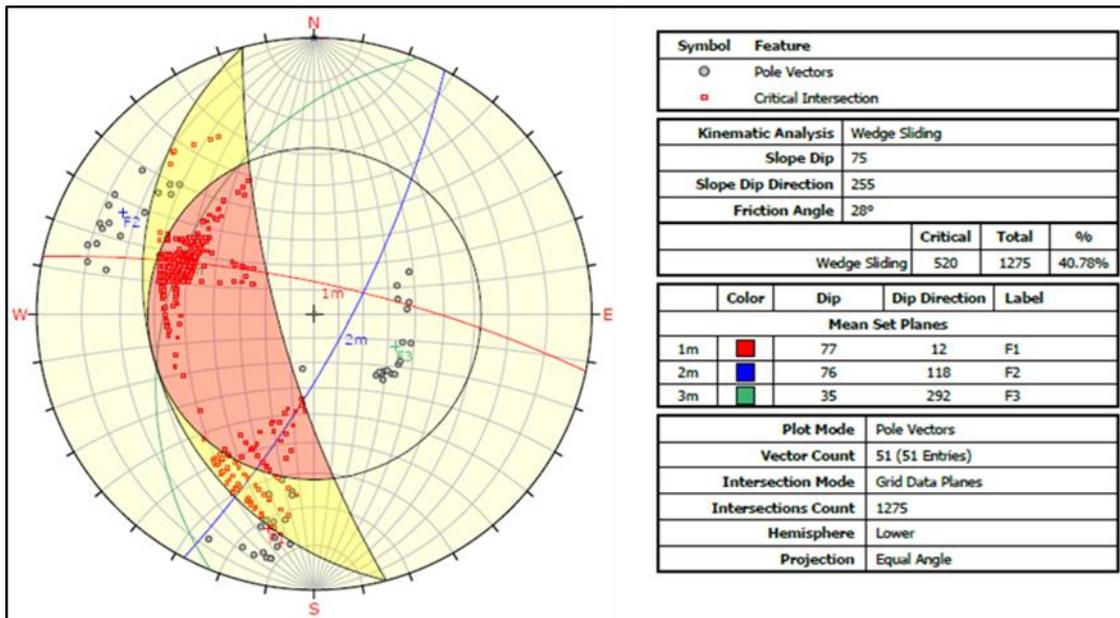


Figura 30: Falla de tipo cuña entre la familia 1 la familia 3, estación 1.

