

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**“CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y MODOS DE FALLA ESTRUCTURAL
EN EL TALUD EN ROCA DEL CERRO ESPINAL JULIACA”**

TESIS

PRESENTADA POR:

BACH. FREDY ALONSO, VALERIANO NINA

PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO-PERÚ

2015

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**TESIS****“CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y MODOS DE FALLA ESTRUCTURAL
EN EL TALUD EN ROCA DEL CERRO ESPINAL JULIACA”****PRESENTADA POR:****BACH. FREDY ALONSO, VALERIANO NINA****A LA COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE MINAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
COMO REQUISITO PARA OPTAR EL TÍTULO DE:****INGENIERO DE MINAS****APROBADA POR LOS JERADOS:****PRESIDENTE**

:

Dr. Ing. JUAN, MAYRUA PALOMINO

PRIMER MIEMBRO

:

M.Sc. Ing. ESTEBAN, AQUINO ALANOCA

SEGUNDO MIEMBRO

:

Ing. ARTURO, CHAYÑA RODRÍGUEZ

DIRECTOR DE TESIS

:

M.Sc. Ing. ESTEBAN, MARÍN PAUCARA

ASESOR DE TESIS

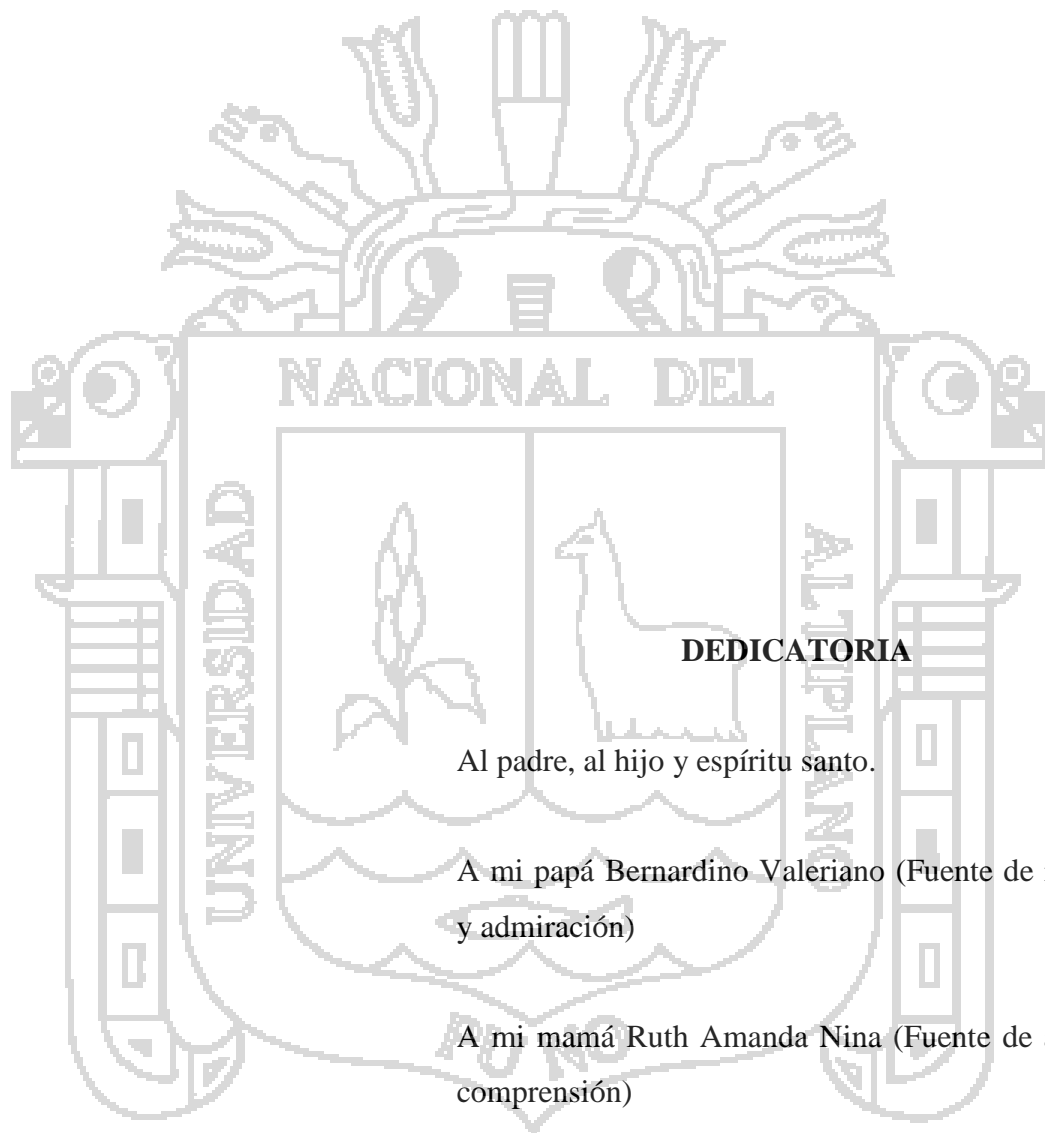
:

Ing. AMÉRICO, ARIZACA AVAJOS

PUNO - PERÚ**2015**

Área: Ingeniería de minas

Tema: Mecánica de rocas, geomecánica y geotécnica



DEDICATORIA

Al padre, al hijo y espíritu santo.

A mi papá Bernardino Valeriano (Fuente de respeto y admiración)

A mi mamá Ruth Amanda Nina (Fuente de amor y comprensión)

A mi hermano Evan Bernard (Fuente de ternura e inspiración)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los entes superiores.

A mis padres Bernardino Valeriano Huaman y Ruth Amanda Nina Nina, por todo lo que me han dado durante toda mi vida, les estaré eternamente agradecido.

A mis profesores compañeros y amigos de la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas y Escuela Profesional de Ingeniería de Geológica.

A mis amigos del laboratorio de Mecánica de Rocas y Suelos de la Facultad de Ingeniería de Minas, Wilson Suaña, Stive Velarde.

A los profesores doctores Luis Jordá Bordehore, Juan Mayhua Palomino y Erasmo Carnero Carnero, por la amistad, recomendaciones, orientaciones y ayuda.

RESUMEN

El presente trabajo surge de la necesidad de resolver problemas relacionados a la estabilidad de taludes en roca, con la realización de dos importantes temas relacionados a este como son; la caracterización geotécnica y la identificación de los modos de falla estructuralmente controlados en un talud de roca, para los cual se utilizó una metodología que involucra el trabajo de campo, laboratorio y gabinete. En el trabajo de campo se realizaron mapeos geológicos, caracterizaciones del macizo rocoso por ventanas, toma de muestras de roca para la realización de ensayos de laboratorio, tratamiento y procesamiento de datos y finalmente el análisis e interpretación de resultados. Producto de la caracterización geotécnica se tienen las siguientes características en el talud del Cerro Espinal. Las estructuras tienen un RQD de 73.93, un RMR de 58.5 y un GSI de 53.5, dentro de las características geológicas tenemos que la litología presente en el talud está constituida por Fonolitas del grupo Mitu, las estructuras más características son las discontinuidades, según la orientación de las discontinuidades se han definido 3 familias de discontinuidades principales y una aleatoria, el espaciado de las discontinuidades en promedio es moderado con una persistencia media, la apertura de las estructuras es muy variable, las discontinuidades presentan superficies onduladas y ligeramente rugosas, la meteorización presente es de segundo grado, con muy poca presencia de agua, los rellenos en las discontinuidades son bandos, el ángulo de fricción promedio es 56.23° este ángulo es relativamente alto por lo cual este talud sigue estable, la resistencia a la compresión simple de la roca intacta tiene como valor promedio de 65.43 MPa y un índice de carga puntual de 2.90 MPa consideramos que la roca es de regular a buena resistencia. Se identificaron los principales modos de falla en el talud con la metodología de proyecciones estereográficas en el cual se muestra claramente un porcentaje mayor de estructuras favorables para la variedad de modos de falla por vuelco, teniendo los siguientes valores; falla por vuelco directo de 2.81%, falla por vuelco oblicuo 31.49% y falla por vuelco flexural de 5.98%. Estos resultados se reflejan en las estructuras presentes en el talud del Cerro Espinal. El análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite para un modo de falla por vuelco en condiciones estáticas es igual a un factor de seguridad de 1.199 y en condiciones pseudoestáticas el factor de seguridad es igual a 1.084 estos valores son aceptables debido a la continua caída de bloques grandes de las partes altas hacia el pie del talud.

Palabras clave: Caracterización, discontinuidad, macizo rocoso, roca intacta, meteorización, factor de seguridad.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	5
ÍNDICE GENERAL.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS Y NOMENCLATURAS.....	14
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	15
1.2. Formulación del problema.....	16
1.3. Objetivos de la investigación.....	16
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	
2.1. Antecedentes de la investigación.....	18
2.2. Bases teóricas.....	20
2.2.1. Consideraciones generales sobre estabilidad de taludes.....	20
2.2.2. Metodologías de los estudio de estabilidad de taludes.....	21
2.2.3. Caracterización geológica.....	22
2.2.4. Caracterización estructural.....	25
2.2.5. Caracterización geotécnica.....	44
2.2.6. Caracterización hidrogeológica.....	58
2.2.7. Análisis de estabilidad.....	59
2.2.8. Principales modos de inestabilidad.....	59
2.2.9. Fallas con control estructural.....	61
2.2.10. Fallas sin control estructural.....	64
2.2.11. Índice SMR (Slope Mass Rating).....	65

2.2.12. Factores que afectan la estabilidad de taludes.....	66
2.2.13. Ensayos de laboratorio.	66
2.3. Definiciones conceptuales.....	71
2.3.1. Macizo rocoso.	71
2.3.2. Matriz rocosa.....	71
2.3.3. Discontinuidad.	71
2.3.4. Orientación.....	72
2.3.5. Meteorización.....	72
2.3.6. Alteración.....	72
2.3.7. Factor de seguridad.....	72
2.4. Hipótesis.....	73
2.4.1. Hipótesis general.....	73
2.4.2. Hipótesis específicas.....	73
 CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN 	
3.1. Diseño metodológico.	74
3.1.1. Revisión, recopilación y elaboración de informaciones preliminares.	74
3.1.2. Selección, establecimiento de condiciones y caracterización del sitio.	75
3.1.3. Caracterización geológica.	75
3.1.4. Caracterización estructural.....	75
3.1.5. Caracterización Geotécnica.....	75
3.1.6. Ensayos de laboratorio.	75
3.1.7. Análisis de los modos de falla en taludes.....	76
3.2. Población.....	76
3.3. Muestra.....	76
3.4. Variables.	76
3.4.1. Variables independientes.	76

3.4.2. Variables dependientes.....	77
3.4.3. Operacionalización de variables.	78
3.5. Técnicas de recolección de datos.	78
3.5.1. Investigaciones de campo.	78
3.5.2. Ensayos de laboratorio.	79
3.6. Técnicas para el procesamiento de la información.	79

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Generalidades.....	80
4.1.1. Ubicación.	80
4.1.2. Accesibilidad.....	80
4.2. Aspectos climáticos.....	81
4.2.1. Temperatura.....	81
4.2.2. Precipitación.....	81
4.3. Caracterización geológica.....	81
4.3.1. Descripción geológica regional.....	81
4.3.2. Descripción geológica local.....	82
4.3.3. Contactos.....	84
4.3.4. Geomorfología.....	84

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización estructural.....	87
5.1.1. Estructuras mayores.	87
5.1.2. Estructuras menores.	88
5.1.3. Familias de discontinuidades y orientación de juntas.....	88
5.1.4. Descripción cuantitativa de las estructuras.	89
5.1.5. Espaciamiento de las estructuras.....	90

5.1.6. Continuidad o persistencia.....	91
5.1.7. Apertura de las estructuras.....	91
5.1.8. Rugosidad.....	92
5.1.9. Meteorización de las juntas.....	93
5.1.10. Agua en discontinuidades.....	94
5.1.11. Relleno.....	95
5.1.12. Resistencia de las paredes de las discontinuidades.....	95
5.1.13. Ángulo de fricción básica de discontinuidades.....	96
5.2. Caracterización geotécnica.....	97
5.2.1. Propiedades de la roca intacta.....	98
5.2.2. Clasificación geotécnica del macizo rocoso.....	101
5.3. Principales modos de inestabilidad.....	102
5.4. Fallas con control estructural.....	103
5.5. Análisis de estabilidad.....	108
5.6. Discusión.....	108
CONCLUSIONES.....	111
RECOMENDACIONES.....	113
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	: Descripción del grado de meteorización	24
Tabla 2.2	: Descripción del espaciamiento de las estructuras.....	35
Tabla 2.3	: Descripción de la persistencia de las estructuras.....	35
Tabla 2.4	: Descripción de la apertura de las estructuras.....	40
Tabla 2.5	: Descripción de la granulometría del material de relleno	41
Tabla 2.6	: Descripción de la condición de humedad de las estructuras	43
Tabla 2.7	: Estimación en campo de la resistencia de la roca mediante un martillo de geólogo y una navaja.	44
Tabla 2.8	: Guías para evaluar el parámetro D en taludes	53
Tabla 4.1	: Delimitación del área de investigación.....	80
Tabla 5.1	: Datos de entrada para el análisis de los modos de falla estructural a través de estereogramas en el software Dips v.6.0 de Rocscience.	104
Tabla 5.2	: Resultados de los modos de falla general según porcentajes de estructuras favorables.....	107
Tabla 5.3	: Resultados de los modos de falla en porcentajes tomando en consideración una superficie de desprendimiento.	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	: Etapas para realizar un estudio de estabilidad de taludes.....	21
Figura 2.2	: Esquema ilustrativo de los parámetros que describen las estructuras presentes en el macizo rocoso.	26
Figura 2.3	: Terminología para definir a orientación de las discontinuidades, vista isométrica del plano (Buzamiento y Dirección de buzamiento).....	28
Figura 2.4	: Terminología para definir a orientación de las discontinuidades, vista en planta del plano.....	29
Figura 2.5	: Representación estereográfica de un plano en una proyección semiesférica de hemisferio inferior.....	30
Figura 2.6	: Representación estereográfica de una línea en una proyección semiesférica de hemisferio inferior.....	31
Figura 2.7	: Efecto de la corrección de Terzaghi en la definición de los contornos de concentración de polos de estructuras intermedias (juntas, diaclasas y vetillas) mapeadas en un dominio estructural de una mina.....	32
Figura 2.8	: Roseta que muestra la distribución de rumbos de estructuras intermedias (juntas, diaclasas y vetillas) mapeadas en un dominio estructural de una mina.....	33
Figura 2.9	: Determinación del espaciamiento en base a observaciones en un afloramiento de roca que muestra 3 sets o familias de estructuras.....	34
Figura 2.10	: Presentación de las mediciones del espaciamiento de un set estructural en forma de histograma.....	34
Figura 2.11	: Esquema que ilustra las condiciones de término que pueden presentar las estructuras de un macizo rocoso.....	36
Figura 2.12	: Caracterización de la rugosidad de las estructuras según las recomendaciones de la ISRM.....	37
Figura 2.13	: Perfiles de rugosidad y valores asociados del coeficiente JRC.....	38
Figura 2.14	: Ábaco para evaluar el coeficiente JRC en función del largo del perfil de la estructura y la amplitud máxima de las asperezas de ésta.....	39
Figura 2.15	: Diagramas que muestran la definición de la apertura de las discontinuidades y el ancho de las discontinuidades rellenas. De izquierda a derecha discontinuidad cerrada, discontinuidad abierta y discontinuidad rellena.	40

Figura 2.16	: Ábaco para la obtención de la resistencia a compresión simple de una roca o de los labios de una discontinuidad a partir de medidas con el martillo Schmidt tipo L.....	46
Figura 2.17	: Frecuencia relativa de uso de distintos métodos de calificación y clasificación geotécnica de macizos rocosos en minas a tajo abierto y subterráneas.....	47
Figura 2.18	: Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos fracturados.	51
Figura 2.19	: Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos estratificados y heterogéneos.....	52
Figura 2.20	: Ajuste de una envolvente lineal a la envolvente de Hoek-Brown.....	54
Figura 2.21	: Criterio lineal de Mohr-Coulomb para la resistencia peak y residual de una estructura.	57
Figura 2.22	: Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla planar.	61
Figura 2.23	: Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla por cuña.....	62
Figura 2.24	: Condición geométrica falla por cuña.....	62
Figura 2.25	: Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla por vuelco de bloques.	64
Figura 2.26	: Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla circular.....	65
Figura 2.27	: Ensayo de carga puntual simple cilíndrica Franklin a, b y c. Aplicación de la carga puntual en el núcleo; d, e y f formas de aplicar la carga para el ensayo de carga puntual axial.....	68
Figura 2.28	: Ensayo de carga puntual simple cilíndrica Louis. a. Aplicación de la carga en el núcleo; b y c formas aceptadas de aplicar la carga para el ensayo de carga puntual diametral.	69
Figura 5.1	: Histograma del espaciado de las estructuras en el talud.....	90
Figura 5.2	: Histograma de las medidas de persistencia de las estructuras en el talud del Cerro Espinal.	91
Figura 5.3	: Histograma de la apertura de las discontinuidades en el talud del Cerro Espinal.	92
Figura 5.4	: Histograma de la rugosidad de las estructuras en el talud del Cerro Espinal.	93

Figura 5.5	: Histograma de grados de meteorización de las juntas presentes en las estructuras del talud del Cerro Espinal.	94
Figura 5.6	: Histograma de la presencia de agua en las estructuras en el talud del Cerro Espinal.	94
Figura 5.7	: Histograma de los tipos y dimensiones de rellenos presentes en las estructuras en el talud del Cerro Espinal.	95
Figura 5.8	: Polígono de frecuencias normalizado de los datos de campo de la resistencia a la compresión simple de los labios de las discontinuidades.	96
Figura 5.9	: Polígono de frecuencias normalizado de los datos de campo de Till Test en el talud del Cerro Espinal.	97
Figura 5.10	: Polígono de frecuencias normalizado de las densidades de rocas presentes en el talud del Cerro Espinal.	98
Figura 5.11	: Polígono de frecuencias normalizado de los valores de la resistencia a la compresión uniaxial de roca intacta en laboratorio.	99
Figura 5.12	: Polígono de frecuencias normalizado de los valores de índice de carga puntual.	100
Figura 5.13	: Polígono de frecuencias normalizado de los valores de RQD.	101
Figura 5.14	: Polígono de frecuencias normalizada de los valores de la clasificación RMR.	102
Figura 5.15	: Polígono de frecuencias normalizada de los valores de la clasificación GSI.	103

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS Y NOMENCLATURAS

ASTM : *American Section of the International Association for Testing Materials.*

E : Este.

GSI : *Geological Strength Index.*

ISRM : *International Society for Rock Mechanics.*

JRC : *Joint Roughness Coefficient.*

MPa : Mega Pascales.

N : Norte.

RQD : *Rock Quality Designation.*

RMR : *Rock Mass Rating.*

S : Sur.

UCS : *Uniaxial Compressive Strength.*

W : Oeste.





CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción de la realidad problemática.

En el ámbito de la ingeniería civil y de la minería es usual encontrar problemas relacionados a la estabilidad de taludes, ya sean estos suelos o macizos rocosos. La identificación de los modos de falla en un talud en roca es primordial para un posterior análisis de estabilidad del talud.

Los trabajos realizados en el Cerro Espinal Juliaca durante varios años con el objetivo de extraer materiales de lastre utilizados en diferentes construcciones en la ciudad de Juliaca y pueblos aledaños, han generado un gran frente de talud de roca, desde el punto de vista de la ingeniería de rocas, este género un cambio de las condiciones naturales y de estabilidad en las que se encontraba antes de la explotación. En el talud del Cerro Espinal durante el paso de los años se vienen identificando una serie de caída de rocas de las partes más altas del talud hacia la base del talud, estos caídos generalmente relacionados con un control estructural definido por la orientación de las discontinuidades presentes en el talud. La presencia de una grieta de tracción en la parte superior de talud nos hace creer que en algún momento este podría inestabilizarse a gran escala.

La inestabilidad del talud del Cerro Espinal, podría ocasionar problemas divididos en tres aspectos; aspecto medioambiental, como la contaminación visual y polución de este material en los lugares aledaños; aspecto económico, destrucción de estructuras civiles en la parte superior del talud, costo de remoción de los materiales caídos y los costos de estabilización final del talud; aspecto social, la no conservación del patrimonio arqueológico del Cerro Espinal y la pérdida de vidas humanas.

La caracterización geotécnica y la identificación de los modos de falla más recurrentes contribuirán a un mejor conocimiento de la mecánica de rocas y del comportamiento de las estructuras que constituyen el Talud del Cerro Espinal Juliaca, con la aplicación de teorías, principios y herramientas geotécnicas. La presente investigación plasma a manera muy detallada la elección del método de análisis de estabilidad de taludes para el método de equilibrio límite en taludes estructuralmente controlados y así poder obtener un factor de seguridad, que nos ayudara a entender mejor el problema.

1.2. Formulación del problema.

Con la presente investigación pretendemos dar respuesta a las siguientes interrogantes.

Pregunta general.

¿Cómo es la caracterización geotécnica y los modos de falla estructural en el talud de roca del Cerro Espinal Juliaca?

Preguntas específicas.

- ¿Cómo es la caracterización geotécnica en el talud de roca del Cerro Espinal Juliaca?
- ¿Cuáles son los modos de falla estructural en el talud de roca del Cerro Espinal Juliaca?

1.3. Objetivos de la investigación.

Objetivo general.

Realizar una caracterización geotécnica e identificar los modos de falla estructural en el talud de roca del Cerro Espinal Juliaca.

Objetivos específicos.

- Caracterizar geotécnicamente el talud de roca del Cerro Espinal Juliaca.
- Identificar los modos de falla estructural en el talud de roca del Cerro Espinal Juliaca.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación.

- (Cabrera Laura, 2005), En su tesis de título *Estudio de estabilidad de taludes del tajo Suro Sur y Suro Norte en la mina la virgen* presentada en la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano en sus conclusiones menciona. - Conclusión N° 02: “La recolección de la información estructural y de las características geotécnicas del macizo rocoso de la zona de estudio, se realizó a través de un mapeo geológico – geotécnico sobre la superficie de los cortes efectuados por la explotación actual, seguido de un mapeo estructural mediante el empleo del método de línea de detalle y método de celdas”. - Conclusión N° 04: “La clasificación del macizo rocoso para cada zona investigada se realizó empleando el índice RQD, sistema RMR (Bieniawski, 1989), índice Q (Barton et, al., 1974) e índice GSI (Marino y Hoek al et. 2000), lo que ha permitido definir diez dominios estructurales”.
- (Rodriguez Copare, Morales Cabrera, & Paredes Lupaca, 2003), en el trabajo denominado *Evaluación de la estabilidad de taludes en la mina Lourdes* presentado en la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann en sus conclusiones menciona. - Conclusión N° 03: “Se levantó información estructural mediante línea de detalle; determinándose como el sistema de discontinuidades más desfavorable, en la cantera Lourdes, Configurando el riesgo

potencial de una inestabilidad por falla de corte plana. El análisis de estabilidad se desarrolló utilizando el método de equilibrio límite”.

- (Morales, 2009), En su tesis de título *Caracterización geotécnica y determinación de ángulos de talud en yacimiento Franke* presentada al Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile en sus conclusiones menciona. - Conclusión N° 01: “El UCS por unidad litológica ha sido estimado de acuerdo a ensayos de carga puntual para cada una de ellas; sin embargo existen ensayos de compresión uniaxial para tres de esas unidades (andesita porfídica, andesita porfídica amigdaloidal y ocoíta) que arrojan resultados mucho menores para este valor. Si bien no se tiene información acerca del equipamiento con el que han sido realizados ambos ensayos, sí es posible apreciar que existe una gran diferencia entre ambos métodos, y sólo considerando la desviación estándar en ambos casos se puede llegar a un valor común, pero muy alejado del promedio”.
- (García Nuñez, 2005), En su tesis de título *Análisis de estabilidad de taludes en macizos rocosos aplicando el método de elementos distintos* presentada en la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano en sus conclusiones menciona. - Conclusión N° 05: “los factores de mayor influencia en la inestabilidad del talud sureste de la mina Cuajone son la geometría del talud (altura y ángulo de inclinación), las estructuras geológicas, el nivel freático y el factor sísmico”.
- (Rodríguez Illachura, 2014), En su artículo de título *Problemas estructurales y la estabilidad de los macizos rocosos* presentado a la revista del Colegio de Ingenieros del Perú – CD Puno en sus conclusiones menciona. - Conclusión N° 01: “La evaluación de problemas estructurales en macizos rocosos, mediante proyección estereográfica, es un medio conveniente en la identificación de direcciones dominantes de discontinuidades”. - Conclusión N° 03: “La representación estereográfica permite verificar las relaciones angulares entre las direcciones dominantes de las discontinuidades y el talud propuesto”.

- (Cosillo Pinto, 1999), En su tesis de título *Consideraciones Geológico - Geotécnicas para el diseño de taludes en macizos rocosos* presentada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala en sus conclusiones menciona. - Conclusión N° 01: “La estabilidad de taludes rocosos depende en gran parte de la existencia, distribución espacial y naturaleza de planos defectuosos o discontinuidades dentro del macizo rocoso. - Conclusión N° 05: “El propósito de la recolección de datos estructurales es definir la geometría del macizo rocoso para promover una base para la escogencia más apropiada del modo de ruptura del macizo. Esta es una de las más importantes decisiones de todo el proceso de la investigación de la estabilidad de taludes, ya que la escogencia incorrecta del modo de ruptura invalidaría el análisis realizado”. - Conclusión N° 07: “La utilización de la platilla estereográfica, tiende a simplificar el análisis de tipo de falla de los diversos tipos de falla en macizos rocosos, por lo que se recomienda su utilización”.

2.2. Bases teóricas.

2.2.1. Consideraciones generales sobre estabilidad de taludes.

En cualquier parte de la superficie terrestre la gravedad empuja continuamente los materiales hacia niveles inferiores. Los problemas que presenta la estabilidad de taludes, tanto naturales como excavados, han sido objeto de análisis en varios dominios de la actividad humana y con especial atención en los incluidos en la ingeniería civil. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

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. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

La distinta naturaleza de las rocas que forman los macizos rocosos implica una problemática determinada en su comportamiento ante la estabilidad de taludes. El comportamiento de un macizo rocoso generalmente depende de las características de las discontinuidades (estratificación, diaclasas, fallas, esquistosidad, etc.) que presenta, así como la litología de la matriz rocosa y su historia evolutiva. Ya que

generalmente los diferentes modos de falla que se producen en los medios rocosos siguen superficies ya existentes. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

2.2.2. Metodologías de los estudio de estabilidad de taludes.

Los estudios geológicos, geotécnicos de taludes están dirigidos al diseño de taludes estables en función de las condiciones requeridas (corto, medio o largo plazo, relación coste-seguridad, grado de riesgo aceptado, etc.) así como a la estabilización de taludes inestables. La metodología seguida en los estudios de estabilidad de taludes parte del conocimiento geológico, hidrogeológico y geomecánico del macizo rocoso o suelo. (Gonzales de Vallejo, 2002).

La investigación de una ladera, talud o deslizamiento consiste en obtener toda la información posible sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales que permitan realizar un diagnóstico de los problemas lo más preciso posible y un diseño efectivo de solución. Para el propósito de la investigación es necesario conocer cuáles son los parámetros básicos que afectan la estabilidad. (Suarez Diaz, 1998).

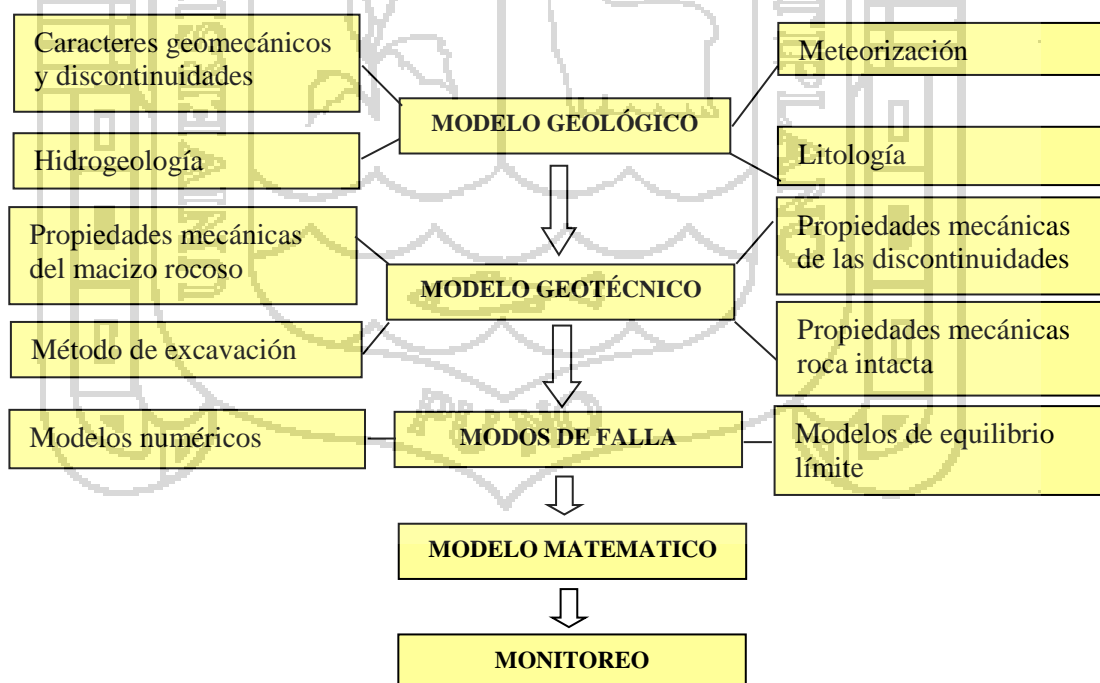


Figura 2.1 : Etapas para realizar un estudio de estabilidad de taludes.

Fuente : Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007.

Como la mayoría de los estudios geotécnicos, los de estabilidad de taludes se suelen efectuar en varias fases. La metodología que se debe de seguir es la misma en todas las fases. Un aspecto del estudio de estabilidad de un talud que se debe de resolver ya al principio, en cuanto se dispone de los datos de la investigación geológico geotécnica, es el modo de falla más probable que puede producirse en él. Para estudiar la estabilidad de un talud, las líneas a seguir son como se muestran en la Figura 2.1. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

Para encontrar las causas y modos de falla y poder cuantificar los parámetros que determinan la estabilidad de un talud, diagnosticar y diseñar las obras de estabilización se recomienda realizar un estudio que incluye las siguientes etapas:

1. Reconocimiento e identificación del sitio.
2. Análisis de la información existente.
3. Estudio de las características superficiales del sitio que permitan la caracterización topográfica y geotécnica.
4. Investigación de campo que incluye sondeos, toma de muestras, y ensayos in situ para cuantificar los parámetros del suelo.
5. Investigación de laboratorio.
6. Análisis de la información obtenida, modelación matemática y diseño.

La sociedad de deslizamientos del Japón (1996) propuso un diagrama de flujo el cual se presenta en la Anexo 01. (Suarez Diaz, 1998).

2.2.3. Caracterización geológica.

El propósito es el de relacionar la geología física regional y los eventos que conducen a la formación de los cuerpos mineralizados efectuando su descripción de los depósitos atendiendo a su génesis, distribución y la naturaleza de los suelos de recubrimiento y tipos de rocas en la zona, incluyendo los efectos de alteración y erosión. La preparación de modelo es fundamental para el proceso de diseño de los taludes y requiere un entendimiento básico de los conceptos esenciales de la geología física. (Read & Stacey, 2009).

A partir de la información de la descripción geológica regional descrita con anterioridad, se recomienda hacer una descripción geológica local. 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. (Suarez Burgoa, 2013).

La Geología generalmente, define las características o propiedades del suelo o roca. La formación geológica determina la presencia de materiales duros o de baja resistencia y las discontinuidades pueden facilitar la ocurrencia de movimientos a lo largo de ciertos planos de debilidad. Los elementos geológicos principales a estudiar son los siguientes: Formación geológica, estructura y discontinuidades, meteorización. Con los mapas geológicos se pueden obtener los parámetros geotécnicos básicos y con los topográficos se pueden conocer las pendientes, accidentes, presencia de cambios de pendiente, sistemas de drenaje y geomorfología. (Suarez Diaz, 1998).

