



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



CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE MACIZOS ROCOSOS
PARA EL DISEÑO DE LA PRESA CHASCA COCHA –
CRUCERO – CARABAYA – PUNO

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. FREDDY CHAIÑA CHURATA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO – PERÚ

2021



DEDICATORIA

A Dios por concederme la vida y la salud, así darme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.

En memoria a mi padre, a mi madre por la motivación y apoyo constante,

a mis hermanos que son el ejemplo a seguir.

A mi esposa e hijos que son mi razón existir.

FREDDY CHAIÑA CHURATA



AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis más profundos y sinceros agradecimientos a:

A Dios nuestro señor, por ser mi guía y compañía en cada momento a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en mis momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizaje.

A la Universidad Nacional del Altiplano - Puno, Mi Alma Mater que me ha acogido durante 5 años de mi formación académica profesional, llevándome una experiencia tan maravillosa e inolvidable.

A todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, que me han impartido sus conocimientos, experiencias, y que estuvieron siempre dispuestos a esclarecer mis dudas.

Al Dr. Héctor Raúl Machaca Condori que, como director de tesis me ha orientado, apoyado y corregido en la ejecución y culminación del presente trabajo de investigación.

A mis compañeros y amigos de toda la vida, con la cual he formado una gran amistad y fraternidad durante toda mi carrera profesional, gracias por ser tan buenos compañeros y amigos.

A mi madre, hermanos y esposa que siempre han estado allí para apoyarme, alentarme y darme ánimo cuando las fuerzas desfallecen, depositando confianza en mí.

Quisiera también expresar mi más sentido agradecimiento a todas aquellas personas que directa o indirectamente han colaborado y contribuido con su apoyo, comentarios, sugerencia y ayuda en el desarrollo de esta tesis.



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE CUADROS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 16

ABSTRACT 17

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 19

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 19

1.2.1. Interrogante general 19

1.2.2. Interrogantes específicas 20

1.3. JUSTIFICACIÓN 20

1.4. HIPÓTESIS 21

1.4.1. Hipótesis general 21

1.4.2. Hipótesis específica 21

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 21

1.5.1. Objetivo general 21

1.5.2. Objetivos específicos 21

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES 22

2.2. MARCO TEÓRICO 24

2.2.1. Propiedades físico- mecánico del macizo rocoso 24

2.2.1.1. Porosidad 24

2.2.1.2. Contenido de agua 24

2.2.1.3. Peso volumétrico 25

2.2.1.4. Alteración 25

2.2.1.5. Alterabilidad 25

2.2.1.6. Sensitividad 26

2.2.1.7. Mineralogía 27

2.2.1.8. Densidad 27

2.2.1.9. Deformación 27



2.2.1.10.	Resistencia.....	28
2.2.1.10.1.	Compresión uniaxial.....	28
2.2.1.11.	Permeabilidad o conductividad hidráulica	30
2.2.2.	Caracterización del macizo rocoso	30
2.2.2.1.	Orientación	30
2.2.2.2.	Espaciamiento	31
2.2.2.3.	Continuidad o persistencia	33
2.2.2.4.	Rugosidad.....	34
2.2.2.5.	Resistencia de las paredes	35
2.2.2.6.	Abertura.....	36
2.2.2.7.	Relleno	37
2.2.2.8.	Ensayos de permeabilidad.....	39
2.2.2.8.1.	Ensayo de Lefranc	39
2.2.2.8.2.	Ensayo de Lugeon	39
2.2.2.9.	Filtraciones	40
2.2.2.10.	Número y orientación de familias de discontinuidades	40
2.2.2.11.	Tamaño de bloques y grado de fracturación	41
2.2.3.	Meteorización o alteración.....	42
2.2.4.	Propiedades de la roca intacta.....	43
2.2.5.	Clasificación geomecánica	43
2.2.5.1.	Designación de la calidad de rocas (RQD)	43
2.2.5.2.	Valoración del macizo rocoso (RMR)	44
2.2.5.3.	Índice (Q)	47
2.2.5.4.	Índice de resistencia geológico (GSI)	52
2.2.6.	Análisis de estabilidad de taludes	54
2.2.7.	Métodos para el análisis de estabilidad de taludes	55
2.2.8.	Métodos de proyecciones estereográficas o cinemáticos	56
2.2.8.1.	Principales modos de falla	59
2.2.8.1.1.	Modo de falla planar	60
2.2.8.1.2.	Falla por cuña.....	61
2.2.8.1.3.	Falla por vuelco.....	62
2.2.8.1.4.	Falla circular.....	62
2.2.9.	Métodos de equilibrio limite o analítico	63
2.2.9.1.	Análisis de estabilidad en falla planar.....	64
2.2.9.2.	Análisis de estabilidad en falla por cuña.....	68
2.2.9.3.	Análisis de estabilidad en falla por vuelco.....	70
2.2.9.4.	Análisis de estabilidad en falla circular	71



2.2.10.	Métodos numéricos	71
2.2.11.	Métodos estadísticos	72
2.2.12.	Tipos de presas.....	73
2.2.12.1.	Clasificación de presas	74
a.	Según su función	74
b.	Según los materiales que se emplean en su construcción	74
c.	Según su estructura	75
d.	Según su aplicación.....	75
2.3.	MARCO CONCEPTUAL	76
2.3.1.	Abertura	76
2.3.2.	Buzamiento	76
2.3.3.	Caracterización	77
2.3.4.	Clasificación geomecánica	77
2.3.5.	Deslizamiento	77
2.3.6.	Dirección de buzamiento	77
2.3.7.	Discontinuidad	77
2.3.8.	Dominios geotécnicos.....	77
2.3.9.	Estabilidad de talud.....	78
2.3.10.	Espaciamiento	78
2.3.11.	Factor de seguridad	78
2.3.12.	Macizo rocoso	78
2.3.13.	Matriz rocosa	78
2.3.14.	Meteorización	79
2.3.15.	Orientación.....	79
2.3.16.	Relleno	79
2.3.17.	Resistencia a compresión simple	79
2.3.18.	Roca	79
2.3.19.	Roca intacta.....	80
2.3.20.	Rugosidad	80
2.3.21.	Talud	80
2.3.22.	Tipo de rotura.....	80

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	Diseño metodológico	81
3.1.1.	Tipo de investigación.....	81
3.2.	Revisión, recopilación y elaboración de informaciones preliminares....	82
3.3.	Población y muestra	82



3.3.1.	Población	82
3.3.2.	Muestra	82
3.4.	Operacionalización de variables	82
3.4.1.	Variable independiente	82
3.4.2.	Variable dependiente	82
3.4.3.	Operación de variables.....	83
3.5.	Técnicas de recolección de datos	83
3.5.1.	Etapa de campo	83
3.5.2.	Caracterización geotécnica del macizo rocoso.	84
3.5.3.	Ensayos de laboratorio.....	84
3.5.4.	Técnicas de procesamiento de datos	84
3.6.	Materiales, instrumentos y equipos.	85

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1.	Ubicación	86
4.2.	Acceso	86
4.3.	Clima vegetación.....	87
4.3.1.	Clima	87
4.3.2.	Lluvias	87
4.3.3.	Temperatura.....	87
4.3.4.	Vientos	87
4.3.5.	Heladas.....	87
4.3.6.	Vegetación	88
4.4.	Hidrografía.....	88
4.5.	Laguna Chasca Cocha.....	88
4.6.	Geomorfología	88
4.6.1.1.	Relieve cordillerano	89
4.6.1.2.	Pre cordillera de Carabaya	89
4.6.1.3.	Valle fluvio-glaciar.....	89
4.6.1.4.	Colinas.....	89
4.6.1.5.	Terrazas	89
4.6.1.6.	Lecho Aluvial altiplánico	90
4.6.1.7.	Drenaje	90
4.7.	Geología Regional.....	90
4.8.	Estratigrafía regional	90
4.8.1.	Paleozoico	90
4.8.1.1.	Formación Sandia (Os-s).....	90



4.8.1.2.	Formación Ananea (SD-a)	91
4.8.1.3.	Grupo Ambo (Ci-a)	91
4.8.1.4.	Grupo Tarma (Ci-a)	91
4.8.1.5.	Grupo Copacabana (Pi-c)	92
4.8.2.	Mesozoico	92
4.8.2.1.	Grupo Cotacucho (Km-c)	92
4.8.2.2.	Formación Viquechico (Ks-v)	93
4.8.2.3.	Formación Muñani (Ti-m)	93
4.8.2.4.	Volcanico Macusani (Ts-m)	93
4.8.3.	Cenozoico	94
4.8.3.1.	Depósitos Fluvioglaciares y aluviales (Q-fg Q-al)	94
4.8.3.2.	Depósitos morrenicos (Qpl-mo)	94
4.9.	Geología local	96
4.10.	Paleozoico	96
4.10.1.	Grupo Tarma (Cs-t)	96
4.10.2.	Grupo Copacabana (Pi-c)	96
4.10.3.	Grupo Mitu (Ps-mi)	96
4.11.	Mesozoico	96
4.11.1.	Intrusivo Microdiorítico (Nm-md)	96
4.12.	Cenozoico	97
4.12.1.	Depósitos Morrénicos (Qpl-mo)	97
4.12.2.	Depósitos Glaciofluviales (Qh-gf)	97
4.12.3.	Depósito Aluviales (Qh-al)	97
4.13.	Geología estructural	98
4.14.	Sismicidad	98
4.14.1.	Sismicidad histórica	98
4.14.2.	Zonificación sísmica según RNC	98

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1.	CARACTERÍSTICAS GEOMECANICAS DE LOS MACIZOS ROCOSOS	100
5.1.1.	Exploración y muestreo	100
5.1.2.	Mapeo de las estructuras geológicas	100
5.1.3.	Evaluación Geomecánica	101
5.1.3.1.	Identificación del Sistema de Discontinuidades	101
5.1.3.2.	Orientación e Inclinación	101
5.1.3.3.	Espaciamiento de las estructuras	102



5.1.3.4.	Continuidad o persistencia	103
5.1.3.5.	Abertura de las estructuras	103
5.1.3.6.	Rugosidad.....	104
5.1.3.7.	Relleno	104
5.1.3.8.	Meteorización o Alteración.....	105
5.1.3.9.	Agua en Discontinuidades.....	105
5.1.3.10.	Permeabilidad del macizo rocoso.....	106
5.1.3.11.	Infiltración en el macizo rocoso	108
5.1.3.12.	Resistencia de las Paredes de las Discontinuidades.....	110
5.2.	CLASIFICACIÓN GEMECANICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS.....	111
5.2.1.	Índice de designación de la calidad de la roca (RQD).....	111
5.2.2.	Clasificación RMR (Bieniawski).....	112
5.2.3.	Clasificación por el Sistema (Q).....	113
5.2.4.	Clasificación por el método GSI.....	113
5.3.	PARAMETROS GEOTECNICOS FUNDAMENTALES	114
5.3.1.	Análisis de Estabilidad de Taludes.....	114
5.3.2.	Análisis de Estabilidad por el Método Estereográfico o Cinemático	115
5.3.3.	Modos de falla	118
5.3.3.1.	Modo de falla planar	118
5.3.3.2.	Modo de falla por cuña	119
5.3.3.3.	Modo de falla por vuelco	119
5.4.	Selección del tipo de presa	120
VI.	CONCLUSIONES.....	122
VII.	RECOMENDACIONES	123
VIII.	REFERENCIAS.....	124
ANEXOS	127

Área : Ingeniería Geotécnica.

Tema : Geología y Geotecnia de Presas.

Tesis sustentada: 12 de marzo del 2021



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 01:	Determinación del peso volumétrico.	25
Figura N° 02:	Tipos de flujo para obtener la sensibilidad de una muestra de roca.	26
Figura N° 03:	Curvas de deformación.	27
Figura N° 04:	Compresión uniaxial o simple.	29
Figura N° 05:	Tipos de esfuerzos.	29
Figura N° 06:	Orientación de discontinuidades.	31
Figura N° 07:	Espaciado de discontinuidades.	31
Figura N° 08:	Esquema que ilustra las condiciones de término que pueden presentar las estructuras de un macizo rocoso.	34
Figura N° 09:	Abertura de las discontinuidades y el ancho de las discontinuidades rellenas.	36
Figura N° 10:	Discontinuidades simples rellenas.	38
Figura N° 11:	Representación del número de familias mediante diagramas de bloques.	41
Figura N° 12:	RQD.....	44
Figura N° 13:	Propuesta de sostenimiento según la Q de Barton.....	51
Figura N° 14:	Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos fracturados.	53
Figura N° 15:	Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos estratificados y heterogéneos.	54
Figura N° 16:	Proyección polar y ecuatorial en una esfera.	57
Figura N° 17:	Representación estegeográfica polar de igual ángulo.....	57
Figura N° 18:	Representación estereográfica ecuatorial de igual ángulo.....	58
Figura N° 19:	Representación de rosetas para la distribución de rumbos de estructuras intermedias.....	58
Figura N°20:	Modos de rotura en taludes de roca: a) Planar, b) Cuña, c) Vuelco, y d) circular.	59
Figura N° 21:	Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla planar.	60
Figura N° 22:	Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla por cuñas.....	61
Figura N° 23:	Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla por vuelco de bloques.	62



Figura N° 24:	Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla circular.	63
Figura N° 25:	Rotura planar: a) Condiciones geométricas, b) Paredes laterales de la superficie de rotura, y c) Estudio bidimensional de rotura.	65
Figura N° 26:	Rotura planar: a) Grieta de tracción ubicada en la cabecera del talud y b) Grieta de tracción ubicada en la cara del talud.	66
Figura N° 27:	Geometría de un análisis estático de solo fricción de una falla en cuña.	69
Figura N° 28:	Deslizamiento e inestabilidad de bloques por vuelco en un plano inclinado.....	71



ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N° 1: Uso de la roca de acuerdo a su alterabilidad.....	26
Cuadro N° 2: Clasificación de las rocas de acuerdo con su resistencia a la compresión	28
Cuadro N° 3: Descripción del espaciamiento de las estructuras.....	32
Cuadro N° 4: Descripción de la continuidad o persistencia.....	33
Cuadro N° 5: Perfiles típicos de rugosidad.....	35
Cuadro N° 6: Descripción de las aberturas	37
Cuadro N° 7: Descripción de las filtraciones en discontinuidades	40
Cuadro N° 8: Clasificación de macizos rocosos por el número de familias de discontinuidades.....	41
Cuadro N° 9: Grado de meteorización del macizo rocoso	42
Cuadro N° 10: Relación entre el valor del RQD y la calidad de la roca.....	43
Cuadro N° 11: Diferencia de valores entre RMR76 Y RMR89.....	46
Cuadro N° 12: Parámetros y rango de valores para la clasificación geomecánica RMR89.....	46
Cuadro N° 13: Índice de calidad de la roca.....	47
Cuadro N° 14: Valor de J_n	48
Cuadro N° 15: Valor de J_r	48
Cuadro N° 16: Valor de J_a	49
Cuadro N° 17: Valor de J_w	49
Cuadro N° 18: Valor de SRF	50
Cuadro N° 19: Valor ESR con la categoría de la excavación	51
Cuadro N° 20: Operacionalización de variables	83
Cuadro N° 21: Accesibilidad	86
Cuadro N° 22: Columna lito estratigráfica.....	95
Cuadro N° 23: Zonificación sísmica según RNC	99
Cuadro N° 24: Descripción de buzamiento y Dir/Buzamiento, obtenido de estereograma	102
Cuadro N° 25: Descripción del espaciado	103
Cuadro N° 26: Descripción de la continuidad o persistencia.....	103
Cuadro N° 27: Descripción de la Abertura	104
Cuadro N° 28: Descripción de la Rugosidad	104
Cuadro N° 29: Descripción del relleno en las discontinuidades	105
Cuadro N° 30: Descripción de Meteorización del macizo rocoso	105
Cuadro N° 31: Descripción Agua en las Discontinuidades.....	106
Cuadro N° 32: Valores típicos de permeabilidad en macizos rocosos.....	107
Cuadro N° 33: Resistencia de las paredes de las discontinuidades.....	110
Cuadro N° 34: Resultados de la resistencia a la compresión simple	110
Cuadro N° 35: Resultados de la resistencia a la compresión simple	111