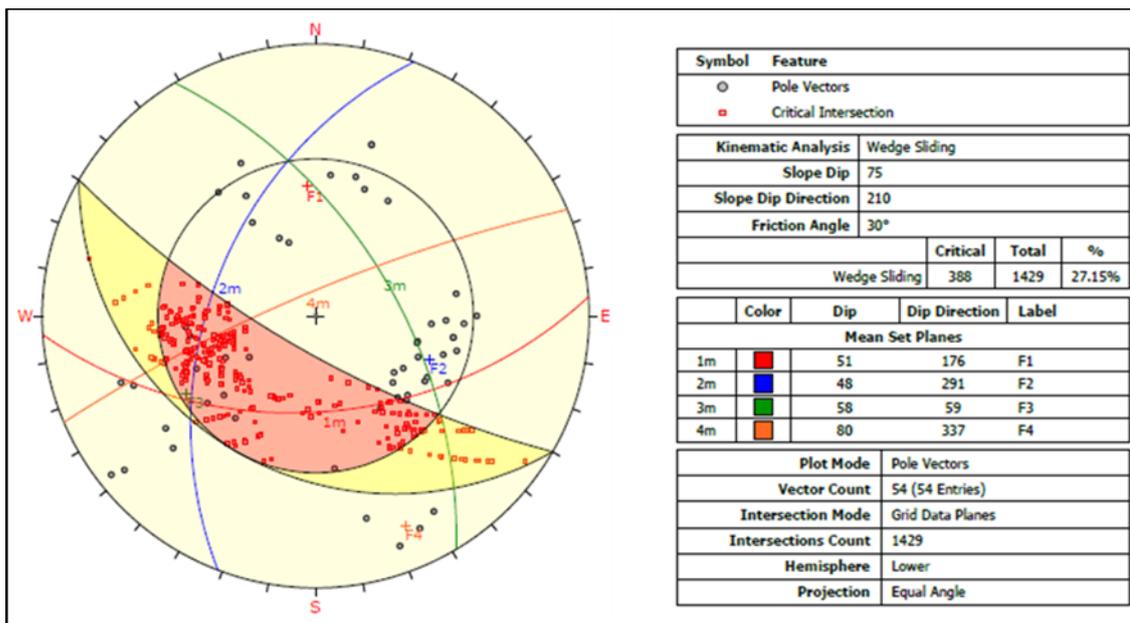


Figura 31: Falla de tipo cuña entre la familia 1 la familia 2, estación 2.

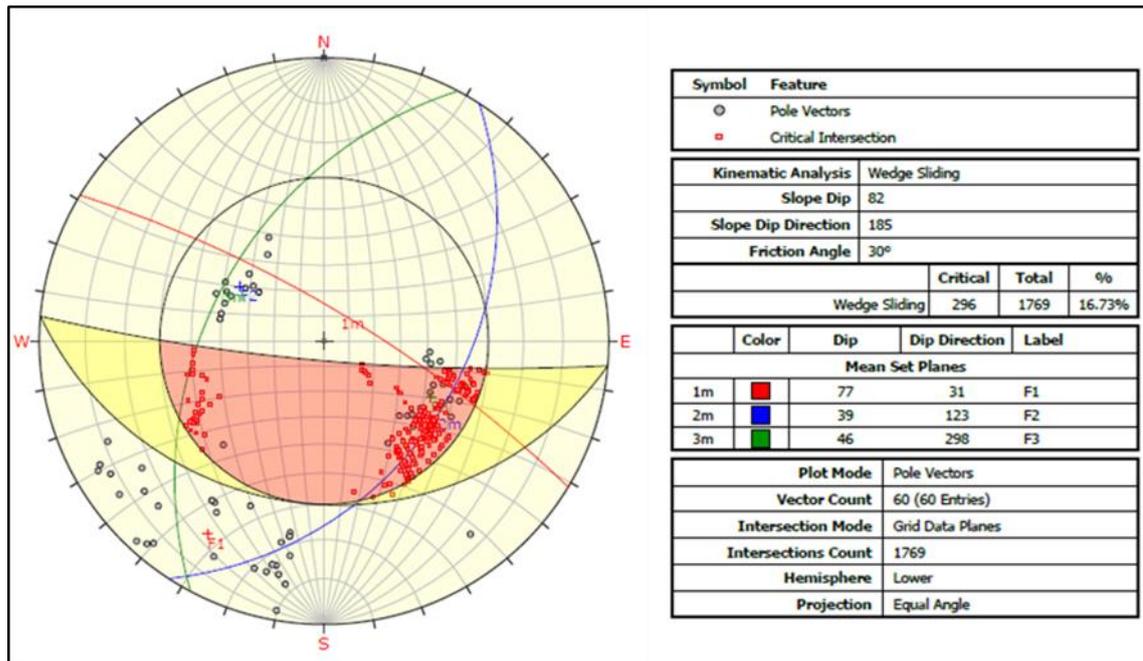


Figura 32: Falla de tipo cuña entre la familia 1 la familia 2, estación 3.

5.2.2.2. Ruptura Planar

Para identificar la posibilidad de una falla de modo planar se empleó el Software Dips v. 6.008, para este tipo de falla se consideró restricciones de límites laterales de 20°, generando una zona crítica determinante para el modo planar, los polos ploteados que coincidan en la zona crítica indican la probabilidad de que suceda falla de este tipo.

En la estación geomecánica 2 existe una probabilidad baja de que suceda una ruptura de tipo planar, ya que se tiene 5 polos que coinciden en la zona crítica haciendo el 9.26% del total de polos ploteados, la presentación estereográfica se adjunta en el Anexo 7.