La caracterización geológica debe permitir no solo definir la geometría de subsuperficie, en lo que dice relación con los contactos entre los diversos entes geológicos, sino también permitir una definición de los distintos tipos de unidades geotécnicas básicas que aparecen en el área de interés. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

Litología.

Descripción breve de la geología regional que explica los tipos de roca que aparecen en el área de interés. Descripción breve de cada tipo de roca, con énfasis en sus características típicas como material pétreo (dureza, degradabilidad, etc.). Estimación del posible error en la posición de los contactos litológicos (e.g. ± 50 m). (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

La buena descripción de los suelos y rocas presentes es uno de los factores más importantes para una buena investigación y esta debe hacerse por un profesional muy calificado y con gran experiencia. Desafortunadamente, existen diferentes esquemas

de descripción que varían no solamente en los términos utilizados sino también en la definición de cada uno de ellos. (Suarez Diaz, 1998).

Meteorización.

El grado de meteorización de una roca es una observación importante en cuanto se condiciona de forma definitiva sus propiedades mecánicas. Según se avanza el proceso de meteorización aumenta la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del material rocoso, al tiempo que disminuye su resistencia. La identificación del estado o grado de meteorización de la matriz rocosa se puede realizar de forma sistemática a partir de las descripciones de la Tabla 2.1 (Gonzales de Vallejo, 2002).

Tabla 2.1
Descripción del grado de meteorización.

Termino	Desripción
Fresca	No se observan signos de meteorización
Decolorada	Se observan cambios en el color original de la matriz rocosa. Es conveniente indicar el grado de cambio. Si se observa que el cambio de color se restringe a uno o algunos minerales se debe mencionar.
Desintegrada	La roca se ha alterado al estado de un suelo, manteniendose la fabrica original. La roca es friable, pero los granos minerales no estan descompuestos.
Descompuesta	La roca se ha alterado al estado de un suelo, alguno o todos los minerales estan descompuestos.

Fuente : Gonzales de Vallejo, 2002.

Alteración.

Descripción breve de los tipos de alteración que afectan a las rocas en el área de interés, con énfasis en sus propiedades efectos sobre las características típicas de estas rocas (por ejemplo un aumento en el contenido de minerales arcillosos). (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

Contacto primario – secundario.

Descripción breve del tipo de contacto, indicando si este está bien definido o si presenta una zona de transición. En este último caso puede resultar necesario subdividir la zona secundaria en un secundario propiamente tal, o “sensu strictu”, y un secundario de transición o más masivo. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

2.2.4. Caracterización estructural.

Resulta de fundamental importancia comenzar con la geología estructural a nivel distrital, para poder definir las macro-tendencias estructurales que explican el patrón estructural propio del sector que interesa, ya que de lo contrario puede resultar difícil comprenderlo y poder definir adecuadamente los distintos dominios estructurales propios de este sector. De hecho, los límites de los dominios estructurales definidos a escala mina deben corresponder a entes geológicos (contactos litológicos, estructuras principales, etc.), y el patrón estructural definido a esta escala debe poder explicarse en términos de la geología estructural distrital. Si lo anterior no se cumple, debe suponerse que la caracterización estructural presenta deficiencias, y la misma debe ser revisada. En la práctica suele ser conveniente que los geólogos a cargo de la caracterización estructural cuenten con la asesoría de un experto en geología estructural para lograr esta caracterización global, que permite explicar la condición imperante en el sector que interesa. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

El análisis estructural procura representar la orientación espacial de las diferentes estructuras geológicas, con el objeto de entender los mecanismos de deformación en el área de estudio y también pudiéndose definir una distribución de tensiones que originan las tensiones. El objetivo principal de hacer un levantamiento geotécnico, con datos geológicos y estructurales, las estructuras presentes en el macizo rocoso y obtener la orientación de todas las estructuras geológicas como fallas, juntas, diques, brechas, discontinuidades, grietas de tracción, entre otras, para que posteriormente, con esa información se realicen análisis cinemáticos para resolver problemas estructurales. (Suarez Burgoa, 2013).

Descripción cuantitativa de las estructuras.

En los métodos sugeridos por la ISRM para la descripción cuantitativa de discontinuidades en macizos rocosos se reseñan 10 parámetros que es preciso describir para lograr este tipo de caracterización (Brown (1981)). Estos parámetros se ilustran en el esquema de Figura 2.2, y son los siguientes: (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

1. Número de familias o sistemas de estructuras que aparecen en el macizo rocoso.

2. Orientación de cada familia (definida por valores característicos del buzamiento y de la dirección de buzamiento).
3. Espaciamiento entre estructuras de una misma familia o set estructural (puede ser verdadero si se mide en la dirección normal al plano de las estructuras, o aparente si se mide en otra dirección).
4. Persistencia o extensión de las estructuras de cada familia de discontinuidad.
5. Rugosidad de las estructuras de cada familia.
6. Apertura (estructuras abiertas) o potencia (estructuras selladas) de las estructuras de cada familia.
7. Tipo(s) de relleno(s) presente(s) en las estructuras de cada familia.
8. Resistencia de la roca de caja para cada set de estructuras (si bien el tipo de roca puede ser el mismo, distintos sets de estructuras pueden presentar distintas características de alteración, afectando de diferente forma a la roca de caja).
9. Características de la percolación de aguas bendada en las estructuras de cada familia.
10. Tamaño de los bloques que definen las estructuras en el macizo rocoso.

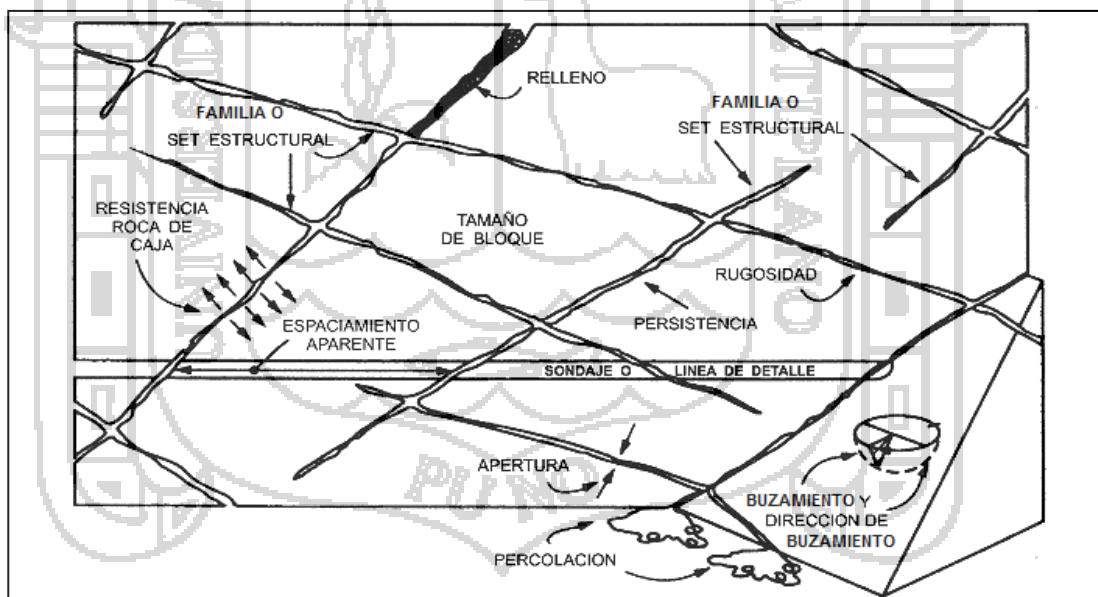


Figura 2.2 : Esquema ilustrativo de los parámetros que describen las estructuras presentes en el macizo rocoso.

Fuente : Hudson, 1989.

Mapeo superficial de estructuras expuestas.

Los métodos de mapeo estructural que examinarán sistemáticamente todas las características geológicas importantes son el mapeo "líneal" y "ventana". El mapeo

lineal conciste en estirar una cinta metrica a lo largo de la cara del talud y mapear todas que intersectan con la línea; las longitudes de línea son normalmente 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 todas las discontinuidades dentro de un segmento representativo o "ventana" de un tamaño fijo, espaciados a intervalos regulares a lo largo de la cara del talud. Las áreas que intervienen se examinan por similitud de estructura. Las dimensiones de una ventana normalmente puede ser de aproximadamente 10 m. (Wyllie & Mah, 2004).

En el caso de no tener acceso total del objeto levantado, el mapeo por ventanas es favorable para el levantamiento del macizo rocoso (Suarez Burgoa, 2013). Por tal razón para el mapeo de las superficies expuestas en la presente investigación se realizo por este método.

La utilización de metodos de proyección estereografica es la mejor forma de representar los datos geologico estructurales (Hoek & Bray, Rock slope engineering, 1981). Permitiendo un estudio estadistico de la distribución de los datos por métodos gráficos. Este estudio estadistico de distribución de las discontinuidades es echo con programas computacionales, como el programa Dips v.6.0 de Rocscience, que fue utilizado en esta investigación.

Familias de discontinuidades y orientación de las estructuras.

La orientación de las discontinuidades es el primer factor geológico que influye en la estabilidad de taludes, la terminología recomendada para los datos de orientación de discontinuidades es el buzamiento y dirección de buzamiento ver Figura 2.3 y 2.4. (Wyllie & Mah, 2004).

Una familia de discontinuidades está constituida por aquellas que tienen orientaciones similares y el mismo origen. Por ello las familias se pueden determinar, representando los polos de las discontinuidades observadas en el macizo rocoso en una red polar equilateral mediante la plantilla de Schmidt, que se contornearan utilizando una plantilla de conteo equilateral para obtener la distribución de polos que representara todas las discontinuidades medidas en el macizo rocoso y donde se

tratará de identificar y estimar las orientaciones medias de las familias (Ramírez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

La orientación de un plano de discontinuidad en el espacio queda definida por su dirección de buzamiento (dirección de la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad respecto al norte) y por su buzamiento (inclinación hacia abajo de dicha línea, respecto al plano horizontal). El instrumento que se emplea para la medida directa de la dirección de buzamiento y buzamiento es la brújula. La notación que se usa para especificar estos dos valores es de escribir primero la dirección de buzamiento, representado por tres dígitos seguidos de un quebrado tendido hacia adelante (/), para luego especificar el buzamiento del plano, representado por dos dígitos. (Suarez Burgoa, 2013).

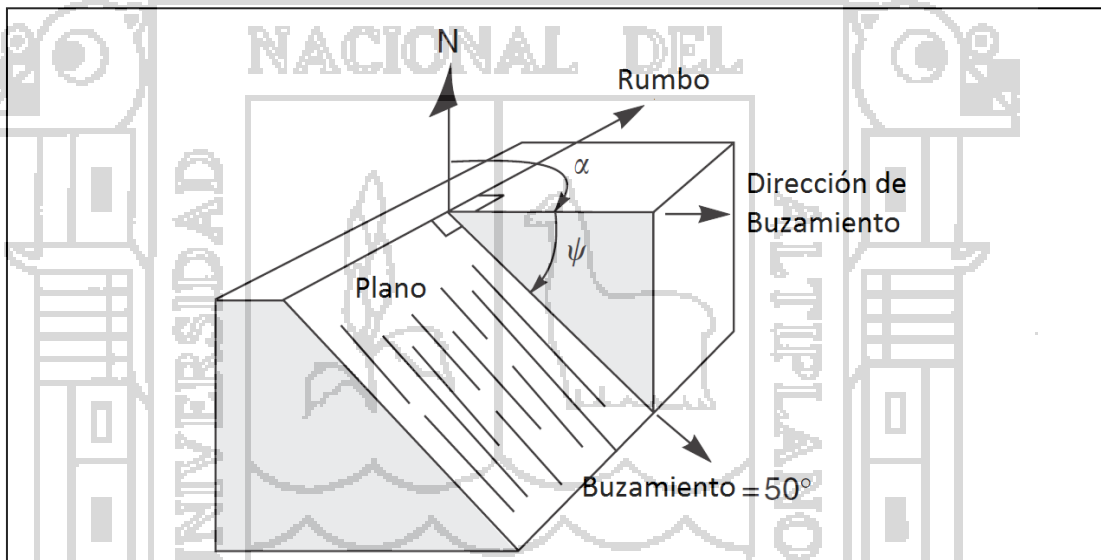


Figura 2.3 : Terminología para definir la orientación de las discontinuidades, vista isométrica del plano (Buzamiento y Dirección de buzamiento).

Fuente : Wyllie & Mah, 2004.

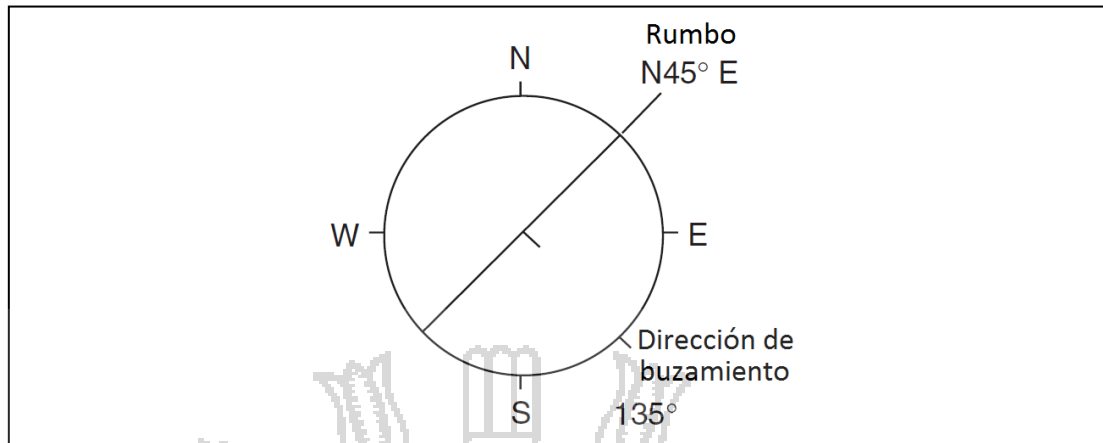


Figura 2.4 : Terminología para definir a orientación de las discontinuidades, vista en planta del plano.

Fuente : Wyllie & Mah, 2004.

La medida espacial de la orientación espacial de las discontinuidades y de cualquier orientación espacial, es la más importante y la más empleada tarea del ingeniero de macizos rocosos. Si un profesional destinado hacer la descripción del macizo rocoso no sabe cómo medir una orientación espacial con la técnica e instrumento necesarios, es mejor que se abstenga de hacer tal trabajo. Esta habilidad no se aprende con la lectura de uno o varios textos, sino se obtiene de varios intentos de medidas reales con instrumento en mano y el elemento a medir ahí presente. (Suarez Burgoa, 2013).

La definición de numero de familias o sistemas de estructuras esta relacionada directamente con la orientación de cada familia; lo cual se hace analizando la información estructural mediante proyecciones estereograficas, para representar cada estructura (plano) por un punto (polo) y luego, mediante tecnicas, estadisticas analizar las agrupaciones de polos y definir asi las familias o sistemas principales y las familias o sistemas secundarios. En la práctica se utilizan programas computacionales para este análisis e interpretación de la información estructural. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

Observando la orientación e inclinación de las discontinuidades y su posición relativa respecto al plano del talud se puede deducir cuál es el modo de falla más probable en el talud. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

Proyección estereográfica.

La proyección estereográfica hace que los datos de orientación en tres dimensiones sean representados y analizados en dos dimensiones. Una importante limitación de las proyecciones estereográficas es que ellas consideran relaciones angulares entre líneas y planos, y no representan la posición y el tamaño de las formas. Los dos tipos de proyección estereográfica usados en geológica estructural son las proyecciones polar y ecuatorial ver Figura 2.5 y 2.6. La proyección polar solo se utiliza para el ploteo de polos, mientras la proyección ecuatorial puede ser utilizada para el ploteo de planos mayores y polos. (Wyllie & Mah, 2004).

En la práctica de la geología geotécnica se ha hecho común el uso de proyecciones estereográficas equiángulares con proyección en el hemisferio inferior, por lo que se recomienda este método. Para definir las densidades de polos se emplean comúnmente las distribuciones de Schmidt o de Fisher. Cuando la cantidad de datos es suficientemente grande ambas distribuciones producen contornos muy similares; sin embargo, cuando, la cantidad de datos es limitada la distribución de Schmidt produce contornos algo irregulares y pueden inducir a errores, ya que cada dato se considera totalmente preciso y cualquier error se acentúa. Por lo tanto, se recomienda preferir la distribución de Fisher. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

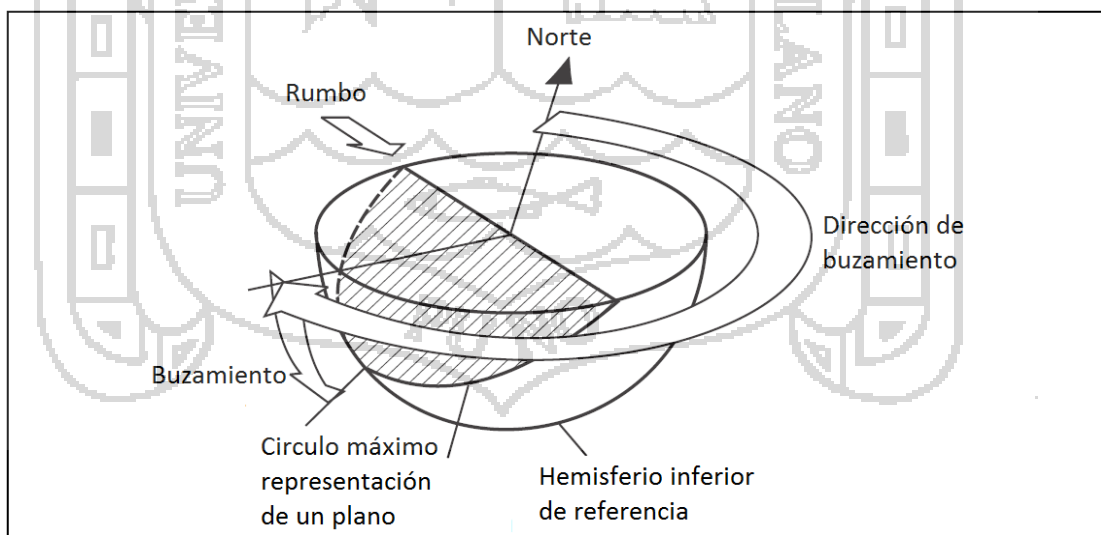


Figura 2.5 : Representación estereográfica de un plano en una proyección semiesférica de hemisferio inferior.

Fuente : Wyllie & Mah, 2004.

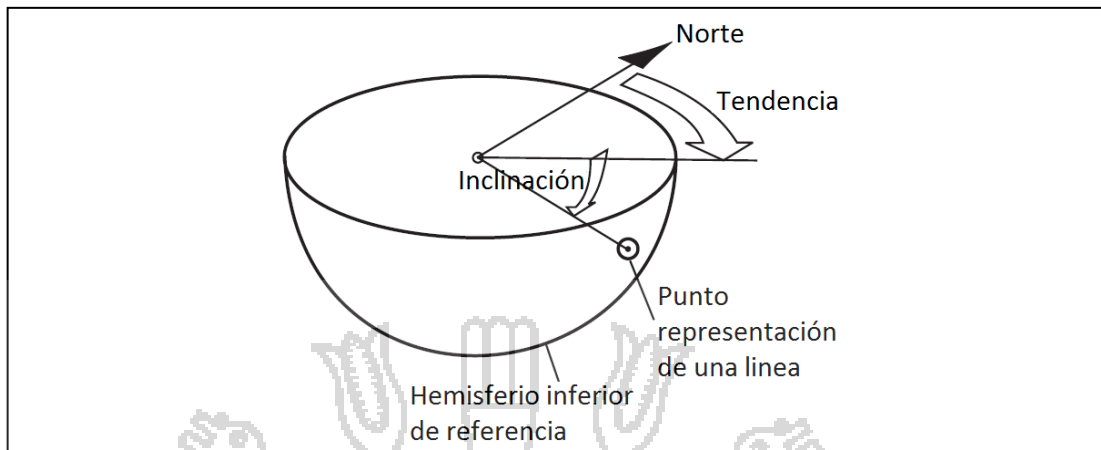


Figura 2.6 : Representación estereográfica de una línea en una proyección semiesférica de hemisferio inferior.

Fuente : Wyllie & Mah, 2004.

Cuando la superficie de mapeo es normal al plano de las estructuras de un determinado set o familia estructural, éstas aparecen con su frecuencia propia, λ .

Cuando esta condición no se cumple y la normal al plano de mapeo forma un ángulo ξ con el plano de las estructuras, éstas aparecen con una frecuencia aparente, λ_a , mayor que su frecuencia propia o verdadera, dada por (Terzaghi (1965)):

$$\lambda_a = \lambda \operatorname{sen} \xi$$

Esto induce un sesgo, por lo que se recomienda considerar la corrección de Terzaghi al definir la familia de polos, como se ilustra en el ejemplo de la Figura 2.7.

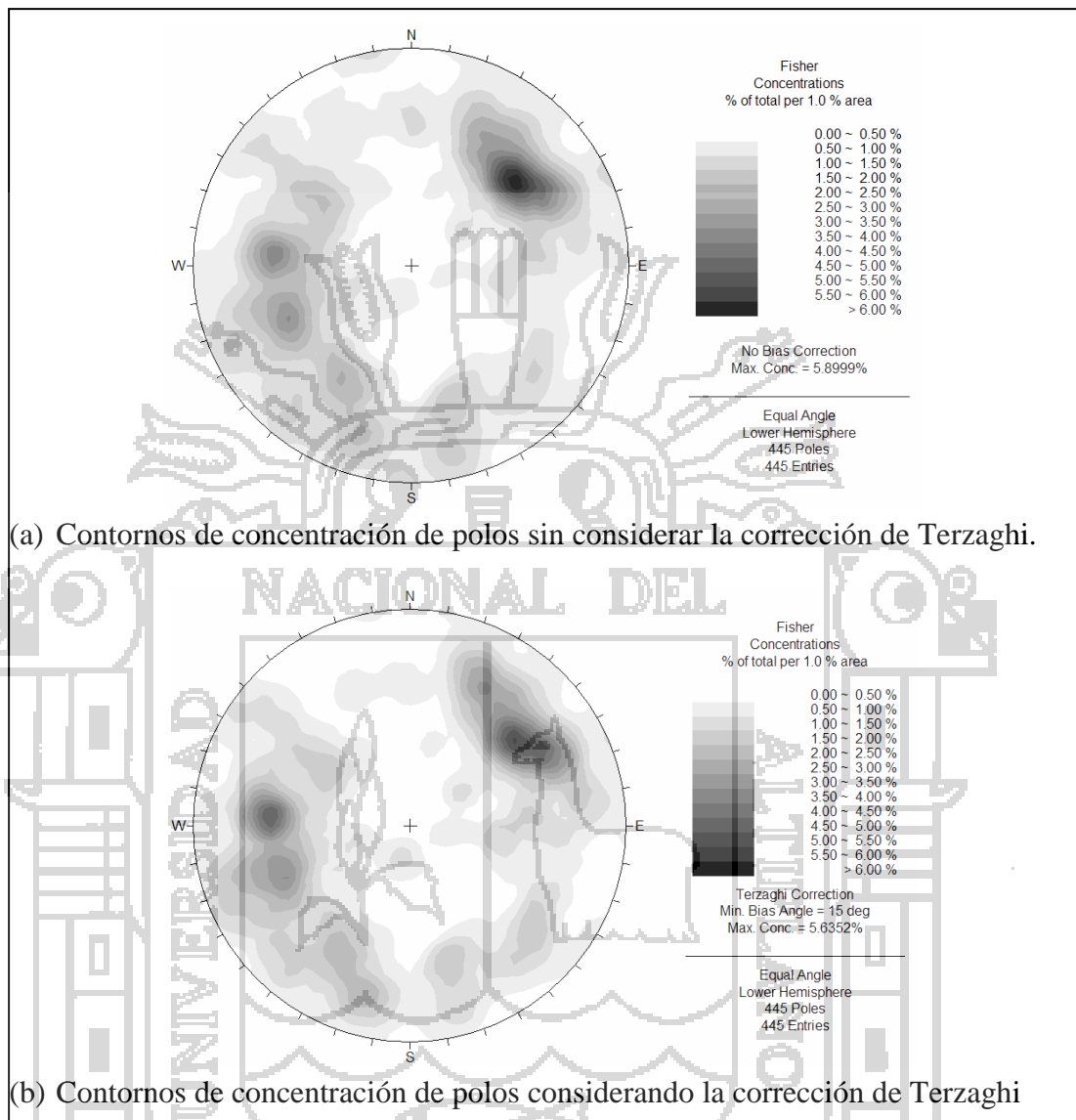


Figura 2.7 : Efecto de la corrección de Terzaghi en la definición de los contornos de concentración de polos de estructuras intermedias (juntas, diaclasas y vetillas) mapeadas en un dominio estructural de una mina.

Fuente : Programa DIPS (Rocscience Inc. ,1999).

La definición de la cantidad de datos necesaria y suficiente para lograr una adecuada representación del patrón estructural requiere bastante experiencia y depende de cada caso en particular.

Las proyecciones estereográficas pueden complementarse con rosetas como la que se muestra en el ejemplo de la Figura 2.8. La roseta convencional considera la

proyección sobre un plano horizontal, por lo que representa un histograma radial del rumbo de las estructuras; sin embargo, es posible considerar cualquier plano de proyección para la roseta (con lo que resultan histogramas radiales de manteos aparentes o rumbos aparentes). (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

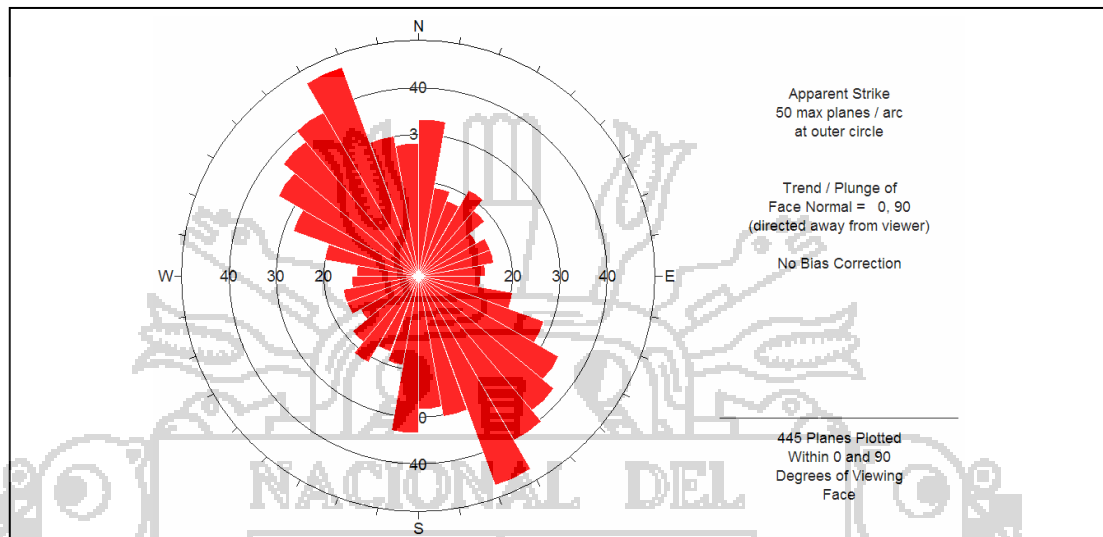


Figura 2.8 : Roseta que muestra la distribución de rumbos de estructuras intermedias (juntas, diaclasas y vetillas) mapeadas en un dominio estructural de una mina.

Fuente : Programa DIPS (Rocscience Inc., 1999).

Espaciamiento de las estructuras.

Es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes, Figura 2.9. Éste 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 grandes. (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, 2004).

Para medir el espaciamiento se necesita una cinta métrica de mínimo 3 m de longitud, con divisiones en milímetros, y la brújula. El procedimiento a seguir es el siguiente, para cada familia de discontinuidad. (Suarez Burgoa, 2013).

- Elegir una superficie de afloramiento o una pared excavada y medir la orientación de cada una de las superficies.
- Definir una línea de trabajo, donde se colocará en forma paralela la cinta métrica, de tal manera que las trazas de la familia de discontinuidades a ser medidas sean lo más perpendiculares a ella.

En la práctica a cada set o familia de estructuras se le asigna una valor “característico” de espaciamiento (los más usados corresponden al valor promedio o al valor modal de la mediciones de espaciamiento para dicho set), ya que el espaciamiento de un set de estructuras no presenta un único valor sino que un rango de valores, muchas veces conforme a una cierta distribución estadística (para lograr una buena definición de esta distribución Hudson & Harrison (1997) señalan que debe contarse con al menos 200 mediciones). (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

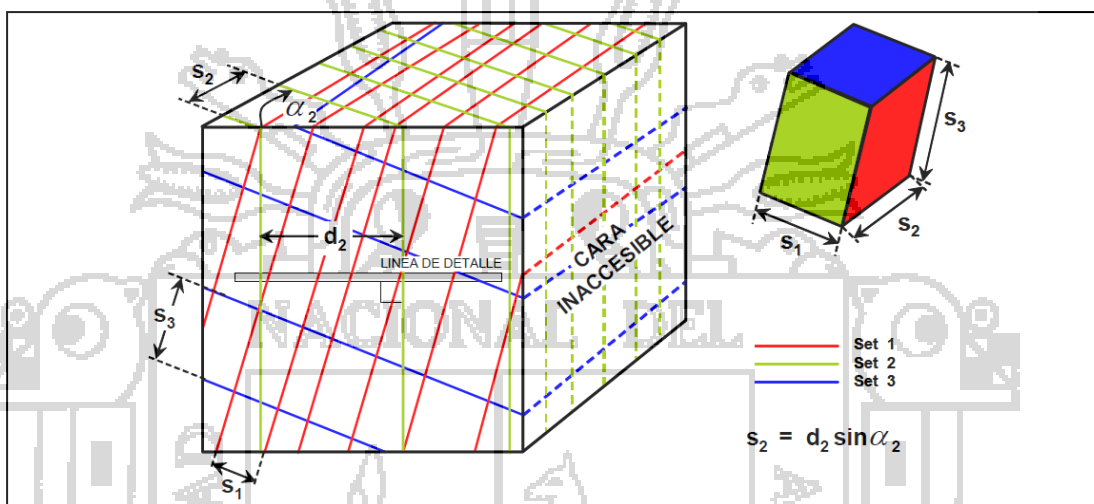


Figura 2.9 : Determinación del espaciamiento en base a observaciones en un afloramiento de roca que muestra 3 sets o familias de estructuras.
Fuente : Brown, 1981.

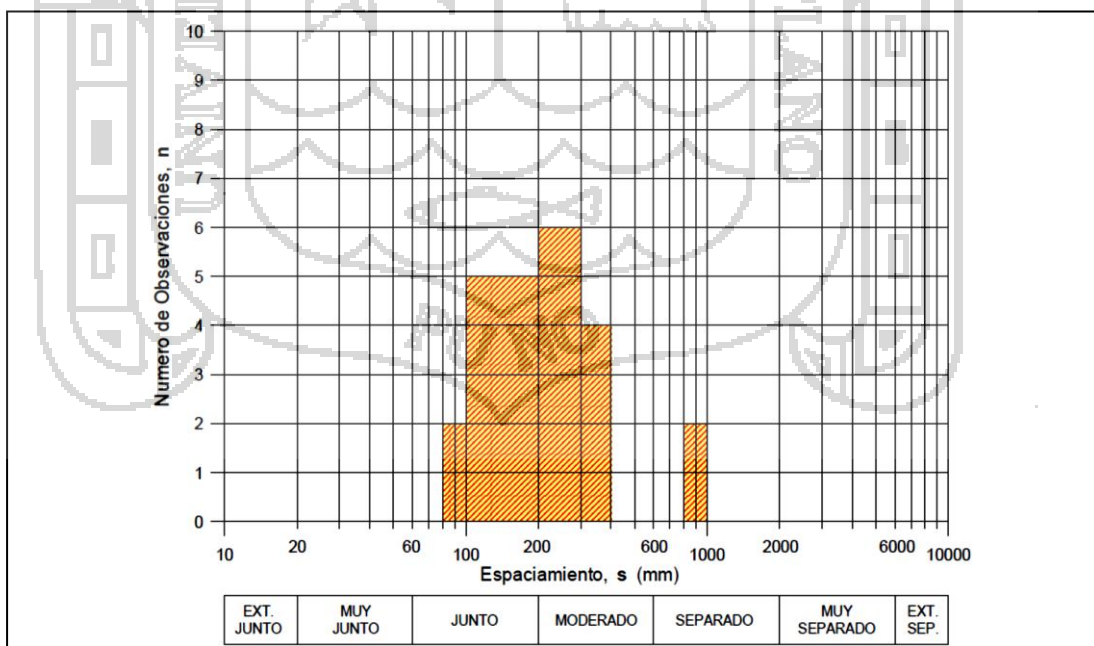


Figura 2.10 : Presentación de las mediciones del espaciamiento de un set estructural en forma de histograma.
Fuente : Brown, 1981.