Cuadro N° 36: Descripción de índice de calidad de roca.....	112
Cuadro N° 37: Resultados de valores de RMR_{89}	112
Cuadro N° 38: Resultados de valores de Sistema Q	113
Cuadro N° 39: Resultados de valores del índice GSI	114
Cuadro N° 40: Datos para el análisis de modos de falla MD-A1	116
Cuadro N° 41: Datos para el análisis de modos de falla MD-A2	116
Cuadro N° 42: Datos para el análisis de modos de falla MD-A3	116
Cuadro N° 43: Datos para el análisis de modos de falla MI-B1	117
Cuadro N° 44: Datos para el análisis de modos de falla MI-B2	117
Cuadro N° 45: Datos para el análisis de modos de falla MI-B3	117
Cuadro N° 46: Resultados de modo de falla planar, según su incidencia.....	118
Cuadro N° 47: Resultados de modo de falla por cuña, según su incidencia	119
Cuadro N° 48: Resultados de modo de falla por vuelco, según su incidencia	120



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ASTM	American Society for Testing and Materials.
GPS	Sistema de posicionamiento global.
c	cohesión de suelos.
θ	Angulo.
Fs	Factor de seguridad.
C°	Grados Centígrados.
Ci-a	Grupo ambo.
Cs-t	Grupo tarma.
Qp-gf	Depósitos glaciofluviales.
Qh-mo	Depósitos morrenicos.
Qh-al	depósitos aluviales.
qu	Capacidad de carga.
Nc	Factores de capacidad de carga.
Y	Densidad natural.
Df	Profundidad de desplante.
B	Ancho de la cimentación.
PE	Peso específico.
PU	Peso unitario.
Zw	Profundidad en el agua.
%	Porcentaje.
H	Altura del talud.
h	Altura de la dovela en la parte media.
b	Ancho de la dovela.
θ'	Ángulo de fricción interna.
δ	Ángulo de apertura de la cuña o ángulo que forman los planos A y B.
ψ_s	Ángulo de la superficie de la cabecera.
ψ_f	Ángulo del buzamiento del talud.
ψ_t	Ángulo del talud con la horizontal.
α	Ángulo positivo o negativo de la base de la dovela con respecto a la horizontal.
β	Ángulo que forma con la horizontal la bisectriz de la cuña.
ψ_p	Ángulo que forma el plano de deslizamiento con la horizontal.
Z_w	Altura del agua en la grieta de tracción.
H_w	Altura del nivel de agua.
Z	Altura del nivel de agua en la grieta de tracción.
A	Área de la superficie de deslizamiento (supuesta de ancho unidad).
JRC	Coefficiente de rugosidad de las juntas o estructuras “Joint Roughness Coefficient”.
c'	Cohesión en términos de tensiones efectivas.
R_A	Es la reacción normal efectiva sobre el plano A.
	Es la reacción normal efectiva sobre el plano B.



R_B	Factor de seguridad.
FS	Índice de calidad de roca “Rock Quality Designation”.
RQD	Índice de resistencia geológica “Geological Strength Index”.
GSI	Número medio de discontinuidades por metro lineal.
λ	Peso de cada dovela.
W	Peso específico del agua.
Y_w	Resistencia a compresión simple de la capa superficial de la roca “Joint
JCS	Wall Comopression Strength” (MPa).
	Resistencia a la compresión uniaxial “Uniaxial Compressive Strength”
UCS	(MPa).
RMR	Calidad del macizo rocoso “Rock Mass Rating”.



RESUMEN

El presente trabajo de investigación denominado “caracterización geomecánica de macizos rocosos para el diseño de la presa Chasca Cocha-Crucero-Carabaya-Puno”; tiene como objetivo principal caracterizar y clasificar geomecánicamente los macizos rocosos, donde se emplazará la Presa Chasca Cocha, ubicado en el Distrito de Crucero– Carabaya–Puno. Se determinó las características y propiedades geomecánicas de los macizos rocosos de las estructuras del eje de la presa, clasificando geomecánicamente los macizos rocosos según los trabajos de exploración geotécnica tales como mapeo por celdas en estaciones geomecánicas, toma de muestras representativas de los márgenes derecho e izquierdo del eje de la presa, ensayos de laboratorio; obteniendo como resultados promedios para cada estación geomecánica y margen de la presa los siguientes resultados: Margen derecho RMR=55, Clase III A, $Q=6.63$ y GSI=60, Margen izquierdo RMR=52, Clase III A, $Q=4.32$ y GSI=57, los que representan una condición de buena a regular del macizo rocoso. Se determinó geológicamente que el área de estudio donde se proyecta el eje de presa, presenta afloramientos de rocas sedimentarias como calizas del grupo Copacabana, tanto en el margen derecho como en el margen izquierdo. Así mismo se determinó que los parámetros geotécnicos que influyen en el diseño de la presa como la inclinación del margen derecho que está en un promedio de 40° a 55° y en el margen izquierdo está en un promedio de 30° a 45° . Presenta un RQD promedio entre 75 – 90%. La resistencia a la compresión simple varía entre 107 - 161 MPa. Para ambos márgenes; complementariamente al estudio, se realizó un análisis de estabilidad de taludes por el método estereográfico o cinemático, usando el software Dips v6.0, para analizar los probables tipos de falla de los taludes en el eje de la presa; teniendo como resultados en el margen derecho un 5.94 % de probabilidad de falla por cuña y un 31.25 % de falla por vuelco, asimismo en el margen izquierdo se tiene un 34.76 % de probabilidad de falla por cuña.

Palabras Claves: Caracterización, Chasca Cocha, Clasificación, Geomecánica, Macizo Rocosos.



ABSTRACT

The present research work called "geomechanical characterization of rocky massifs for the design of the Chasca Cocha-Crucero-Carabaya-Puno dam"; Its main objective is to characterize and geomechanically classify the rocky massifs, where the Chasca Cocha Dam will be located, located in the District of Crucero - Carabaya - Puno. The characteristics and geomechanical properties of the rock masses of the structures of the dam axis were determined, geomechanically classifying the rock masses according to geotechnical exploration works such as mapping by cells in geomechanical stations, taking representative samples of the right and left margins. the axis of the dam, laboratory tests; obtaining the following results as average results for each geomechanical station and dam margin: Right margin RMR = 55, Class III A, $Q = 6.63$ and GSI = 60, Left margin RMR = 52, Class III A, $Q = 4.32$ and GSI = 57, which represent a good to fair condition of the rocky massif. It was geologically determined that the study area where the dam axis is projected presents outcrops of sedimentary rocks such as limestone from the Copacabana group, both on the right bank and on the left bank. Likewise, it was determined that the geotechnical parameters that influence the design of the dam, such as the inclination of the right bank which is an average of 40° to 55° and on the left bank it is an average of 30° to 45° . It presents an average RQD between 75 - 90%. The resistance to simple compression varies between 107 - 161 MPa. For both margins; In addition to the study, a slope stability analysis was carried out by the stereographic or kinematic method, using the Dips v6.0 software, to analyze the probable types of slope failure in the axis of the dam; having as results in the right margin a 5.94% probability of failure per wedge and a 31.25% failure due to overturning, also in the left margin there is a 34.76% probability of failure per wedge.

Keywords: Characterization, Chasca Cocha, Classification, Geomechanics, Rocky Massif.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Las presas son obras de infraestructura hidráulica, que han sido construidas por el hombre desde las primeras civilizaciones. Desde obras pequeñas como diques, hasta las grandes presas construidas en la actualidad, estas estructuras proporcionan distintos beneficios a las poblaciones, como la retención de agua para consumo o riego, la regulación de las avenidas y/o la generación de energía. Sin embargo, su potencial falla representa grandes riesgos por las pérdidas materiales y daños al medio ambiente que ocasionaría, y de manera especialmente importante la pérdida de vidas humanas, por ello es de mucha responsabilidad e importancia los trabajos geotécnicos realizados para el diseño de presas, así mismo involucra la participación de diferentes especialistas en el área de geotecnia, hidráulica, estructuras, topografía, impacto ambiental, etc.

El presente trabajo de investigación responde a la necesidad de disponer una buena infraestructura básica de riego en el Distrito de Crucero Provincia de Carabaya Departamento de Puno, donde se realizaron los trabajos de campo tales como: Mapeo geomecánico, medición de actitudes de las discontinuidades, medición de fracturas, verificación de cantidad de agua, identificación de número de familias, para Calificar los macizos rocosos mediante los sistemas de Clasificación Geomecánica: RMR, Q, GSI y RQD; Con el propósito de la Caracterización geotécnica de los macizos rocosos, para el diseño de la presa Chasca Cocha – Crucero – Puno. Donde se proyecta la construcción del cuerpo de presa para plantear tratamientos adecuados o necesarios con el objetivo de asegurar la infraestructura de posibles daños a la estructura de riego de los problemas geotécnicos.

Los parámetros geotécnicos de los materiales obtenidos mediante la inspección geotécnica, se utilizan en los análisis de cálculo por medio del software Dips especializado en el área de la geotecnia, los cuales nos permiten obtener: la simulación de superficies de falla de los taludes del cuerpo de la presa con ello, es posible determinar las soluciones apropiadas que faciliten la construcción de la presa de manera segura.



1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De una forma común, sabe que nuestro planeta, está compuesto por tres cuartas partes de agua. Igualmente se conoce que un alto porcentaje la composición de los seres vivos está sustentada por la presencia de agua en ellos, por lo tanto, el agua es de vital importancia. Entonces es necesario que el hombre pueda transportar el agua a zonas potencialmente agrícolas, donde el agua de lluvia es insuficiente para el desarrollo exponencial de los cultivos. Los sistemas de irrigación han mejorado a lo largo del tiempo, teniendo entre varias opciones para elegir, pero sería en vano utilizar un extenso y correcto canal de regadío, o utilizar la irrigación por goteo, surcos o aspersión sin el suficiente almacenamiento previo del agua total a utilizar, por tanto, a lo largo de los años se ha perfeccionado el método de embalsamiento de aguas por medio de presas.

Las actividades de programas de prospección, exploraciones encaminadas a descubrir y extraer fuentes de recursos que nos lleva a desarrollar nuevas técnicas de prospección usando métodos directos e indirectos, para ello establecer nuevos modelos geológicos, que son importantes en la etapa de exploración geológica para la construcción de la Presa Chasca Cocha.

Se tiene una deficiente gestión de construcción de represas, a causa de una débil organización e insuficientes elementos correctos de operación, mantenimiento de la infraestructura de presas e inadecuada caracterización geotécnica de las presas, debido a la baja eficiencia de construcción de presas. Pese a toda esta coyuntura adversa, el poblador de nuestra Región, trata de encontrar mejores rendimientos a su producción agrícola y pecuaria, mediante la optimización del recurso hídrico y suelo a través de adecuadas infraestructuras, para mejorar su condición de vida.

Nuestra Región de Puno cuenta con gran cantidad del recurso hídrico, lo cual debemos de aprovechar el represamiento de agua. En el Distrito de Crucero, Provincia de Carabaya, Región Puno; específicamente en el área de estudio siendo la Laguna Chasca Cocha, donde se tiene pensado plantar una presa, donde la investigación recae en la caracterización geotécnica de los macizos rocosos y la inspección geológica que se realizará con motivos de viabilizar la construcción de esta presa, para ello es imprescindible contar con la geología como ingeniería.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Considerando los problemas descritos, esta investigación responde las siguientes interrogantes:

1.2.1. Interrogante general

- ¿Cuáles son Las características geomecánicas del macizo rocoso para el diseño de la presa Chasca Cocha – Crucero – Carabaya – Puno?



1.2.2. Interrogantes específicas

- ¿Qué características geomecánicas presentarán los macizos rocosos, para el diseño de la presa Chasca Cocha – Crucero – Carabaya - Puno?
- ¿Cuál será la clasificación geomecánica de los macizos rocosos, para el diseño de la presa Chasca Cocha – Crucero – Carabaya - Puno?
- ¿Qué parámetros geotécnicos fundamentales influirán para la optimización del diseño de la presa Chasca Cocha – Crucero – Carabaya - Puno?

1.3. JUSTIFICACIÓN

Para el presente trabajo de investigación se ha elegido el estudio de la caracterización y clasificación de macizos rocosos para el diseño de la presa Chasca Cocha del Distrito de Crucero – Carabaya - Puno, por la relevancia que presenta esta obra para el beneficio y mejora de condiciones de vida de los pobladores de la zona, y por la carencia de estudios de esta naturaleza en el diseño de una presa siendo así que la caracterización de campo del macizo rocoso es un ejercicio progresivo que comienza con una descripción general de las condiciones del terreno, y con la identificación y clasificación de los materiales que forman los macizos. Las observaciones posteriores más complejas sobre propiedades y factores concretos pueden aumentar el grado de interpretación.

En general, el procedimiento a seguir parte de una descripción general de los aspectos y características observables a simple vista, en base a los cuales se establecen distintas zonas más o menos homogéneas en base a la litología, estructura tectónica, etc.; posteriormente, se describen y caracterizan con detalle los componentes de las diferentes zonas del macizo y sus propiedades; finalmente, a partir de todos los datos obtenidos, se clasifica geomecánicamente el macizo rocoso. La caracterización de cada zona debe realizarse de forma objetiva e individualizada, e incluye el estudio de la matriz rocosa, de las discontinuidades y del conjunto del macizo, describiendo tanto sus propiedades intrínsecas como los factores externos que condicionan su comportamiento.

Este trabajo de investigación dará a conocer el comportamiento real del macizo rocoso, para el diseño de la presa Chasca Cocha, Crucero – Carabaya - Puno, mediante un modelamiento de sus propiedades y características tales como fracturamiento, diaclasamiento y calidad del macizo rocoso por medio del software Dips, resultando una guía o manual muy importante para los estudiantes de ingeniería y así mismo para posteriores investigaciones en nuestra región.



1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis general

La caracterización geomecánica de los macizos rocosos son de buena calidad, para el diseño de la presa Chasca Cocha- Crucero-Puno.

1.4.2. Hipótesis específica

- El macizo rocoso presenta características geomecánicas favorables para el diseño de la presa Chasca Cocha - Crucero – Carabaya – Puno.
- La clasificación geomecánica indica que los macizos rocosos son de buena calidad para el diseño de la presa Chasca Cocha - Crucero – Carabaya – Puno.
- Los parámetros geotécnicos fundamentales, influyen directamente para la optimización del diseño de la presa Chasca Cocha – Crucero – Carabaya - Puno.

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

Caracterizar geomecánicamente los macizos rocosos, para el diseño de la presa Chasca Cocha- Crucero-Puno.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar las características geomecánicas de los macizos rocosos, para el diseño de la presa Chasca Cocha - Crucero – Carabaya – Puno.
- Determinar la clasificación geomecánica de los macizos rocosos, para el diseño de la presa Chasca Cocha – Crucero – Carabaya – Puno.
- Determinar los parámetros geotécnicos fundamentales que influyen en la optimización del diseño de la presa Chasca Cocha – Crucero – Carabaya – Puno.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Figueras, M. (2008). Diseño de presas pequeñas, Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de: maestro en ingeniería, México, en su investigación indica: En el estudio referido al diseño de presas pequeñas, señala que, al adoptar cualquier método de evaluación de externalidades para elegir la mejor alternativa de sitio para el diseño de presas pequeñas, se deben de cuidar los factores a evaluar, porque de ellos depende el estudio de la elección de la alternativa más viable. La elección de algún tipo de presa responde a la conveniencia de construir una estructura económica y segura con los materiales que existen en la vecindad teniendo en cuenta las condiciones topográficas, geológicas, hidrológicas, sísmicas, así como conocer las características mecánicas de los suelos y las rocas en los empotramientos, el fondo del cauce y el embalse. La calidad de la obra no debe de estar en función de su magnitud, es decir, no por tratarse de una obra de pequeñas dimensiones la calidad en los estudios previos, la exploración del suelo, las pruebas de campo y laboratorio, el diseño y el procedimiento de construcción se verán disminuidas a comparación de una obra de grandes dimensiones.