5.2.2.3. Ruptura por Vuelvo

En la estación geomecánica 2 se puede observar la posibilidad de que ocurra este tipo de falla, ya que se tiene 3 de los 15 polos ploteados que coinciden en la zona crítica haciendo un 20% de probabilidad de que la familia 3 pueda provocar un vuelco. El análisis del método estereográfico se presenta en el Anexo 7.



5.2.2.4. Ruptura por vuelco directo

Considerando los 1769 planos ploteados por el Dips para la estación 3, se puede observar que 139 de ellos intersectan en la zona crítica, haciendo un 7.86% de probabilidad de que ocurra un fallamiento por vuelco directo. El análisis del método estereográfico se presenta en el Anexo 7.

5.2.3. Método de Equilibrio Limite o Analítico

Para la investigación estos métodos de análisis son utilizados generalmente en los análisis de estabilidad en roca estructuralmente controlada, es decir la estabilidad del talud es controlada por la resistencia que ofrecen las estructuras, es así que calculamos los valores de resistencia para cada uno de las familias de discontinuidades tomando en consideración el criterio de resistencia de Barton. Para el presente estudio se realizó el análisis de estabilidad para el modo de falla por cuña, con la ayuda del software Swedge v. 4.0, tomando en consideración los resultados del análisis cinemático presentados en el Anexo 7.

5.2.4. Método de Estabilidad con Software Swedge v.4.0

Swedgwe v.4.0 es un programa que estudia la estabilidad de cuñas superficiales en taludes rocosos a partir de su geometría y propiedades de la junta pudiéndose calcular su factor de seguridad, para el análisis probabilístico es necesario usar además del peso y dimensiones de la cuña. Es posible también modelizar los efectos de la presencia de agua, y los de fuerzas desestabilizadoras, como son la sísmica o las externas, permite la visualización en 3D de la cuña formada por dos planos de discontinuidad que se cortan, la superficie del talud.



VI CONCLUSIONES

Tras el análisis geológico-geomecánico podemos concluir que las rocas que componen los taludes son de la Formación Ananea y la Formación Sandía, llegándose a determinar cómo rocas de clase III y de calidad media, Con: RQD1 = 66, RQD2 = 70, RQD3 = 66; RMR1 = 56, RMR2 = 55, RMR3 = 52; GSI1 = 51, GSI2 = 54 y GSI3 = 53.

De acuerdo a los ensayos realizados en laboratorio se determina que las rocas tienen una densidad que varían de 2.68 g/cm^3 a 2.76 g/cm^3 , la resistencia a compresión simple de 91.5 MPa a 94.13 MPa, y la resistencia a la carga puntual de 1.71MPa a 6.72MPa.

Mediante el análisis cinemático por el programa Dips se pudo establecer que: Para la estación geomecánica 1, se tiene 3 familias de discontinuidades, para la estación geomecánica 2 se tiene 4 familias de discontinuidades y para la estación 3 se tiene 3 familias de discontinuidades; asimismo el análisis por el método estenográfico muestra un potencial de deslizamiento de tipo cuña en las tres estaciones geomecánicas.

El factor de seguridad se calculó mediante el software Swedge, siendo estos los valores: en condiciones estáticas se tiene: FS1= 1.4, FS2 = 1.3, FS3 = 1.4, para condiciones pseudoestáticas: FS1= 1.0, FS2 = 1.1, FS3 = 1 respectivamente, en conclusión, los taludes en estudio son inestables sobre todo en épocas de fuerte avenida.



VII RECOMENDACIONES

Realizar un estudio técnico para estabilizar y evitar deslizamientos en el trayecto entre los kilómetros 229 al kilómetro 231 de la carretera Sandía a Quiquira.

Efectuar ensayos que permitan conocer las propiedades físicas y mecánicas de las rocas, para obtener valores más precisos.