Resulta recomendable que los resultados de las mediciones de espaciamiento se presenten en histogramas como se muestra en la Figura 2.10, y para describir el espaciamiento se sugiere usar las definiciones de la ISRM que se reseñan en Tabla 2.2. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

Tabla 2.2
Descripción del espaciamiento de las estructuras.

Descripción	Espaciamiento (mm)
Extremadamente Junto	< 20
Muy Junto	20 a 60
Junto	60 a 200
Moderado	200 a 600
Separado	600 a 2000
Muy Separado	2000 a 6000
Extremadamente Separado	> 6000

Fuente : International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field test, 1978.

Persistencia o continuidad de las estructuras.

Este concepto hace referencia a la extensión o tamaño de las discontinuidades. Las dimensiones de una discontinuidad se pueden cuantificar observando su longitud en los afloramientos en la dirección del rumbo y en la dirección del buzamiento. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

Tabla 2.3
Descripción de la persistencia de las estructuras.

Descripción	Persistencia (m)
Muy Baja	< 1
Baja	1 a 3
Media	3 a 10
Alta	10 a 20
Muy Alta	> 20

Fuente : International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field test, 1978.

La persistencia o extensión de las estructuras de cada familia de discontinuidades corresponde al largo de la traza de la estructura, el cual medirse en la dirección del rumbo o en la dirección de buzamiento de la estructura. En problemas de estabilidad

de taludes resulta preferible definir la persistencia en la dirección del buzamiento. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

Para describir la persistencia de las estructuras se sugiere usar las definiciones de la ISRM que se reseñan en la Tabla 2.3 Por otra parte, se recomienda complementar la persistencia con información relativa al tipo de término que presentan las estructuras de un set dado, conforme al esquema que se muestra en la Figura 2.11.

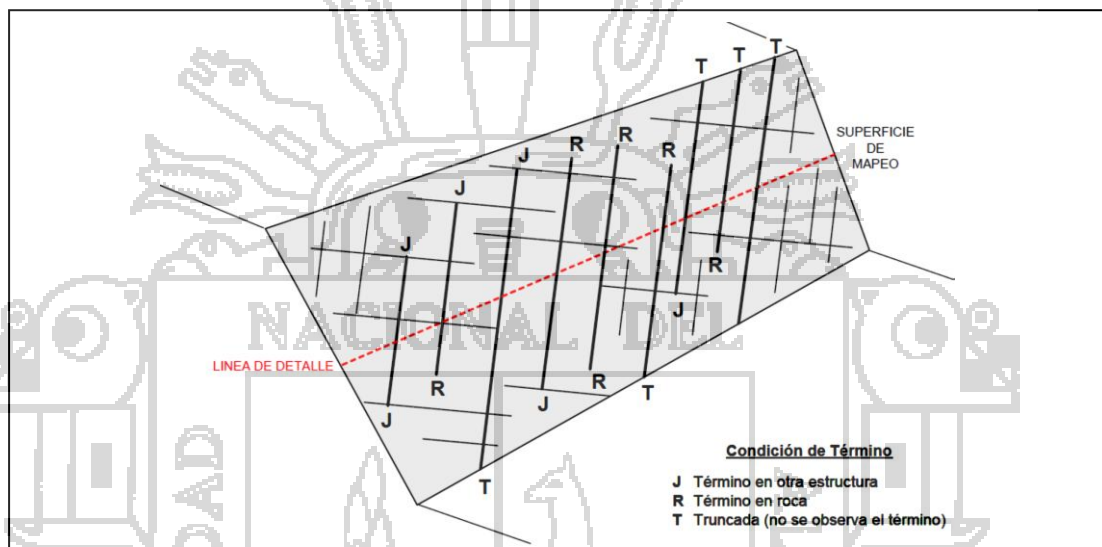


Figura 2.11 : Esquema que ilustra las condiciones de término que pueden presentar las estructuras de un macizo rocoso.

Fuente : Flores G. & Karzulovic L., 2003.

Rugosidad de las estructuras.

Conjunto de irregularidades de diferentes órdenes de magnitud (asperezas, ondulaciones), que componen la superficie de las paredes de la discontinuidad. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

La rugosidad se define a las características morfológicas que presenta la superficie del plano de una discontinuidad, la cual contribuye a disminuir o aumentar la resistencia al esfuerzo cortante. (Suarez Burgoa, 2013).










Muchos autores discuten métodos para medir la rugosidad de las estructuras, pero en la práctica las evaluaciones de la rugosidad de las estructuras se suelen hacer con comparación con “perfiles de rugosidad”, lo que indudablemente introduce subjetividad y, al mismo tiempo, un potencial problema de escala, es por eso que

para definir la rugosidad se recomienda el empleo de los perfiles que se muestran en la Figura 2.12 y considerar 2 escalas:

Escala intermedia (Varios metros), en la que a ondulación de las estructuras permite clasificarlas en 3 clases: escalonadas, onduladas, y planas.

Escala menor (Varios centímetros), en la que las disparidades de las estructura permite clasificarlas en 3 clases: rugosas, lisas, y pulidas.

Esto permite definir un total de 9 clases de rugosidad: (I) escalonadas rugosas, (II) escalonadas lisas, (III) escalonadas pulidas, (IV) onduladas rugosas, (V) onduladas lisas, (VI) onduladas pulidas, (VII) planas rugosas, (VIII) planas lisas, y (IX) planas pulidas.

Clase	Escala		Perfil Típico de Rugosidad de la Estructura	JRC ₂₀	JRC ₁₀₀
	Intermedia	Menor			
I	Escalonada	Rugosa		20	11
II		Lisa		14	9
III		Pulida		11	8
IV	Ondulosa	Rugosa		14	9
V		Lisa		11	8
VI		Pulida		7	6
VII	Plana	Rugosa		2.5	2.3
VIII		Lisa		1.5	0.9
IX		Pulida		0.5	0.4

Notas: La longitud de cada perfil puede estar en el rango de 1 a 10 m.

Las escalas vertical y horizontal son iguales.

JRC₂₀ y JRC₁₀₀ corresponde al valor estimado del coeficiente de rugosidad de la estructura (Barton & Choubey (1977)) cuando el perfil se “asimila” a un largo de 20 y de 100 cm, respectivamente (Bandis (1993)).

Figura 2.12 : Caracterización de la rugosidad de las estructuras según las recomendaciones de la ISRM.

Fuente : Modificada de Brown (1981).

Sin perjuicio de lo recién recomendado, es también relativamente frecuente el empleo del coeficiente de rugosidad de la estructura (*Joint Roughness Coefficient*), JRC, definido por Barton & Choubey (1977) para caracterizar la rugosidad de las

estructuras a escala centimetrica, utilizando los perfiles de rugosidad que se muestran en la Figura 2.13. Finalmente, cabe señalar que a veces resulta útil el ábaco propuesto por Barton (1982) para estimar la rugosidad en términos del índice JRC, como se muestra en la Figura 2.14 (Flores G. & Karzulovic L., 2003). La utilización de uno u otro ábaco es según el detalle del trabajo que se está realizando, siendo el primero el más conocido y utilizado.

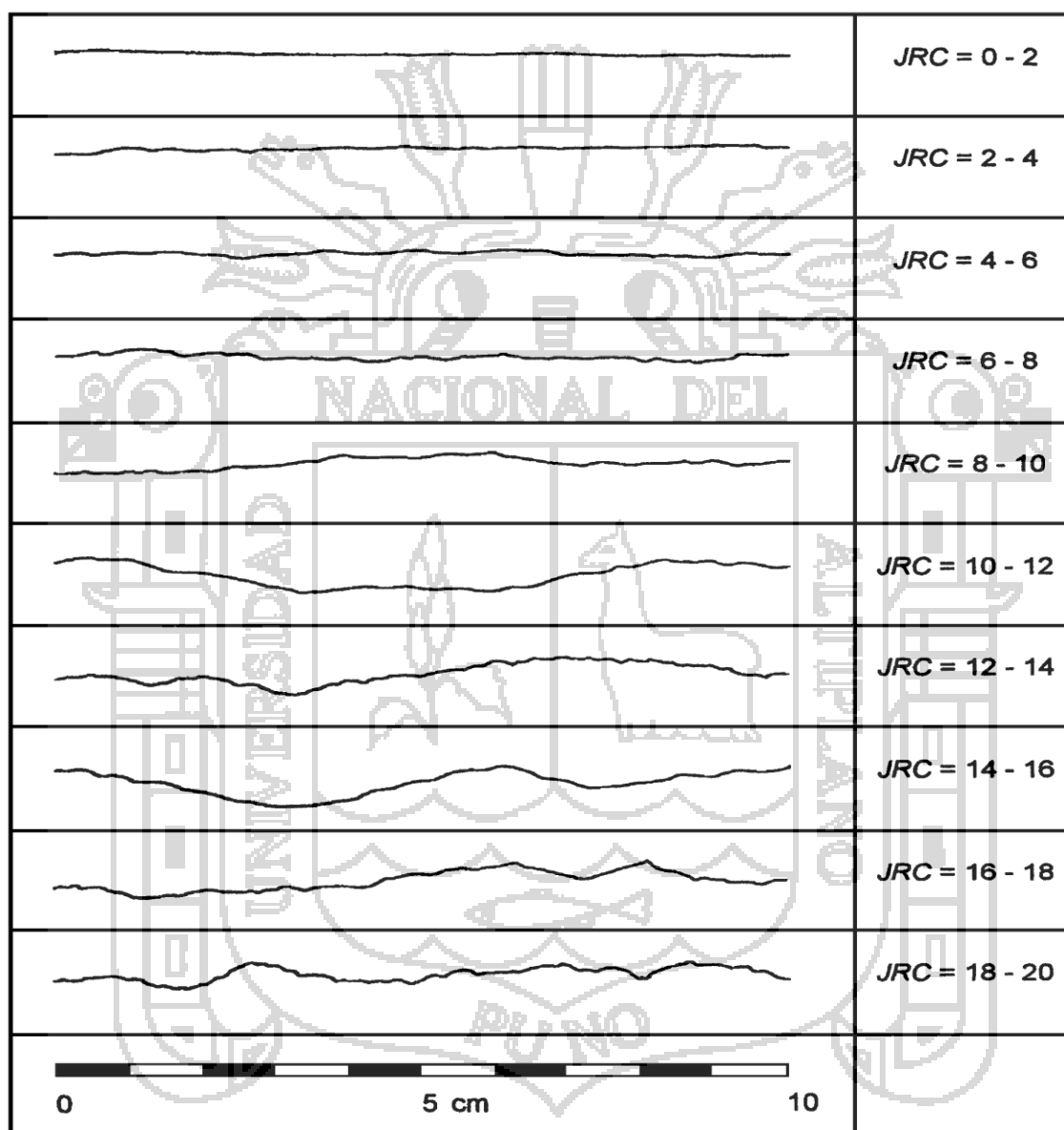


Figura 2.13 : Perfiles de rugosidad y valores asociados del coeficiente JRC.
Fuente : Barton & Choubey, 1977.

Apertura de las estructuras.

Se define apertura como la distancia perpendicular que separa las paredes adyacentes de roca de una discontinuidad, cuando este espacio intermedio tiene agua o aire. En esto se distingue la apertura del espesor de relleno ver Figura 2.15. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

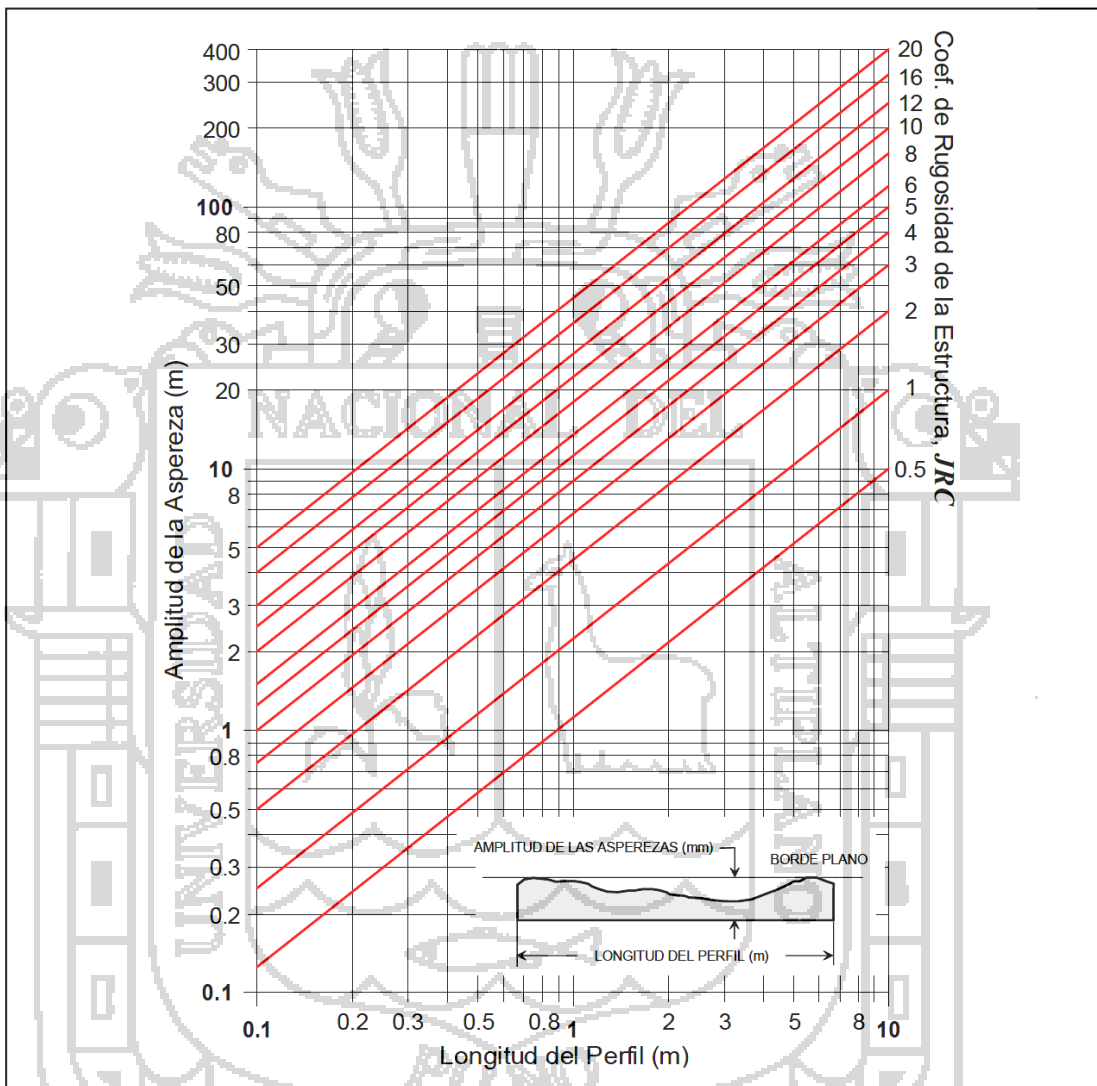


Figura 2.14 : Abaco para evaluar el coeficiente JRC en función del largo del perfil de la estructura y la amplitud máxima de las asperezas de ésta.

Fuente : Barton & Choubey, 1977.

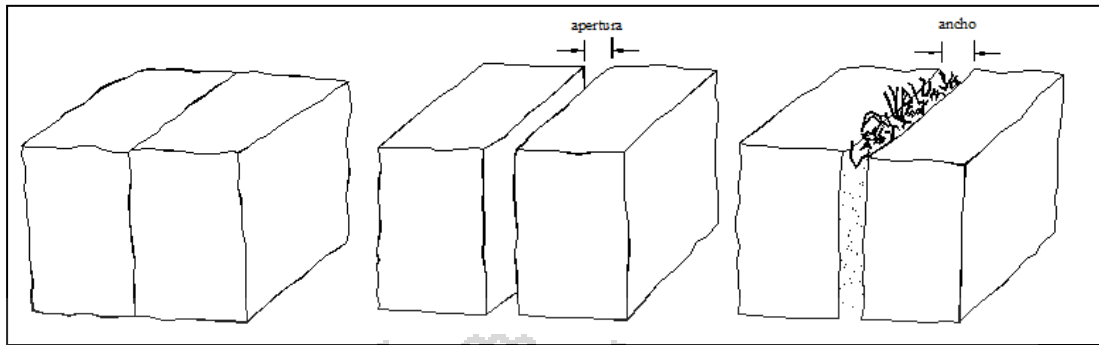


Figura 2.15 : Diagramas que muestran la definición de la apertura de las discontinuidades y el ancho de las discontinuidades rellenas. De izquierda a derecha discontinuidad cerrada, discontinuidad abierta y discontinuidad rellena.

Fuente : International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field test, 1978.

Este parámetro puede ser muy variable en diferentes zonas de un mismo macizo rocoso: mientras que en superficie la apertura puede ser alta, ésta se reduce con la profundidad pudiendo llegar a cerrarse. Su medida puede realizarse directamente con una regla graduada en milímetros. Las medidas han de realizarse para cada familia de discontinuidades, adoptando los valores medios más representativos de cada una de ellas. (Gonzales de Vallejo, 2002).

Tabla 2.4 Descripción de la apertura de las estructuras.

Apertura	Descripción	Tipo
<0.1 mm	Muy cerrado	Rasgos “cerrados”
0.1 a 0.25 mm	Cerrado	
0.25 – 0.5 mm	Parcialmente abierto	
0.50 – 2.5 mm	Abierto	Rasgos “semiabiertos”
2.50 – 10 mm	Moderadamente amplio	
>10 mm	Amplio	
1 – 10 cm	Muy amplio	Rasgos “abiertos”
10 – 100 cm	Extremadamente amplio	
>1 m	Cavernoso	

Fuente : Brown, 1981.

Brown (1981) discute la forma de medir estos parámetros según las recomendaciones de la ISRM. Para describir la apertura se recomienda la terminología de Tabla 2.4. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

Relleno en las discontinuidades.

Son los materiales que se encuentran dentro de la discontinuidad. Cuando los materiales son suaves, la masa rocosa es menos competente y cuando éstos son más duros, ésta es más competente. (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, 2004).

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. (Gonzales de Vallejo, 2002).

Las estructuras pueden presentar una enorme variedad de tipos de relleno, los que pueden tener distintas propiedades mecánicas e hidráulicas. Una descripción del tipo de relleno debe considerar al menos lo siguiente: Mineralogía, granulometría, competencia (resistencia y deformabilidad), humedad y permeabilidad, alteración de la roca caja, etc. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

Tabla 2.5
Descripción de la granulometría del material de relleno.

Tamaño (mm)	Descripción	Material	Granulometría
>600	Bloques	Granular	Muy gruesa
200 a 600	Bolones		
60 a 200	Bolones pequeños		
20 a 60	Gravas gruesas		Gruesa
6 a 20	Gravas		
2 a 6	Gravas finas		
0.6 a 2	Arenas gruesas		
0.2 a 0.6	Arenas	Media	
0.06 a 0.2	Arenas finas	Fino	Fina
< 0.06	Limos, Arcillas		

Fuente : Brown, 1981.

Filtración en las discontinuidades.

La presencia de agua subterránea es de suma importancia en la estabilidad e taludes por ende en la clasificación de macizo rocoso en las cuales puede estar seco, ligeramente húmedo, húmedo, goteando y fluyendo. 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). (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

Las observaciones con respecto a las filtraciones en discontinuidades, tanto si se presentan rellenas como si aparecen limpias, pueden seguir las descripciones de la Tabla 2.6, conforme a las recomendaciones de la ISRM. (Gonzales de Vallejo, 2002).

Resistencia de las paredes de las discontinuidades.

La resistencia a la 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 Figura 2.16. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

Las resistencias de las rocas se pueden estimar también en el campo utilizando una navaja y un martillo de geólogo, aunque con menos precisión que con el martillo de Schmidt, en la tabla 2.7 se describe la forma de hacerlo según la ISRM. (Gonzales de Vallejo, 2002).

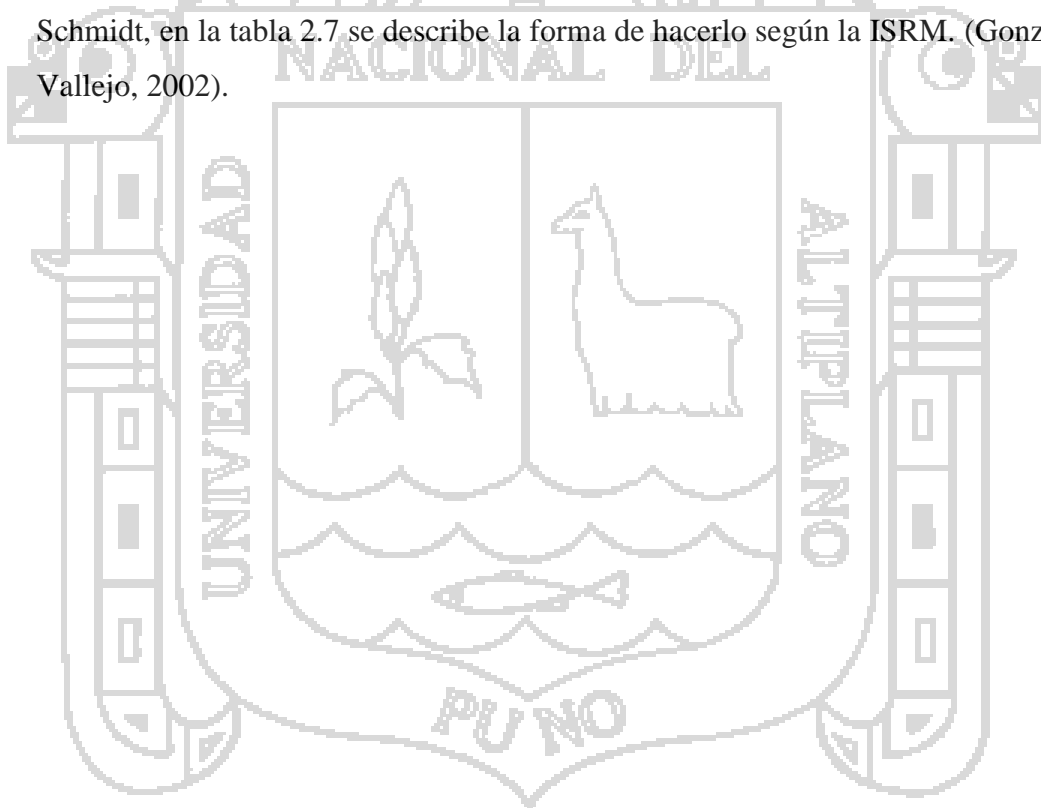


Tabla 2.6
Descripción de la condición de humedad de las estructuras.

Condición	Descripción de la Condición de Humedad	
	Estructuras Sin Relleno	Estructuras Con Relleno
I	Estructura cerrada y seca. No parece posible que a través de la misma circule agua.	El relleno se observa consolidado y seco. No parece posible el flujo de agua.
II	Estructura seca y sin evidencia de que haya permitido el flujo de agua.	El relleno está húmedo pero sin señales de agua libre.
III	Estructura seca pero con evidencia de que ha permitido el flujo de agua.	El relleno está mojado y presenta goteos ocasionales.
IV	La estructura está húmeda pero no hay goteos ni otras señales de agua libre.	Se observa un flujo continuo de agua (estimar el caudal). El relleno puede mostrar señales de lavado.
V	La estructura presenta goteos ocasionales, pero sin un flujo continuo de agua.	Se observa flujo considerable de agua según "canales" preferentes (estimar el caudal y la presión). El relleno está localmente lavado.
VI	La estructura muestra un flujo continuo de agua (estimar el caudal y la presión).	Se observa un flujo considerable de agua (estimar caudal y presión). El relleno ha sido, al menos localmente, completamente lavado.

Fuente : Brown, 1981.

La resistencia de las paredes está definida por el ISRM, el cual indica que este es el equivalente a la resistencia a la compresión de la roca adyacente a las paredes de las discontinuidades. Este es un componente muy importante de la resistencia al corte y la deformabilidad. La resistencia de las paredes podría disminuir debido a la alteración y meteorización de las paredes. Una descripción semi-cuantitativa y cuantitativa de la resistencia de las paredes es obtenida con el uso de un martillo de geólogo, fuertes navajas y el martillo de Schmidt. (Giani, 1991).

Tabla 2.7
Estimación en campo de la resistencia de la roca mediante un martillo de geólogo y una navaja.

Grado	Descripción	Identificación de campo	Rango aprox. Sigma_c – MPa
R1	Roca muy débil	Desmenuzable bajo golpes firmes con la punta de un martillo de geólogo, puede desconcharse con una navaja.	1.0– 5.0
R2	Roca débil	Puede desconcharse con dificultad con una navaja, se puede hacer marcas poco profundas golpeando firmemente con el martillo de geólogo.	5.0 – 25
R3	Roca medianamente dura	No se puede rayar o desconchar con una navaja, las muestras se pueden romper con un golpe firme del martillo de geólogo	25 – 50
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo de geólogo para romper la muestra.	50 – 100
R5	Roca muy dura	Se requieren varios golpes con el martillo de geólogo para romper la muestra.	100 – 250
R6	Roca estremadamente dura	Solo se puede romper esquirlas de la muestra con el martillo de geólogo.	> 250

Fuente : Brown, 1981.

2.2.5. Caracterización geotécnica.

La caracterización geotécnica resulta fundamental para definir las propiedades mecánicas de la roca “intacta”, las estructuras y el macizo rocoso. Para comprender los modos de falla en taludes en roca. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

Por roca "intacta" se entiende los trozos de roca que se ubican entre las estructuras presentes en el macizo rocoso, y usualmente se considera que las propiedades de la roca "intacta" pueden determinarse mediante ensayos de laboratorio sobre probetas con un diámetro del orden de 50 mm y una altura de unos 100 mm, o sea con un volumen del orden de 10^{-4} m^3 . Por otra parte, por macizo rocoso se entiende el conjunto roca "intacta" y estructuras, en un volumen de tamaño tal que representa adecuadamente la situación que se está considerando. Esto significa que el macizo rocoso puede tener un volumen del orden de 10^5 m^3 , si se está analizando la estabilidad de una galería, a más de 10^7 m^3 , si se está analizando la estabilidad de un sector productivo. Lo anterior significa que las propiedades del macizo rocoso no pueden medirse directamente, sino que deben estimarse en función de las propiedades de la roca "intacta" y las características del arreglo de bloques que componen el macizo rocoso, usualmente representadas en función de algún índice de calidad geotécnica. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

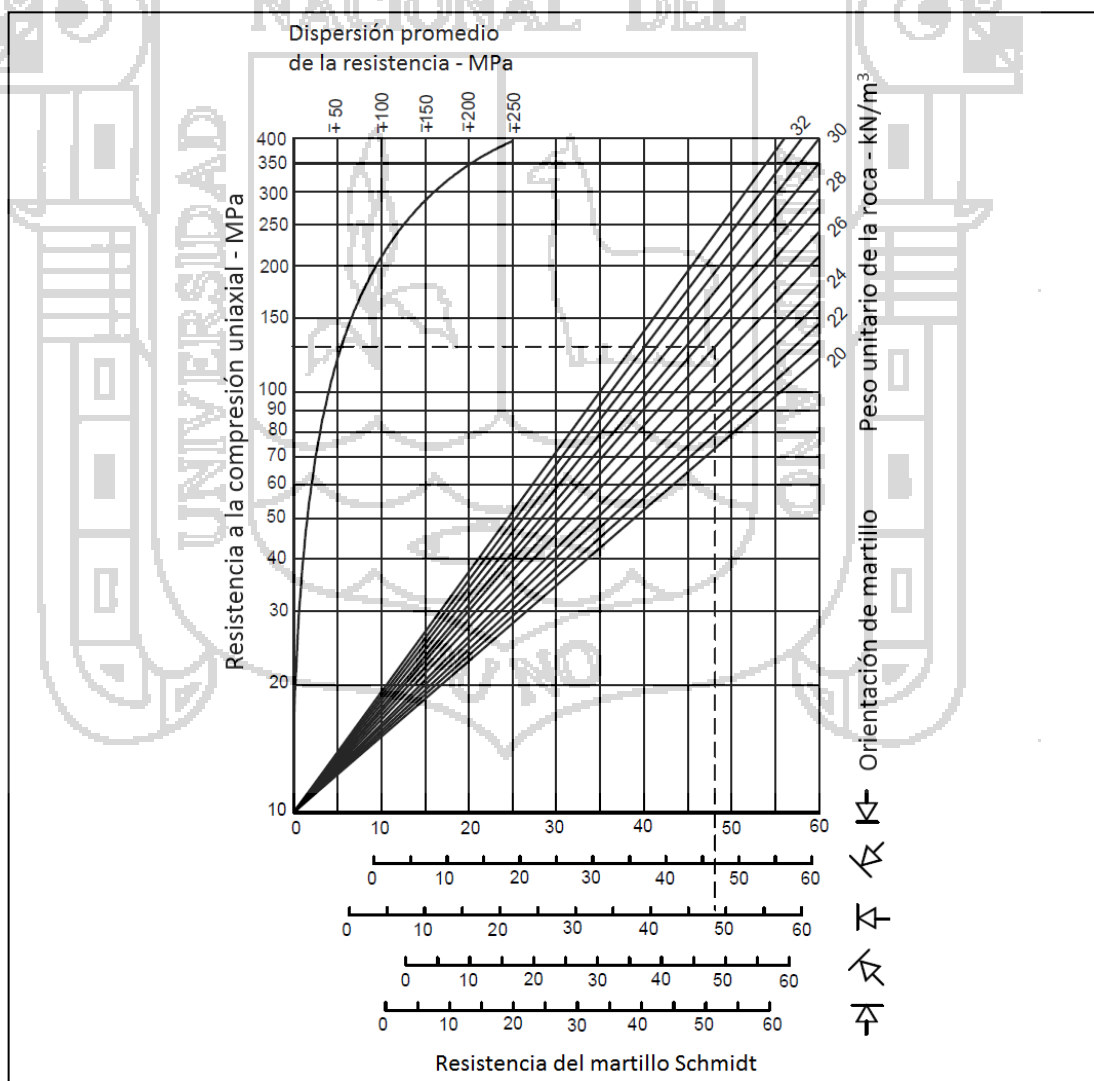


Figura 2.16 : Ábaco para la obtención de la resistencia a compresión simple de una roca o de los labios de una discontinuidad a partir de medidas con el martillo Schmidt tipo L.

Fuente : Hoek, Practical Rock Engineering, 2000.

Propiedades de la roca intacta.

Para definir las propiedades mecánicas de la roca intacta deberán obtenerse probetas de cada unidad geológica básica y someterlas a ensayos de laboratorio, para determinar a lo menos: El peso unitario, la resistencia a la compresión uniaxial, la deformabilidad. Podrán seguirse las recomendaciones de la ISRM (Brown (1981)) y/o las Normas ASTM (1999). (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

Las propiedades geomecánicas de la roca intacta que se encuentran entre defectos estructurales en un típico macizo rocoso son medidas en el laboratorio de muestras representativas de roca intacta. La necesidad de obtener muestras representativas es importante. (Read & Stacey, 2009).

Clasificación geotécnica del macizo rocoso.

Las clasificaciones geotécnicas tienen por objeto caracterizar ingenierilmente un determinado macizo rocoso en función de una serie de parámetros a los que se les designa un cierto valor. Clasificar geomecánicamente un macizo rocoso consiste en otorgarle una puntuación según una metodología o criterio establecido. Una vez puntuado el macizo, se clasifica en una categoría de entre varias existentes en función del rango de puntos. (Jorda Bordehore, 2013).