Cruzado, P. (2017). Indica que: Se utiliza con frecuencia para la caracterización geomecánicas más comunes en el macizo rocoso son la de Bieniawski o RMR, el Índice de la Calidad de Roca (RQD) y el Índice de Resistencia Geológica (GSI) y para la determinación de los parámetros de resistencia del macizo rocoso se usó comúnmente el Criterio de Falla de Hoek & Brown y la propuesta de Hoek & Diedericks.

Así mismo; Cabrera, L. (2005), En su tesis de Título “Estudio de la estabilidad de taludes del tajo sur y suro norte Mina Virgen”, presentada en la Facultad de Ingeniería de Minas, de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, En sus conclusiones indica:

- 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 del corte efectuado por la explotación actual, seguido de un mapeo estructural del método de línea de detalles y método de celdas.
- 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 & Hoek, 2000), lo que ha permitido definir diez dominios estructurales.



Albarracín, O. Gómez D. (2000), trabajo técnico “Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso del sector la sierra, Sogamoso, Boyacá, Colombia”, donde en sus conclusiones indica:

- De acuerdo a los datos tomados en campo y mediante la utilización del software Dips se determinaron dos familias de discontinuidades en el macizo, las cuales se pueden observar en los diagramas de polos, frecuencias y rosetas.
- Según las clasificaciones RMR, Q, y el índice de calidad de la roca RQD, las propiedades geomecánicas del macizo tienden a ser de mala calidad.

Guamán V. Mendieta F. (2013), Tesina “Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la cantera de materiales de construcción las Victorias” presentado a la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Cuenca, en sus conclusiones indica:

- En general, las clasificaciones geomecánicas con mejores resultados de aplicación son las de Bieniawski (RMR básico), Romana (SMR) y el índice de resistencia geológica (GSI) basado en el estado de fractura miento y calidad de las discontinuidades. Se clasifica al macizo rocoso de la cantera “Las Victorias” de calidad Media y comportamiento Elasto-Frágil.
- La clasificación de Barton (Q), presentó resultados que eran incompatibles con las observaciones de campo, respecto a la Andesita que conforma el macizo rocoso. En primer lugar, el espaciado de las discontinuidades no se considera directamente del índice Q, aunque es considerado en el RQD. En segundo lugar, la resistencia de la roca intacta y grado de meteorización no se tienen en cuenta directamente en la clasificación, además no se tiene en cuenta la orientación de las discontinuidades con respecto al talud de la cantera.

Condori A. E. (2010), tesis titulado “Evaluación geomecánica de San Andrés de la mina La Rinconada”; para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo, presentado a la escuela profesional de Ingeniería Geología – UNA - PUNO, en una de sus conclusiones indica:

- El comportamiento de los parámetros geomecánicos, está directamente relacionado a los planos de fracturamiento; que constituye los principales sistemas de discontinuidades dominantes están caracterizados por dos familias y una aleatoria, que en la mayoría de los casos se encuentran paralelo a los planos estratificados.



2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Propiedades físico- mecánico del macizo rocoso

Las propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso son de tipo cuantitativo que permiten predecir el comportamiento mecánico de los macizos rocosos y son directamente aplicables dentro del diseño de ingeniería. (Hoek, E. y Brown, E. T. 1985).

2.2.1.1. Porosidad

Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de la muestra, mide la capacidad de una formación para contener agua la cual se expresa en porcentaje. La porosidad se relaciona con la resistencia al esfuerzo cortante. (Blanco, 2005).

$$\eta(\%) = \frac{V_v}{V_m} \times 100$$

Dónde:

$\eta(\%)$: Porosidad expresada en porcentaje.

V_v : Volumen de vacíos.

V_m : Volumen de la muestra.

Tipos de porosidad:

- Absoluta
- De fisuración

2.2.1.2. Contenido de agua

Es la relación entre el peso del agua contenida en una roca y el peso de su fase sólida. Se expresa en porcentaje. (Blanco, 2005). El contenido de agua está ligado a la porosidad de la muestra y a la profundidad de la que proviene la misma. A mayor contenido de agua mayor disminución de la resistencia.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

Dónde:

ω : humedad.

W_w : Peso del agua contenida en la roca.

W_s : Peso del sólido rocoso.

2.2.1.3. Peso volumétrico

Es la relación entre el peso de la muestra y el volumen de la muestra. El peso y volumen de la muestra se realiza pesándola en el aire y luego pesándola sumergida en mercurio.

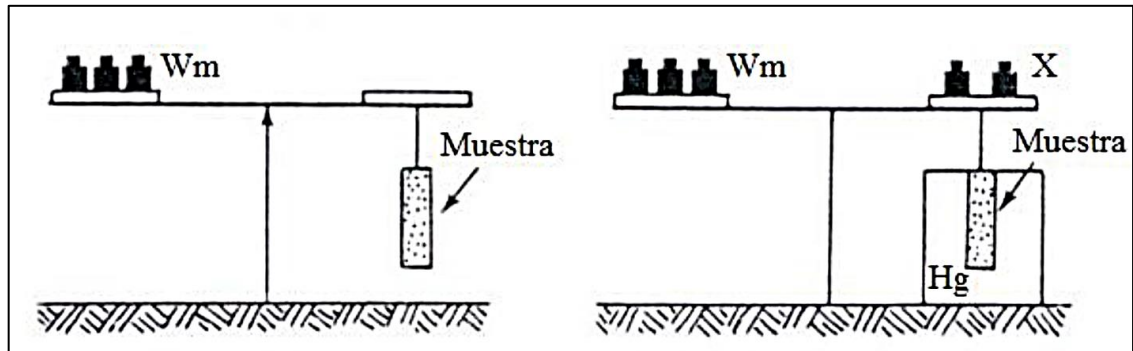


Figura N° 01: Determinación del peso volumétrico.

Fuente: Blanco, R. (2005). Características físico y mecánicas estructurales del macizo rocoso. Proyecto CYTED XIII, Córdoba, Argentina.

2.2.1.4. Alteración

Las rocas al estar expuestas al medio natural, sufren modificaciones en su estructura y composición mineralógica. Cuando se altera una roca se incrementa la porosidad y por lo tanto se produce mayor absorción de agua.

2.2.1.5. Alterabilidad

Propiedad de alterarse de la roca en presencia de los fenómenos atmosféricos este proceso físico – químico; representado en el cuadro N° 01.

Factores condicionantes:

- Composición mineralógica.
- Fisuras de la roca.
- Agentes agresivos.
- Tratamiento mecánico a que se somete.

Cuadro N° 1

Uso de la roca de acuerdo a su alterabilidad

FISURACIÓN	ALTERABILIDAD ESPECÍFICA	AGREGADO PARA CONCRETO	FACHADAS	TÚNEL	CIMENTACIÓN
Baja $K < 10^{-7}$ cm/s	Baja	Utilizable	Por lo general utilizable	Revestimiento innecesario	Utilizable
	Alta	Impropia	Impropia	Revestimiento no siempre necesario	Tratamiento de relleno de la micro fisura
Baja $K > 10^{-7}$ cm/s	Baja	Utilizable		Revestimiento innecesario	Utilizable sin tratamiento
	Alta	Impropia	Impropia	Revestimiento necesario	Tratamiento necesario

Fuente: Blanco, R. (2005). Características físico y mecánicas estructurales del macizo rocoso. Proyecto CYTED XIII, Córdoba, Argentina.

2.2.1.6. Sensitividad

La sensitividad se establece al analizar la variación de su permeabilidad al cerrarse o abrirse sus fisuras bajo el efecto de una modificación del estado de esfuerzos aplicados.

Para medir dichas variaciones de permeabilidad se realiza una prueba que consiste en utilizar una probeta cilíndrica de roca con una perforación central la cual se somete a dos tipos de flujo:

- Flujo convergente
- Flujo divergente

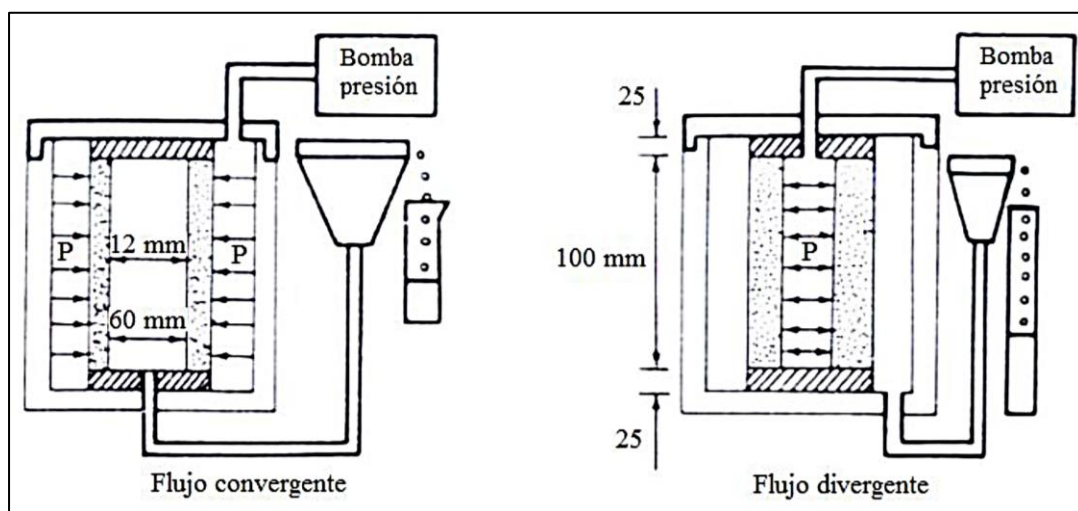


Figura N° 02: Tipos de flujo para obtener la sensitividad de una muestra de roca.

Fuente: Blanco, R. (2005). Características físico y mecánicas estructurales del macizo rocoso. Proyecto CYTED XIII, Córdoba, Argentina.

2.2.1.7. Mineralogía

Es identificar los minerales y estudiar sus propiedades de los cuales las rocas están compuestas. (Blanco, 2005).

Dentro de la mineralogía existen dos líneas de trabajo.

Mineralogía descriptiva

Se ocupa de estudiar las propiedades y clasificación de los minerales individuales, su localización, sus formas de aparición y sus usos.

Mineralogía determinativa

Es el área que ocupa de identificar los minerales presentes en una muestra en función de sus propiedades químicas, físicas y cristalográficas, estas propiedades de los minerales constituyen subespecialidades de la mineralogía.

2.2.1.8. Densidad

Es la relación de la masa de la muestra sobre el volumen de la misma.

$$\rho = m / v$$

Dónde:

m : Masa del material

v : Volumen del material

2.2.1.9. Deformación

Cuando se somete una muestra de roca a una carga esta tiende a cambiar de forma, de volumen o bien las dos cosas simultáneamente. Durante el período de aplicación del esfuerzo, este y la deformación son inseparables, por lo que se acostumbra a estudiar a la deformación mediante gráficas conocidas como Esfuerzo-Deformación.

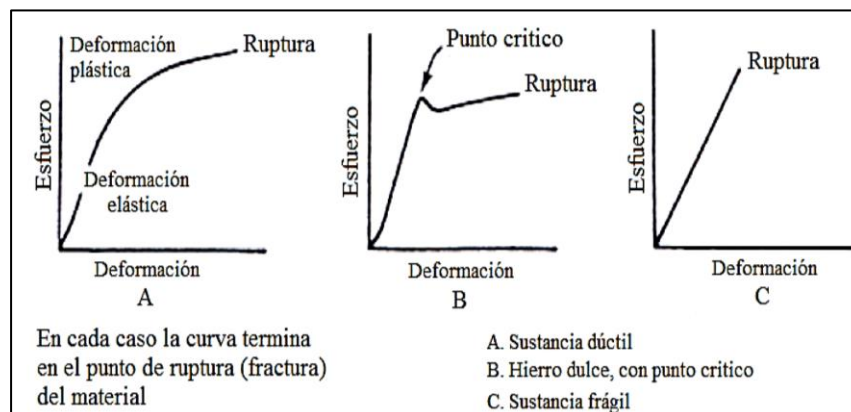


Figura N° 03: Curvas de deformación.

Fuente: Hoek, E. y Brown, E. T. (1985). Excavaciones subterráneas en roca, México, McGraw-Hill.

2.2.1.10. Resistencia

Es el esfuerzo máximo que puede soportar una roca sin romperse, tiene tres esfuerzos como variables.

Compresión: Que tiende a disminuir el volumen del material.

Uniaxial: resistencia a la compresión simple.

Las propiedades mecánicas de las rocas se las puede determinar tanto en laboratorio, en el campo y en el sitio mismo de la obra o proyecto.

Cuadro N° 2

Clasificación de las rocas de acuerdo con su resistencia a la compresión

RESISTENCIA EN MPa	CONDICIÓN	DESCRIPCIÓN
5 a 20	Muy débil	Sedimentarias alteradas y débilmente compactadas.
20 a 40	Débil	Sedimentarias y esquistos débilmente cementados.
40 a 80	Resistencia media	Sedimentarias competentes y rocas ígneas cuarzosas de densidad un poco baja.
80 a 160	Resistencia alta	Ígneas competentes, metamórficas y algunas areniscas de grano fino.
160 a 320	Resistencia muy alta	Cuarcitas, rocas ígneas densas de grano fino.

Fuente: Comisión Federal de Electricidad (1979). Manual de diseño de obras civiles, B-3.4, México.

2.2.1.10.1. Compresión uniaxial

La resistencia a la compresión simple, consiste en aplicar a los especímenes de roca cargas axiales sin confinamiento, donde los especímenes son generalmente cilíndricos de 2.5 a 7.5 cm de diámetro y altura igual a dos veces el diámetro, y está definido por:

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

Dónde:

σ_c : resistencia a la compresión.

F : fuerza aplicada hasta la rotura.

A : sección inicial de la muestra normal a la dirección de la fuerza.

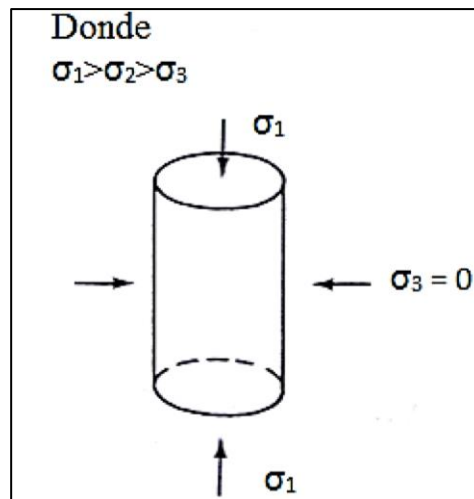


Figura N° 04: Compresión uniaxial o simple.

Fuente: González, L. (2002). Ingeniería Geológica.