Realizar un sistema de sostenimiento proyectado con malla entre 50 a 90mm de espesor más empernado sistemático.

Se recomienda realizar zanjas de coronación, mantenimientos periódicos como desquinchado de roca suelta en los taludes.

Realizar un estudio de estabilidad de taludes tanto en roca como en suelos desde la localidad de Cuyucuyo hasta el Distrito de Quiquira.



VIII REFERENCIAS

- Arzúa, J. & Alejano, L. (2016). *Mecánica De Rocas. Fundamentos e Ingeniería de Taludes. España.*
- Alvarez, A. F. (2015). *Analisis de peligros del distrito de Sandia.*
- Barton, N. (2013). *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. England.*
- Barton, N. (1982). *Effects of Block Size in the Shear Behaviour of Blocky Rock. 23 Congreso de Estados Unidos de Mecánica de Rocas. Berkeley.*
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Ingeineering Rock Mass Classifications. New York.*
- Bieniawski, Z. T. (1973). *engineering classification of jointed rock masses. South African.*
- Bieniawski, Z. T. (1979). *The geomechanics classification in rock engineering applications. Proc. 4th International Conference on Rock Mechanics. Montreaux. Balkema.*
- Carnero, E. (2011). *Texto universitario, Ingeniería geológica UNA Puno. Perú.*
- Díaz, S. J. (1998). *Deslizamientos Y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Bucaramanga, Colombia.*
- Eberhardt, E. (2003). *Rock Slope Stability Analysis. University of British Vancouver, Canadá.*
- Franklin & Dusseault. (1989). *Rock Engineering, Volumen 1. California.*
- Gonzáles de Vallejo, L. I. (2006). *Ingeniería Geológica. Madrid, España.*
- González de Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería Geológica (2da ed.). Madrid, España.*
- Gobierno regional Puno. (2012). *Plan de contingencias por sismo región Puno.*
- Herrera, J. H. (2007). *Diseño de Explotaciones de Cantera. Madrid, España.*
- Hoek, E. & Bray, J.W. (1981). *Rock Slope Engineering. Revised 3rd edition. Londres.*
- Hoek, E. & Kaiser, P. K. & Bawden, W. F. (1995): *Support of Underground Excavations in Hard Rock. Balkema.*
- Hoek, E. & Bray, J. W. (1991). *Rock Slope Engineering (4ta ed.). New York.*
- Hoek, E. & Brown, E. T. (1997). *Practical estimates of rock mass strength. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Elsevier.*



- Hudson, J. A. & Harrison, J. P. (2000). Engineering Rock Mechanics an Introduction to the Principles. Pergamon, London.*
- INGEMMET. (2021). Geología de los cuadrángulos de Sandía, san Ignacio, Limbani. Lima, Perú.*
- Manrique, V. L. & Tigrero, P. (2019). Análisis de estabilidad de taludes a partir de la evaluación geomecánica del macizo rocoso en Anconcito, Provincia de Santa Elena. Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador.*
- Miller, R.P. (1966). Engineering classification and index properties for intact rock. Ph. D. thesis. Universidad de Illinois, EEUU.*
- Patton & Deere. (1970). Significant geologic factors in rock slope stability. Proc. Symp. on Planning Open Pit Mines. Balkema.*
- Peres, F. (1993). About LNEC Experience on Scale Effects on the Deformability of Rocks. Acta del Cong. Int. de Efectos de Escala en Macizos Rocosos. Lisboa, Portugal.*
- Ramírez, O. P. & Alejano, M. L. (2004). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.*
- Ramírez, O. P. & Alejano, M. L. (2007). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.*
- Serrano, V.V. (2015). Evaluación del riesgo de desastres del distrito de Sandía, Puno, Perú.*
- Wyllie, D. C., Mah, C. W. (2004). Rock Slope Engineering (4ta ed.). New York.*
- Yupanqui, B. M. (2019). Tesis: Diseño preliminar para taludes en roca en el tramo III – Sina Yanahuaya. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.*



ANEXOS