Las clasificaciones geomecánicas se utilizan mucho actualmente, sobre todo en estudios geotécnicos, en lo que se refiere a los taludes, la principal ventaja de las clasificaciones geomecánicas consiste en que permiten obtener, mediante unas correlaciones establecidas, los principales parámetros mecánicos del macizo rocoso. Los sistemas de clasificación de los macizos rocosos tienen por objeto evaluar sus características para determinar de forma cuantitativa su calidad. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

Para definir las propiedades mecánicas del macizo rocoso es preciso “escalar” las propiedades de la roca “intacta” considerando la calidad geotécnica del macizo

rocoso, la cual se define en términos de un índice de calidad geotécnica asociado a algún sistema de calificación y clasificación geotécnica de macizos rocosos. Como se muestra en la Figura 2.17, los métodos de clasificación geotécnica más empleados en minería a tajo abierto son los de Hoek et al. (1995) y de Bieniawski (1989). (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

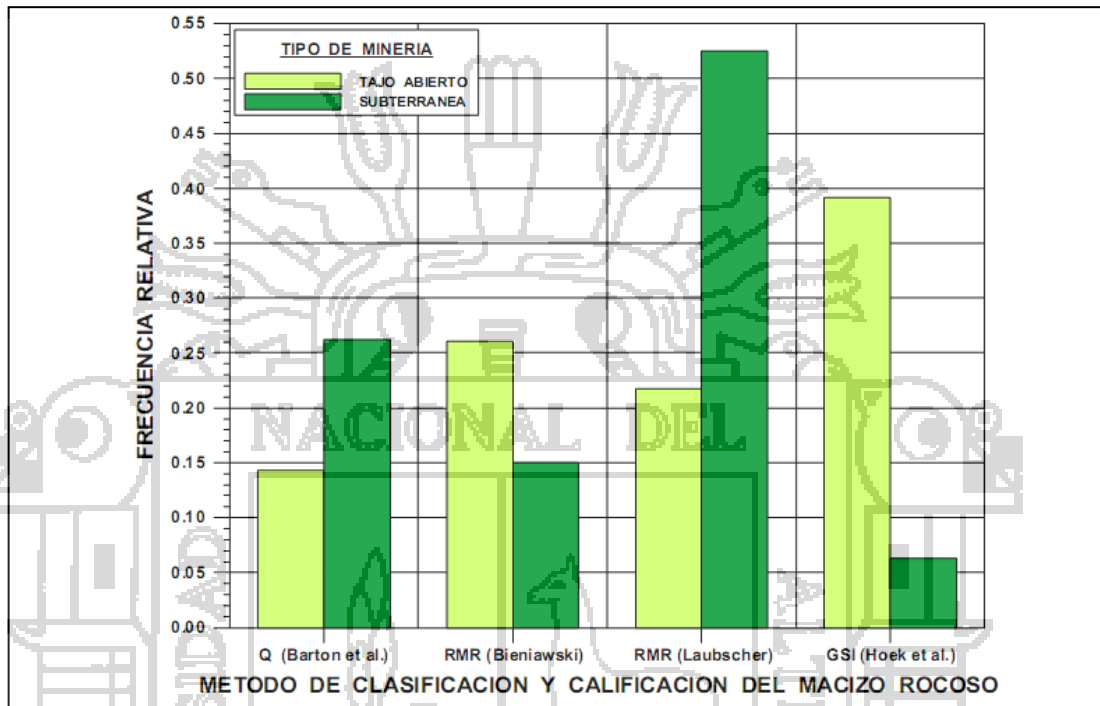


Figura 2.17 : Frecuencia relativa de uso de distintos métodos de calificación y clasificación geotécnica de macizos rocosos en minas a tajo abierto y subterráneas.

Fuente : Flores & Karzulovic, 2002.

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

Fue desarrollado por Deer (Deere et al., 1967) para promover un estimado cuantitativo de la calidad de la masa rocosa, a partir de los testigos de perforación diamantina. El RQD es definido como el porcentaje de piezas de testigos intactos mayores a 100 mm en la longitud total del testigo. El testigo deberá tener por lo menos un tamaño NX (54.7 mm de diámetro) y deberá ser perforado con un cilindro de doble tubo de perforación. Palstrom (1982) sugirió que, cuando los testigos no están disponibles pero las trazas de las discontinuidades son visibles en afloramientos superficiales o en socavones exploratorios, el RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen. (Hoek, 2000).

El índice RQD (*Rock Quality Designation*) se define como el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud en su eje, sin tener en cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo. Para determinar el RQD en el campo existen dos procedimientos de cálculo. (Morales Cárdenas, 2009).

- A partir del mapeo de celdas geotécnicas: comprende el cálculo del RQD en función del número de fisuras por metro, determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural (*detail line*) en el área o zona predeterminada de la operación minera.
- Se hace el cálculo del RQD en función del número de fisuras por metro cúbico (J_v), determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural en el área o zona predeterminada. Esto se usa para voladura y queda establecido de acuerdo a la relación entre RQD y J_v .

Sistema de clasificación RMR (Bieniawski (1973)).

Bieniawski (1976) publicó los detalles de una clasificación de la masa rocosa denominada sistema de clasificación Geomecánica o valoración de la masa rocosa RMR (*Rock Mass Rating*). A través de los años, este sistema ha sido modificado sucesivamente conforme han ido examinando más casos registrados, y se advierte al lector que Bieniawski hizo cambios significativos en las valoraciones asignadas a los diferentes parámetros. Los siguientes seis parámetros son usados para clasificar una masa rocosa con el sistema RMR. (Hoek, 2000).

UCS es la resistencia en compresión uniaxial de la roca “intacta”, y el puntaje asociado a la misma puede variar de 0 (si $UCS < 1$ MPa) a 15 (si $UCS > 250$ MPa).

RQD es la designación de la calidad de la roca definida por Deere et al. (1967), y el puntaje asociado a la misma puede variar de 3 (si $RQD < 25\%$) a 20 (si $90 < RQD \leq 100$).

s es el espaciamiento entre las estructuras, y el puntaje asociado al mismo puede variar de 5 (si $s < 60$ mm) a 20 (si $s > 2$ m).

JC es la condición de las estructuras, y el puntaje asociado a la misma puede variar de 0 (en el caso de estructuras continuas y abiertas más de 5 mm, o con rellenos arcillosos blandos de potencia mayor a 5 mm) a 30 (en el caso de estructuras discontinuas, muy rugosas, cerradas y sin alteración de su roca de caja).

WC es la condición de aguas, y el puntaje asociado a la misma puede variar de 0 (en el caso de estructuras con flujo de aguas que se traduce en un gasto de más de 125 lt/min en un tramo de túnel de 10 m de longitud, o donde la presión del agua excede el 50% del esfuerzo principal mayor) a 15 (en el caso de estructuras completamente secas).

El uso del índice RMR permite calificar la calidad geotécnica de los macizos rocosos en una escala que varía desde 0 a 100, y considera 5 clases:

- Macizos de calidad MUY MALA (Clase V, $0 \leq \text{RMR} \leq 20$).
 - Macizos de calidad MALA (Clase IV, $20 < \text{RMR} \leq 40$).
 - Macizos de calidad REGULAR (Clase III, $40 < \text{RMR} \leq 60$).
 - Macizos de calidad BUENA (Clase II, $60 < \text{RMR} \leq 80$).
 - Macizos de calidad MUY BUENA (Clase I, $80 < \text{RMR} \leq 100$).
- (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

Método del índice GSI.

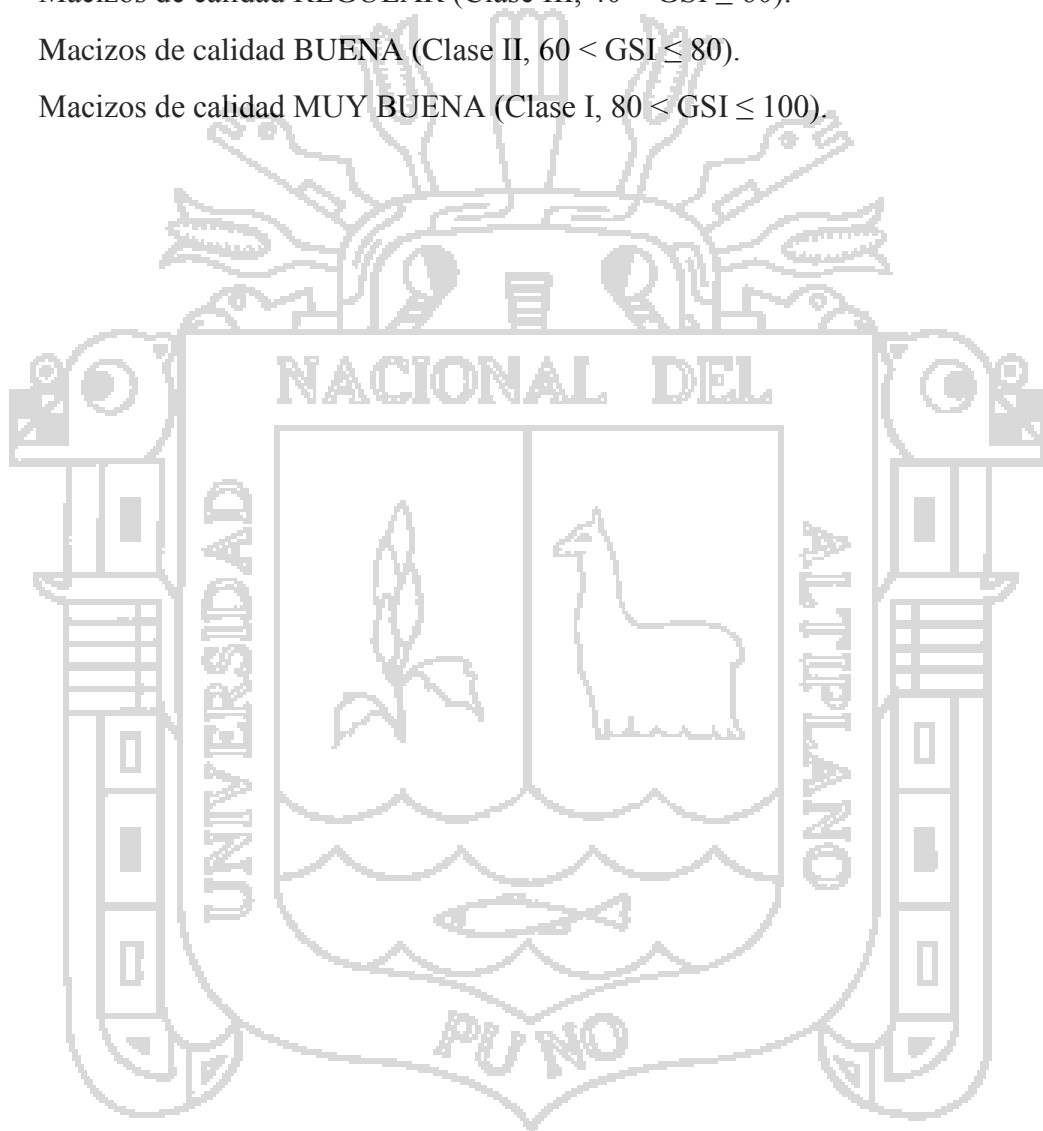
El índice de resistencia geológica, GSI, fue desarrollado por Hoek (1994) para subsanar los problemas detectados con el uso del índice RMR para evaluar la resistencia de macizos rocosos según el criterio generalizado de Hoek-Brown. Este índice de calidad geotécnica se determina en base a dos parámetros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

RMS es la “estructura del macizo rocoso”, definida en términos de su blocosidad y el alteración.

JC es la condición de las estructuras presentes en el macizo rocoso.

La evaluación del GSI se hace por comparación del caso que interesa con las condiciones típicas que se muestran en Figura 2.23 y 2.24, 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, $0 \leq \text{GSI} \leq 20$).
- Macizos de calidad MALA (Clase IV, $20 < \text{GSI} \leq 40$).
- Macizos de calidad REGULAR (Clase III, $40 < \text{GSI} \leq 60$).
- Macizos de calidad BUENA (Clase II, $60 < \text{GSI} \leq 80$).
- Macizos de calidad MUY BUENA (Clase I, $80 < \text{GSI} \leq 100$).



INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA MACIZOS ROCOSOS FRACTURADOS (Marinos & Hoek (2000))		CONDICION DE LAS ESTRUCTURAS				
<p>Estime el valor tipico de <i>GSI</i> considerando el tipo de roca, la estructura del macizo rocoso, y la condición de las discontinuidades.</p> <p>NO trate de ser demasiado preciso. De hecho, el considerar $33 \leq GSI \leq 37$ es más realista que considerar $GSI = 35$. <u>Note que esta tabla NO es aplicable a problemas con control estructural.</u> Si hay estructuras desfavorablemente orientadas, ellas controlarán el comportamiento del macizo rocoso.</p> <p>En aquellos casos en que la resistencia al corte de las estructuras podría ser afectada por la humedad, deberá considerarse la eventual presencia de agua. Esto puede hacerse "desplazando hacia la derecha" el rango estimado para <i>GSI</i>.</p> <p>La presión del agua no se considera al evaluar el rango de <i>GSI</i>, ya que la misma se incorpora posteriormente en los análisis geotécnicos, los que se desarrollan considerando esfuerzos efectivos.</p>		MUY BUENA Muy rugosas, cajas frescas o no intemperizadas	BUENA Rugosas, cajas ligeramente intemperizadas y algo oxidadas.	REGULAR Lisas, cajas moderadamente intemperizadas y algo alteradas	MALA Pulidas, cajas meteorizadas, con pátinas o con rellenos y/o fragmentos angulosos	MUY MALA Pulidas, cajas muy meteorizadas, con pátinas o con rellenos de arcilla blanda
ESTRUCTURA DEL MACIZO		DISMINUYE LA CALIDAD →				
	INTACTA o MASIVA Probetas de roca intacta. Macizos masivos o con pocas y muy espaciadas estructuras.	90			N/A	N/A
	BLOCOSA Macizos con 3 sets de estructuras, que definen bloques cúbicos, bien trabados entre si.	80			50	40
	MUY BLOCOSA Macizos con 4 sets de estructuras, o más, que definen bloques angulosos y trabados, pero que están parcialmente perturbados.	70				30
	BLOCOSA VETEADA Macizos plegados y con bloques angulosos formados por la intersección de muchas estructuras. Los planos de estratificación y/o esquistosidad son persistentes.	60				20
	DESINTEGRADA Macizo fuertemente fracturado, con una mezcla de bloques angulosos y redondeados, pobremente trabados.					10
	LAMINADA / CIZALLADA Macizo con planos débiles (cizalle y/o esquistosidad), muy poco espaciados entre si y que no definen bloques.		N/A	N/A		

Figura 2.18 : Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos fracturados.

Fuente : Marinos & Hoek, 2000.

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA MACIZOS ROCOSOS ESTRATIFICADOS HETEROGENEOS (Marinos & Hoek (2000)) En base a una descripción de la litología, la estructura del macizo y la condición de las estructuras (especialmente los planos de estratificación), seleccione una zona en la tabla. Ubique en esa zona la posición correspondiente a la condición de las estructuras y estime el valor medio de GSI . NO trate de ser demasiado preciso. De hecho, el considerar $33 \leq GSI \leq 37$ es más realista que suponer $GSI = 35$. Note que esta tabla NO es aplicable a problemas con control estructural. Si hay estructuras desfavorablemente orientadas ellas controlarán el comportamiento del macizo rocoso. En aquellos casos en que la resistencia al corte de las estructuras podría ser afectada por la humedad, deberá considerarse la eventual presencia de agua. Esto puede hacerse "desplazando hacia la derecha" el rango estimado para GSI para condiciones regular, mala o muy mala de las estructuras. La presión del agua no se considera al evaluar el GSI (análisis en esfuerzos efectivos).		CONDICION ESTRUCTURAS (PLANOS DE ESTRATIFICACION)				
COMPOSICION Y ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		MUY BUENA Muy rugosas, superficies frescas o no Meteorizadas.	BUENA Rugosas, superficies algo meteorizadas.	REGULAR Lisas, superficies moderadamente meteorizadas y lateradas.	MALA Muy lisas, ocasionalmente pulidas, con pátinas compactas o rellenos con fragmentos angulosos.	MUY MALA Muy lisas y pulidas o de superficies muy meteorizadas, y con pátinas o rellenos de arcilla blanda.
	A. Estratos gruesos de arenisca de mucha blocosidad. El efecto de posibles pátinas pelíticas en los planos de estratificación se ve minimizado por el confinamiento del macizo rocoso; sin embargo, en túneles poco profundos y/o taludes, estos planos de estratificación pueden generar inestabilidades controladas estructuralmente.	70	A			
	B. Arenisca con lentes delgadas de limonita.	60		B, C, D, E		
	C. Arenisca y limonita, en estratos de similar potencia.					
	D. Limolitas o esquistos limosos con estratos de arenisca.					
	E. Limolitas débiles o esquistos arcillosos con estratos de arenisca.					
	F. Esquistos limosos o arcillosos, deformados tectónicamente, muy plegados y Cizallados, con estratos de arenisca deformados y quebrados, definiendo una estructura casi caótica.	50			F	10
	G. Esquistos limosos o arcillosos no perturbados, con o sin intercalaciones de estratos delgados de arenisca.	40		30		
	H. Esquistos limosos o arcillosos, deformados tectónicamente, con una estructura caótica y bolsos de arcilla. Estratos delgados de arenisca quebrados en pequeños bloques de roca.	N/A	N/A		G, H	

→ Indica deformación por tectonismo.

Figura 2.19 : Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos estratificados y heterogéneos.

Fuente : Marinos & Hoek, 2000.

Propiedades del macizo rocoso.

Una vez evaluadas las propiedades de la roca “intacta” y definida la calidad geotécnica del macizo rocoso, es posible evaluar las propiedades geomecánicas de éste. Para esto se recomienda emplear el criterio generalizado de Hoek-Brown (ver Hoek et al. (2002)), con lo que la resistencia del macizo rocoso puede evaluarse como:

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

donde σ'_1 y σ'_3 son los esfuerzos principales efectivos en la condición de falla, σ_{ci} es la resistencia en compresión uniaxial de la roca “intacta”, y m_b , s y a son constantes del material que están dadas por:

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

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

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

donde m_i es el valor del parámetro m para la roca “intacta”, GSI es el índice de resistencia geológica del macizo rocoso ver Figura 2.18 y 2.19, y D es un factor que considera la perturbación que producen en el macizo rocoso el desconfinamiento y las voladuras. En la Tabla 2.8 se presentan algunas guías para evaluar D .

Tabla 2.8
Guías para evaluar el parámetro D en taludes.

TALUDES	
Condición	D
Excavación mecanizada en macizos de mala calidad geotécnica, con mínima perturbación al macizo rocoso.	0.7
Excavación mediante voladuras controladas (e.g. pre-splitting), con mínimo daño al macizo rocoso.	
Excavación mediante voladuras de mala calidad en taludes de obras civiles.	1.0
Desarrollo de expansiones en rajos de gran tamaño y profundidad, mediante voladuras de producción.	

Fuente : Modificado de Hoek et al., 2002

Ajustando una envolvente lineal a la de Hoek-Brown, como se muestra en Figura 2.20, es posible determinar valores para la cohesión, c , y el ángulo de fricción, ϕ , del macizo rocoso como:

$$\phi = \text{sen}^{-1}\left(\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_3)^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_3)^{a-1}}\right)$$

$$c = \frac{\sigma_{ci} \left((1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n} \right)^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}}$$

Donde:

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}}$$

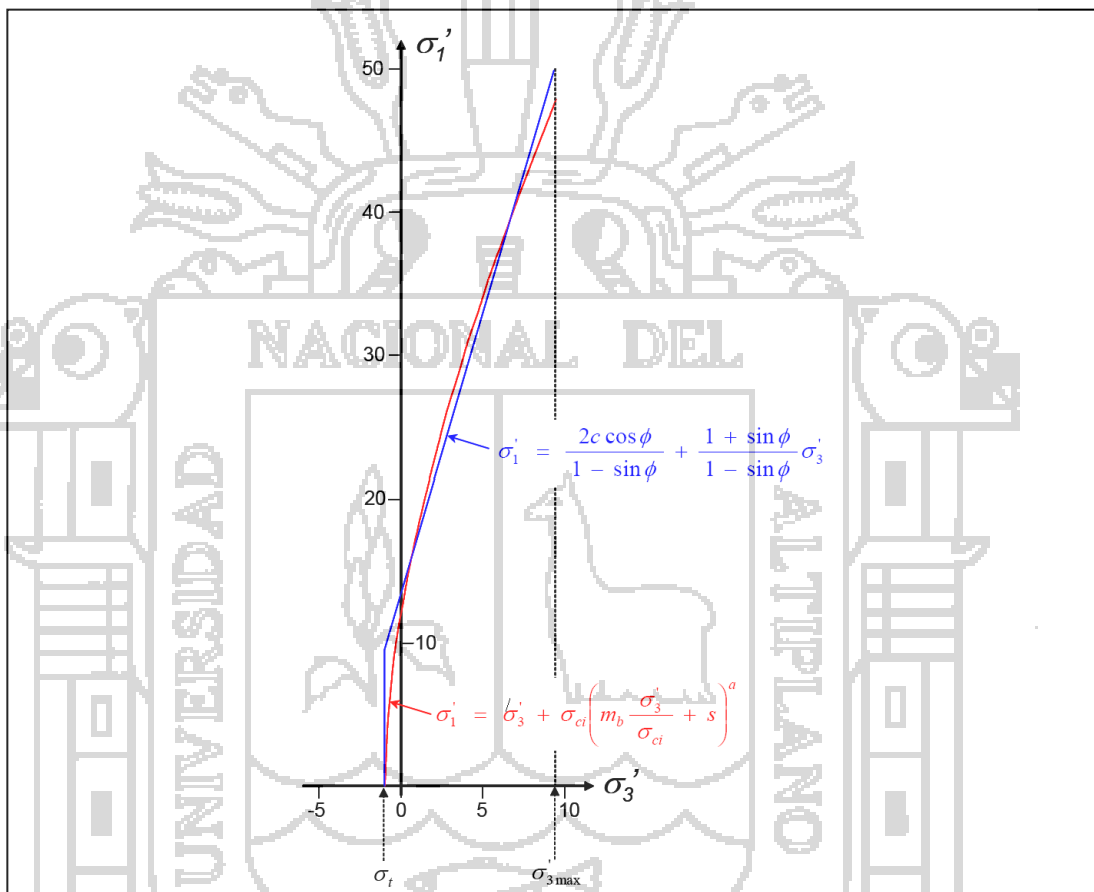


Figura 2.20 : Ajuste de una envolvente lineal a la envolvente de Hoek-Brown
Fuente : Hoek et al., 2002.

y σ_{3max} corresponde al límite superior del rango de esfuerzos de confinamiento considerado. Hoek et al. (2002) discuten la selección del valor más apropiado para este límite superior. Conocidos c y ϕ es posible definir la envolvente de Mohr-Coulomb para el macizo rocoso:

$$\sigma'_1 = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma'_3$$

Esto permite definir una resistencia “global” en compresión uniaxial para el macizo rocoso (Hoek & Brown (1997)), como:

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} = \sigma_{ci} \frac{\left(m_b + 4s - a(m_b - 8s) \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1} \right)}{2(1+a)(2+a)}$$

Para evaluar el módulo de deformabilidad del macizo rocoso, E_m , Hoek et al. (2002) sugieren utilizar la formula siguiente:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \times \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{40} \right)}$$

donde E_m se expresa en GPa, y σ_{ci} en MPa. Para estimar la razón de Poisson del macizo rocoso, ν_m , puede utilizarse la siguiente formula empírica (Karzulovic (1999)):

$$\nu_m = 0.4 - \frac{GSI^{0.7}}{100}$$

Conocidos E_m y ν_m pueden evaluarse los módulos de corte, G_m , y de deformabilidad volumétrica, B_m , del macizo rocoso:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)}$$

$$B_m = \frac{E_m}{3(1-2\nu_m)}$$

Cabe señalar que estas no son aplicables en aquellos casos en que el comportamiento del macizo rocoso presenta un claro control estructural. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

Propiedades de las estructuras.

La correcta evaluación de las propiedades geomecánicas de las estructuras presentes en el macizo rocoso resulta difícil en la práctica, debido a los efectos de escala y la dificultad y costo de ejecutar ensayos in situ. 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 sigue se resumen los criterios de caracterización y se presentan algunas recomendaciones prácticas. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

Resistencia al corte.

Hoek & Bray (1981) indican que la resistencia al corte de estructuras lisas o no rugosas puede evaluarse mediante el criterio de Mohr-Coulomb, considerando que la resistencia peak queda dada por:

$$\tau_{\max} = c_j + \sigma'_n \tan \phi_j$$

donde ϕ_j y c_j corresponden al ángulo de fricción y la cohesión para la condición de resistencia peak, y σ'_n es el valor medio del esfuerzo normal efectivo actuante sobre el plano de la estructura. En condición residual, o sea cuando se ha excedido la resistencia peak y han ocurrido desplazamientos importantes en el plano de la estructura, la resistencia al corte queda dada por:

$$\tau_{\max} = c_{jres} + \sigma'_n \tan \phi_{jres}$$

donde ϕ_{jres} y c_{jres} corresponden al ángulo de fricción y la cohesión para la condición de resistencia residual (usualmente la cohesión es nula en la condición residual), y σ'_n es el valor medio del esfuerzo normal efectivo actuante sobre el plano

de la estructura. Este criterio de resistencia se ilustra en Figura 2.21, y es el más utilizado en la práctica.

Como el criterio de Mohr-Coulomb ignora la no linealidad de la envolvente de resistencia al corte, la determinación de los parámetros de resistencia al corte debe hacerse para un rango de presiones de confinamiento acorde a la situación que se tendrá en terreno (de lo contrario éstos podrían no ser válidos).

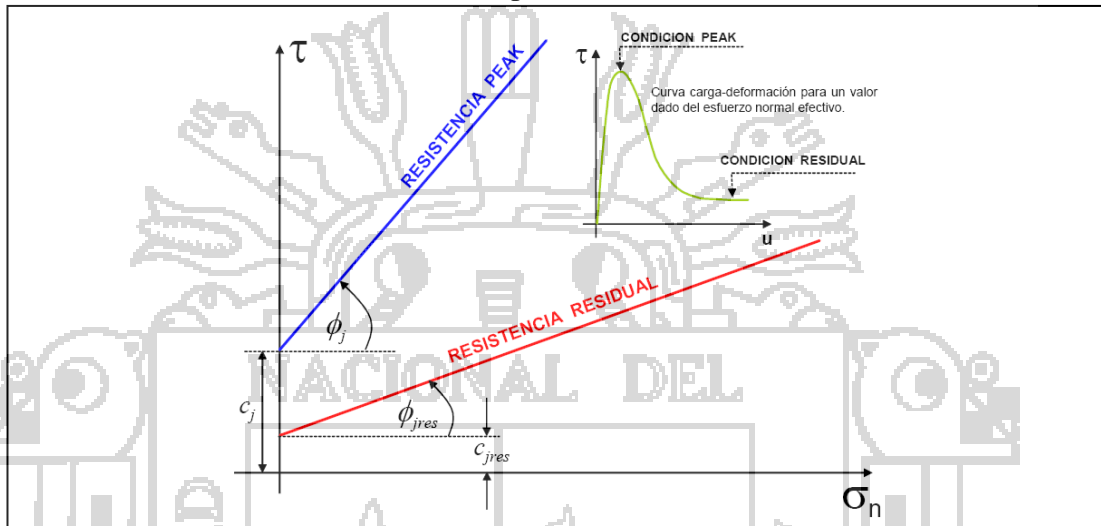


Figura 2.21 : Criterio lineal de Mohr-Coulomb para la resistencia peak y residual de una estructura.

Fuente : Flores G. & Karzulovic L., 2003.

Barton (1971,1973) propuso un modelo no lineal empírico para la resistencia al corte de las estructuras, sugiriendo que ésta podía determinarse con una precisión razonable si se consideraba la resistencia en compresión uniaxial de la roca de caja, JCS. Posteriormente, Barton & Choubey (1977) extendieron el criterio para incluir distintos grados de rugosidad en términos de un índice de rugosidad de la estructura, JRC. Barton y sus colaboradores han continuado mejorando este criterio, que actualmente se conoce como criterio de Barton-Bandis:

$$\tau_{\max} = \sigma_n \tan\left(JRC \lg\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \phi_b\right)$$

donde ϕ_b es el ángulo de fricción básico de la roca de caja de la estructura (medido sobre un plano liso de dicha roca), JRC es el coeficiente de rugosidad de la

estructura, y JCS es la resistencia en compresión uniaxial de la roca que forma la rugosidad de la estructura.

2.2.6. Caracterización hidrogeológica.

La caracterización hidrogeológica resulta fundamental para definir las posibles infiltraciones de aguas a la mina, tanto a rajo abierto como subterránea, y los potenciales requerimientos de drenaje y/o despresurización. Discusiones detalladas sobre distintos aspectos de la hidrogeología aplicada pueden encontrarse en los trabajos de Custodio & Llamas (1983), Freeze & Cherry (1979) y Fetter (2001); sin embargo, desde un punto de vista práctico puede señalarse lo siguiente respecto al flujo de aguas a través de los macizos rocosos y la caracterización hidrogeológica para un proyecto esta generalmente de gran envergadura. (Flores G. & Karzulovic L., 2003).

En la gran mayoría de los casos la conductividad hidráulica de los macizos rocosos queda definida por la presencia de estructuras, las cuales definen lo que comúnmente se denomina “permeabilidad secundaria” y es órdenes de magnitud mayor que la llamada “permeabilidad primaria”, asociada al flujo a través de la roca misma. Por lo mismo, la conductividad hidráulica de los macizos suele ser muy anisotrópica, siendo mucho mayor en la dirección de las estructuras que permiten el flujo de aguas que en la dirección normal a éstas. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

La presencia de las aguas subterráneas puede afectar a las excavaciones de tajo abierto:

- Puede causar cambios en la tensión efectiva de la masa rocosa donde se ha excavado, aumentando la posibilidad de fallas de taludes que conducen a otras medidas correctoras, para compensar la reducción de la fuerza global del macizo rocoso.
- Se pueden crear condiciones de saturación.
- Las aguas subterráneas por lo general tienen un efecto perjudicial sobre la estabilidad de taludes.

(Read & Stacey, 2009).

2.2.7. Análisis de estabilidad.

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 y del carácter temporal o definitivo del talud, combinando los aspectos de seguridad, costes de ejecución, consecuencias o riesgos que podría causar una desestabilidad.

Los análisis permiten definir la geometría de nuestro talud que debe de ser aplicado para lograr el factor de seguridad requerido. En caso de taludes inestables, los análisis permitirán diseñar medidas de corrección y estabilización adecuadas.

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 el talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad se pueden agrupar en:

- Métodos determinísticos
 - Métodos probabilísticos
- (Gonzales de Vallejo, 2002)

2.2.8. Principales modos de inestabilidad.

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

El acabado conocimiento del comportamiento de un talud frente a sus posibles roturas, repercute enormemente en los costos y en la seguridad, por ello las investigaciones de campo (in situ) y de laboratorio deben ser las suficientes, como para poder caracterizar en la medida de lo posible las características geomecánicas del terreno, así como los posibles modos de rotura. Se presenta a continuación una revisión de los tipos de fallas probables en un talud: cuando esta se encuentra dominada por las estructuras (con control estructural) y cuando no es posible determinar la familia de discontinuidades que determinaría el modo de falla (sin control estructural). (Morales Cárdenas, 2009).

La orientación de las distintas familias de discontinuidades combinadas con la orientación del talud en cada dominio estructural, dan origen a la formación de los potenciales modos de falla que se podrían presentar en el talud. (Hoek, Practical Rock Engineering, 2000).

Los diferentes modos de falla en taludes están asociados con diferentes estructuras geológicas y este es importante para el diseñador que podrá reconocer potenciales problemas de estabilidad durante la realización de las fases del proyecto. Algunas pueden ser identificadas mediante la representación y ploteo de polos en estereogramas. (Wyllie & Mah, 2004).