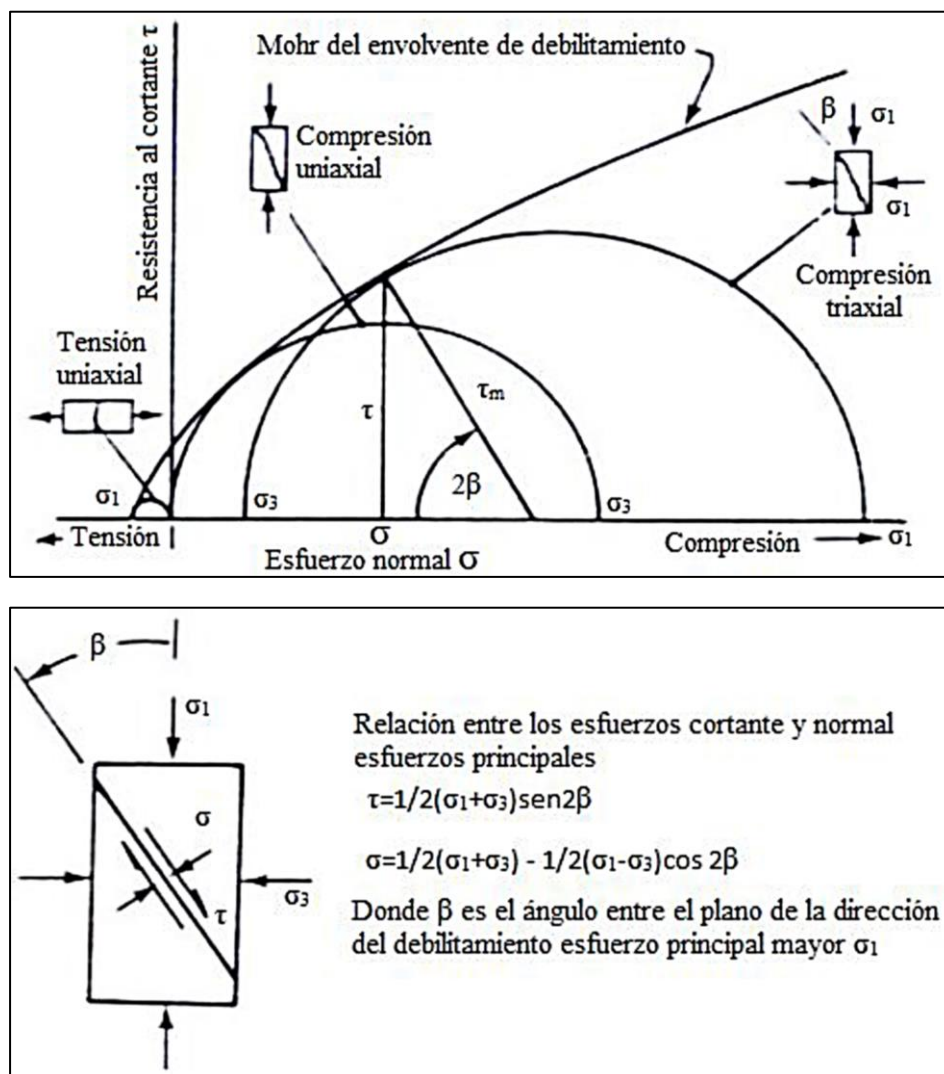


Figura N° 05: Tipos de esfuerzos.

Fuente: Hoek, E. y Brown, E. T. (1985). Excavaciones subterráneas en roca, México, McGraw-Hill.



2.2.1.11. Permeabilidad o conductividad hidráulica

Es la propiedad de algunos materiales de permitir el paso de fluidos a través de ellos. Una roca es permeable cuando permite el paso de una cantidad medible de fluido en un espacio de tiempo finito. Equivale a una velocidad en m/día o cm/s.

Ley de Darcy:

$$Q = k \cdot A \cdot h/l = k \cdot A \cdot i$$

Donde:

- Q: Caudal.
- A: Sección.
- h: Diferencia de altura.
- l: Recorrido del agua.
- h/l: Gradiente hidráulico.

No tiene por qué coincidir la permeabilidad (k) con la porosidad (n), aunque normalmente lo hacen, con excepción de las pizarras y arcillas que tiene una alta porosidad (n) y baja permeabilidad (k).

Factores que influyen en la permeabilidad:

- Temperatura.
- Existencia de cavidades.
- Estratificación y estructura.

2.2.2. Caracterización del macizo rocoso

En la caracterización del macizo rocoso intervienen varios parámetros, que determinan el comportamiento mecánico del macizo rocoso. (FIGUERAS, M. et al., 1999).

2.2.2.1. Orientación

Las discontinuidades sistemáticas se presentan en familias con orientación y características más o menos homogéneas. La orientación relativa y el espaciado de las diferentes familias de un macizo rocoso definen la forma de los bloques que conforman el macizo. (Ferrer, M. et al., 1999). La orientación de las discontinuidades con respecto a las estructuras u obras de ingeniería condicionan la presencia de inestabilidad y roturas a su favor.

La orientación de una discontinuidad queda definida por su dirección de buzamiento lo que normalmente se conoce como dip – dir, de las estructuras de planos de falla, fractura, juntas y planos de sedimentación, foliación o esquistosidad (Ferrer, M. et al. 1999).

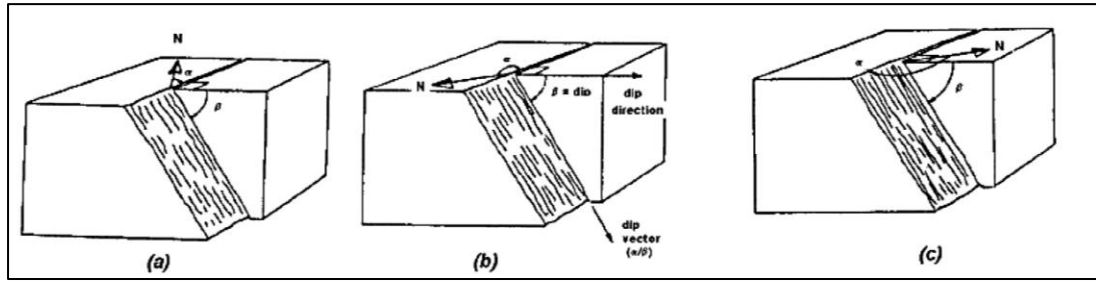


Figura N° 06: Orientación de discontinuidades.

Fuente: Ferrer M. y González V. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME.

2.2.2.2. Espaciamiento

El espaciado entre los planos de discontinuidad condiciona el tamaño de los bloques del macizo rocoso, por tanto, (Ferrer, M. et al., 1999). Define el papel que ésta tendrá en el comportamiento mecánico del macizo, y su importancia con respecto a la influencia de las discontinuidades.

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

El espaciado se define como la distancia entre dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en la dirección perpendicular a dichos planos. Normalmente este valor se refiere al espaciado medio o modal de los valores medidos para las discontinuidades de una misma familia.

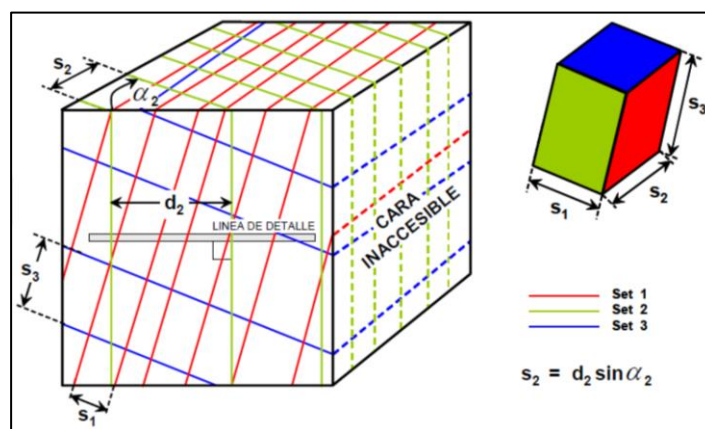


Figura N° 07: Espaciado de discontinuidades.

Fuente: Ferrer M. y González V. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME.

Es la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes, la figura, determina el tamaño de los bloques de roca intacta.

Cuando menos espaciado tengan, los bloques serán más pequeños y cuando más espacio 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 de 3 metros de longitud, con divisiones en milímetros, y la brújula. El procedimiento a seguir es el siguiente, para cada familia de discontinuidades. (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 perpendicular a ella.

En la práctica a cada set o familia de estructuras se le asigna un valor “característico” de espaciamiento (los más usados corresponden al valor promedio o al valor modal de las 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). Debe tenerse presente también que, si la extensión de la línea de detalle utilizada para medir el espaciamiento de un set de estructuras es “corta” en comparación al valor medio de este espaciamiento, entonces las mediciones estarán sesgadas (Brown (2002)). En principio, puede considerarse que para no tener este problema la longitud de la línea de detalle debería ser al menos 5 veces el valor medio del espaciamiento del set de estructuras considerado. (Flores & Karzulovic, 2002).

Cuadro N° 3

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: ISRM (1981).

2.2.2.3. Continuidad o persistencia

La continuidad o persistencia de un plano de discontinuidad es su extensión superficial, medida por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento. Es un parámetro de gran importancia, pero de difícil cuantificación a partir de la observación de afloramientos, en los que normalmente se ven las trazas de los planos de discontinuidad según un buzamiento aparente.

La medida de la continuidad se realiza con una cinta métrica. (Ferrer, M. et al., 1999). Si el afloramiento permite la observación tridimensional de los planos de discontinuidad, deberán medirse las longitudes a lo largo de la dirección y del buzamiento. Las discontinuidades pueden o no terminar contra otra discontinuidad, debiendo indicarse en la descripción. Es importante destacar las familias más continuas, ya que por lo general serán éstas las que condicionen principalmente los planos de rotura del macizo rocoso.

También (Flores & Karzulovic, 2002) lo define como: La persistencia o extensión de las estructuras de cada set corresponde al largo de la traza de la estructura, el cual medirse en la dirección del rumbo o en la dirección del manto de la estructura. En problemas de estabilidad de taludes resulta preferible definir la persistencia en la dirección del manto; por otra parte, al evaluar la estabilidad de las labores subterráneas se emplea mayoritariamente la persistencia en la dirección del rumbo de la estructura. Obviamente no pueden hacerse mediciones de persistencia en testigos de sondajes. Por otra parte, el mapeo de las galerías de una mina subterránea o los bancos de un rajo abierto también presenta problemas de truncación para las estructuras de persistencia mayor a la superficie de mapeo. Conforme con esto, con la sola excepción de las estructuras menores, la definición de la persistencia de las estructuras requiere un grado importante de interpretación geológica, que permita inferir continuidad para estructuras mapeadas en distintos puntos y que presentan similar orientación, potencia y tipo de relleno.

Para describir la persistencia de la estructura se sugiere usar las definiciones de la ISRM que se reseñan en el siguiente cuadro. 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 N°08.

Cuadro N° 4

Descripción de la continuidad o persistencia

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

Fuente: Ferrer M. y González V. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME.

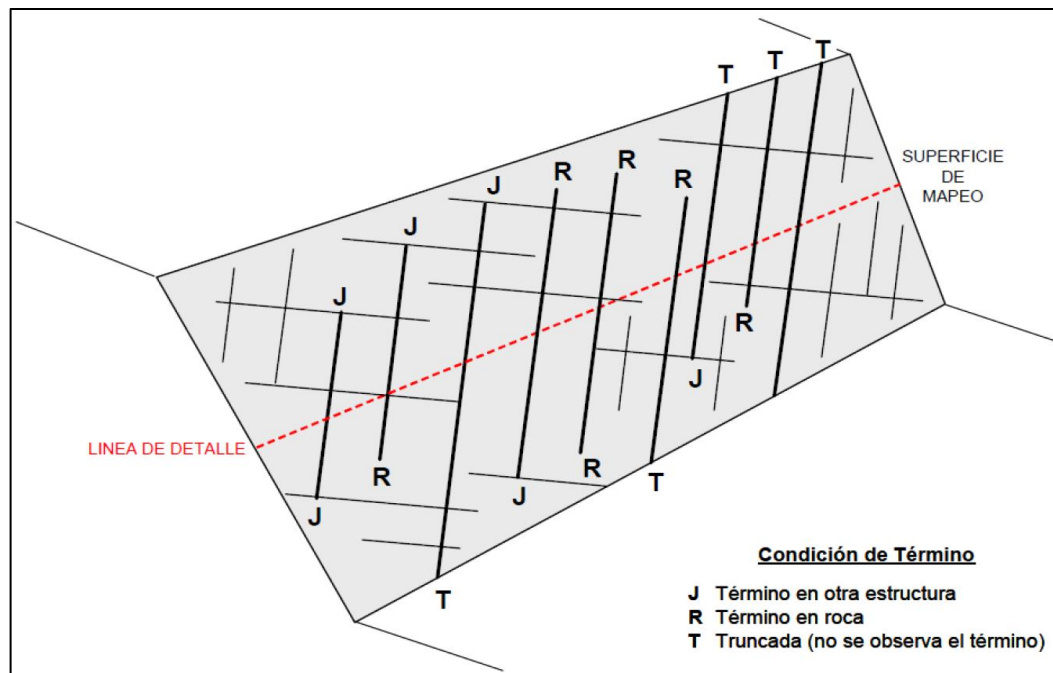


Figura N° 08: Esquema que ilustra las condiciones de término que pueden presentar las estructuras de un macizo rocoso.

Fuente: Brown, 1981.

2.2.2.4. Rugosidad

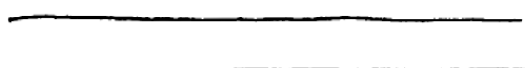
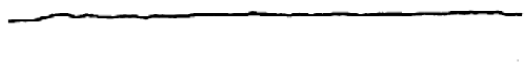

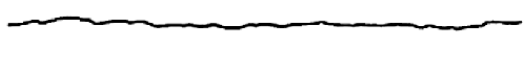
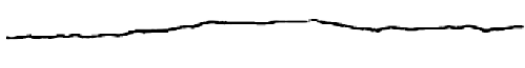
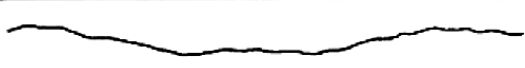
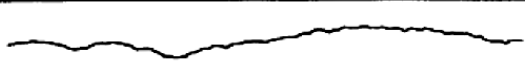


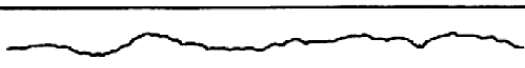
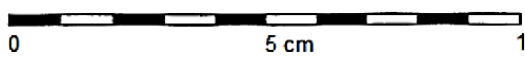
Esta referenciada básicamente el comportamiento mecánico de resistencia al corte entre las paredes de la fractura, la alta rugosidad aumenta la resistencia al corte (τ) y que decrece con el espacio de separación entre las paredes y la presencia de relleno suave, en si la rugosidad son las imperfecciones de las paredes por la presencia de los minerales conformadores de la roca o de la creación de superficies escalonadas por los planos de foliación o esquistosidad. (Ferrer, M. et. al. 1999)

Está designado a través de perfiles típicos de rugosidad en escala disimétrica y métrica para la ondulación de las superficies: superficies planas, onduladas o escalonadas.

Escala milimétrica y centimetrada para la rugosidad o irregularidad: superficies pulidas, lisas o rugosas.

Cuadro N° 5

Perfiles típicos de rugosidad

	<i>JRC</i> = 0 - 2
	<i>JRC</i> = 2 - 4
	<i>JRC</i> = 4 - 6
	<i>JRC</i> = 6 - 8
	<i>JRC</i> = 8 - 10
	<i>JRC</i> = 10 - 12
	<i>JRC</i> = 12 - 14
	<i>JRC</i> = 14 - 16
	<i>JRC</i> = 16 - 18
	<i>JRC</i> = 18 - 20
	

Fuente: Ferrer M. y González V. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME.

2.2.2.5. Resistencia de las paredes

La resistencia de la pared de una discontinuidad influye en su resistencia al corte y en su deformabilidad. (Ferrer, M. et al., 1999). La resistencia depende del tipo de macizo rocoso, el grado de alteración y la existencia o no de relleno. En discontinuidades sanas y limpias, la resistencia sería la misma del macizo rocoso, pero generalmente es menor debido a la meteorización de las paredes, los procesos de alteración afectan en mayor grado a los planos de discontinuidad que al macizo rocoso. Por este motivo, junto a la medida de la resistencia de las paredes de la discontinuidad debe ser estimado el grado de meteorización del macizo rocoso.

La resistencia puede estimarse en campo con el martillo Schmidt, aplicándolo directamente sobre la discontinuidad, para medir la resistencia del macizo, o a partir de

los índices de campo en general, la resistencia de la pared rocosa estará comprendida entre los grados R_0 a R_6 .

En ambos casos las medidas deben realizarse sobre paredes representativas del estado de alteración de las discontinuidades, considerando también las discontinuidades más frecuentes o significativas en el macizo rocoso.

2.2.2.6. Abertura

La apertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. 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. (Ferrer, M. et al., 1999). La influencia de la apertura en la resistencia al corte de la discontinuidad es importante incluso en discontinuidades muy cerradas, al modificar las tensiones efectivas que actúan sobre las paredes. Los procesos de desplazamiento en la discontinuidad o de disolución pueden dar lugar a aberturas importantes.

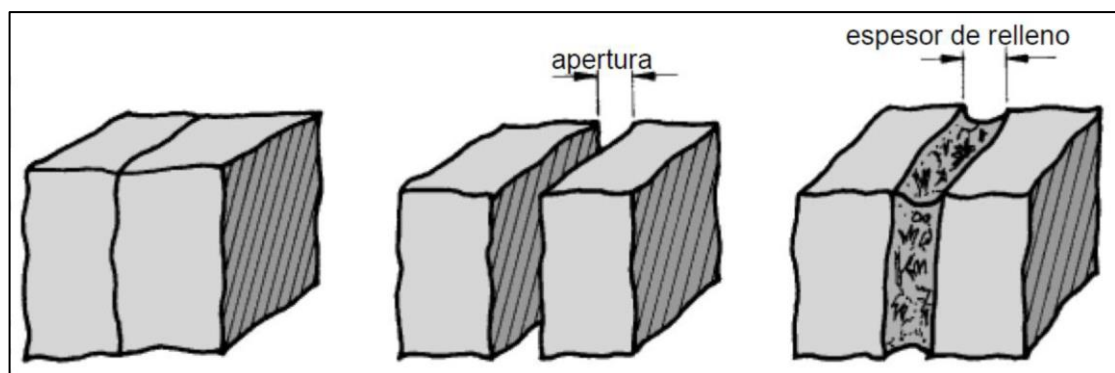


Figura N° 09: Abertura de las discontinuidades y el ancho de las discontinuidades rellenas.

Fuente: Ramirez Oyanguren & Alejono Monge, 2007.

Su medida se realiza directamente con una regla graduada en milímetros. Cuando la separación es muy pequeña se puede emplear un calibre que se introduce en la apertura. Debe indicarse si la apertura de una discontinuidad presenta variaciones, realizándose medidas a lo largo al menos de 3 m. La descripción se realiza según la terminología. Las medidas han de realizarse para cada familia de discontinuidades, adoptando los valores medios más representativos de cada una de ellas.



Cuadro N° 6

Descripción de las aberturas

ABERTURA	DESCRIPCIÓN
< 0.1 mm	Muy cerrada
0.1 – 0.25 mm	Cerrada
0.25 – 0.5 mm	Parcialmente abierta
0.5 – 2.5 mm	Abierta
2.5 – 10 mm	Moderadamente ancha
> 10 mm	Ancha
1 – 10 cm	Muy ancha
10 – 100 cm	Extremadamente ancha
> 1 m	Cavernosa

Fuente: Ferrer M. y González V. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME.

2.2.2.7. Relleno

Las discontinuidades pueden aparecer rellenas de un material de naturaleza distinta a la roca de las paredes. Existe gran variedad de materiales de relleno con propiedades físicas y mecánicas muy variables. La presencia de relleno gobierna el comportamiento de la discontinuidad, por lo que deben ser reconocidos y descritos todos los aspectos referentes a sus propiedades y estado. (Ferrer, M. et al., 1999). Debe tenerse en cuenta que, si se trata de materiales blandos o alterados, éstos pueden sufrir variaciones importantes en sus propiedades resistentes a corto plazo, si cambia su contenido en humedad o si tiene lugar algún movimiento a lo largo de las juntas.

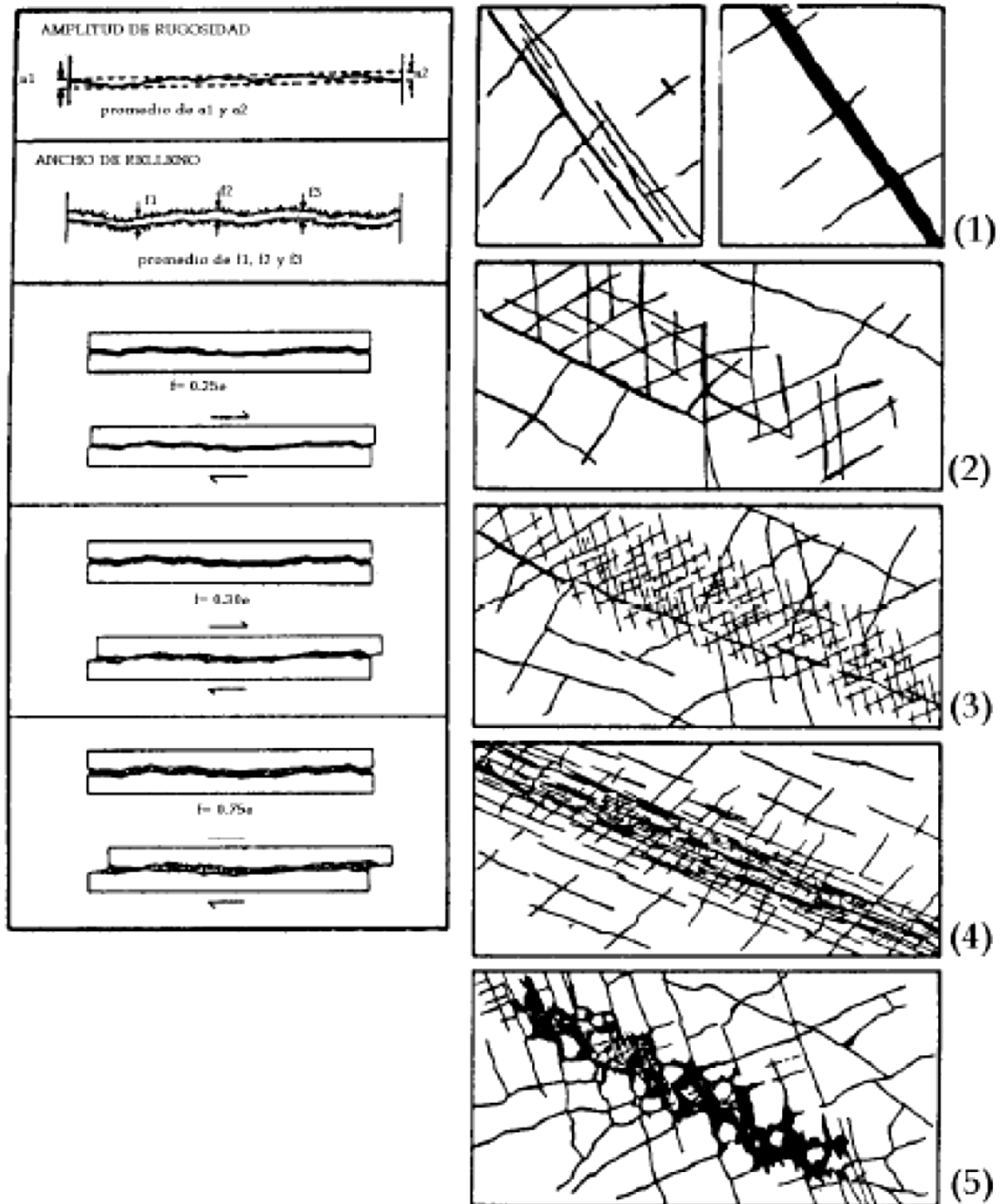


Figura N° 10: Discontinuidades simples rellenas.

Fuente: Ferrer M. y González V. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME.

Las características principales del relleno que deben describirse en el afloramiento son: su naturaleza, espesor o anchura, resistencia al corte y permeabilidad (los dos últimos parámetros de forma indirecta o cualitativa):

La anchura se mide directamente con una regla graduada en milímetros.



La descripción del relleno incluye la identificación del material, descripción mineralógica y tamaño de grana. Si el relleno proviene de la descomposición y alteración del material de las paredes de la discontinuidad, deberá ser evaluado su grado de meteorización, que normalmente será descompuesto o desintegrado.

La resistencia se puede estimar mediante los Índices de campo (si el relleno es blando corresponderá a los grados s_1 a s_6), o mediante la utilización del esclerómetro o martillo de Schmidt.

Debe indicarse el grado de humedad, y estimarse cualitativamente la permeabilidad del material de relleno.

En caso de poder reconocerlo, se indicará si ha existido desplazamiento por corte a favor del relleno, en cuyo caso sus propiedades y estructura mineralógica habrán sufrido cambios con respecto al estado inicial.

2.2.2.8. Ensayos de permeabilidad

2.2.2.8.1. Ensayo de Lefranc

Este ensayo consiste en medir el caudal inyectado o bien la subida o bajada del nivel de agua que se produce en el taladro a lo largo de un tiempo determinado de observación. Dependiendo del método, el caudal debe regularse con precisión del 3 %, las medidas 1 a 2 mm y el tiempo con un segundo. Las medidas iniciales no son representativas y no deben considerarse. Las lecturas más continuas, durante el proceso de inyección y saturación de agua, son los más representativos en suelos y roca muy fracturada.

El ensayo Lefranc se utiliza para medir la permeabilidad de suelos y roca fracturada, bajo débil gradiente y en régimen permanente. También se puede efectuarse en régimen transitorio, siendo su interpretación diferente. (Comité Nacional Español de grandes presas, Madrid España 1999).

2.2.2.8.2. Ensayo de Lugeon

El ensayo Lugeon consiste en inyectar agua a una determinada presión manométrica y de obturación en un determinado taladro de perforación diamantina en roca dura; resultado del proceso de saturación a presión se llega a conseguir la conductividad del macizo rocoso; para fines de construcción de obras de ingeniería, como presas, embalses, centrales hidroeléctricas, casas de máquinas, entre otros la estabilidad de talud de corte en roca. Otros consideran este ensayo como la fracturación hidráulica en roca. El ensayo Lugeon puede realizarse a medida que se perfora o una vez finalizada la perforación. Generalmente el primer modo es mejor y solo necesita el empleo de un obturador, pero es un procedimiento lento y más costoso que puede alargar en exceso la investigación. En caso de llevarlo a cabo una vez concluida la perforación, se suelen efectuar de forma ascendente comenzando por el tramo más profundo del sondeo de perforación. (Comité Nacional Español de grandes presas, Madrid España 1999).

2.2.2.9. Filtraciones

El agua en el interior de un macizo rocoso procede generalmente del flujo que circula por las discontinuidades (permeabilidad secundaria), aunque en ciertas rocas permeables las filtraciones a través del macizo rocoso (permeabilidad primaria) pueden ser también importantes. (Ferrer, M. et al., 1999). Las observaciones respecto a las filtraciones en discontinuidades, tanto si se presentan rellenas como si aparecen limpias.

Cuadro N° 7

Descripción de las filtraciones en discontinuidades

CLASE	DISCONTINUIDADES SIN RELLENO	DISCONTINUIDADES CON RELLENO
I	Junta muy plana y cerrada. Aparece seca y no parece posible que circule agua.	Relleno muy consolidado y seco. No es posible el flujo de agua.
II	Junta seca sin evidencia de agua.	Relleno húmedo, pero sin agua libre.
III	Junta seca, pero con evidencia de haber circulado agua.	Relleno mojado con goteo ocasional.
IV	Junta húmeda, pero sin agua libre.	Relleno que muestra señales de lavado, flujo de agua continuo (estimar caudal en 1/min)
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo, pero sin flujo continuo.	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (estimar caudal y presión)
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en 1/min y la presión).	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevados.

Fuente: Ferrer M. y González V. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME.

ISRM (1981). Para la caracterización global del macizo rocoso a partir de datos de afloramientos, además de la descripción de sus componentes, el macizo y las discontinuidades, deben ser considerados otros factores representativos del conjunto, como son:

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

2.2.2.10. Número y orientación de familias de discontinuidades

El comportamiento mecánico del macizo rocoso, su modelo de deformación y sus mecanismos de rotura están condicionados por el número de familias de discontinuidades. (ISRM, 1981). La orientación de las diferentes familias con respecto a una obra o instalación sobre el terreno puede determinar, además, la estabilidad de la misma.

La intensidad o grado de fracturación y el tamaño de los bloques del macizo rocoso vienen dados por el número de familias de discontinuidades y por el espaciado de cada familia. Cada una de las familias queda caracterizada por su orientación en el espacio y por las propiedades y características de los planos.

Cuadro N° 8

Clasificación de macizos rocosos por el número de familias de discontinuidades

TIPO DE MACIZO ROCOSO	NÚMERO DE FAMILIAS
I	Masivo, discontinuidades ocasionales.
II	Una familia de discontinuidades.
III	Una familia de discontinuidades más otras ocasionales.
IV	Dos familias de discontinuidades.
V	Dos familias de discontinuidades más otras ocasionales.
VI	tres familias de discontinuidades.
VII	Tres familias de discontinuidades más otras ocasionales.
VIII	Cuatro o más familias de discontinuidades.
IX	Brechificado.

Fuente. ISRM (1981). Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. ISRM Suggested methods. Ed. E.T. Brown. Pergamon Press.

2.2.2.11. Tamaño de bloques y grado de fracturación

El tamaño de los bloques que forman el macizo rocoso condiciona de forma definitiva su comportamiento y sus propiedades resistentes y deformacionales. (ISRM, 1981). La dimensión y la forma de los bloques están definidas por el número de familias de discontinuidades, su orientación, su espaciado y su continuidad. La descripción del tamaño de bloque se puede realizar de las siguientes formas.

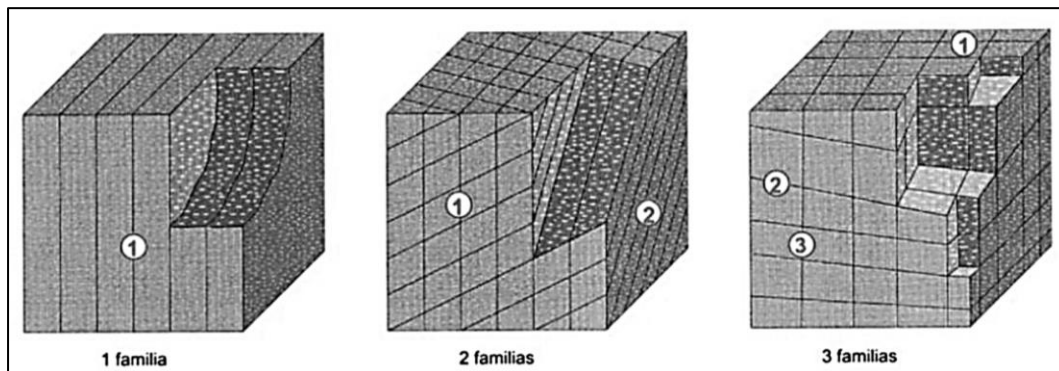


Figura N° 11: Representación del número de familias mediante diagramas de bloques.

Fuente: ISRM (1981). Suggested methods for rock characterization. Ed. E.T. Brown. Pergamon Pres.

2.2.3. Meteorización o alteración

La meteorización de las rocas se denomina a las modificaciones experimentadas en su composición o estructura por la acción de los agentes atmosféricos. La importancia que tiene la meteorización desde el punto de vista de la mecánica de rocas se debe a que produce profundos cambios en las propiedades físicas y mecánicas de los materiales rocosos. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

La sociedad internacional de mecánica de rocas ISRM, en su publicación de 1978, establece tablas con los criterios para clasificar la meteorización tanto de la masa rocosa como de los labios o paredes de las discontinuidades. (Brown, 1981).

Donde indica que debe describir el grado de meteorización o alteración de la masa rocosa como un todo, utilizando los términos descritos en el cuadro siguiente. Durante el mapeo geológico se deben identificar zonas de alteración mostrando sus grados y tipo de alteración; en muchos casos la meteorización tiene impacto sobre la resistencia del macizo rocoso y su estabilidad.

Cuadro N° 9

Grado de meteorización del macizo rocoso

GRADO DE METEORIZACIÓN	TIPO	DESCRIPCIÓN
I	Fresco	No aparecen signos de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidades. Todo el conjunto rocoso esta decolorado por meteorización.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece en una estructura continua o como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se observa la estructura original de macizo rocoso.
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

Fuente: ISRM (1981). Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. ISRM Suggested methods. Ed. E.T. Brown. Pergamon Press.