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

- Modos de falla por deslizamiento según uno o varios planos de discontinuidad que afloran en el talud y que incluirán los modos de falla plana y en cuña.
- Modos de falla por movimiento relativo de bloques a través de planos de discontinuidad preexistentes que no afloran necesariamente y que incluirán los modos de falla por volteo o vuelco, algunas fallas que siguen discontinuidades paralelas al talud y las fallas de varios bloques.
- Modos de falla producidas parte por deslizamiento a lo largo de planos de discontinuidad y parte por rotura de la roca y que incluirán los modos de falla en escalón, mixtas, complejas y por pandeo.

- Modos de falla que se producen siguiendo una superficie circular, sin relación importante con los planos de junta, y que en términos generales se denominan fallas circulares.

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

2.2.9. Fallas con control estructural.

Falla plana.

Se entiende por falla plana, o rotura planar, como aquella en la que el deslizamiento se produce a través de una única superficie plana. Siendo la más sencilla de las formas de rotura posibles se produce cuando existe una fracturación dominante en la roca y convenientemente orientada respecto al talud. La representación semiesférica en la red de Schmidt de esta condición se observa en la Figura 2.22, se prevé el deslizamiento cuando el rumbo de la familia de discontinuidades es similar al del talud y su buzamiento menor que este. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

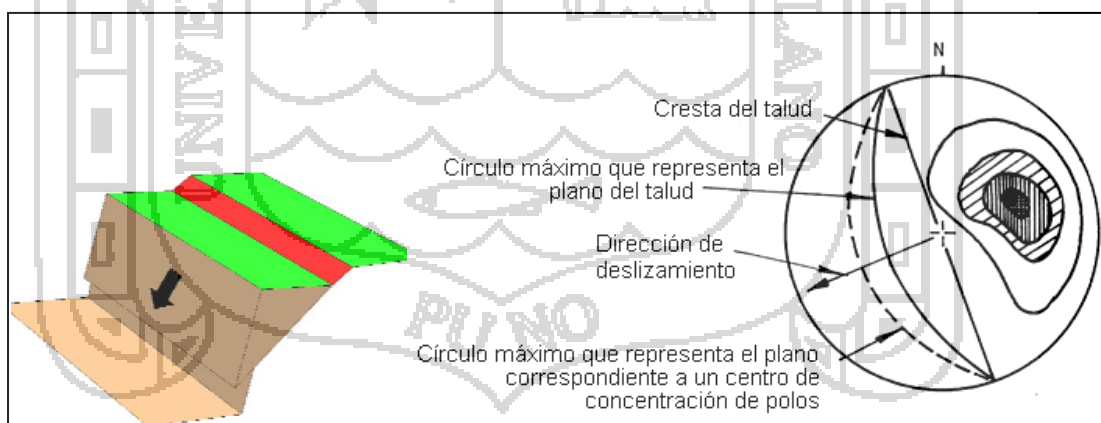


Figura 2.22 : Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla planar.

Fuente : Modificado de Hoek y Bray, 1977.

Falla por cuña.

La falla en cuña es un tipo de deslizamiento traslacional que está controlado por dos o más discontinuidades (estratificación, esquistosidad, diaclasa, falla, etc). Este tipo

de deslizamientos generalmente se dan en macizos rocosos resistentes, con discontinuidades bien marcadas. Este tipo de fallas es sin duda una de las más comunes en taludes excavaos en roca, fácilmente observados en canteras. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

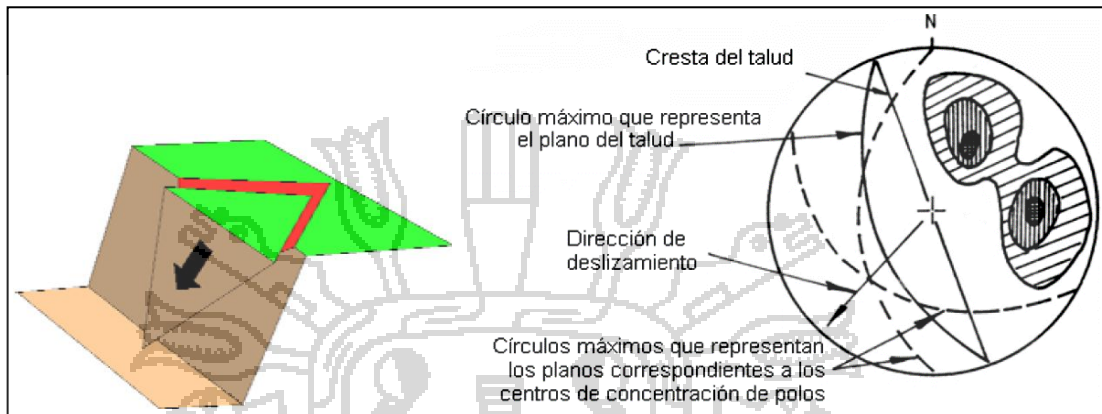


Figura 2.23 : Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla por cuña.
Fuente : Modificado de Hoek y Bray, 1981.

Si representamos el plano del talud y las discontinuidades en una proyección estereográfica, la disposición típica de los casos en que es posible la falla por cuñas es la que aparece en la Figura 2.23 en ella se aprecia la existencia de dos familias de discontinuidades de rumbos oblicuos respecto al del talud, quedando el rumbo de éste comprendido entre los de las dos familias de discontinuidades. La dirección de deslizamiento es la intersección de las dos familias de discontinuidades y ha de tener menos inclinación que el talud. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

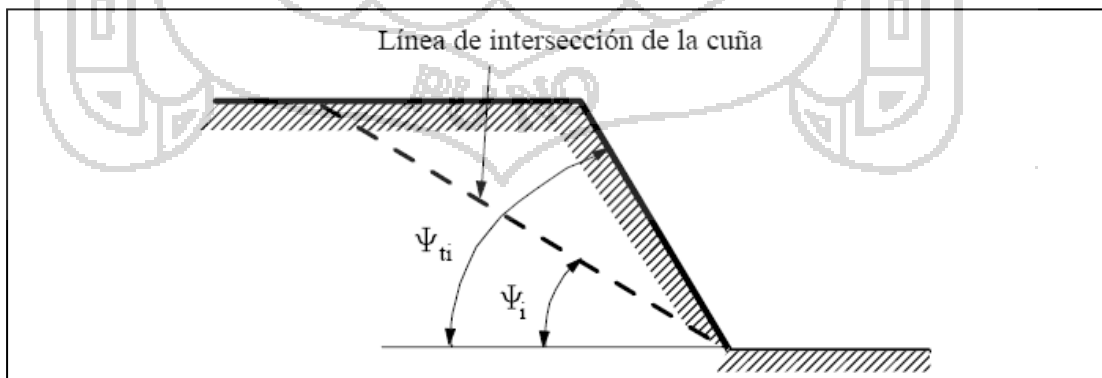


Figura 2.24 : Condición geométrica falla por cuña.
Fuente : Wyllie & Mah, 2004.

Donde:

ϕ : Ángulo de fricción de la estructura.

ψ_i : Ángulo de inclinación de la línea de intersección de la cuña

ψ_{ii} : Ángulo de inclinación del talud.

En este tipo de rotura se aprecia la existencia de dos familias de discontinuidades de rumbos oblicuos respecto al del talud, quedando el rumbo de este comprendido entre los de las familias de discontinuidades. La condición geométrica que hace posible el deslizamiento es $\phi < \psi_i < \psi_{ii}$, Figura 2.24. (Wyllie & Mah, 2004).

Falla por vuelco.

Las fallas por vuelco de taludes aparecen principalmente cuando el rumbo del plano de discontinuidad: falla, estratificación, etc., coincide aproximadamente con el del plano del talud y además tiene un fuerte buzamiento hacia el interior del macizo rocoso. Cuando el macizo rocoso presenta un conjunto de paquetes que quedan en voladizo, se produce el vuelco por flexión; además, puede aparecer una familia de discontinuidades conjugada con la principal, produciéndose en este caso un vuelco de bloques o un vuelco de bloques por flexión. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

Una rotura o falla por volcamiento se produce debido a la existencia de un set de fracturas paralelas o subparalelas y otro set perpendicular o sub-perpendicular. Estas estructuras forman bloques los cuales pierden la adhesión a la matriz y pueden rotar por sobre la base por efectos de la gravedad. La condición en la red de Schmidt se observa en la Figura 2.25. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

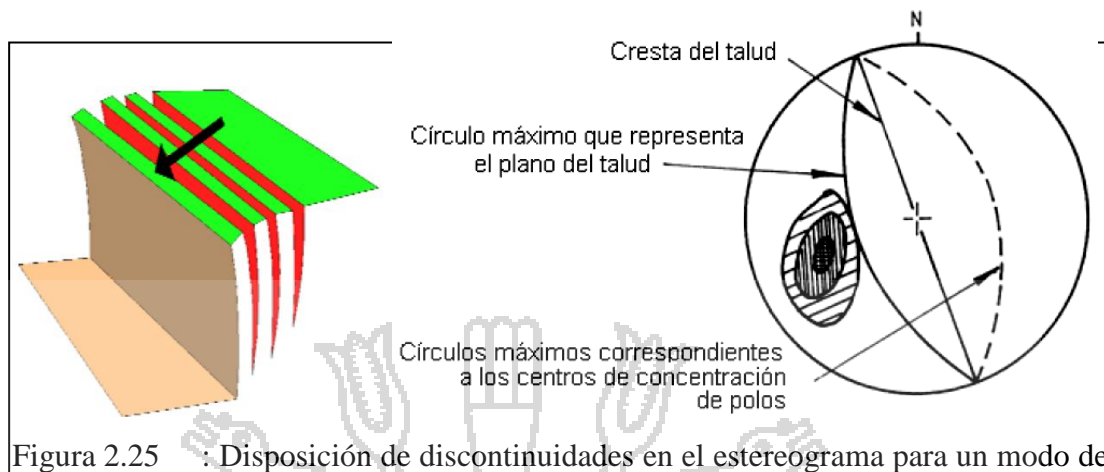


Figura 2.25 : Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla por vuelco de bloques.

Fuente : Modificado de Hoek y Bray, 1981.

El vuelco en taludes es posible siempre que un conjunto de discontinuidades bien definidos se inclina abruptamente en un talud. En este tipo de fallas, son largas, delgadas columnas de roca formadas por las discontinuidades fuertemente inclinadas estos pueden girar alrededor de un punto de giro situado en la esquina más baja del bloque. (Kliche, 1999).

2.2.10. Fallas sin control estructural.

Caída de rocas.

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

Falla circular.

También conocida como deslizamiento o rotura rotacional, es producida por muchos sets de fallas, las cuales tienen distintos rumbos y manteos, y dejan la roca muy fracturada, perdiendo la cohesión. Por la cantidad de fracturas, el macizo rocoso se transforma en una especie de gravilla, la que desliza por la cara del talud, tal como se

muestra en la Figura 2.26. Esta aproximación de rotura se hace cuando no es posible determinar la familia de discontinuidades que controla la inestabilidad (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

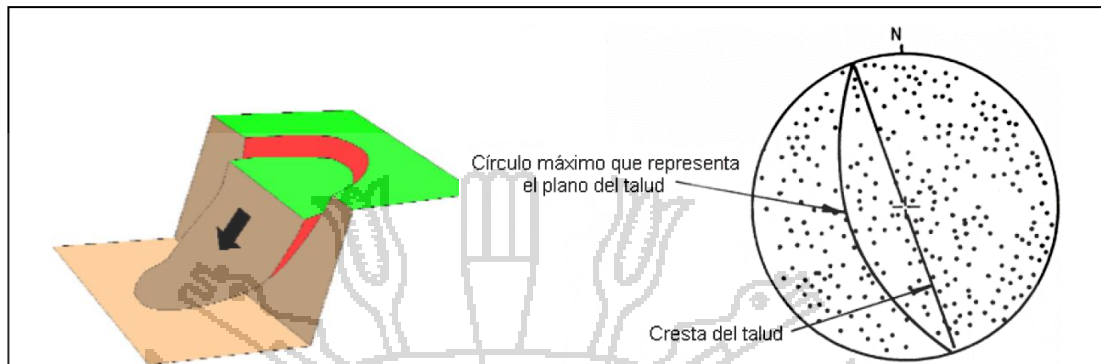


Figura 2.26 : Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla circular.

Fuente : Modificado de Hoek y Bray, 1981.

2.2.11. Índice SMR (Slope Mass Rating).

El Índice de Talud en Roca (SMR) es una clasificación geomecánica comúnmente usado para la caracterización de taludes en roca en roca. El Índice de Talud en roca (SMR) se calcula adicionando al índice de masa de roca básico (RMR) calculado por valores característicos de la masa rocosa, varios factores de corrección dependen del paralelismo de las discontinuidades del talud, ángulo de discontinuidades, el ángulo relativo entre discontinuidades y el talud y el método de excavación empleado. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

La aplicación de las clasificaciones geomecánicas a los taludes permite evaluar empíricamente la estabilidad de una excavación. A partir de la clasificación RMR, Romana (1997) ha propuesto la clasificación SMR aplicada a taludes. El índice se obtiene del RMR definiéndose unos factores de ajuste por orientación de discontinuidades y por el método de excavación; el primero de ellos es producto de los subfactores F_1 , F_2 y F_3 . (Gonzales de Vallejo, 2002).

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

El inconveniente con este método y la no aplicación del mismo en este trabajo es que siendo una metodología empírica esta considera que mientras más alto sea el valor de SMR este será más estable y no necesariamente se cumple en todos los taludes, por

lo cual se prefirió realizar un análisis estructural estereográfico para la identificación de los modos de falla más recurrentes en todo el talud, en cada una de las estaciones geomecánicas y el posterior análisis de estabilidad por métodos de equilibrio límite para el cálculo del factor de seguridad.

2.2.12. Factores que afectan la estabilidad de taludes.

La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), factores geológicos (que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos o relacionados con el comportamiento mecánico del terreno (resistencia y deformabilidad). El conocimiento de cada uno de estos factores permitirá un correcto análisis del talud, la evaluación del estado del mismo y diseñar medidas de prevención y corrección. (Gonzales de Vallejo, 2002).

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

2.2.13. Ensayos de laboratorio.

Las muestras obtenidas por los diferentes procesos de extracción son llevadas a laboratorio para la realización de ensayos. Los principales objetivos de hacer ensayos de laboratorio son de brindar una clasificación exacta del material extraído y determinar parámetros cualitativos y cuantitativos que representen el comportamiento mecánico y en algunos casos el comportamiento químico del material rocoso. (Suarez Burgoa, 2013).

Pruebas índice.

Un parámetro índice es una propiedad que puede ser determinada a través de ensayos de sencilla aplicación sobre muestras de roca. Estos parámetros proporcionan un valor que no puede tener un significado mecánico pero que puede relacionarse con ciertas características mecánicas del material rocoso. (Suarez Burgoa, 2013).

Peso unitario y densidad.

El peso unitario de una roca, γ , es definida como la relación entre el peso (W) y el volumen total (V_T) de la muestra.

$$\gamma = \frac{W}{V_T}$$

La densidad de una roca, ρ , es definida como la relación entre la masa (M) y el volumen total (V_T) de la roca. (Read & Stacey, 2009).

$$\rho = \frac{M}{V_T}$$

La medida de la masa de la muestra de material rocoso es directa a través de una balanza, sin embargo la medida del volumen bruto de la muestra puede abordarse por dos métodos. Dependiendo del tipo de muestra que se dispone; estos son: por medidas con calibrador para cuerpos de prueba de forma geométrica regular; y por el principio de Arquímedes para muestras de formas irregulares. (Suarez Burgoa, 2013).

Ensayos indirectos básicos.**Carga puntual simple.**

Existen como mínimo cuatro tipos de ensayos de carga puntual simple: el ensayo tipo Franklin y el de tipo Louis, ambos para cuerpos de prueba cilíndricos; y dos métodos para muestras irregulares. (Suarez Burgoa, 2013).

a. Cilíndrica Franklin.

Este ensayo de carga puntual fue propuesto en forma sistemática por Broch y Franklin, sin embargo se tiene conocimiento del mismo desde 1950. En este ensayo se mide la fuerza requerida para romper una muestra de roca comprimida entre dos puntas cónicas de acero truncadas en esferas. En el caso del ensayo diametral, la rotura se produce en un plano paralelo al eje de la carga. Este ensayo está normalizado según la norma ASTM D5731 como del tipo A y determina el índice de resistencia a carga puntual I_s en rocas en esto seco o húmedo, donde P es la carga de rotura y D es la distancia entre las puntas.

$$I_s = \frac{P}{D^2}$$

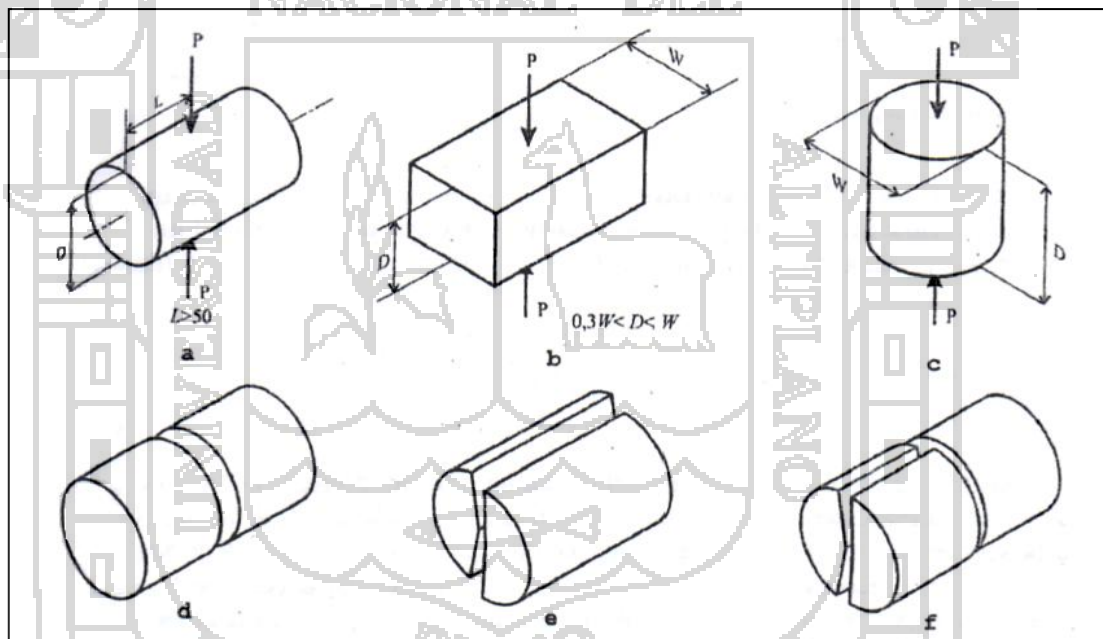


Figura 2.27 : Ensayo de carga puntual simple cilíndrica Franklin a, b y c. Aplicación de la carga puntual en el núcleo; d, e y f formas de aplicar la carga para el ensayo de carga puntual axial.

Fuente : Suarez Burgoa, 2013.

Los valores I_s se corrigen a un valor normalizado I_{s50} (correspondiente a una muestra cilíndrica de 50 mm de diámetro) a través de la expresión de la ecuación siguiente. Si el diámetro está próximo a 50 mm el exponente de la expresión es igual a 0,5.

$$I_{s50} = \left(\frac{D}{50} \right)^{0.45} I_s$$

La Figura 2.27 muestra las formas de aplicar la carga en los cuerpos de prueba y las distintas formas de ruptura aceptadas por el ensayo. (Suarez Burgoa, 2013).

b. Cilíndrica Louis.

El ensayo de carga puntual cilíndrica Louis se menciona como ensayo de carga axial Tipo B en la norma ASTM D5731. Se ejecuta por lo general en núcleos donde el diámetro se corrige para hallar uno equivalente D_e a través de la ecuación siguiente, donde A es el área de la sección transversal de la muestra. La Figura 2.28 muestra la forma de aplicar la carga y las distintas formas de ruptura aceptadas por el ensayo.

$$D_e = \frac{4A}{\pi}$$

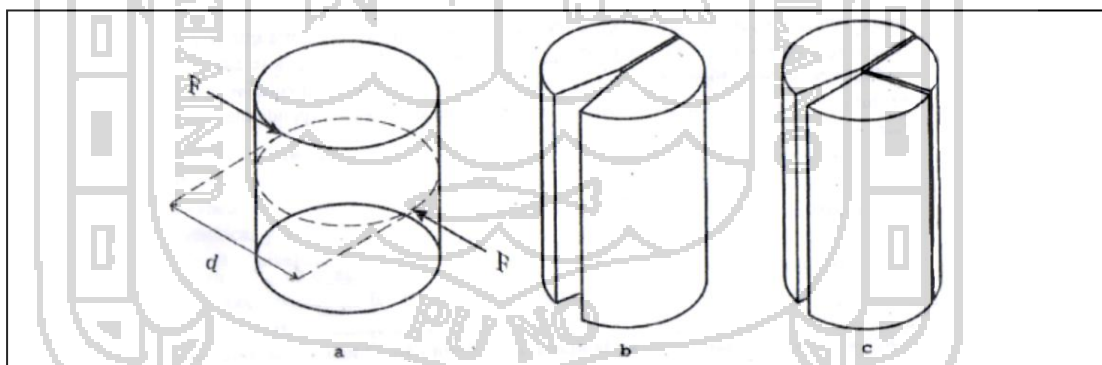


Figura 2.28 : Ensayo de carga puntual simple cilíndrica Louis. a. Aplicación de la carga en el núcleo; b y c formas aceptadas de aplicar la carga para el ensayo de carga puntual diametral.

Fuente : Suarez Burgoa, 2013.

c. Irregular.

Este ensayo se llama también ensayo Lump o puntual simple en muestra irregular Figura 2.29. Se emplea cuando la muestra ensayada es un trozo de roca de geometría

irregular. En este caso, se sustituye la variable D de la ecuación general de carga puntual de Franklin por una variable equivalente D_e .

$$D_e = \left(\frac{4DW}{\pi} \right)^{0.5}$$

Cuando se ensayan muestras irregulares, estas no requieren preparación; pero es importante ensayar más muestras, por lo menos veinte. La dimensión menor de la muestra D no debe ser menor a 30 mm ni más de 85 mm, con una dimensión preferencial de 50 mm. La relación D/W se recomienda que este entre 1/3 a 1, y con preferencia cerca de 1; mientras que la distancia L en por lo menos $0,5W$.

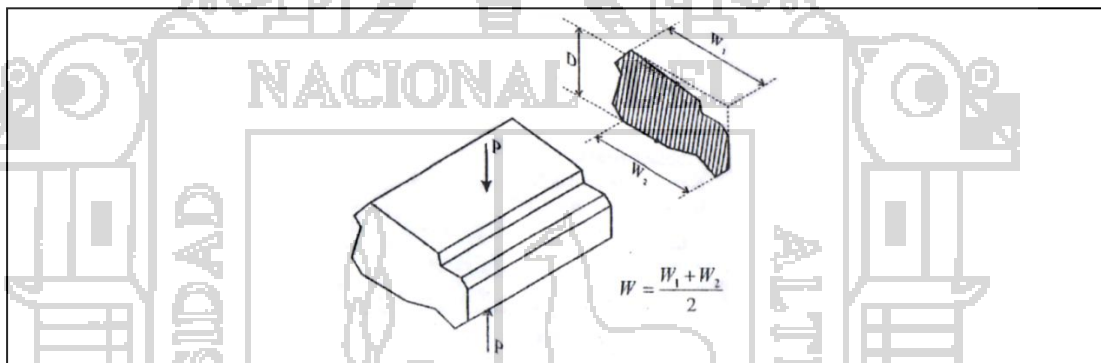


Figura 2.29 : Formas irregulares para el ensayo de carga puntual.
Fuente : Suarez Burgoa, 2013.

Ensayos en superficies de discontinuidades.

Mesa inclinada.

El ensayo de la mesa inclinada se usa para encontrar el ángulo de fricción básico del material rocoso (ϕ_b). Existen dos formas de ensayar cuerpos de prueba en la mesa inclinada. El primer método requiere de dos cuerpos de prueba prismáticos, pero como por lo general no se tienen cuerpos de prueba prismáticos o son muy trabajosos para prepararlos. El segundo método se propuso par cuerpos de prueba cilíndricos, en este caso se necesitan tres cuerpos de prueba del mismo diámetro. (Suarez Burgoa, 2013).

Este ensayo resulta sencillo, barato y fácil de repetir y de gran utilidad para aplicar el modelo Barton-Bandis de estimación de las propiedades resistentes de las discontinuidades rugosas sin relleno, que son las que más comúnmente se encuentran

en gran parte de los macizos rocosos a partir de cierta profundidad, por lo que se suele utilizar muy a menudo. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

Ensayo de compresión uniaxial.

El ensayo de compresión uniaxial es sin duda el ensay más usado e importante en cualquier investigación de mecánica de rocas este ensayo se restringe a aquellos materiales rocosos que son duros, irrompibles y que permitan su preparación, para este ensayo se prepararan cuerpos de prueba de material rocoso de forma cilíndrica a partir de bloques de muestras o de núcleos extraídos de las perforaciones. La resistencia ultima a compresión uniaxial de un cuerpo de prueba de material rocoso es el valor del esfuerzo ultimo registrado antes de producirse la falla, cuando esté es sometido a un esfuerzo paralelo al eje axial de la muestra que no está confinada. (Suarez Burgoa, 2013).

2.3. Definiciones conceptuales.

2.3.1. Macizo rocoso.

Es el medio in-situ que contiene diferentes tipos de discontinuidades como diaclasas, estratos, fallas y otros rasgos estructurales. (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, 2004).

2.3.2. 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 comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral. (Gonzales de Vallejo, 2002).

2.3.3. Discontinuidad.

Es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso. (Gonzales de Vallejo, 2002).

Una discontinuidad es una superficie del macizo rocoso que está abierta o puede abrirse fácilmente a causa de tenciones inducidas por la excavación. Las superficies de discontinuidad aparecen durante la formación de la roca (planos de estratificación, laminación, foliación, disyunción, etc) o posteriormente por causas tectónicas (esquistosidad, pizarrosidad y las fracturas: fallas y las diaclasas (estas últimas denominadas vulgarmente “juntas”). (Jorda Bordehore, 2013).

2.3.4. Orientación.

Es la posición de la discontinuidad en el espacio y comúnmente es descrito por la dirección de buzamiento y el buzamiento de la línea de máxima pendiente en el plano de la discontinuidad. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1987).

2.3.5. Meteorización.

Denominada también intemperización, está relacionada con la modificación que sufre la superficie de la roca o en sus proximidades, debido a la acción de agentes atmosféricos. El grado de la meteorización dependerá de las condiciones climatológicas, morfológicas y la composición de la masa rocosa. La meteorización se divide en meteorización física, química y biológica. (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, 2004).

2.3.6. Alteración.

La alteración de la roca o más propiamente dicha, alteración hidrotermal, se produce por la ascensión de fluidos o gases magmáticos a altas temperaturas a través de fracturas o zonas de falla. Éstos afectan a los rellenos de las zonas de falla y sus cajas, originando reemplazamientos y rellenos, que modifican las condiciones del macizo rocoso en los cuales se emplazan. Algunos tipos de alteración, como la silicificación y en menor grado la calcificación, mejoran las características de la masa rocosa, incluyendo las zonas de falla. Otros, como la propilitización, disminuyen levemente las condiciones debido a la presencia de cloritas en las paredes de las fracturas. La sericitización y la argilitización (aumento de minerales arcillosos) son las alteraciones más desfavorables para los macizos rocosos donde se emplazan. (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía, 2004).

2.3.7. Factor de seguridad.

El Factor de Seguridad es una medida determinista de la relación entre las fuerzas de resistencia (capacidad) y las fuerzas impulsoras (demanda) del sistema en su entorno considerado. El FoS es el criterio más básico de diseño aceptado en la ingeniería. En geomecánica saltó a la fama a mediados del siglo 20, cuando la ingeniería geotécnica

se desarrolló como una disciplina de ingeniería independiente en 1940. (Read & Stacey, 2009).

2.4. Hipótesis.

2.4.1. Hipótesis general.

La caracterización geotécnica estará relacionada con los modos de falla estructural presentes en el talud del Cerro Espinal Juliaca.

2.4.2. Hipótesis específicas.

- La caracterización geotécnica ayudara a determinar la estabilidad del talud en el Cerro Espinal Juliaca.
- Los modos de falla estructural dependerán estrictamente de la orientación de las discontinuidades y la dirección de corte del talud en el Cerro Espinal Juliaca





NACIONAL DEL
CAPÍTULO III
METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Diseño metodológico.

Consideramos a la presente investigación dentro del diseño metodológico descriptivo no experimental, en razón a las variables desarrolladas en la investigación.

La presente investigación es dominada caracterización geotécnica y modos de falla estructural en el talud en roca del Cerro Espinal Juliaca. Así, para que sea posible atender los objetivos anteriormente descritos, serán cumplidos los siguientes pasos.

3.1.1. Revisión, recopilación y elaboración de informaciones preliminares.

Fue hecha una revisión bibliográfica para tener una visión del estado del conocimiento en relación a las metodologías de caracterización geológica, caracterización estructural, caracterización de macizos rocosos, ensayos de campo y laboratorio, modos de falla estructuralmente controlados. Con los cuales se elaboraron informes preliminares relacionados al trabajo de investigación.

3.1.2. Selección, establecimiento de condiciones y caracterización del sitio.

Fue seleccionado el corte de talud del Cerro Espinal ubicado en la ciudad de Juliaca ya que las condiciones en las que se encuentra cumple con los objetivos relatados (Talud rocoso, discontinuidades bien definidas, talud de gran altura estructuralmente controlado, otros). La caracterización del talud del Cerro Espinal fue realizada geológicamente, estructuralmente y geotécnicamente.

3.1.3. Caracterización geológica.

Mediante trabajos de campo estrictamente geológicos, se identificaron las diferentes litologías presentes en el área de estudio, el grado de meteorización, los contactos primarios y secundarios cercanos al talud del Cerro Espinal.

3.1.4. Caracterización estructural.

Se identificó estructuras mayores, como una falla en la base del talud y estructuras menores utilizando la metodología de mapeo por ventanas, A través de seis estaciones distribuidos en forma aleatoria en la base del talud y dos en otras litologías en las cuales no se presentan problemas de inestabilidad, tomándose como datos de campo dirección de buzamiento, buzamiento, RQD, espaciamiento, características de las discontinuidades (persistencia, apertura, rugosidad, relleno y alteración) y la presencia de agua. Adicionalmente fueron tomados 535 puntos distribuidos aleatoriamente, solo de la orientación de las estructuras para el análisis exclusivo de los modos de falla estructural presentes en el talud del Cerro Espinal.

3.1.5. Caracterización Geotécnica.

Los datos obtenidos en el campo y en laboratorio para las respectivas caracterizaciones geológica y estructural son utilizados en conjunto para tener una caracterización geotécnica del macizo rocoso del talud del Cerro Espinal. Así calculamos el RMR y consiguientemente el GSI.

3.1.6. Ensayos de laboratorio.

Para la determinación de las propiedades e índices de la roca intacta se realizaron los siguientes ensayos; Ensayo de compresión uniaxial en rocas, ensayos de carga puntual y la densidad de roca.

3.1.7. Análisis de los modos de falla en taludes.

Para el análisis de los modos de falla presentes en el talud del Cerro Espinal se utilizó el software Dips v.6.0 y para el análisis de estabilidad por el método de equilibrio limite el software RocTopple v.1.0 ambos de la firma Rocscience.

3.2. Población.

La presente investigación se realizará en el Cerro Espinal ubicada en el distrito de Juliaca, provincia de San Román, Departamento de Puno. Teniendo como población a todo el Cerro Espinal.

3.3. Muestra.

El muestreo se realizara por muestreo universal.

- Macizo rocoso.
- Roca intacta.
- Discontinuidades.
- Litología.