2.2.4. Propiedades de la roca intacta

Para definir las propiedades mecánicas de la roca intacta deberán obtenerse probetas de cada unidad geotécnica básica y someterlas a ensayos de laboratorio, para realizar estos ensayos se podrán seguirse las recomendaciones de la ISRM (Brown (1981)) y/o las Normas ASTM (1999). (Flores & Karzulovic, 2002).

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

2.2.5. Clasificación geomecánica

La clasificación geomecánica tiene como objetivo proporcionar una evaluación geomecánica del macizo rocoso que se estudia a partir de ensayos simples, y observaciones de campo.

2.2.5.1. Designación de la calidad de rocas (RQD)

La Designación de la calidad de Rocas (Rock Quality Designation) fue desarrollado por Deere et al. (1967), para estimar cuantitativamente la cualidad del macizo rocoso, basándose en la recuperación de un testigo. Depende indirectamente del número de fracturas y del grado de alteración del macizo.

Cuadro N° 10

Relación entre el valor del RQD y la calidad de la roca

RQD %	CALIDAD DE LA ROCA
< 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Regular
75 – 90	Buena
90 - 100	Excelente

Fuente: Deere, D.U. and Deere, D.W. 1988. The rock quality designation (RQD) index in practice. In Rock classification systems for engineering purposes, (ed. L. Kirkaldie), ASTM Special Publication 984, 91-101. Philadelphia: Am. Soc. Test. Mat.

El diámetro del testigo tiene que ser igual o superior a 57.4 mm, y tiene que ser perforado con un doble tubo de extracción de testigo. El RQD es el porcentaje de fragmentos de longitud superior a 10 cm, sobre la longitud total del testigo.

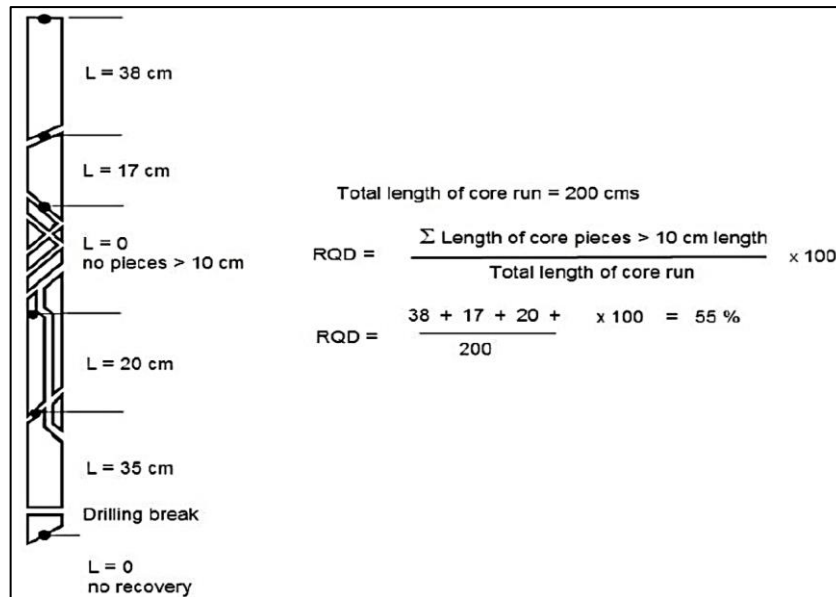


Figura N° 12: RQD

Fuente: Deere, D.U. and Deere, D.W. 1988. The rock quality RQD designation (RQD) index in practice. In Rock classification systems for engineering purposes, (ed. L. Kirkaldie), ASTM Special Publication 984, 91-101. Philadelphia: Am. Soc. Test. Mat.

Si no se disponen de sondeos, una alternativa para el cálculo del RQD es a partir de las siguientes ecuaciones:

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \rightarrow J_v > 4.5$$

$$RQD = 100 \rightarrow J_v \leq 4.5$$

Donde: J_v es el número de juntas identificadas en el macizo rocoso por m^3 .

También se tiene otra forma de hallar el RQD, es tomar una línea con cinta métrica en el entorno de la estación geo mecánica o entre varias de ellas alineadas (tomaremos en general tantas zonas como diferenciadas estimemos, aunque habitualmente será suficiente con un par de ellas si el macizo es muy semejante en toda la longitud investigada).

Medimos todas las juntas que interceptan nuestra línea “grosso modo”, siendo este el parámetro “ λ ”. Para la determinación del RQD del macizo. Aplicaremos la formulación de Priest y Hudson que requiere de λ . (juntas por metro lineal).

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

Donde: λ es el número de juntas por metro lineal.

2.2.5.2. Valoración del macizo rocoso (RMR)

La valoración del macizo rocoso (Rock Mass Rating), introducido por Bieniawski (1976), es posiblemente la clasificación geomecánica más usada, inicialmente pensado para valorar la estabilidad y los soportes requeridos en túneles, ha resultado ser apto



también para la valoración de la estabilidad en taludes. El RMR permite la obtención de la cohesión y ángulo de fricción, parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb. En las siguientes ecuaciones se muestran las relaciones entre RMR y los parámetros resistentes.

$$c = 5 \text{ RMR (KPa)}$$

$$\phi = 5 + \frac{\text{RMR}}{2} \text{ (deg)}$$

Donde:

c: es la cohesión

Φ : es el ángulo de fricción.

El **RMR** es una clasificación geomecánica, en la que se tienen en cuenta los siguientes parámetros del macizo rocoso:

1° Resistencia del material intacto, que se obtiene mediante ensayo de carga puntual o compresión simple.

2° RQD

3° Espaciado de las discontinuidades, hace referencia a la longitud entre discontinuidades dentro de la zona a estudio.

4° Condición de las discontinuidades, que incluye:

- Longitud de la discontinuidad
- Abertura
- Rugosidad
- Relleno
- Alteración

5° Presencia de agua subterránea.

A cada uno de los parámetros anteriores se le asigna un valor, el **RMR** se obtiene como a suma de todos ellos.

$$\text{RMR} = (1^\circ) + (2^\circ) + (3^\circ) + (4^\circ) + (5^\circ)$$

Una vez obtenido el **RMR** para el macizo, se pueden obtener los parámetros resistentes, cohesión y el ángulo de fricción.

Hay que tener en cuenta que existen dos versiones para la obtención del RMR, el RMR76, del año 1976, y el RMR89, del año 1989. La diferencia es en los valores que se les asignan a los parámetros de presencia de agua subterránea, condición de las discontinuidades y RQD conjuntamente con el espaciado de las discontinuidades. Se muestra la diferencia entre valores que se le dan a los parámetros según el criterio.

Cuadro N° 11

Diferencia de valores entre RMR76 Y RMR89

PARÁMETRO	RMR ₇₆	RMR ₇₆
RQD y Espaciado de las discontinuidades	8 - 50	8 - 40
Condición de las discontinuidades	0 - 25	0 - 30
Presencia de agua subterránea	0 - 10	0 - 15

Fuente: Bieniawski, Z.T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for rock engineering, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town: Balkema.

Cuadro N° 12

Parámetros y rango de valores para la clasificación geomecánica RMR89

Parámetros		Rango de valores							
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa			
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Valor	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90-	75-90%	50-75%	25-50%	25%			
	Valor	20	17	13	8	3			
3	Espaciado de las discontinuidades	> 2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	6-20 cm	< 6 cm			
	Valor	20	15	10	8	5			
4	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m			
		Valor	6	4	2	1	0		
	Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1-1.0	1-5 mm	> 5 mm			
		Valor	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave			
		Valor	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm			
		Valor	6	4	2	2	0		
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta				
	Valor	6	5	3	1	0			
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo		
	Valor	15	10	7	4	0			



Fuente: Bieniawski, Z.T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for rock engineering, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town: Balkema.

2.2.5.3. Índice (Q)

El índice **Q** fue desarrollado por el NGI (Instituto Geotécnico Noruego), basado en un gran número de casos históricos en Escandinavia. (Barton, et al 1974). Para determinar las características del macizo rocoso y los requerimientos de soporte del túnel o en una excavación. El valor numérico del índice Q varía en una escala logarítmica de 0,001 a un máximo de 1000.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Dónde:

RQD: Designación de la calidad de la roca

J_n: Número de familias de discontinuidades

J_r: Numero de rugosidad de las discontinuidades

J_a: Numero de alteración de las discontinuidades

J_w: factor de reducción por presencia de agua en las discontinuidades

SRF: factor de reducción por tensiones.

(RQD/J_n): Representa el tamaño de los bloques presentes.

(J_r/J_a): Representa la rugosidad y características de resistencia al corte de las discontinuidades (paredes o relleno).

(J_w/SRF): Representa las tensiones activas Presencia de agua y estado tensional para distintos tipos de macizos rocosos.

Cabe señalar que el índice Q, no incluye la orientación de las discontinuidades.

Cuadro N° 13

Índice de calidad de la roca

1.- INDICE DE CALIDAD DE LA ROCA	
Descripción	RQD %
MUY POBRE	0 - 25
POBRE	25 - 50
REGULAR	50 - 75
BUENA	75 - 90
EXCELENTE	90 - 100
Nota:	
i) Estimar el RQD con 5% de aproximacion	
ii) Cuando no se disponga de testigos	
RQD = 115 - 3.3 J _v Donde: J _v : N° de Diaclasas por m3	
iii) Si el RQD es menor de 10, emplear un valor nominal 10	



Cuadro N° 14
Valor de J_n

2.- NUMERO DE DISCONTINUIDADES	
descripción	J_n
Masiva o con muy poca discontinuidad	0.5 - 1.0
Un sistema de discontinuidad	2
Un sistema de principal y uno secundario	3
Dos sistemas de discontinuidad	4
Dos sistemas principales y uno secundario	6
Tres sistemas de discontinuidades	9
Tres sistemas principales y uno secundario	12
Cuatro sistemas de discontinuidades o mas	15
(roca muy fracturada)	
Roca triturada (Terrosa)	20
Nota:	
i) Para intersecciones de tuneles, usar $(3.0 * J_n)$	
ii) Para portales usar $(2.0 * J_n)$	

Cuadro N° 15
Valor de J_r

FACTOR DE RUGOSIDAD DE LAS DISCONTINUIDADES		
	DESCRIPCION	J_r
A	Diaclasas discontinuas	4
B	Rugosas e irregulares, onduladas	3
C	Lisas, Onduladas	2
D	Lustrosas Ondulantes	1.5
E	Rugosas o irregulares, planares	1.5
F	Lisas, Planares	1
G	Lustrosas, Planares	0.5
H	Zona conteniendo arcillas en cantidad suficiente como para impedir el contacto entre las superficies que limitan la fractura	1
J	Zona de material arenoso en cantidad suficiente como para impedir el contacto entre las superficies que limitan la fractura	1
NOTAS.		
En grupos A hasta la G, el contacto entre las superficies de la discontinuidad se logra con desplazamientos de cizalla inferiores a los 10 cm.		
Las descripciones se refieren a las características de pequeña escala y características de escala intermedia, en ese orden.		
En los grupos H y J no se produce contacto entre las superficies al ocurrir desplazamientos de cizalla		
* Agregar 1.0 cuando el espaciamiento medio de las diaclasas fuera superior a 3 cm.		
* $J_r = 0.5$ puede ser usado para juntas planares lustrosas que tienen alineaciones, siempre que las alineaciones están orientadas para la resistencia mínima		

Cuadro N° 16

Valor de Ja

FACTOR DE ALTERACION DE LAS DISCONTINUIDADES		
DESCRIPCION		Ja
a) Contacto entre superficies de la discontinuidad (sin relleno de mineral, solo recubrimientos)		
A	Ajustadas, rellenas con material compacto	0.75
B	Superficies inalteradas, ligeras manchas de oxidacion	1
C	Superficies ligeramente alteradas, cubiertas con material granular no arcilloso, producto de la desintegracion de la roca.	2
D	Capas superficiales de material limoso o arcilloso arenoso, con una pequena fraccion cohesiva.	3
E	Capas superficiales de arcilla (caolinita, mica cloritas, etc.) cantidades pequenas de arcilla expansiva en capas de 1- 2 mm de espesor	4
b) Contacto entre superficies de la discontinuidad se produce despues de 10cm de (relleno de mineral fino)		
F	Relleno granular no cohesivo, roca desintegrada libre de particulas arcillosas	4
G	Material con alto grado de consolidacion, relleno continuo (hasta de 5mm. de espesor) de material arcilloso compacto.	6
H, I	Relleno continuo (hasta de 5mm. De espesor) de material arcillosos compacto con bajo grado de consolidacion	8
J	Relleno continuo de arcilla expansivas (Montmorillonita) el valor de Ja dependera del % de expansion, el tamaño de las particulas arcillosas, la accesibilidad del agua, etc.	8 - 12
c) No contacto entre superficies de la discontinuidad despues de cizalla (relleno de mineral grueso)		
K, L, M	Zonas o bandas de roca desintegrada o triturada y arcilla (ver G,H,J para la descripcion de los tipos de arcilla)	6 - 8 ó 8 - 12
N	Zona de arcilla limosa o arenosa	5
O,P,Q	Zonas potentes y continuas de arcilla (ver G,H,J para la descripcion de los tipos de arcilla)	10 - 13 ó 13 - 20.

Cuadro N° 17

Valor de Jw

FACTOR DE REDUCCION POR CONTENIDO DE AGUA EN FRACTURAS		
DESCRIPCION		Jw
A	Secas o flujos bajos (5 l/min)	1
B	Flujos a presiones medias que ocasionen erosion del material de relleno	0.66
C	Flujos o presiones altas en roca competente con diaclasas sin relleno	0.5
D	Flujos a presiones altas con erosion considerable del material de relleno	0.33
E	Flujos o presiones excepcionalmente altas luego de la voladura disminuyendo con el tiempo	0.2 - 0.1
F	Flujos o presiones excepcionalmente altas sin que ocurra una disminucion en el tiempo	0.1 - 0.05
NOTAS.		
i) Factores C a F son estimaciones basicas. Aumentar Jw si se han instalado medidas de drenaje.		
ii) Especiales problemas causados por la formacion de hielo no son considerados.		
iii) Para la caracterización general de las masas de roca distantes de las influencias de excavación, el uso de Jw = 1,0, 0,66, 0,5, 0,33, etc , aumenta con la profundidad como por ejemplo 0-5m, 5-25m, 25-250m a > 250m se recomienda, si se asume que RQD / Jn es lo suficientemente bajo (ejemplo 0,5-25) para una buena conectividad hidráulica. Esto le ayudará a ajustar Q para algunos de las tensiones efectivas y los efectos de ablandamiento de agua, en combinación con los valores apropiados de caracterización SRF. Correlaciones con módulo de deformación estática y la profundidad dependen de la velocidad sísmica. En la práctica usar estos valores cuando se desarrollan.		