3.4. Variables.

3.4.1. Variables independientes.

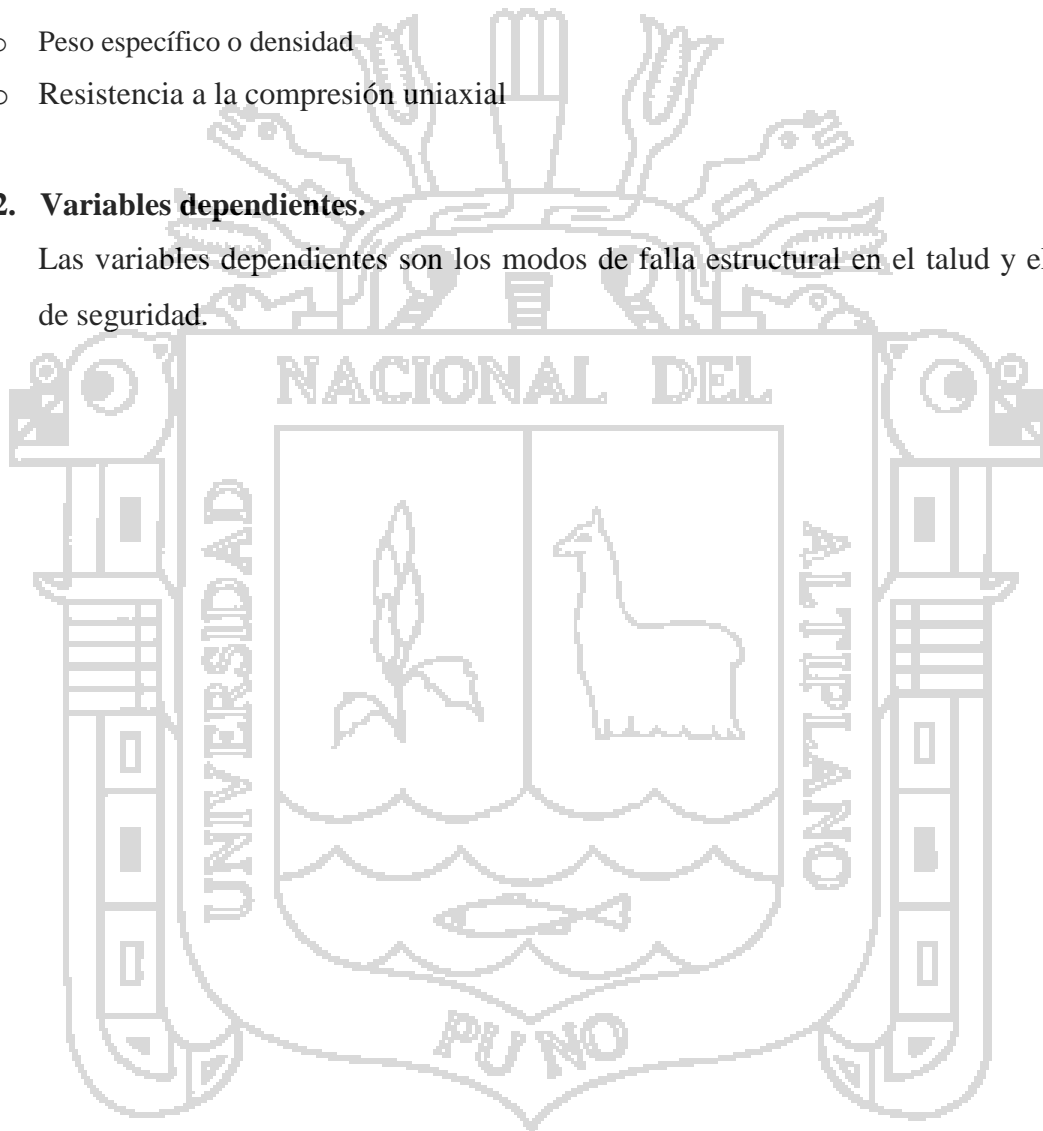
Las variables independientes más importantes son las siguientes:

- Geometría del talud
 - o Altura
 - o Dirección de la base del talud
 - o Longitud
 - o Pendiente del talud
- Datos estructurales
 - o Dirección de buzamiento
 - o Buzamiento
- Propiedades de las discontinuidades
 - o Espaciado
 - o Persistencia

- Rugosidad
- Apertura
- Relleno
- Agua
- Meteorización
- Alteración
- Datos de laboratorio
 - Peso específico o densidad
 - Resistencia a la compresión uniaxial

3.4.2. Variables dependientes.

Las variables dependientes son los modos de falla estructural en el talud y el factor de seguridad.



3.4.3. Operacionalización de variables.

	Variable(s)	Dimensión(es)	Indicador(es)
Variables Independientes	Altura del talud	Longitud	Metros (m)
	Dirección de la base del talud	Ángulo	Grados (°)
	Longitud del talud	Longitud	Metros (m)
	Pendiente del talud	Ángulo	Grados (°)
	Dirección de Buzamiento	Ángulo	Grados (°)
	Buzamiento	Angulo	Grados (°)
	Espaciado	Longitud	Milímetros (mm)
	Persistencia	Longitud	Metros (m)
	Rugosidad	Adimensional	Texto
	Apertura	Longitud	Milímetros (mm)
	Relleno	Longitud	Milímetros (mm)
	Agua	Adimensional	Texto
	Meteorización	Adimensional	Texto
	Alteración	Adimensional	Texto
Peso específico	Peso	Newton/metro ³	
Resistencia a la compresión uniaxial	Fuerza	Mega pascales (MPa)	
Variables Dependientes	Modo de falla estructural	Adimensional	Porcentaje de falla (%)
	Factor de seguridad	Adimensional	Numero

Fuente : Elaboración propia.

3.5. Técnicas de recolección de datos.

3.5.1. Investigaciones de campo.

Las investigaciones de campo constituyen la parte más esencial de los estudios geológicos, estructurales y geotécnicos necesarios en todo proyecto de estabilidad de taludes. De ellos se obtienen los parámetros y propiedades que definen las condiciones del macizo rocoso. El objetivo de las investigaciones de campo es conocer y cuantificar las condiciones de los materiales con los que se van a trabajar,

ya que estos pueden afectar la viabilidad, diseño y construcción de una obra o estructura.

Para el presente estudio se realizaron los siguientes trabajos de campo:

- Mapeo geológico.
- Mapeo estructural.
- Mapeo geotécnico.

3.5.2. Ensayos de laboratorio.

Se realizaron ensayos que permitieron obtener las propiedades mecánicas de las litologías presentes en el talud para la identificación de los modos de falla estructural presentes en el talud del Cerro Espinal, en tal forma que son lo más representativos de las situaciones reales en el campo.

Los ensayos de laboratorio realizados en el talud son las siguientes:

- Determinación de la densidad.
- Ensayo de compresión uniaxial (UCS).
- Ensayo de carga puntual (PLT).

Todos los ensayos de laboratorio fueron realizados en el laboratorio de Mecánica de Rocas y Suelos de la Facultad de Ingeniería de Minas.

3.6. Técnicas para el procesamiento de la información.

Los datos de la caracterización estructural y geotécnica del talud fueron almacenados en el software Microsoft Excel y expresados en histogramas, algunos de los datos de caracterización fueron expresados en polígonos de frecuencia normalizados en el software Minitab v.6.0 versión de prueba y los datos relacionados con la orientación de estructuras y el análisis de los modos de falla estructural presentes en el talud del Cerro Espinal Juliaca se realizaron con la utilización del software Dips v.6.0 y finalmente el análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite para el cálculo del factor de seguridad por el modo de falla estructural por vuelco se realizó con la ayuda del software RocToppo v.1.0 de la firma Rocscience licencia Educativa de la Facultad de Ingeniería de Minas.

CAPÍTULO IV CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Generalidades.

4.1.1. Ubicación.

El área de estudio está situada aproximadamente a 3 Km de la plaza de Armas de la ciudad de Juliaca en dirección Oeste. Políticamente, se ubica dentro del departamento de Puno, provincia de San Román, Distrito de Juliaca. El área está delimitada por las coordenadas presentadas en la Tabla 4.1, solo se considera la zona donde se encuentra el corte del talud.

Tabla 4.1
Delimitación del área de investigación

	Norte	Este
A	8286000	0372000
B	8286000	0380000
C	8280000	0372000
D	8280000	0380000

Fuente : Elaboración propia.

4.1.2. Accesibilidad.

La accesibilidad al área estudiada, se logra desde la ciudad de Puno por la vía principal transoceánica sur, vía provincial Puno – Juliaca como se detalla en el Anexo 02, para llegar al frente de talud del Cerro Espinal se accede por la autopista

héroes de la guerra del pacifico de la ciudad de Juliaca y podrá observar el talud en la dirección Sur.

Tabla 4.2
Accesibilidad al área de estudio

Tramo	Distancia	Tiempo	Tipo de via	Via principal
Puno - Juliaca	44 Km	0h:45'	Asfaltado	Puno - Juliaca
Juliaca – Área de estudio	3 Km	0h:20'	Asfalto	Autopista heroes de la guerra del pacifico
Total	47 Km	1h:05'		

Fuente : Elaboración propia.

4.2. Aspectos climáticos.

Para la zona comprendida entre 3.800 y 4.000 m.s.n.m., la dispersión de las temperaturas es grande debido a los efectos de exposición, de abrigo y de distancia al lago. En las cimas más altas que delimitan la cuenca, la temperatura media anual desciende bajo cero alrededor de 5.100 m.

4.2.1. Temperatura.

Las temperaturas máximas se presentan en el mes de febrero que oscilan entre 13°C y 18°C e incluso llega hasta los 21°C, y las temperaturas mínimas se presentan en el mes de julio que bajan hasta los 12°C bajo cero.

4.2.2. Precipitación.

La época de lluvias está centrada en enero. Comienza generalmente en diciembre para terminarse en marzo. La época seca, centrada en junio, se escalona de mayo a agosto. Dos períodos de transición separan estas dos épocas, uno en abril y el otro de septiembre a noviembre. Según las cuencas, del 65 al 78 % de la precipitación anual se acumula durante los cuatro meses de la época de lluvias, mientras que solamente del 3 al 8 % intervienen durante la época seca. Los dos períodos intermedios corresponden a una participación de 18 a 29 %.

4.3. Caracterización geológica.

4.3.1. Descripción geológica regional.

Dentro de la geología regional del Altiplano puneño se han reconocido, rocas cuyo rango en edad van desde el Paleozoico hasta el reciente. Su distribución está

controlada por una serie de bloques delimitados por fracturas con rumbo NO-SE, los cuales determinaron la deposición, el tectonismo y el vulcanismo.

El Altiplano es una planicie sin rasgos fisiográficos, se ubica alrededor de los 4900 m.s.n.m. con algunas colinas bajas al Este de Juliaca.

4.3.2. Descripción geológica local.

El área de estudio localmente se encuentra constituida por litologías pertenecientes al paleozoico; grupo Cabanillas del sistema Ordoviciano, grupo Ambo del sistema Carbonífero inferior y el grupo Mitu perteneciente al Permiano superior. Los depósitos aluviales presentes en la parte baja de las laderas del Cerro Espinal son materiales modernos y cuaternarios. En el Anexo 06 – Foto 01, se muestra una fotografía de Este a Oeste de las formaciones geológicas locales presentes en el talud del Cerro Espinal y la falla normal.

En el Anexo 04, se presenta el plano geológico estructural de la zona de estudio. Este se realizó producto de un mapeo geológico por contorneo de contactos e identificación de estructuras como es el caso de la falla normal.

Grupo Cabanillas (D-ca).

La sección tipo fue definida por Newell (1949) en el área de Cabanillas 40 Km. Al Sur Oeste de Juliaca.

Litológicamente compuesta por capas delgadas de areniscas y limolitas con lutitas nodulares silicificadas, también pueden ser lutitas gris oscuras interconectadas con areniscas cuarzosas, en ciertas zonas también se aprecian lutitas grises intercaladas con capas delgadas de arenisca, con facies turbidíticas con presencia de fósiles.

Como se muestra en el Anexo 06 – Foto 01, el grupo Cabanillas se encuentra en la base del talud del Cerro Espinal de color amarillo este infrayaciendo al grupo Ambo de color verde claro y también podemos ver al grupo Cabanillas al Este de la foto producto de una falla normal.

El grupo Cabanillas es el afloramiento más antiguo cercano a la zona de estudio, este presenta micropliegues, empaquetamiento de estratos típicos por ser una formación de origen sedimentario, discontinuidades y lutitas nodulares silicificadas que se observan en el Anexo 06 – Foto 02 y 03.

Grupo Ambo (Ci-a).

Este nombre fue aplicado originalmente por Newell et al. (1953), para agrupar una secuencia de capas continentales de edad Misisipiana.

Este tiene su mejor desarrollo al sur del área de investigación, presentándose una discordancia angular sobre Lutitas, allí se tiene una arenisca cuarcífera gruesa. Localmente las areniscas son guijarrosas, las capas son de 0.50 m a 1.50 m de grosor. La sucesión sedimentaria indica deposición continental, las unidades basales son particularmente inmaduras implicando transporte local.

Como se muestra en el Anexo 06 – Foto 01, el Grupo Ambo está ubicado en la base del talud del Cerro Espinal representado de color verde claro. En el Anexo 06 – Foto 04 se muestra el afloramiento del grupo Ambo distinguiéndose los paquetes de estratos sedimentarios.

Grupo Mitu (PsTi-mi).

El nombre Mitu fue originalmente aplicado por Mc Laughlin (1924) para una secuencia de capas rojas permianas, en el Perú central. Una fase volcánica fue reconocida y es así que Newell et. al (1953) aplicaron el nombre de Grupo Mitu en forma genérica para definir la sucesión de capas rojas permianas y los volcánicos suprayacentes como un solo grupo. Ver Anexo 06 – Foto 05.

Como se muestra en el Anexo 06 – Foto 01, este grupo compone toda la superficie expuesta del talud de color rosado y litológicamente está compuesta por Tobas Cristalolíticas de color rojizo con cristales de plagioclasas y biotitas ver Anexo 07 en el cual se realiza la descripción petrológica.

Estructuralmente las discontinuidades presentes en este grupo son los que controlan la estabilidad del talud del Cerro Espinal, en el Anexo 06 – Foto 05, se muestra el

afloramiento del grupo Mitu, las discontinuidades presentes y la presencia de bloques columnares estructuralmente controlados.

Depósitos Aluviales.

Son depósito resientes que se encuentra en toda la parte baja de la zona de estudio de origen aluvial, constituidos por materiales de rocas subredondeados a redondeados de diversos tamaños constituidos en una matriz de limos y arcillas. Cubiertos por la vegetación típica del altiplano como se muestra en la Anexo 06 – Foto 06.

4.3.3. Contactos.

Es una línea que separa las rocas de naturaleza diferente o dos unidades litológicas. Las cuales se clasifico como:

- Contactos definidos.
- Contactos inferidos.

Con la realización del mapeo geológico en campo se identificó contactos definidos en la zona de estudio.

En la base del talud se presenta un contacto geológico entre las lutitas del grupo Cabanillas y las cuarcitas del grupo Ambo ver Anexo 06 – Foto 07.

Al extremo oeste del talud se muestra el contacto geológico entre las areniscas cuarzosas del grupo Ambo y las Tobas Cristalolíticas del grupo Mitu como se muestra en el Anexo 06 – Foto 08.

4.3.4. Geomorfología.

Dentro del marco fisiográfico descrito se han identificado varias unidades geomorfológicas en cuyo modelado externó han participado agentes como el clima, la lluvia, el viento y las corrientes fluviales, las geoformas también están asociadas a la litología y estructuras como plegamientos y fallas.

El relieve regional del Sur del Perú presenta una superficie accidentada debido a la presencia de la cordillera de los Andes. Este sistema montañoso desenvuelve

diversas geoformas morfo-estructurales de características peculiares en diversas localidades.

Según la clasificación de características geomorfológicas del territorio peruano, el área de estudio se encuentra ubicada dentro de las unidades morfo-estructurales denominadas Altiplano – cordillera occidental (INGEMMET, 1995), comprendida entre las cordilleras Occidental y Oriental de los Andes del Sur del Perú.

El aspecto geomorfológico en la estabilidad de taludes es tomado en cuenta cuando se tratan de taludes que son naturales y no existe intervención antrópica. Por lo tanto no se toma muy en cuenta en el presente estudio.

Geomorfología Local.

La geomorfología local de la zona sur de Juliaca está comprendida de unidades montañosas (colinas Altas, colinas Medias, Pie de monte) presenta una pequeña planicie. Como también presenta unidades fluviales (valles en U, lechos de río, terrazas aluviales y bofedales) y unidades antrópicas como carreteras (afirmada y trocha), viviendas.

Unidades Geomorfológicas.

Unidades Montañosas.

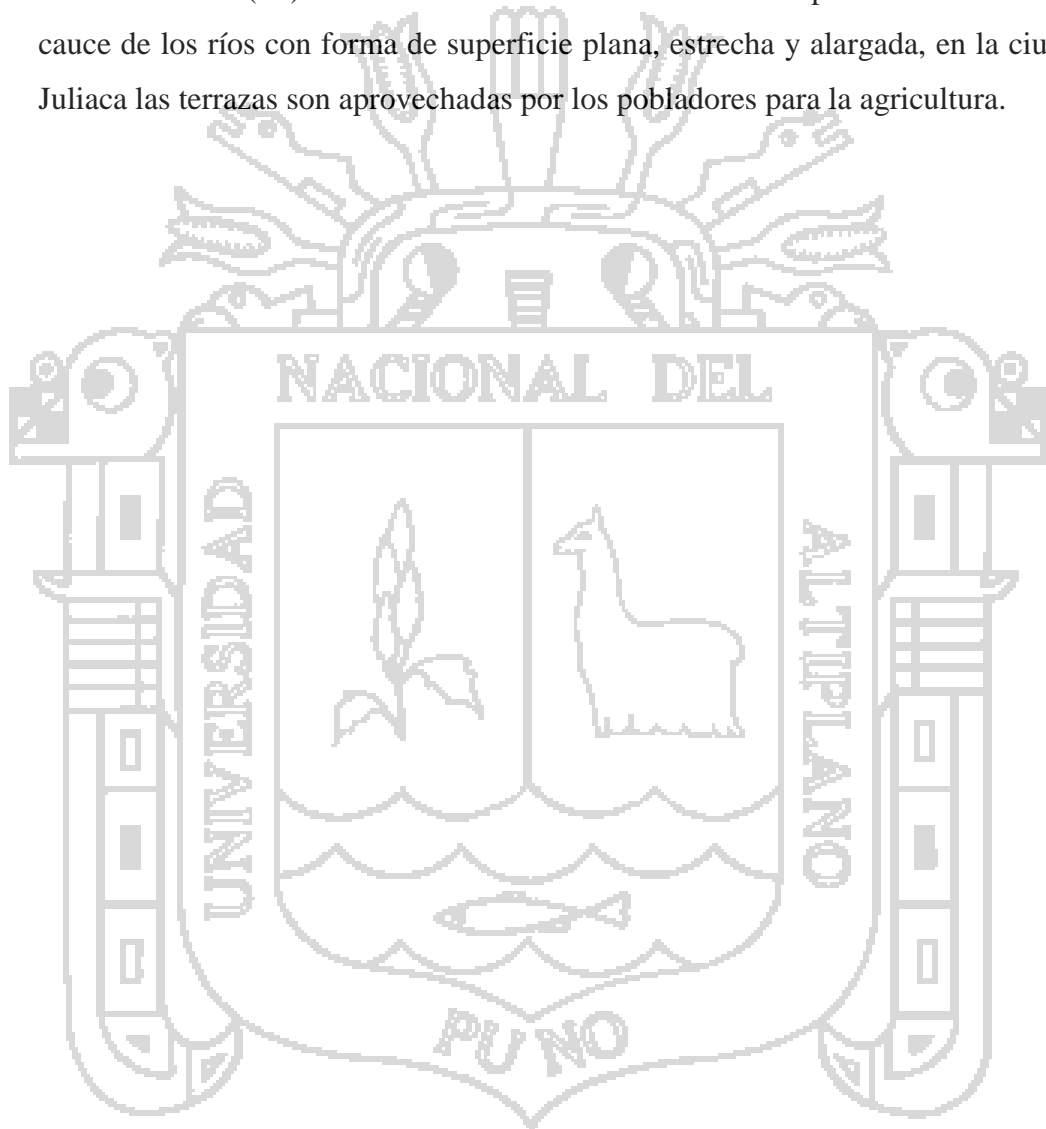
- Colinas altas (c-a). Son elevaciones de forma redondeada, producto de la erosión. Esta unidad se presenta con una cota superior a las demás unidades geomorfológicas presentes en la zona de estudio.
- Colinas medias (c-m). Esta unidad presenta elevaciones con altitud media, en el área de estudio esta unidad fue la más resaltante.
- Pie de monte (p-m). Esta unidad representa las partes más bajas en las que se presenta acumulaciones de material no consolidado.


Unidades fluviales.

- Valles “U” (v-u). Un valle es una depresión de la superficie terrestre, entre dos vertientes, de forma alargada e inclinada hacia un lago, mar o cuenca endorreica, por

donde habitualmente discurren las aguas de un río. Esta unidad es producto de erosión, meteorización en el tiempo por los agentes geológicos.

- Lecho de río (l-r). Esta unidad se encontró con mayor frecuencia en la zona de estudio debido a las precipitaciones pluviales.
- Terraza aluvial (t-a). Son acumulaciones de sedimentos depositados a los largo del cauce de los ríos con forma de superficie plana, estrecha y alargada, en la ciudad de Juliaca las terrazas son aprovechadas por los pobladores para la agricultura.





NACIONAL DEL
CAPÍTULO V
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización estructural.

Se identificaron estructuras mayores y menores, realizando una descripción cuantitativa de las estructuras que controlan los modos de falla en el talud, para lo cual fue utilizado el mapeo por ventanas, este fue seleccionado debido a que no se tenía acceso a partes altas del talud.

5.1.1. Estructuras mayores.

La zona de estudio constituye una parte del altiplano (el altiplano es una planicie sin rasgo fisiográficos, con algunas colinas bajas que se encuentra al NE de Juliaca), en la cual predominan diferentes litologías (rocas sedimentarias y rocas ígneas). Al tener diferentes composiciones litológicas y al estar afectada por más de una fase tectónica, estas presentan diferentes respuestas a la deformación, con estilos estructurales diferentes.

En la zona de estudio se observó las siguientes estructuras geológicas:

- Fallamientos
- Contactos

Fallas.

Se ha identificado una falla normal en la parte inferior del talud con una dirección de 40° NW como se muestra en el Anexo 04 – plano geológico estructural, esta estructura mayor no afectara en el análisis de los modos de falla estructural en el talud del Cerro Espinal.

5.1.2. Estructuras menores.

Micropliegues.

Los pliegues son flexiones u ondulaciones. Los pliegues se dividen en dos grupos los anticlinales y sinclinales. Este tipo de estructuras se presenta en menor escala en el grupo Cabanillas como se observa en el Anexo 06 – Foto 02.

Diaclasamientos.

Son estructuras que se presentan a modo de aberturas o grietas. Estas estructuras predominan en las Tobas cristalolíticas del grupo Mitu, que constituye todo el afloramiento del talud del Cerro Espinal, los cuales fueron caracterizados geológica, estructural y geotécnicamente, las estructuras que controlan en mayor porcentaje el desprendimiento de bloques columnares a lo largo del talud se resaltan en la Anexo 06 – Foto 09.

5.1.3. Familias de discontinuidades y orientación de juntas.

Se tomaron en el campo 535 datos de dirección de buzamiento y buzamiento con una brújula Brunton de manera aleatoria a lo largo del talud ver Anexo 06 – Foto 10 y Anexo 05, para la respectiva caracterización estructural de las discontinuidades.

Los datos fueron procesados en el software Dips v.6.0 de Rocscience. La representación de polos de los 535 datos fueron proyectados en el estereograma de hemisferio inferior equiángular, estos son expresados en puntos de color azul de manera dispersa como se muestra en el Anexo 08, la dispersión de polos se debe a la

variabilidad que presentan las orientaciones de las estructuras presentes en el talud y los posibles errores en la toma de datos estructurales en el campo.

Debido a la variabilidad de puntos ploteados en el estereograma es que surge la necesidad de representarlos mediante un diagrama de densidad de polos como se muestra en el Anexo 09, este nos muestra con mayor detalle la agrupación estadística de los datos tomados en el campo, definiéndose cuatro familias de discontinuidades principales estos representados de coloración amarilla, naranja y rojo en el centro de los contornos y una familia aleatoria de menor intensidad que en el centro nos muestra una coloración celeste.

Luego de identificar las familias, las definimos mediante un diagrama de planos como se muestra en el Anexo 10, del diagrama, tenemos cuatro familias de discontinuidades principales con las siguientes orientaciones (Buzamiento/Dirección de buzamiento): familia principal 1 (63/266) representada de color naranja, familia principal 2 (59/311) representada de color morado, familia principal 3 (61/340) representada de color verde, familia principal 4 (84/27) representada de color rojo. También se consideró una familia aleatoria con la siguiente orientación (54/114) representada de color azul. También representamos la orientación del plano del corte del talud (65/30) de color negro.

5.1.4. Descripción cuantitativa de las estructuras.

Para la descripción óptima de las estructuras presentes en el talud se realizó un mapeo por ventanas, estos distribuidos aleatoriamente en la parte baja del talud del Cerro Espinal, los datos fueron almacenados en fichas de campo y las presentamos en hojas Excel en el Anexo 12.

En los siguientes acápite mostramos histogramas y polígonos de frecuencia normalizados tomando en consideración los datos obtenidos en el campo producto de la caracterización del macizo rocoso de seis fichas de estaciones geomecánicas realizadas en el grupo Mitu, una ficha en el grupo Cabanillas y una ficha en el grupo Ambo. Los valores tomados para la realización de los histogramas fueron realizados según la frecuencia en la cual estos valores se presentan en las fichas geomecánicas con relación a distintos intervalos ya estandarizados por la ISRM de cada uno de los

parámetros que caracterizan a las estructuras como; espaciado, persistencia, rugosidad, apertura, relleno, presencia de agua en discontinuidades y la resistencia de las paredes de las discontinuidades.

5.1.5. Espaciamiento de las estructuras.

El espaciado de las discontinuidades fue medida colocando una cinta métrica perpendicular a las discontinuidades en el afloramiento como se muestra en el Anexo 06 – Foto 11.

Se presenta un histograma en la Figura 5.1 con los espaciados de todas las discontinuidades caracterizadas en las fichas geomecánicas del Anexo 12 correspondientes al grupo Mitu. El espaciado de las estructuras presentes en el talud del Cerro Espinal en mayor porcentaje las describimos con un espaciado moderado dentro de un intervalo de 20 a 60 cm y separado dentro de un intervalo 60 cm a 20 m. Tomamos en consideración que estos espaciados limitan bloques de tamaño medio que podrían ocasionar problemas de desprendimiento de bloques de la cresta del talud hacia el pie del talud.

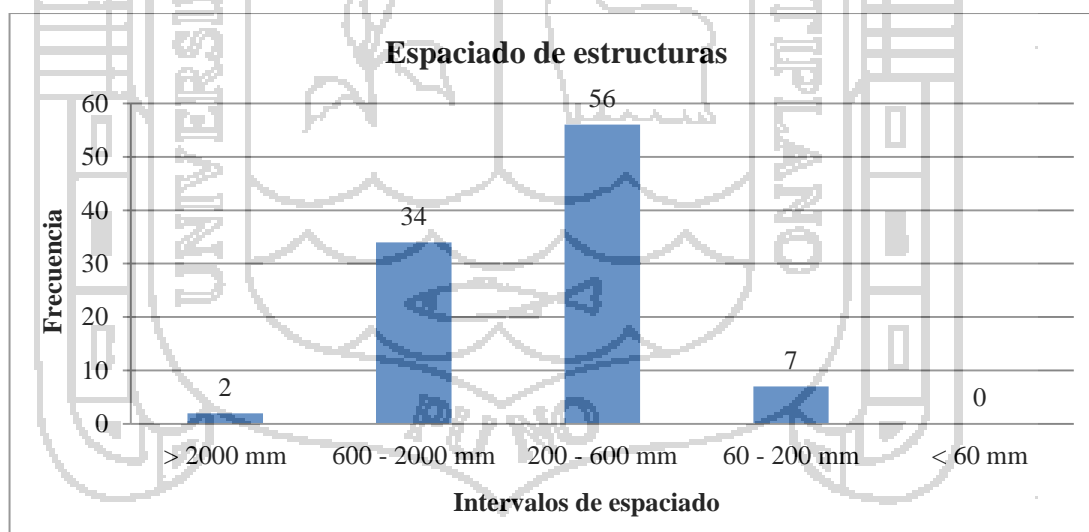


Figura 5.1 : Histograma del espaciado de las estructuras en el talud.

Fuente : Elaboración propia.

5.1.6. Continuidad o persistencia.

Como este concepto hace referencia a la extensión o tamaño de las discontinuidades, sus dimensiones se cuantificaron observando la longitud de los afloramientos presentes en el talud del Cerro Espinal como se muestra en el Anexo 06 – Foto 12.

La Figura 5.2 nos presenta un histograma con los valores de persistencia de todas las discontinuidades caracterizadas en las fichas geomecánicas del Anexo 12 correspondientes al grupo Mitu. La persistencia de las estructuras presentes en el Talud de Cerro Espinal en mayor frecuencia corresponden a una persistencia media en un intervalo de 3 a 10 m de longitud, siendo estas medidas de importancia considerable para la determinación de los tamaños de bloque a caer mas frecuentes. La presencia de persistencias mayores de 10 m indican la presencia de estructuras que controlaran los modos de falla estructural en el talud del Cerro Espinal y algunas persistencias mayores a 20 metros controlaran fallas mas generales a lo largo del talud.

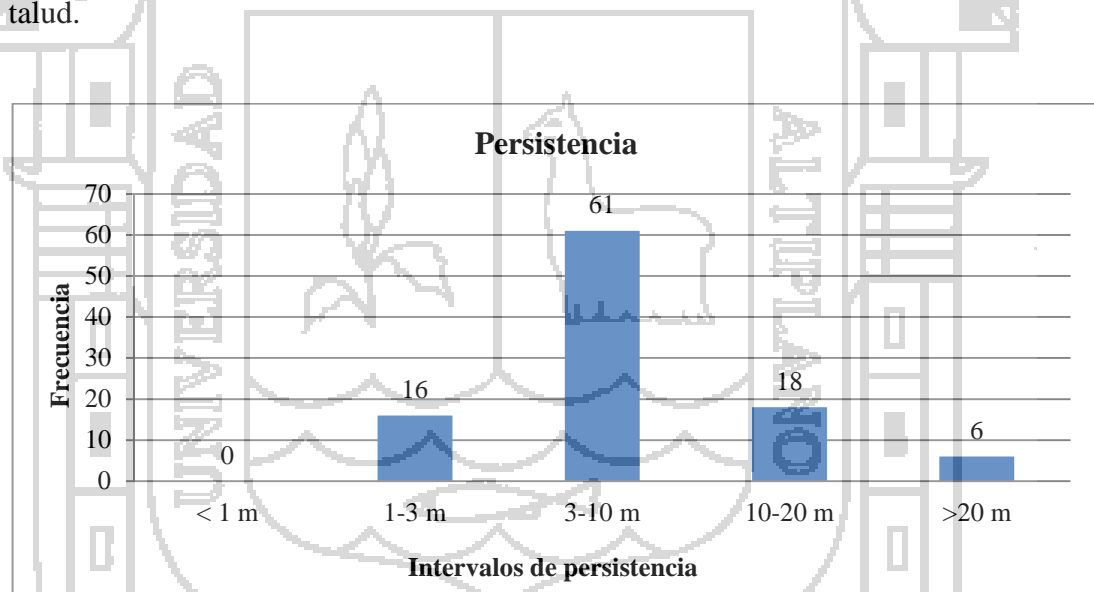


Figura 5.2 : Histograma de las medidas de persistencia de las estructuras en el talud del Cerro Espinal.

Fuente : Elaboración propia.

5.1.7. Apertura de las estructuras.

Las aperturas fueron medidas con una regla gradada en milímetros como se muestra en el Anexo 06 – Foto 13.

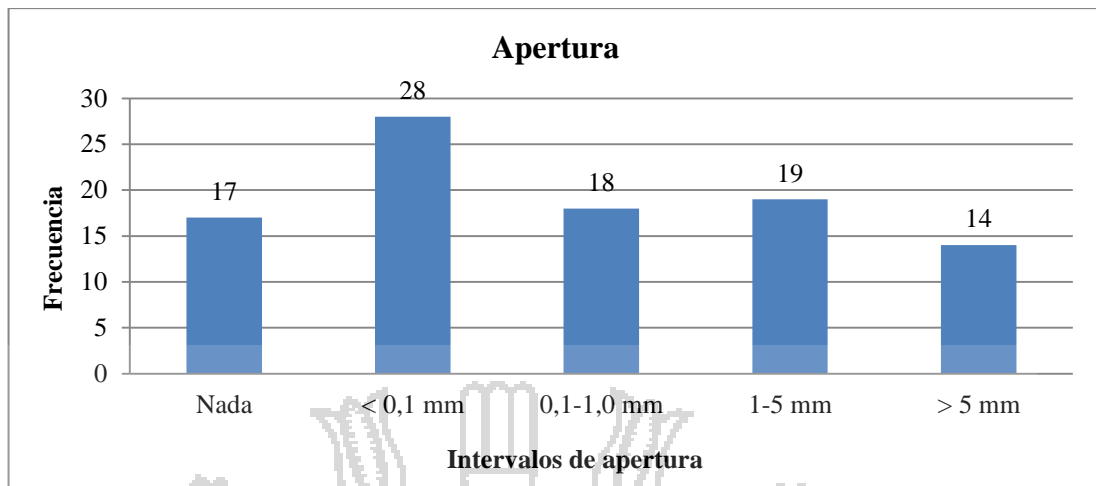


Figura 5.3 : Histograma de la apertura de las discontinuidades en el talud del Cerro Espinal.

Fuente : Elaboración propia.

La Figura 5.3 nos presenta un histograma con las aperturas de todas las discontinuidades caracterizadas en las fichas geomecánicas del Anexo 12 correspondientes al grupo Mitu. En la cual la frecuencia de apertura para los diferentes intervalos dados en las estructuras presentes en el talud del Cerro Espinal es variable, ya que no tenemos un intervalo que sobre salga entre los demás, en algunas juntas encontramos aperturas mayores a 5 mm y en otras las juntas están completamente cerradas.

5.1.8. Rugosidad.

Fueron identificados los tipos de rugosidad en el campo con la ayuda de perfiles de rugosidad y valores asociados al coeficiente de rugosidad que se muestran en las Figuras 2.13 y 2.14, para poder ver la rugosidad del labio de la discontinuidad en el campo con respecto a los 10 centímetros se utilizó una regla Anexo 06 – Foto 14.

Se presenta un histograma en la Figura 5.4 con los valores de rugosidad de todas las discontinuidades caracterizadas en las fichas geomecánicas del Anexo 12 correspondientes al grupo Mitu. La superficie de las discontinuidades en el talud del Cerro Espinal presenta rugosidades características entre superficies onduladas a ligeramente rugosas, teniendo se también superficies rugosas y muy rugosas en algunas discontinuidades esto en mayor medida en la familia principal 3.

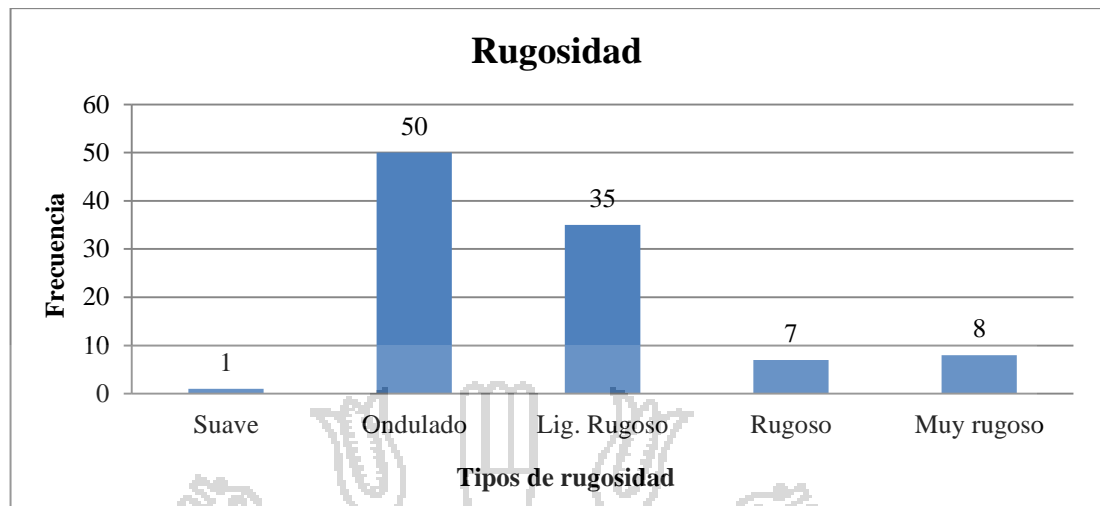


Figura 5.4 : Histograma de la rugosidad de las estructuras en el talud del Cerro Espinal.

Fuente : Elaboración propia.

Este parámetro es muy importante ya que controla la estabilidad estructural del macizo rocoso presente en el talud del Cerro Espinal. Relacionándose a dos parámetros de estabilidad; el ángulo de fricción y la cohesión.

5.1.9. Meteorización de las juntas.

La zona de estudio al ser un talud de corte producto de la explotación de roca y no haber estado sometido a cambios endógenos; como alteraciones hidrotermales o estar en contacto con rocas ígneas plutónicas no presenta alteraciones muy visibles.

En la Figura 5.5 se presenta un histograma con los valores de meteorización de juntas de todas las discontinuidades caracterizadas en las fichas geomecánicas del Anexo 12 correspondientes al grupo Mitu, estas presentan alteraciones en las superficies de las discontinuidades de grado II en el cual las caras de las juntas están manchadas o cubiertas, por otra parte algunas juntas también se encuentran en un grado de alteración III que corresponde a superficies moderadamente meteorizadas esto debido a la exposición de las estructuras presentes en el talud.

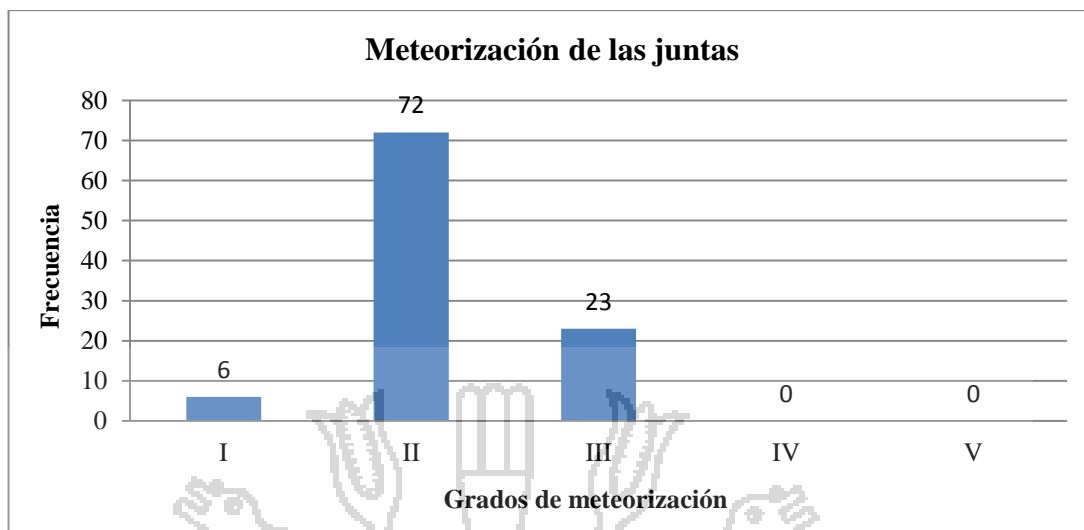


Figura 5.5 : Histograma de grados de meteorización de las juntas presentes en las estructuras del talud del Cerro Espinal.

Fuente : Elaboración propia.

5.1.10. Agua en discontinuidades.

Como indicamos en las generalidades de la zona de estudio tenemos dos estaciones muy marcadas, la sequía y una temporada de precipitaciones, si consideramos las peores condiciones para la inestabilidad del talud tomaremos que todas las discontinuidades casi verticales estarán secas ya que no tendrán la capacidad de almacenar agua, más al contrario el agua discurrirá fácilmente y consideramos ligeramente húmedas cuando estas tienen ángulos que tienden a la horizontalidad. El Histograma de frecuencias de la Figura 5.6 nos muestra las condiciones de presencia de agua en el talud, siendo las condiciones presentes de seco a ligeramente húmedo.

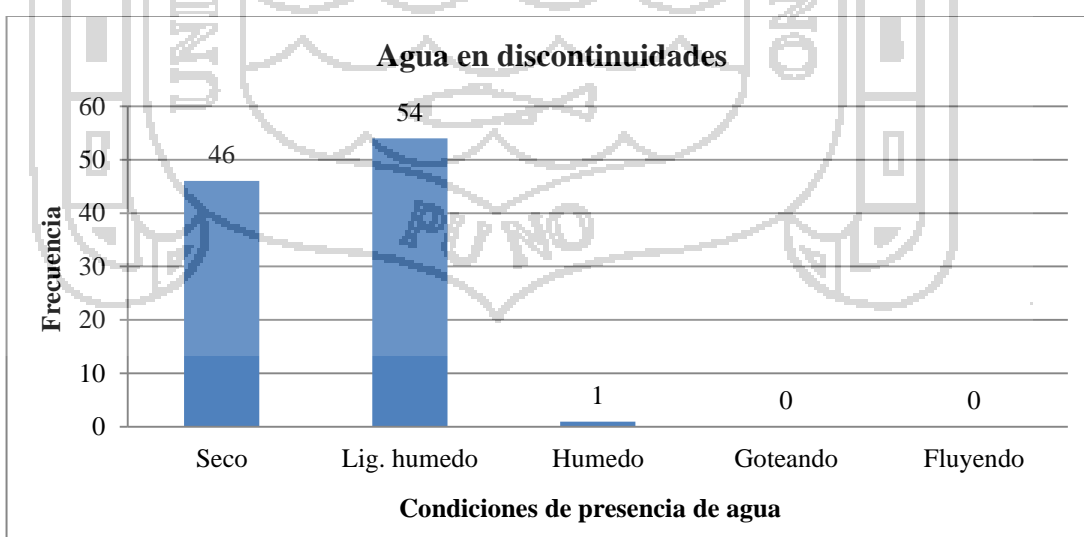


Figura 5.6 : Histograma de la presencia de agua en las estructuras en el talud del Cerro Espinal.

Fuente : Elaboración propia.

5.1.11. Relleno.

Los rellenos fueron reconocidos y medidos con una regla a escala como se muestra en el Anexo 06 – Foto 13.

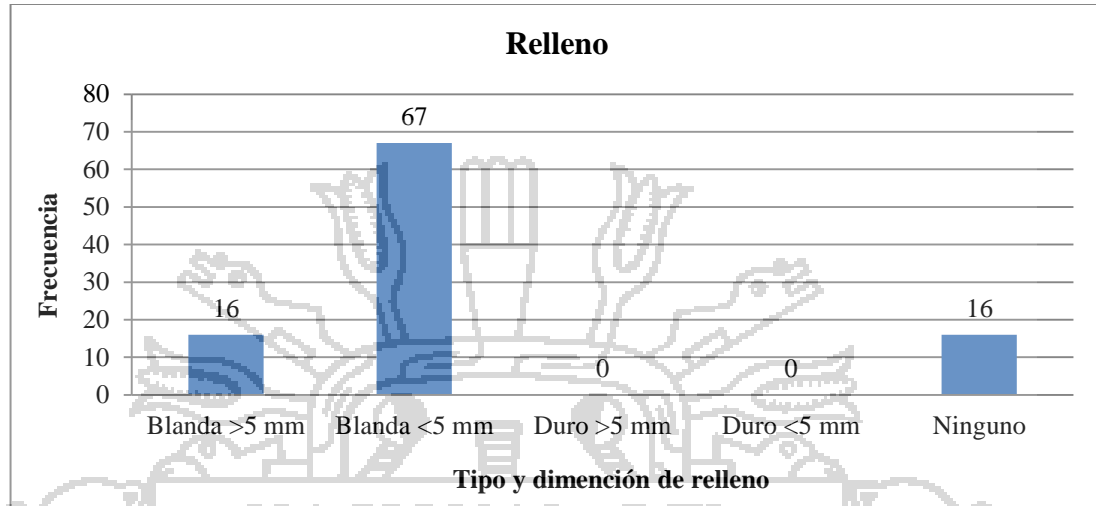


Figura 5.7 : Histograma de los tipos y dimensiones de rellenos presentes en las estructuras en el talud del Cerro Espinal.

Fuente : Elaboración propia.

Los rellenos son categorizados en duros y blandos, según su dimensión estos pueden ser mayores a 5 milímetros o menores a 5 milímetros o simplemente sin relleno. La Figura 5.7 nos muestra una prevalencia de rellenos blandos menores a 5 milímetros en las estructuras presentes en el talud, no dejando de considerar en algunas juntas rellenos blandos mayores a 5 milímetros que generan más problemas de estabilidad en taludes.

También es importante recordar que como los rellenos se encuentran en las aperturas de las discontinuidades, cuando no existe apertura no hay presencia de relleno alguno y estas estarán en relación al número de aperturas cerradas presentes en el talud que contribuyen a que el talud del Cerro Espinal siga estable.

5.1.12. Resistencia de las paredes de las discontinuidades.

Para la determinación de los valores de resistencia de las paredes de las discontinuidades se tomaron 68 datos en el campo con el martillo Schmidt en los labios de las discontinuidades como se muestra en el Anexo 06 – Foto 15, posteriormente estos valores fueron corregidos según la Figura 2.16 tomando en

consideración la orientación del martillo al ejecutar el ensayo y la densidad de la roca.

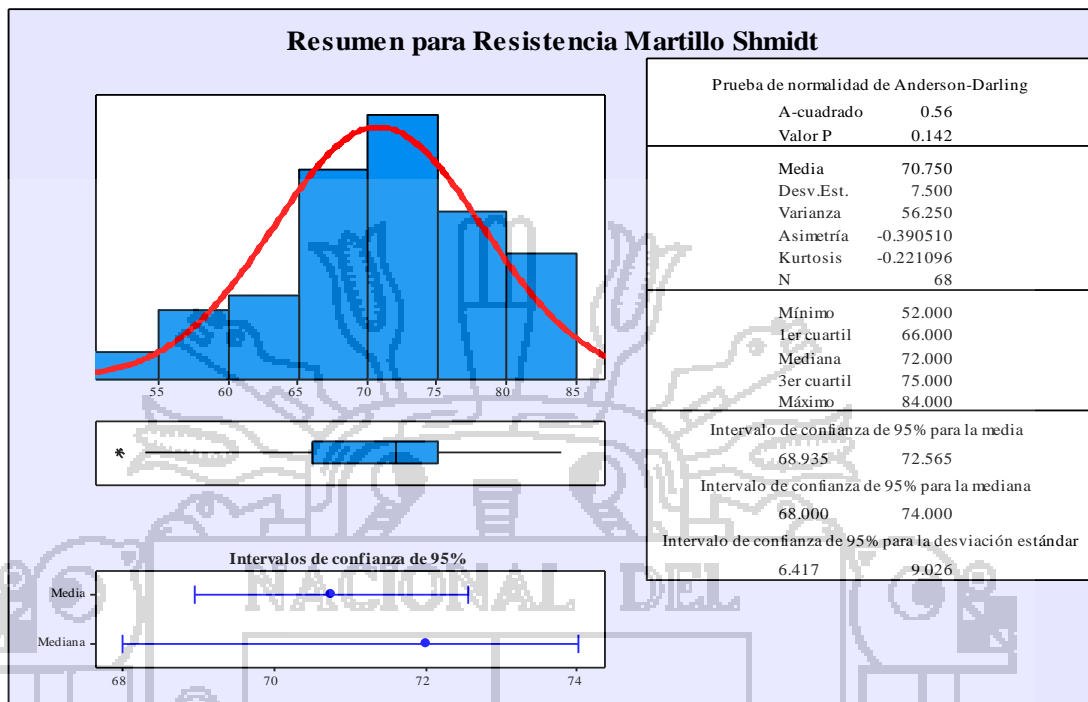


Figura 5.8 : Polígono de frecuencias normalizado de los datos de campo de la resistencia a la compresión simple de los labios de las discontinuidades.

Fuente : Elaboración propia.

Los datos ya corregidos son presentados en un polígono de frecuencias normalizado en la Figura 5.8, obteniéndose un valor P mayor a 0.1, este representa que nuestros valores de resistencia tomados en el campo se ajustan a una distribución normal, tenemos el valor de resistencia promedio de 70.750 MPa, con una desviación estándar de 7.5, consideramos que esta roca es dura y la desviación estándar aceptable debido a la variabilidad de los datos con este ensayo.

5.1.13. Ángulo de fricción básica de discontinuidades.

Para determinar la resistencia al corte se recurrió al ensayo de campo Till-Test para calcular el ángulo de fricción básico según la propuesta de Stimpson (1981). Para lo cual se procedió a deslizar 30 superficies de juntas y medir el ángulo de deslizamiento con el inclinómetro de la brújula, esto aleatoriamente a lo largo de la base del talud.

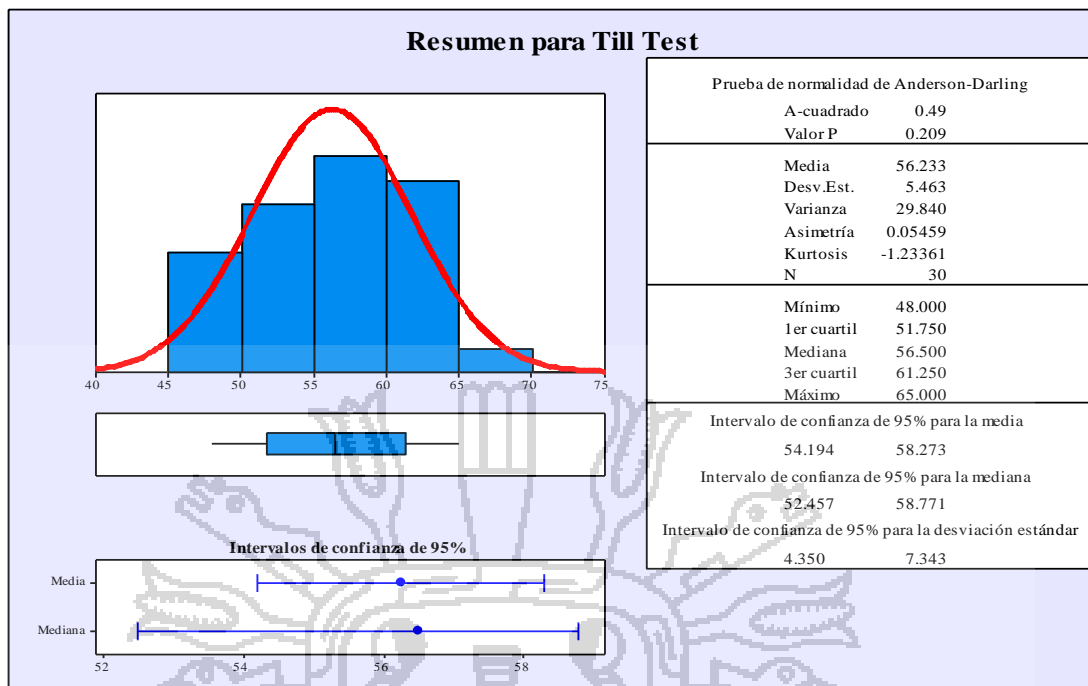


Figura 5.9 : Polígono de frecuencias normalizado de los datos de campo de Till Test en el talud del Cerro Espinal.
 Fuente : Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de los ensayos se presentan en un polígono de frecuencias normalizado en la Figura 5.9. Obteniéndose un valor P mayor a 0.1, este representa que nuestros valores de ángulos de fricción tomados en el campo se ajustan a una distribución normal, tenemos como valor promedio del ángulo de fricción básico 56.233°, con una desviación estándar de 5.463. El valor del ángulo de fricción básico es un parámetro de entrada fundamental al realizar los análisis de modos de falla estructural en taludes en roca con el programa Dips v.6.0, al igual que al realizar el análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite para cualquiera de los modos de falla estructural.

5.2. Caracterización geotécnica.

La caracterización geotécnica consistió en definir las propiedades mecánicas de la roca intacta y los macizos rocosos presentes en el talud de Cerro Espinal, para lo cual se realizaron ensayos de laboratorio en la Facultad de Ingeniería de Minas de las diferentes muestras de roca, con los datos obtenidos en el campo de las estaciones geotécnicas se determinaron los valores mínimos y máximos del RMR de las ocho estaciones realizadas, seis de las cuales en la cara del talud y las dos restantes en la base y el costado del talud en diferentes litologías.

5.2.1. Propiedades de la roca intacta.

Densidad.

Los valores de densidad fueron obtenidos de ensayos de laboratorio ver Anexo C, los resultados obtenidos de los ensayos se presentan en un polígono de frecuencias normalizado en la Figura 5.10.

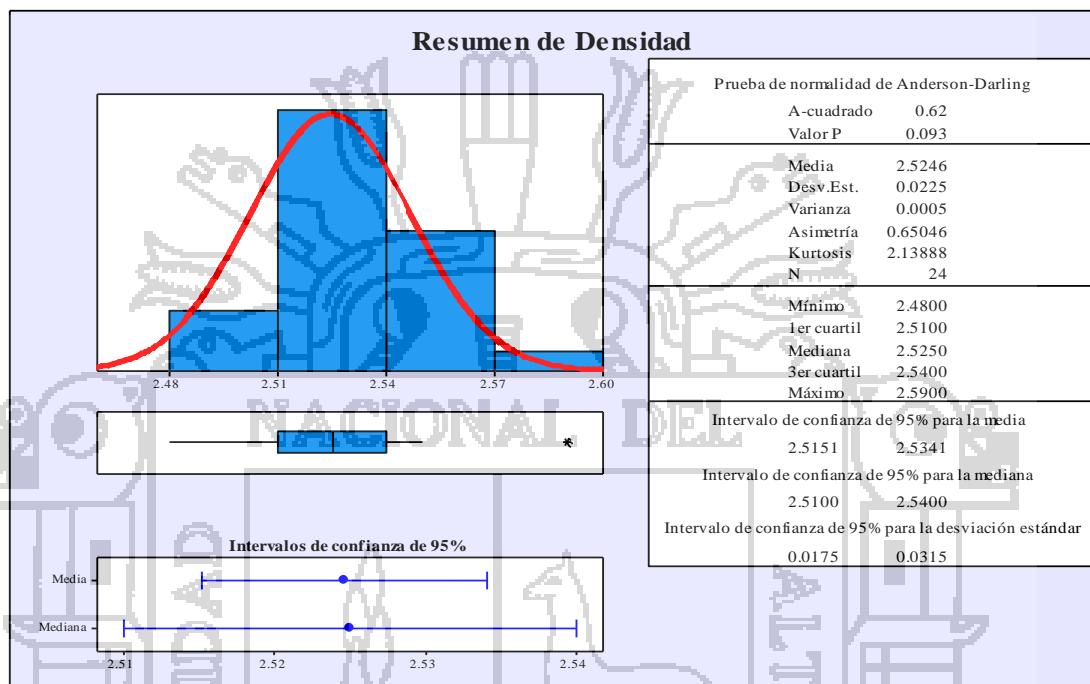


Figura 5.10 : Polígono de frecuencias normalizado de las densidades de rocas presentes en el talud del Cerro Espinal.

Fuente : Elaboración propia.

Obteniéndose un valor P menor a 0.1, este representa que nuestros valores de densidad no se ajustan a una distribución normal, teniendo como valor promedio de densidad 2.5246 Kg/cm^2 , con una desviación estándar de 0.0225 es decir no existía mucha variabilidad con los datos obtenidos lo cual es aceptable tratándose de ensayos de laboratorio.

Resistencia.

Para determinar la resistencia de la matriz rocosa se recurrió a los ensayos de laboratorio; 16 ensayos de compresión simple o uniaxial y 8 ensayos de carga puntual, estos fueron realizados en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas de la Facultad de Ingeniería de Minas y los resultados se muestran en el Anexo 11.

Resistencia a la compresión uniaxial (UCS).

El equipo de laboratorio utilizado para estos ensayos fue una prensa hidráulica manual de 2000 KN de capacidad, que se presenta en el Anexo 06 – Foto 16, junto a probetas o testigos listos para ser ensayados, los ensayos fueron realizados cumpliéndose todos los procedimientos y protocolos de trabajo en laboratorio normados por las ASTM e ISRM.

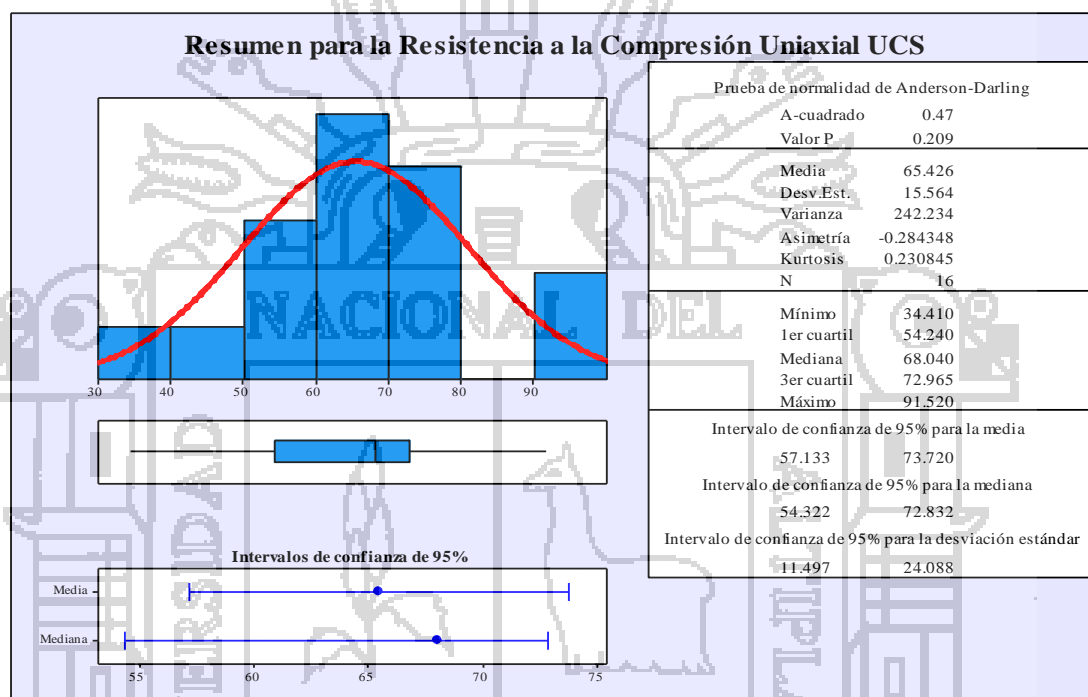


Figura 5.11 : Polígono de frecuencias normalizado de los valores de la resistencia a la compresión uniaxial de roca intacta en laboratorio.

Fuente : Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de los ensayos de compresión uniaxial se presentan en un polígono de frecuencias normalizado en la Figura 5.11. Obteniéndose un valor P mayor a 0.1, este representa que nuestros valores de resistencia a la compresión simple se ajustan a una distribución normal, teniendo como valor promedio de la resistencia a la compresión simple 65.426 MPa, con una desviación estándar de 15.564 es decir existe mucha variabilidad con los valores obtenidos en laboratorio, esto significaría que el macizo varia de resistencia en ciertas zonas. Según el valor promedio consideramos que esta roca es dura.

Ensayos de carga puntual.

El equipo de laboratorio utilizado para realizar los ensayos de carga puntual fue una prensa hidráulica manual de 5000 bares de capacidad, que se presenta en el Anexo 06 – Foto 17, junto a probetas o testigos listos para ser ensayados, los ensayos fueron realizados cumpliéndose todos los procedimientos y protocolos de trabajo en laboratorio normados por las ASTM e ISRM.

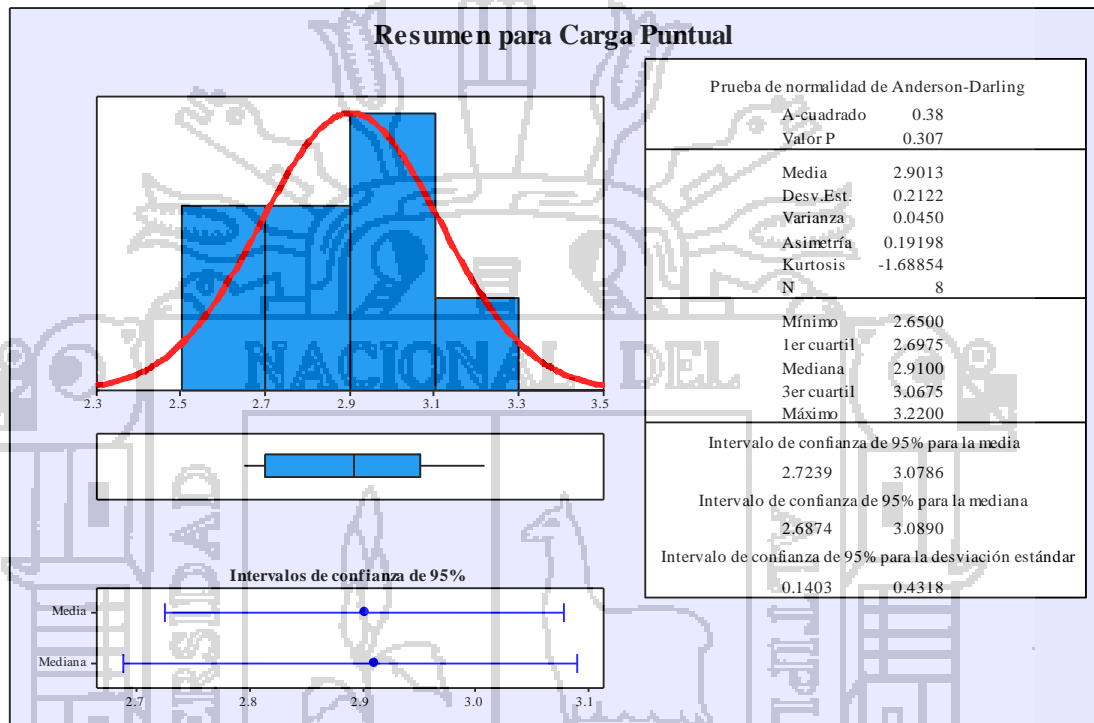


Figura 5.12 : Polígono de frecuencias normalizado de los valores de índice de carga puntual.

Fuente : Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de los ensayos de carga puntual para la determinación del índice de carga puntual se presentan en un polígono de frecuencias normalizado en la Figura 5.12, obteniéndose un valor P mayor a 0.1, este representa que nuestros valores de carga puntual se ajustan a una distribución normal, teniendo como un promedio del índice de carga puntual un valor de 2.9013 MPa por lo tanto consideramos que esta roca es de resistencia media, con una desviación estándar de 0.2122 aceptable.

5.2.2. Clasificación geotécnica del macizo rocoso.

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

Para la determinación del RQD se utilizó el criterio de Priest y Hudson que consideran la medición del número de fisuras por metro, los resultados obtenidos de los RQD calculados con los datos de numero de fisuras por metro se presentan en un polígono de frecuencias normalizado en la Figura 5.13, obteniéndose un valor P menor a 0.1, este representa que nuestros valores de RQD no se ajustan a una distribución normal, teniendo como un promedio de RQD igual a 73.921% valor relativamente alto y una desviación estándar de 7.161 que representa la variabilidad de este en el campo.