Cuadro N° 18

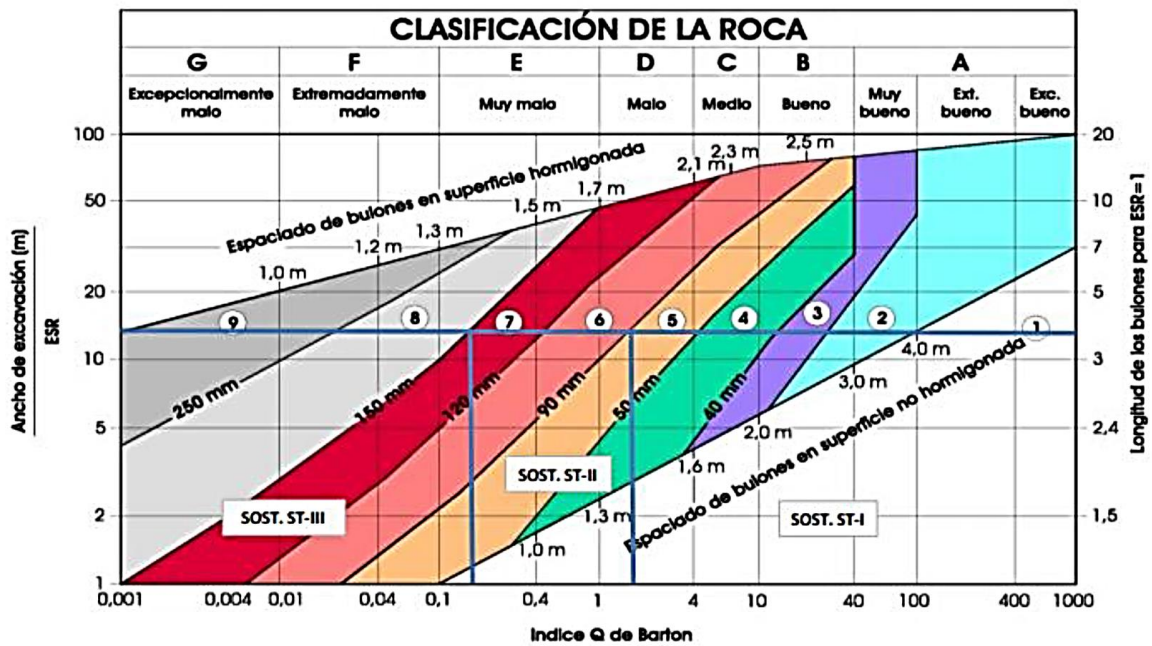
Valor de SRF

FACTOR DE REDUCCION POR TENSIONES				SRF
DESCRIPCION				
A) Las zonas debiles interseccion a la excavacion, pudiendo producirse desprendimientos de rocas a medida que la excavacion del tunel va avanzando.				
A	Muchas zonas debiles de arcilla con evidencias de desintegracion quimica roca circundante muy suelta cualquier profundidad			10
B	Zona debil aislada con arcilla o roca desintegrada quimicamente (profundidad menor 50m)			5
C	Zona debil aislada con arcilla o roca desintegrada, profundidad mayor 50m.			2.5
D	Muchas zonas de falla en roca competente, roca circundante suelta. (cualquier profundidad)			7.5
E	Zona de falla aislada en roca competente profundidad menor a 50 m.			5
F	Zona de falla aislada en roca competente profundidad mayor a 50 m.			2.5
G	Diaclasas abiertas y sueltas roca intensamente fracturada, en terrones, cualquier prof.			5
Nota: i) Reducir estos valores de SRF por 25-50% si las zonas de fallas influyen pero no interseccion la excavacion.				
B) Rocas competentes, problemas tensionales en las rocas		σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	SRF
H	Tensiones bajas, poca profundidad, diaclasas abiertas	> 200	< 0.01	2.5
J	Tensiones moderadas, condiciones tensionales favorables	200 - 10	0.01 - 0.3	1
K	Tensiones elevadas, estructura muy compacta. Normalmente favorable para la estabilidad, puede ser desfavorable para la estabilidad de los hastiales	10 - 5	0.3 - 0.4	0.5 - 2
L	Lajamiento moderado de la roca despues de 1 hora en rocas masivas	5 - 3	0.5 - 0.65	5 - 50
M	Lajamiento y estallido de la roca despues de pocos minutos en rocas masivas	3 - 2	0.65 - 1	50 - 200
N	Estallidos violentos de roca (deformacion explosiva) y deformaciones dinamicas inmediatas en rocas masivas	< 2	> 1	200 - 400
Nota: ii) Para campos insitu fuertemente anisotropico (si se ha medido): cuando $5 < \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reducir σ_c en 0.75 σ_c , cuando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reducir σ_c a 0.5 σ_c , donde σ_c =esfuerzo compresivo sin confirmar, σ_1 y σ_3 son los esfuerzos principales mayores y menores y σ_θ =esfuerzo tangencial maximo (estimado de la teoria de la elasticidad) iii) Existen algunos registros disponibles que señalan que la altura del techo de la excavacion a superficie es mejor que el ancho de la labor. Para estos caso se sugiere incrementar de 2.5 a 5 para estos casos (ver H).				
C) Rocas deformables: flujo plastico de roca incompetente a altas presiones litostaticas		σ_θ/σ_c		SRF
O	Presion de deformacion suave	1 - 5		5 a 10
P	Presion de deformacion intensa	> 5		10 a 20
Nota: iv) Casos de deformaciones de roca pueden ocurrir para profundidades $H > 350 * Q^{1/3}$. La resistencia a la compresion de la masa rocosa puede ser estimada como $q = 7 * \gamma * Q^{1/3}$, donde γ =densidad de la roca (gm/cc)				
D) Rocas expansivas: Actividad expansiva quimica dependiendo de la presencia de agua				
R	Presion de expansion suave			5 - 10
S	presion de expansion intensa			10 - 15

En relación al valor del índice Q para los requerimientos en la estabilidad y soporte de las excavaciones subterráneas, (Barton et al 1974) define un parámetro adicional a la que llamaron la dimensión equivalente (De), de las excavaciones.

$$De = \frac{\text{Apertura excavada (diametro o altura en m)}}{\text{Ratio de soporte de excavación ESR}}$$

El valor de ESR se relaciona con el uso previsto de la excavación y para el grado de seguridad que se exige del sistema de soporte instalado para mantener la estabilidad de la excavación. Barton et al (1974).



- | | |
|---|--|
| 1. Sin sostenimiento | 6. Hormigón proyectado con fibras, 9-12 cm y bulonado |
| 2. Bulonado puntual | 7. Hormigón proyectado con fibras, 12-15 cm y bulonado |
| 3. Bulonado sistemático | 8. Hormigón proyectado con fibras, >15 cm con bulonado y cerchas |
| 4. Bulonado sistemático con hormigón proyectado | 9. Revestimiento de hormigón |
| 5. Hormigón proyectado con fibras, 5-9 cm, y bulonado | |

Figura N° 13: Propuesta de sostenimiento según la Q de Barton

Fuente: Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech. 6(4), 189-239.

Cuadro N° 19

Valor ESR con la categoría de la excavación

CATEGORIA DE EXCAVACIÓN		ESR
A	Excavación temporal (mina)	3 – 5
B	Excavación permanente (mina, túneles)	1.6
C	Cámaras de almacenaje de agua	1.3
D	Túneles permanentes de trenes	1.0
E	Estaciones subterráneas nucleares	0.8

Fuente: Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech. 6(4), 189-239.



2.2.5.4. Índice de resistencia geológico (GSI)

La clasificación GSI se basa en una observación cuidadosa del macizo rocoso y, por consiguiente, es esencialmente cualitativa. Este índice incorpora la estructura del mismo y las características geomecánicas de las superficies de discontinuidad existentes en él y se obtiene a partir de un examen visual del macizo rocoso en afloramientos y sondeos. El GSI combina los dos aspectos fundamentales del comportamiento de los macizos rocosos, es decir: su fracturación, o sea, el tamaño y la forma de los bloques, y la resistencia al corte de las discontinuidades. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

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 grado de trabazón.

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 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, $80 < \text{GSI} \leq 100$).

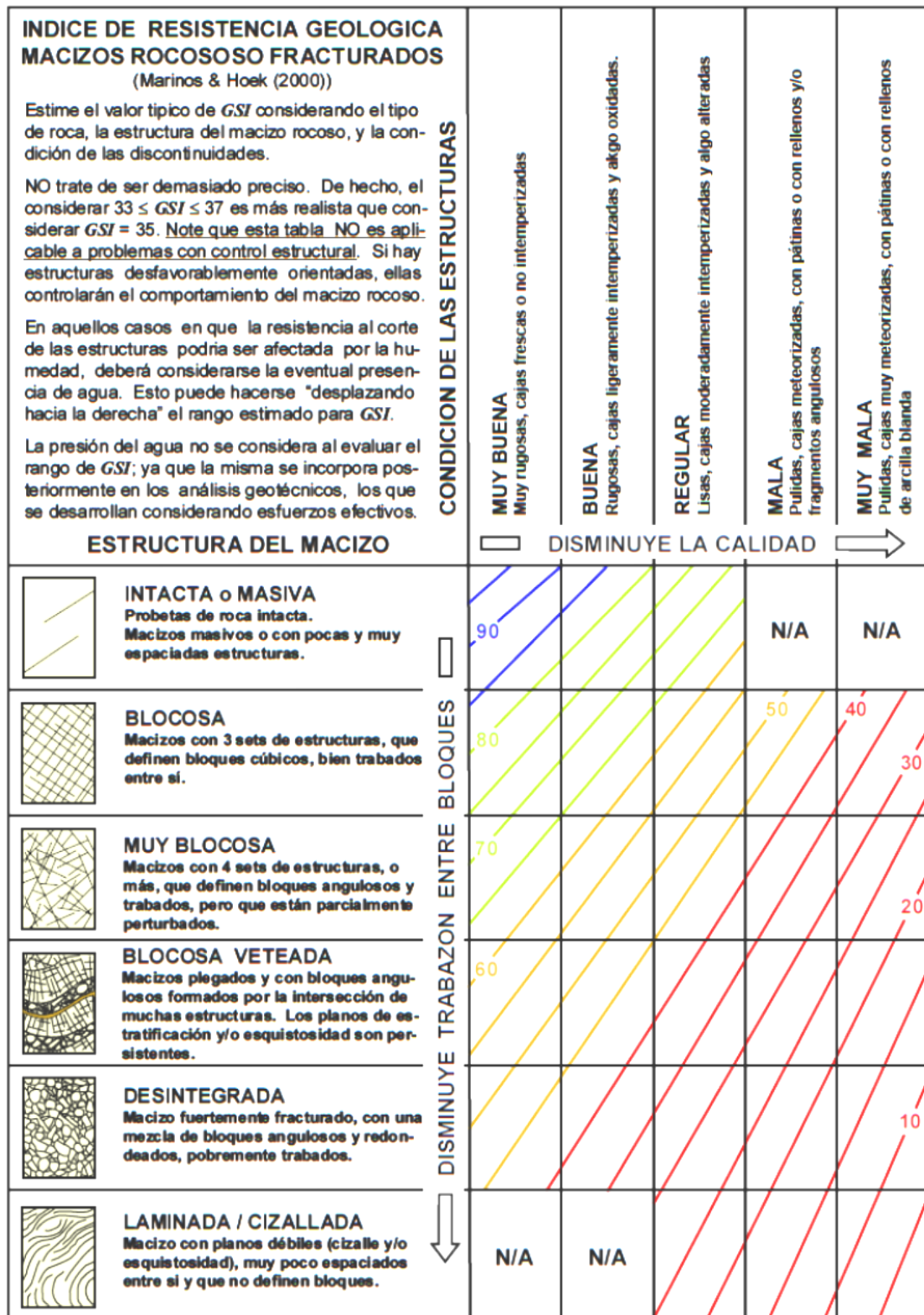


Figura N° 14: Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos fracturados.

Fuente: (Marinos & Hoek, 2000)

En la etapa inicial del GSI, los creadores de esta clasificación propusieron (Hoek y Brown, 1997) estimar el GSI a partir del RMR realizando algunas correcciones en estos

índices. Actualmente se considera que esta forma de proceder puede resultar correcta solamente en los macizos rocosos de mejor calidad pero que puede carecer de sentido en los de calidad baja. (Marinos et al., 2005) No se recomienda utilizar la correlación que se presenta a continuación en macizos rocosos débiles y heterogéneos, con $GSI < 35$. En los macizos rocosos de mejor calidad el GSI se puede estimar directamente a partir de $GSI = RMR - 5$, cuando RMR es mayor a 23.

INDICE DE RESISTENCIA GEOLOGICA MACIZOS ROCOSOS ESTRATIFICADOS HETEROGENEOS (Marinos & Hoek (2000))		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 alteradas.	MALA Muy lisas, ocasionalmente pulidas, con pátinas compactas o rellenos con fragmentos argilosos.	MUY MALA Muy lisas y pulidas o de superficies muy meteorizadas, y con pátinas o rellenos de arcilla blanca.
	A. Estratos gruesos de arenisca de mucha blocosidad. El efecto de posibles pátinas peliicas 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			20
	B. Arenisca con lentes delgadas de limonita.	60	B	C, D, E		
	C. Arenisca y limonita en estratos de similar potencia.					
	D. Limonitas o esquistos limosos con estratos de arenisca.	50		F		10
	E. Limonitas débiles o esquistos arcillosos con estratos de arenisca.					
C, D, E y G: Pueden estar más o menos plegados que lo indicado, pero esto no altera su resistencia. Si presentan deformación tectónica, fallamientos y pérdidas de continuidad, cambie estas categorías a F y H.		40				
	G. Esquistos limosos o arcillosos no perturbados, con o sin intercalaciones de estratos delgados de arenisca.	N/A	N/A	G		
	H. Esquistos limosos o arcillosos, deformados tectónicamente, con una estructura caótica y bolsones de arcilla. Estratos delgados de arenisca quebrados en pequeños bloques de roca.			H		

→ Indica deformación por tectonismo.

Figura N° 15: Carta para evaluar el índice de resistencia geológica en macizos rocosos estratificados y heterogéneos.

Fuente: (Marinos & Hoek, 2000).

En casos especiales, como macizos rocosos heterogéneos, puede ser necesario desarrollar una versión especial de la tabla de calificación del índice *GSI*. Un ejemplo de esto se muestra en Figura N° 15, donde se presenta una tabla desarrollada por Marinos & Hoek (2000) para el caso de macizos heterogéneos estratificados.

2.2.6. Análisis de estabilidad de taludes

Por la naturaleza de las discontinuidades en roca, el diseño de un talud en roca estable es más que un arte esto es una aplicación de la ingeniería, la experiencia es muy importante en la utilización de las teorías de mecánica de suelos y rocas, geología estructural, e hidrología.

Muchas herramientas computacionales se han desarrollado para el diseño de taludes en roca.

Es importante que estos ingenieros comprendan la teoría básica de la estabilidad de taludes en roca especialmente de tratar de interpretar y aplicar los resultados (Kliche, 1999)

Los análisis de estabilidad se aplican al diseño de taludes o cuando estos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir un coeficiente de seguridad adecuado, dependiendo de la finalidad de la excavación y del carácter temporal o definitivo del talud, combinando los aspectos de seguridad, costes de ejecución, consecuencias o riesgos que podría causar su rotura, etc. Para taludes permanentes, el coeficiente de seguridad a adoptar debe ser igual o superior a 1.5, e incluso 2.0, dependiendo de la seguridad exigida y de la confianza que se tenga en los datos geotécnicos que intervienen en los cálculos; para taludes temporales el factor de seguridad está en torno a 1.3, pero en ocasiones pueden adoptarse valores inferiores. (González de Vallejo, 2002)

Los análisis permiten definir la geometría de la excavación o las fuerzas externas que deben ser aplicadas para lograr el factor de seguridad requerido. En caso de taludes inestables, los análisis permiten diseñar las medidas de corrección o estabilización adecuadas para evitar nuevos movimientos. (González de Vallejo, 2002)

La elección de una correcta técnica de análisis depende de las condiciones del sitio y los potenciales modos de falla, con especial consideración ser determinado la variación de resistencias, debilidades y limitaciones inherentes a la metodología aplicada. (Gundewar, 2014)

2.2.7. Métodos para el análisis de estabilidad de taludes

El método de análisis a utilizar depende de varios factores los cuales incluyen:

- La fase del proyecto.
- La escala del talud en consideración, y
- Las propiedades de los materiales que conforma el talud.

Según (Read & Stacey, 2009) Los principales métodos de análisis incluyen:

- Métodos empíricos.
- Métodos cinemáticos.
- Métodos de equilibrio límite.
- Métodos numéricos.
- Métodos estadísticos.

Actualmente debido a la variedad de autores que han escrito sobre estabilidad de taludes en macizos rocosos se tiene discrepancias en cuanto a los métodos utilizados uno de ellos es el de los métodos de proyección estereográfica o cinemáticos.

Según (Gundewar, 2014) estos examinan que modos de falla puedan posiblemente ocurrir en el macizo rocoso para un posterior análisis por el método de equilibrio límite.