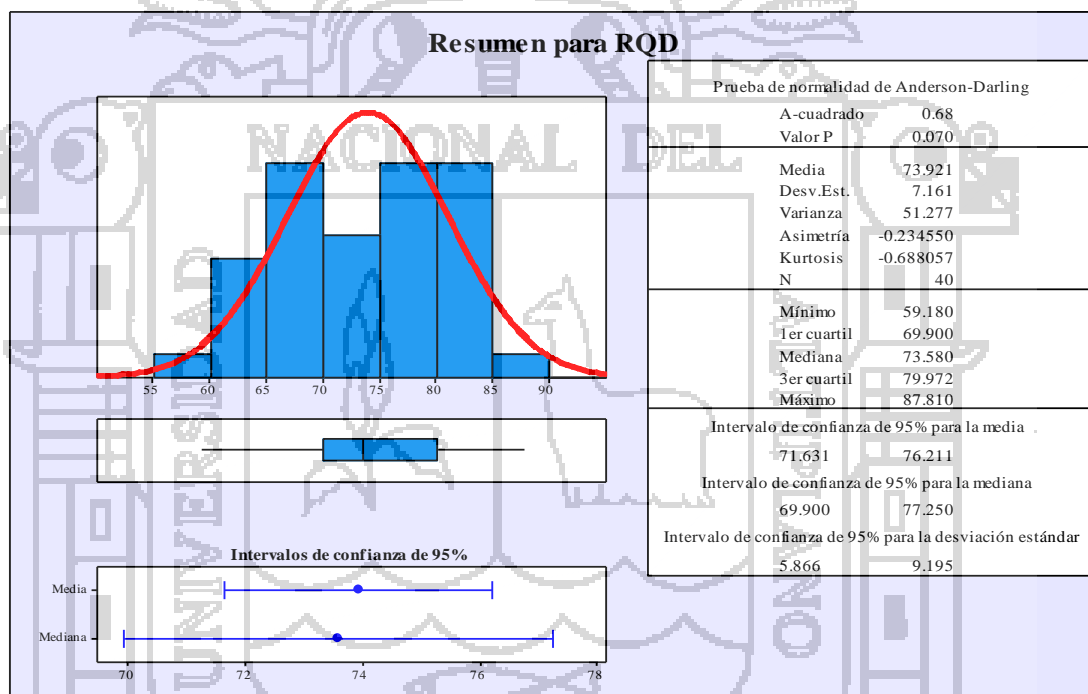


Figura 5.13 : Polígono de frecuencias normalizado de los valores de RQD.
Fuente : Elaboración propia.

Clasificación RMR (Bieniawski, 1973).

Los resultados obtenidos de los valores de RMR obtenidos de las 6 estaciones geomecánicas del Anexo 12 correspondientes al grupo Mitu, se presentan en un polígono de frecuencias normalizado en la Figura 5.14, obteniéndose un valor P mayor a 0.1, este representa que nuestros valores de RQD se ajustan a una distribución normal, teniendo como promedio un RMR igual a 58.5 y una desviación estándar de 10.9 siendo este muy variable.

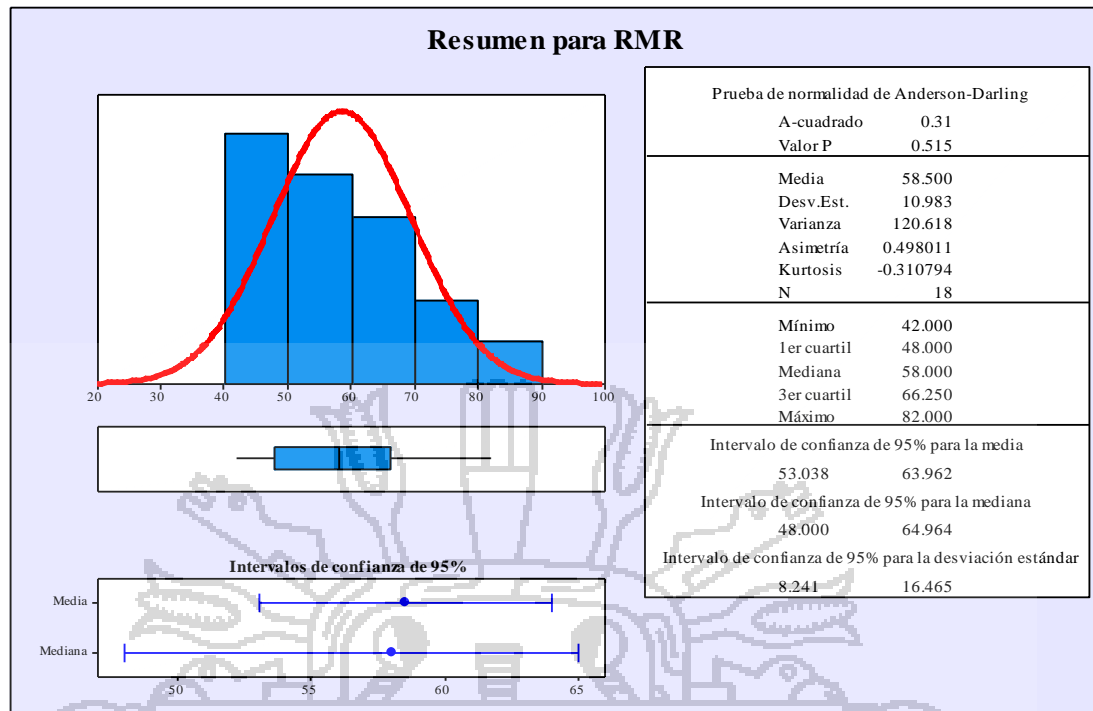


Figura 5.14 : Polígono de frecuencias normalizada de los valores de la clasificación RMR.

Fuente : Elaboración propia.

Clasificación por el método índice GSI.

Los valores de GSI se obtuvieron con relación al RMR, para lo cual se consideró la recomendación de Hoek (2005), donde el $GSI = RMR - 5$.

Los resultados obtenidos de los valores de GSI obtenidos de la correlación con el RMR de las estaciones geomecánicas del Anexo 12, se presentan en un polígono de frecuencias normalizado en la Figura 5.15, obteniéndose un valor P mayor a 0.1, este representa que nuestros valores de GSI se ajustan a una distribución normal, teniendo como promedio un GSI igual a 53.500.

5.3. Principales modos de inestabilidad.

La identificación de los modos de falla más relevantes en el talud del Cerro Espinal Juliaca se realizó con la ayuda del programa Dips versión 6.0 la cual nos ofrece un entorno amigable de trabajo y la aplicación del mismo para el análisis cinemático de taludes en roca que es lo mismo que identificar los modos de falla más recurrentes en un determinado talud con la utilización de proyecciones estereográficas.

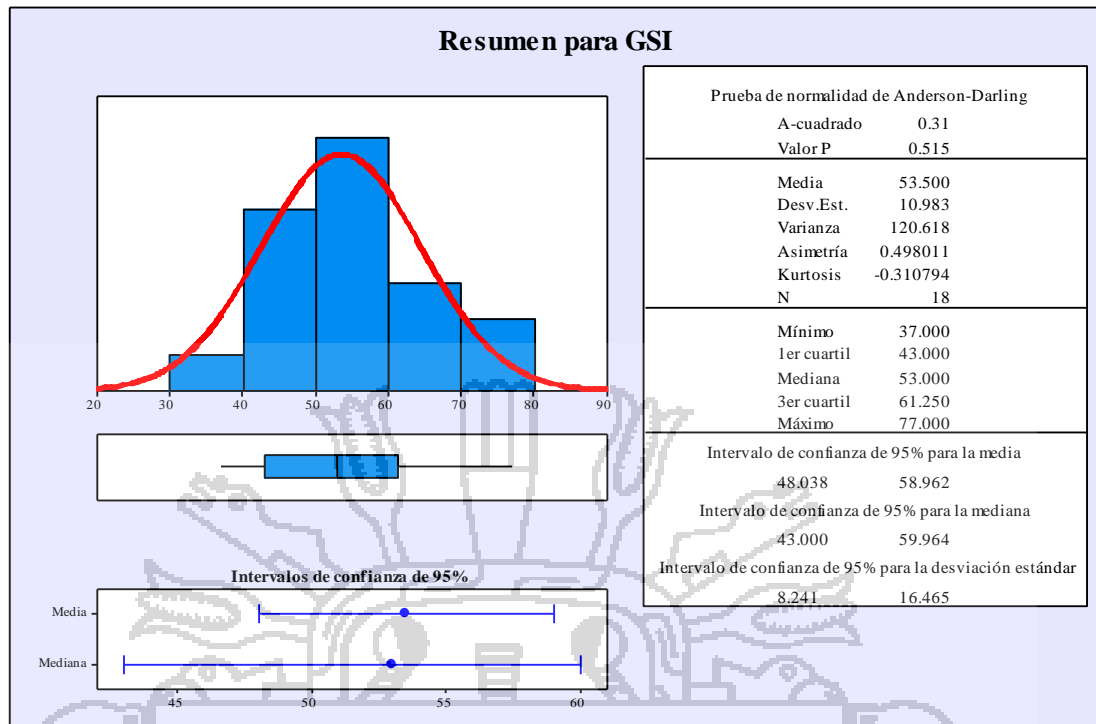


Figura 5.15 : Polígono de frecuencias normalizada de los valores de la clasificación GSI.

Fuente : Elaboración propia.

5.4. Fallas con control estructural.

El talud del Cerro Espinal presenta un típico control estructural que podemos observar en el Anexo 06 – Foto 18, los desprendimientos de bloques columnares se pueden observar ya caídos en la base del talud, estos bloques presentan diferentes dimensiones debido a la variabilidad del espaciado y continuidad de las estructuras, también se puede observar una clara tendencia de la orientación de las discontinuidades.

Para el análisis de modos de falla presentes en el talud de Cerro Espinal se tomaron en consideración los siguientes datos de entrada ver Tabla 5.1.

Los primeros valores de la tabla 5.1, corresponden a las orientaciones de las principales familias de discontinuidades y la dirección de corte en el talud estos son presentados en el Anexo 10, la altura del talud, la pendiente y la dirección de buzamiento del talud fueron tomados de una modelización en tres y dos dimensiones de un levantamiento topográfico, en el Anexo 06 – Foto 20 se muestra la modelización del talud en 3D en el software MineSight v.6.0, por último el ángulo de fricción considerado para el análisis de los modos de falla y el análisis de estabilidad

por el método de equilibrio limite es el promedio de los valores obtenidos en el ensayo de campo Till Test estos valores se muestran en la Figura 5.9.

Tabla 5.1
Datos de entrada para el análisis de los modos de falla estructural a través de estereogramas en el software Dips v.6.0 de Rocscience.

Datos de entrada para el análisis de modos de falla	
Descripción	Valor
Numero de datos (DipDir/Dip)	535
Familia de discontinuidades principales 1 (DipDir/Dip)	63/266
Familia de discontinuidades principales 2 (DipDir/Dip)	59/311
Familia de discontinuidades principales 3 (DipDir/Dip)	61/340
Familia de discontinuidades principales 4 (DipDir/Dip)	84/27
Familia de discontinuidades secundarias 1 (DipDir/Dip)	54/114
Altura del talud (m)	156 m
Pendiente del talud (°)	65°
Dirección de buzamiento del talud	N 30° E
Angulo de fricción (°)	56.23°

Fuente : Elaboración propia.

Falla planar.

Para la identificación de un posible modo de falla planar en el talud del Cerro Espinal Juliaca, se analizó mediante dos tipos de falla planar; la primera considerando restricciones de límites laterales de 20° y la segunda sin considerar la anterior restricción es decir un deslizamiento planar total.

Mediante la representación y análisis de proyecciones estereográficas en el programa Dips determinamos valores porcentuales de densidad de estructuras favorables para los dos casos de modos de falla planar.

Para el análisis estereográfico del modo de falla estructural de tipo planar con límites laterales de 20° que se muestra en el Anexo 13, tenemos a 2 polos que se encuentran en la zona crítica sombreada de color rojo, la cual representa un 0.37% del número total de polos ploteados en el estereograma que es igual 535 polos. Este valor en

porcentaje es muy bajo y consideramos que en el talud tenemos pocos bloques que podrían fallar por un deslizamiento de tipo planar.

Para el análisis estereográfico del modo de falla estructural de tipo planar sin límites laterales que se muestra en el Anexo 14, tenemos a 4 polos que se encuentran en la zona crítica sombreada de color rojo, la cual representa un 0.75% del número total de polos ploteados en el estereograma que es igual a 535 polos. Este valor en porcentaje es muy bajo y consideramos que en el talud tenemos pocos bloques que podrían fallar por un deslizamiento de tipo planar total.

El programa Dips también te da información acerca de los planos por donde puede deslizarse una falla de tipo planar, en esta investigación tenemos un porcentaje de 1.49% de probabilidad de que los bloques fallen de modo planar y se deslicen sobre el plano de la familia de discontinuidades 3.

Los valores obtenidos por análisis estereográfico para el modo de falla planar son muy bajos y resulta innecesario realizar un análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite.

Falla por cuña.

Para la identificación de un posible modo de falla por cuña en el talud del Cerro Espinal Juliaca, se realizó mediante la representación y análisis de proyecciones estereográficas en el programa Dips.

Para el análisis de modos de falla por cuña, el programa Dips genera los planos de cada uno de los polos ploteados y posteriormente identifica toda las intersecciones formadas entre planos en todo el estereograma para considerarlos puntos de intersección, como observamos en la representación estereográfica del Anexo 15, se sombrea una zona de color amarilla en la cual se ven una serie de puntos de intersección, por lo cual de un total de 142813 puntos de intersección de planos en todo el estereograma solo 1072 se encuentran de color rojo en la zona amarilla, esta representa la zona crítica donde puede ocurrir modos de falla por cuña, estos puntos de intersección rojos solo representan el 0.75% del total.

Este valor es muy bajo por lo cual consideramos que en el talud tenemos una mínima cantidad de bloques propensos a fallar estructuralmente por cuña.

Los valores obtenidos por análisis estereográfico para el modo de falla por cuña son muy bajos y resulta innecesario realizar un análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite.

Falla por vuelco flexural.

Para la identificación y valoración del modo de falla por vuelco flexural en el talud del Cerro Espinal Juliaca, se realizó mediante la representación y análisis de proyecciones estereográficas en el programa Dips como se muestra en el Anexo 16, determinándose valores porcentuales según el número de estructuras favorables para un modo de falla por vuelco flexural.

Tomando en consideración que el total de polos ploteados en todo el estereograma es igual a 535 y solo 32 polos se encuentran en la zona crítica sombreada de color rojo que se muestra en el Anexo 16, el cual representa un 5.98% del número total de polos ploteados. Este valor en porcentaje es mayor a los anteriores análisis de modos de falla y diremos que un porcentaje de bloques presentes en el talud podría fallar por este modo. Consideramos también el valor dado por el programa para un modo de falla por vuelco flexural controlado por la familia de discontinuidad principal 4, teniendo un 22.77% de estructuras favorables para este modo de falla exclusivo.

Falla por vuelco directo y oblicuo.

Para la identificación y valoración del modo de falla por vuelco directo en el talud del Cerro Espinal Juliaca, se realizó mediante la representación y análisis de proyecciones estereográficas en el programa Dips como se muestra en el Anexo 17, determinándose valores porcentuales según el número de estructuras favorables para un modo de falla por vuelco directo y oblicuo.

Tomando en consideración los 142813 puntos de intersección de planos ploteados, para un modo de falla por vuelco directo tenemos que 4020 puntos de intersección se encuentran en la zona crítica, representando un 2.81% de estructuras favorables para este tipo de falla. Para un vuelco de tipo oblicuo tenemos que 44965 puntos de

intersección se encuentran en la zona crítica, representando un 31.49% de estructuras favorables para este tipo de falla.

Por otro lado, tomando en consideración que los vuelcos en roca se producen bajo una superficie de discontinuidad que controla la dirección del vuelco, tenemos para los distintos planos de discontinuidades ya conocidos los siguientes valores; para un vuelco directo sobre un plano horizontal tendremos que 12.15% de las estructuras son favorables. Para un vuelco controlado por el plano de la familia 2 tendremos que 22.92% de las estructuras son favorables. Para un vuelco directo controlado por el plano de la familia 3 tendremos que 20.90% de las estructuras son favorables. Para un vuelco directo controlado por el plano de la familia 5 tendremos que 41.18% de las estructuras mapeadas en el talud son favorables.

Los porcentajes obtenidos para los diferentes modos de falla general, es decir estos modos de falla no toman en consideración una superficie de desprendimiento alguno, se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2

Resultados de los modos de falla general según porcentajes de estructuras favorables.

Modo de Falla	Porcentaje
Modo de falla planar con límite de 20°	0.37%
Modo de falla planar total	0.75%
Modo de falla por cuña	0.75%
Modo de falla por vuelco flexural	5.98%
Modo de falla por vuelco directo	2.81%
Modo de falla por vuelco oblicuo	31.49%

Fuente : Elaboración propia.

Los porcentajes obtenidos para los diferentes modos de falla que toman en consideración una superficie de desprendimiento, se resumen en la Tabla 5.3.

Como podemos observar en las tablas mostradas se tiene una diferencia muy marcada en porcentaje de cada uno de los modos de falla estructural, teniendo como los modos de falla más presentes en el talud del Cerro Espinal los diferentes modos de falla por vuelco.

Tabla 5.3
Resultados de los modos de falla en porcentajes tomando en consideración una superficie de desprendimiento.

Modo de falla y superficie	Porcentaje
Modo de falla planar (familia principal 3)	1.49%
Modo de falla por vuelco flexural (familia principal 4)	22.70%
Modo de falla por vuelco directo (base horizontal)	12.15%
Modo de falla por vuelco directo (familia principal 2)	22.92%
Modo de falla por vuelco directo (familia principal 3)	20.90%
Modo de falla por vuelco directo (familia principal 5)	41.18%

Fuente : Elaboración propia.

5.5. Análisis de estabilidad.

Después de haber determinado el modo de falla estructural que controla la estabilidad en el talud del Cerro Espinal, procedemos a realizar un análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite para un modo de falla por vuelco con la ayuda del software RocTopple v.1.0 de la firma Rocscience.

En el Anexo 18 se muestran los resultados obtenidos del software RocTopple v.1.0, teniendo como resultados; para condiciones estáticas un factor de seguridad de 1.199 y para condiciones pseudoestáticas el factor de seguridad es 1.084, resultados que se reflejan en la realidad ya que la caída de bloques prismáticos producto del volcamiento se da cada cierto tiempo.

La presencia de una grieta de tracción en la cresta del talud es evidencia que este podría fallar de manera generalizada en gran escala.

5.6. Discusión.

Con la presente investigación se ha logrado cumplir con los objetivos presentados en la investigación, se ha caracterizado detalladamente el macizo rocoso y con la ayuda de proyecciones estereográficas se han identificado los modos de falla más recurrentes en el talud y finalmente se determinó el factor de seguridad.

- La caracterización geotécnica incluye una variedad de datos de entrada cuyos resultados se plasman estadísticamente en el trabajo y consideramos que si están

relacionados con los modos de falla estructural presentes en el talud del Cerro Espinal Juliaca. Ya que este hace referencia a las direcciones de los planos de discontinuidades menores y mayores presentes en el talud considerados dentro de la caracterización estructural. Al respecto (Read & Stacey, 2009), en la metodología propuesta para el diseño de taludes en minas a tajo abierto menciona al modelo geotécnico como producto de otros sub modelos como el geológico, estructural, macizo rocoso e hidrogeológico, para posteriormente definir dominios geotécnicos en todo el tajo, para finalmente determinar los modos de falla más característicos en cada dominio geotécnico. Esta metodología se resume en el presente trabajo ya que es un caso particular; el talud tiene solo una dirección de corte y no se cuenta con datos hidrogeológicos, por lo cual para el presente trabajo se tomaron en cuenta; la geología, las estructuras y el macizo rocoso, teniéndose como resultado una caracterización geotécnica, se decidió no realizar un modelo geotécnico debido a que el talud estudiado presenta una litología, las mismas características estructurales y un mismo macizo rocoso en todo el talud. También (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007), en la Figura 2.1 se presentan las etapas para realizar un estudio de estabilidad de taludes, mostrándonos la interacción entre los modelos geológico y geotécnico, para después determinar los modos de falla en el talud.

- La caracterización geotécnica si es una ayuda para determinar la estabilidad del talud en el Cerro Espinal Juliaca. Como se demuestra en la presente investigación, al tomar datos de la caracterización geotécnica como datos de entrada en el análisis cinemático para la determinación de los modos de falla presentes en el talud y posteriormente para el análisis de estabilidad por el método de equilibrio limite por vuelco en el software RocTopple y así obtener un factor de seguridad de 1.199 que nos hace pensar que el talud del Cerro Espinal es estable. Al respecto continuando con la metodología propuesta por los profesores (Read & Stacey, 2009), teniendo en cuenta la caracterización geotécnica y realizando los pre diseños para los elementos del tajo abierto, se realiza el análisis de estabilidad del talud según corresponda, con la finalidad de tener el factor de seguridad. De igual manera en el diagrama presentado en el texto de (Suarez Diaz, 1998) en el Anexo 01, se muestra que la investigación geotécnica es la base para un posterior análisis de estabilidad.

- Los modos de falla estructural si dependen estrictamente de la orientación de las discontinuidades y la dirección de corte del talud en el Cerro Espinal Juliaca, como vemos la estabilidad del talud es controlado estructuralmente debido a que las estructuras presentes son muy marcadas, las cuales fueron identificadas en familias de discontinuidades. Al realizar el análisis cinemático nos dimos cuenta que la variación de la dirección de corte en el talud, hace que varíen los porcentajes de estructuras favorables para cada modo de falla estructuralmente controlado. Por lo cual diremos que la dirección de corte del talud si determina el modo de falla predominante en el talud del Cerro Espinal.

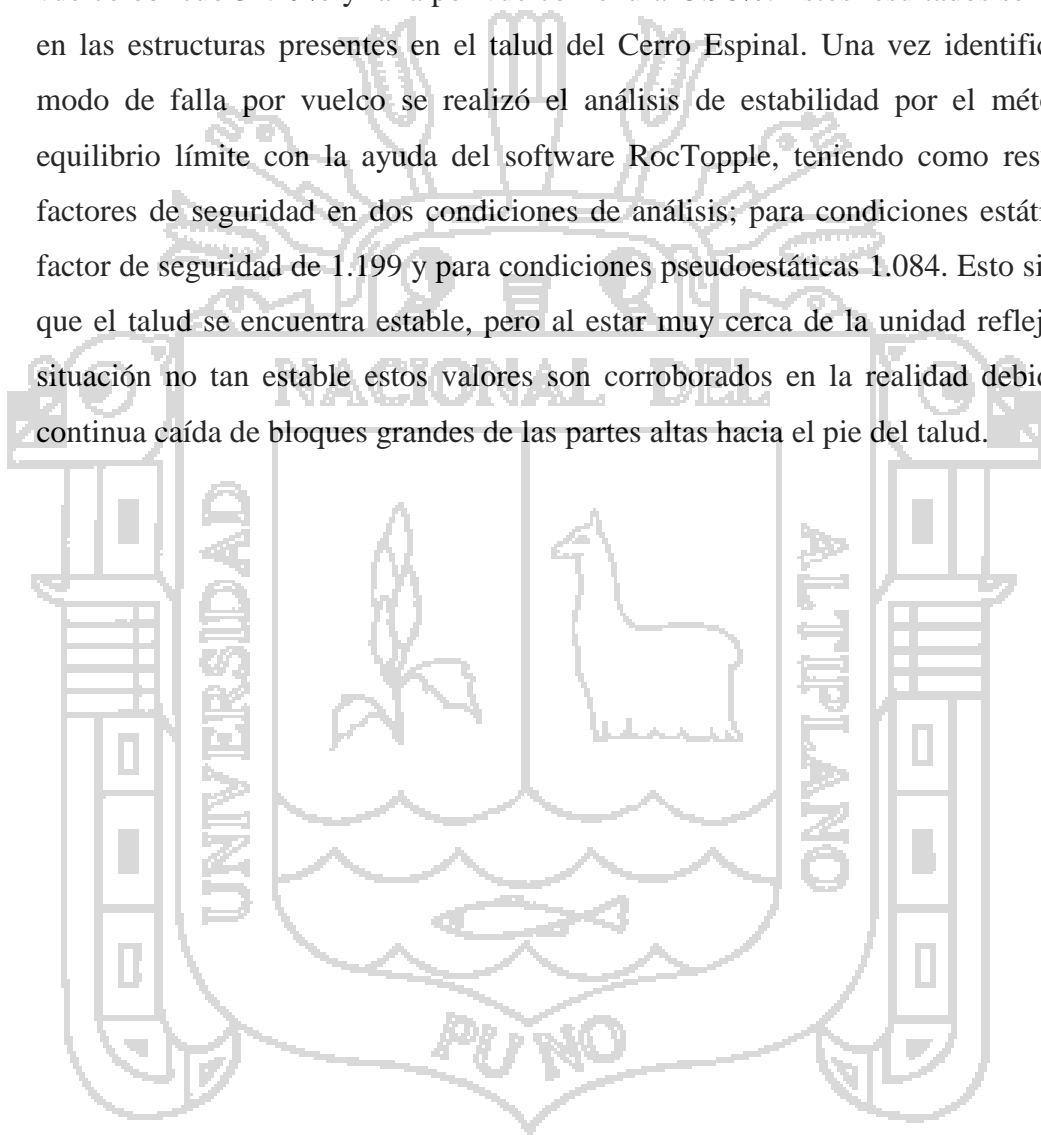
Finalmente, la aplicación de las metodologías propuestas para este tipo de análisis y la forma como se presentan los resultados es una muestra de la interacción del empirismo y la aplicación de softwares especializados en geotecnia, dando nos resultados confiables que se asemejan a la realidad del sitio.

En la presente investigación no se desarrolla la metodología empírica del SMR (*Slope Mass Rating*) propuesta por el profesor Manuel Romana, debido a que a través de este solo llegamos a determinar resultados cualitativos sobre la estabilidad de un talud. A diferencia de la metodología analítica del equilibrio límite, nosotros determinamos valores cuantitativos que son expresados a través de un factor de seguridad, que definitivamente es mejor a lo anterior.

CONCLUSIONES

- Las características geotécnicas presentes en el talud del Cerro Espinal están condicionadas a las características geológicas, estructurales y de macizo rocoso. En el presente trabajo se generalizó todo el talud de corte, en cuanto a la litología, alteración, parámetros estructurales, resistencia a la compresión simple, ángulo de fricción básico, presencia de agua, etc. Estas características fueron medidas e identificados en el campo. Debido a que todo el talud se encuentra en una roca muy competente y con un grado de fracturamiento regular analizamos los modos de falla estructural típicos en el talud con la ayuda de las proyecciones estereográficas del software Dips v.6.0. para finalizar con el análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite para un modo de falla por vuelco con la ayuda del software RocToppo v.1.0.
- Las características más relevantes presentes en el talud del Cerro Espinal son las siguientes: se presenta solo una litología en todo el corte de talud constituida de Fonolitas de color rojizo medianamente meteorizadas, la característica estructural más relevante fue las discontinuidades presentes, teniéndose tres familias principales y una aleatoria o poco frecuente, las estructuras presentan un espaciado de 20 a 60 cm de espaciado, una persistencia de 3 a 10 metros, la apertura de las discontinuidades es muy variable según las familias, presentando superficies onduladas y ligeramente rugosas, teniendo una meteorización de grado II, no hay mucha presencia de agua, las discontinuidades están rellenas con un relleno blando y en el mejor de los casos no existe relleno alguno. La resistencia de los labios de las discontinuidades tienen un promedio de 70.75 MPa, un ángulo de fricción básico promedio de 56.23°, la densidad promedio del material es 2.52 kg/cm², con una resistencia a la compresión simple de la roca intacta en laboratorio de 65.43 MPa y un índice de carga puntual de 2.9 MPa, que corresponden a un tipo de roca de regular a buena resistencia. Los valores de la clasificación geotécnica fueron; RQD promedio bueno igual a 73.92, un RMR promedio bueno de 58.5 y un GSI promedio de 53.50.

- Los modos de falla estructural controlados por la dirección de las discontinuidades, altura del talud, pendiente del talud, orientación del talud y el ángulo de fricción básico de discontinuidades, fueron identificados a través de porcentajes de probabilidad de falla, tomando en consideración los porcentajes diremos que el modo de falla con mayor número de estructuras favorables es el de vuelco en sus diferentes variedades. Teniendo los siguientes valores; falla por vuelco directo 2.81%, falla por vuelco oblicuo 31.49% y falla por vuelco flexural 5.98%. Estos resultados se reflejan en las estructuras presentes en el talud del Cerro Espinal. Una vez identificado el modo de falla por vuelco se realizó el análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite con la ayuda del software RocTopple, teniendo como resultados factores de seguridad en dos condiciones de análisis; para condiciones estáticas un factor de seguridad de 1.199 y para condiciones pseudoestáticas 1.084. Esto significa que el talud se encuentra estable, pero al estar muy cerca de la unidad reflejan una situación no tan estable estos valores son corroborados en la realidad debido a la continua caída de bloques grandes de las partes altas hacia el pie del talud.



RECOMENDACIONES

- Teniendo valores generalizados de las características geotécnicas del talud se recomienda realizar análisis de estabilidad haciendo uso de métodos de equilibrio límite y/o métodos numéricos en diferentes secciones longitudinales como se muestra en el Anexo 06 – Foto 20, los cuales nos darán una mejor referencia de la estabilidad global del talud.
- Realizar caracterizaciones geotécnicas de cada una de las familias de discontinuidades identificadas, ya que en este trabajo se generalizaron las características presentes en todo talud. Este podría ayudarnos al mejor entendimiento de cada una de las características geotécnicas de las discontinuidades y la identificación de las discontinuidades más relevantes para la inestabilidad en el talud del Cerro Espinal.
- Se recomienda poder realizar un cierre del talud tomando en consideración las medidas de corrección, remediación y estabilización, para lo cual se propone poder limitar el acceso a personas y el pastoreo de animales a través de la construcción de un cerco perimétrico con sus respectivas señalizaciones y paneles informativos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cabrera Laura, J. (2005). *Estudio de Estabilidad de Taludes del tajo Suro Sur y Suro Norte "Mina la Virgen"*. Puno: Tesis, Universidad Nacional del Altiplano.
- Cosillo Pinto, A. G. (1999). *Consideraciones Geológico - Geotécnicas para el Diseño de Taludes en Macizos Rocosos*. Guatemala: Tesis, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Flores G., G., & Karzulovic L., A. (2003). *Guías geotécnicas para una transición desde rajo abierto a minería subterránea*. Santiago de Chile: División Chuquicamata de Codelco.
- García Nuñez, J. C. (2005). *Añálisis de Estabilidad de Taludes en Macizos Rocosos aplicando el Método de Elementos Distintos*. Puno: Tesis, Universidad Nacional del Altiplano.
- Giani, G. P. (1991). *Rock Slope Stability Analysis*. Australia: CRC Press.
- Gonzales de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica* (2da ed.). Madrid, España: Pearson Education.
- Hoek, E. (2000). *Practical Rock Engineering*. Toronto, Canada: RocScience.
- Hoek, E., & Bray, J. (1981). *Rock slope engineering* (2 da ed.). Londres: The Institution of mining and metallurgy.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (1987). *Manual de ingeniería de Taludes*. Madrid: ITGE.
- International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field test. (1978). *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Ankara, Turkia: ISRM.
- Jorda Bordehore, L. (2013). *Clasificaciones Geomecánicas y Diseño Empírico de Sostenimiento*. Lima: Elite.

- Laubacher, G. (1978). *Estudio geológico de la región norte del lago Titicaca*. Lima, Perú: INGEOMIN.
- Kliche, C. A. (1999). *Rock Slope Stability*. USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME).
- Morales Cárdenas, M. (2009). *Caracterización geotécnica y determinación de ángulos de talud en yacimiento Franke*. Santiago, Chile: Tesis. Universidad de Chile.
- Morales, M. O. (2009). *Caracterización geotécnica y determinación de ángulos de talud en yacimiento Franke*. Santiago de Chile: Tesis, Universidad de Chile.
- Palacios, Oscar; De la Cruz, Julio; De la Cruz, Natalio; Klinck, B.A.; Ellison, R.A.; Hawkins, M.P. (1993). *Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al Oeste del Lago Titicaca Sur del Perú (Proyecto Integrado del Sur)*. Lima Perú: INGEMMET.
- Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. (2007). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Read, J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for Open Pit Slope Design* (1ra ed.). Australia: CSIRO Publishing.
- Rodríguez Copare, J. D., Morales Cabrera, D. U., & Paredes Lupaca, L. (2003). *Evaluación de la Estabilidad de Taludes en la Mina Lourdes*. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Rodríguez Illachura, H. T. (2014). Problemas Estructurales y la Estabilidad de los Macizos Rocosos. *El Ingeniero*, 72.
- Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía. (2004). *Manual de Geomecánica Aplicada a la Prevención de Accidentes por Caídas de Rocas en Minería Subterránea*. Lima: SNMPE.
- Suarez Burgoa, L. (2013). *Descripción del macizo rocoso introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterránea*. Medellín, Colombia: El autor.

Suarez Diaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda.

Tejada Cervantes, L. M. (2011). *Resistencia de macizos rocosos estructuralmente complejos de mineralización sometidos a cargas dinámicas*. Brasilia: Tesis, Universidad de Brasilia.

Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering* (4ta ed.). New York: Taylor and Francis Group.