2.2.8. Métodos de proyecciones estereográficas o cinemáticos

En análisis cinemático, que es puramente geométrico, examina que modos de falla del talud son posibles en macizos rocosos con respecto a la existencia de un talud en roca. En un análisis cinemático, es combinación de la orientación de las discontinuidades, la cara del talud, la superficie superior del talud, y alguna superficie de interés, juntamente con la fricción que es examinada estos determinan con certeza que modos de falla posiblemente pueden ocurrir. (Kliche, 1999).

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

Sin embargo, mientras que el análisis del estereograma es buen indicador de las condiciones de estabilidad, que no tiene en cuenta las fuerzas extremas tales como presiones de agua o de refuerzo que comprende pernos de roca tensado, que pueden tener un efecto significativo en la estabilidad. El procedimiento de diseño habitual es utilizar el análisis cinemático para identificar bloques potencialmente inestables, seguido de un análisis de estabilidad detallada de estos bloques usando el método de equilibrio limite. (Wyllie & Mah, 2005).

Desde el punto de vista de análisis, la característica más importante de una discontinuidad es su orientación (rumbo y buzamiento). La interpretación de los datos geológicos estructurales requiere del uso de proyecciones estereográficas que permiten la representación en dos dimensiones, de datos en tres dimensiones. Las proyecciones más comúnmente utilizadas son la red de Wulf de igual ángulo y la red de Schmidt de igual area. (Suarez Diaz, 1998).

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 geología estructural son las proyecciones polar y ecuatorial. La proyección polar solo se utiliza para el ploteo de planos, mientras la proyección ecuatorial puede ser utilizada para el ploteo de planos mayores y polos. (Wyllie & Mah, 2005).

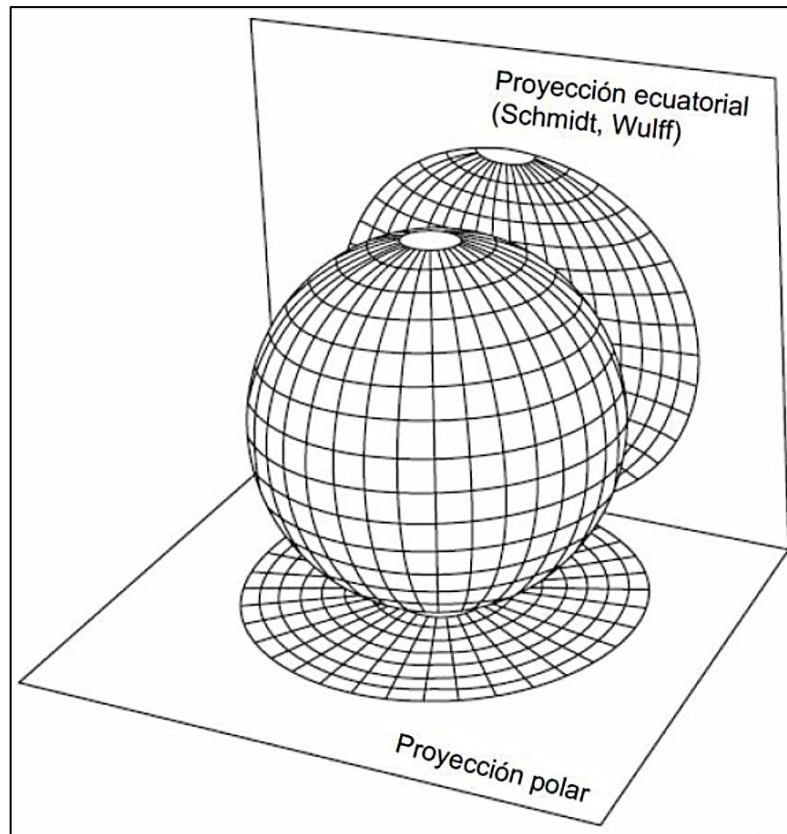


Figura N° 16: Proyección polar y ecuatorial en una esfera.

Fuente: Wyllie & Mah, 2005.

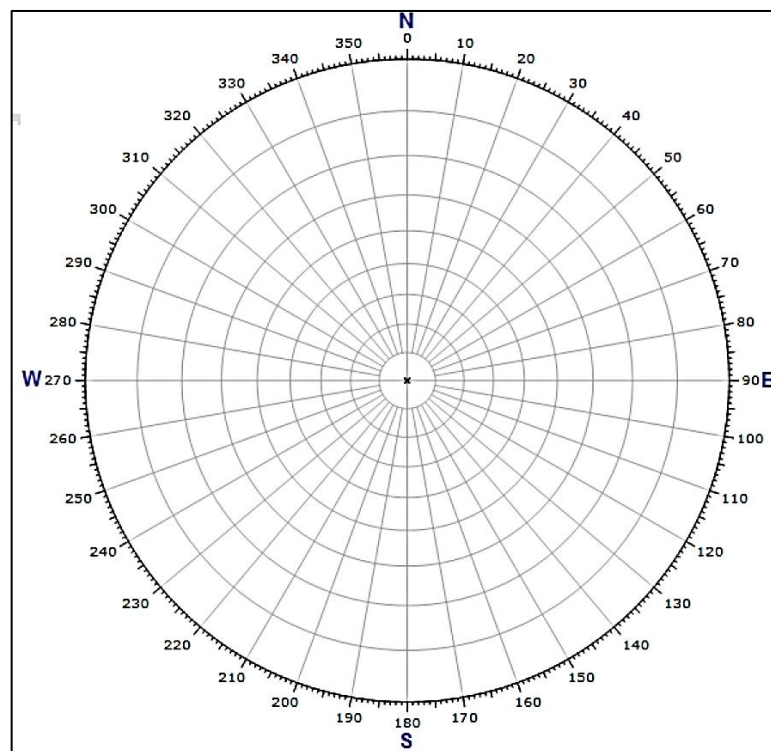


Figura N° 17: Representación estegeográfica polar de igual ángulo.

Fuente: Roger, M. (2016). Tesis. EPIC. UNAP. PUNO. PERÚ.

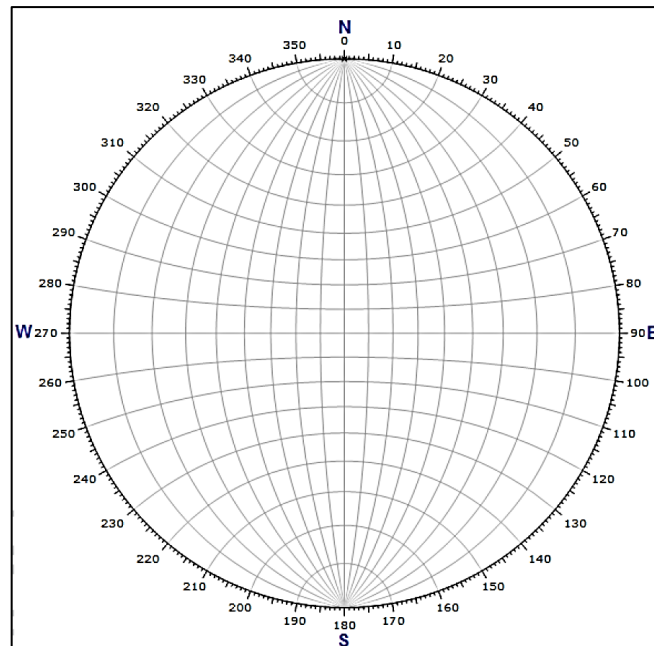


Figura N° 18: Representación estereográfica ecuatorial de igual ángulo.

Fuente: Roger, M. (2016). Tesis. EPIC. UNAP. PUNO. PERÚ.

Las proyecciones estereográficas pueden complementarse con rosetas. 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 & Karzulovic, 2002).

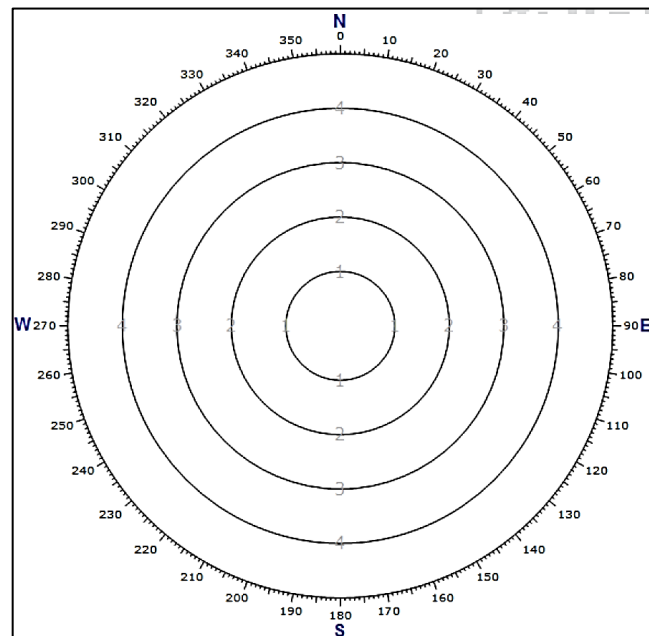


Figura N° 19: Representación de rosetas para la distribución de rumbos de estructuras intermedias.

Fuente: Roger, M. (2016). Tesis. EPIC. UNAP. PUNO. PERÚ.

La proyección equiangular es la que se usa en geología estructural cuando las relaciones angulares entre las estructuras geológicas, como los planos de estratificación están examinándose, La proyección equiareal se usa más a menudo cuando la distribución de planos dentro de ciertas áreas de la esfera de la referencia se examina.

2.2.8.1. Principales modos de falla

Los diferentes tipos de falla en taludes están asociados con diferentes estructuras geológicas y es muy importante que el diseñador del talud sea capaz de reconocer los posibles problemas de estabilidad durante las primeras etapas de un proyecto. La importancia de distinguir entre estos cuatro modos de falla en taludes en roca es que hay tipo específico de análisis de estabilidad para cada uno como se muestra y es esencial que el método de análisis a ser utilizado sea correcto. En un estudio de campo típico en la que los datos estructurales se han trazado en un estereograma, una serie de concentraciones significativas de polos pueden estar presentes. Es útil para poder identificar a aquellos que representan posibles planos de falla y de eliminar aquellos que presentan estructuras que tienen pocas probabilidades de estar involucrados en las fallas del talud. Las pruebas para la identificación de las concentraciones de polos importantes han sido desarrolladas por Markland (1972) y Hocking (1976). (Wyllie & Mah, 2005).

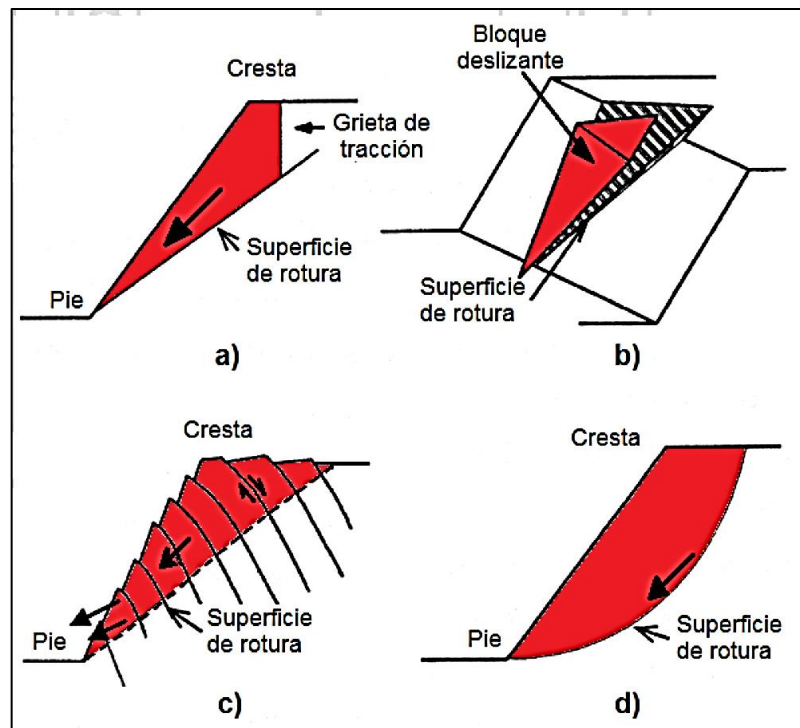


Figura N°20: Modos de rotura en taludes de roca: a) Planar, b) Cuña, c) Vuelco, y d) circular.

Fuente: Coates, 1973.

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, 2000).

La roca dura suele ser tan resistente que las fallas son por gravedad y esto es posible solo si las discontinuidades permiten un fácil movimiento de bloques discretos. En regularmente es estratos o roca foliada, cortada por juntas, hay muchas posibilidades de movimiento de bloques a lo largo de planos de debilidad y gran variedad de modos de comportamiento se exhiben. Con una apreciación del modo de falla, es posible evaluar la probabilidad de falla, o el factor de seguridad, y el ingeniero dar una medida de corrección si el grado de riesgo es inaceptable. (Goodman, 1989).

Existen posibles modos de falla como planar, cuña, vuelco estos son aplicables a los macizos rocosos fracturados. En roca muy fracturada o descomprimida, producirá fallas circulares, ocurrencias de cualquier modo de una fractura o combinación de los mismos está controlado por la orientación relativa de cara / plano de junta dominante, conjunto de juntas dominantes, las características de resistencia al corte de juntas, y su continuidad / frecuencia. (Gundewar, 2014).

2.2.8.1.1. Modo de falla planar

La rotura planar en taludes tiene lugar sobre todo en macizos rocosos constituidos por rocas de resistencia media o alta afectadas por fallas o diaclasas.

Si se representan el plano del talud y las discontinuidades en una proyección estereográfica, se puede temer una rotura de tipo planar cuando existe una familia de discontinuidades de rumbo similar al del talud y buzamiento menor que éste. La disposición típica descrita se presenta en la siguiente figura. (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

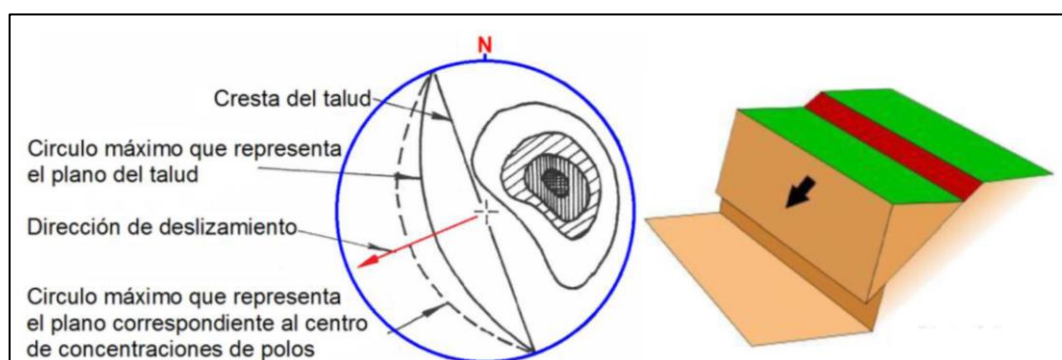


Figura N° 21: Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla planar.

Fuente: Hoek & Bray, 1981.

Aunque no se trata de roturas excesivamente comunes si se puede observar ocasionalmente tanto en carreteras como en canteras, pudiendo dar lugar en algunos casos de roturas rápidas que pueden causar desde pequeños desprendimientos hasta cortes de carretera en el ámbito de la ingeniería civil y deslizamientos importantes con afectaciones a uno o varios bancos y accidentes laborales en minería. Por todo ello, este tipo de rotura debe ser necesariamente tenido en cuenta en el proceso de diseño de taludes en roca. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

2.2.8.1.2. Falla por cuña

La rotura en cuña es un tipo de deslizamiento traslacional que está controlado por dos o más discontinuidades (estratificación, esquistosidades, diaclasas, fallas, etc.). Este tipo de deslizamientos generalmente se dan en macizos rocosos resistentes, con discontinuidades bien marcadas.

Si representamos el plano del talud y las discontinuidades en una proyección estereográfica, la disposición típica de los casos en que es posible la rotura por cuñas es la que aparece en la siguiente figura. 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 de la intersección de las dos familias de discontinuidades y ha de tener menos inclinación que el talud. (Instituto Geologico y Minero de España, 2006).

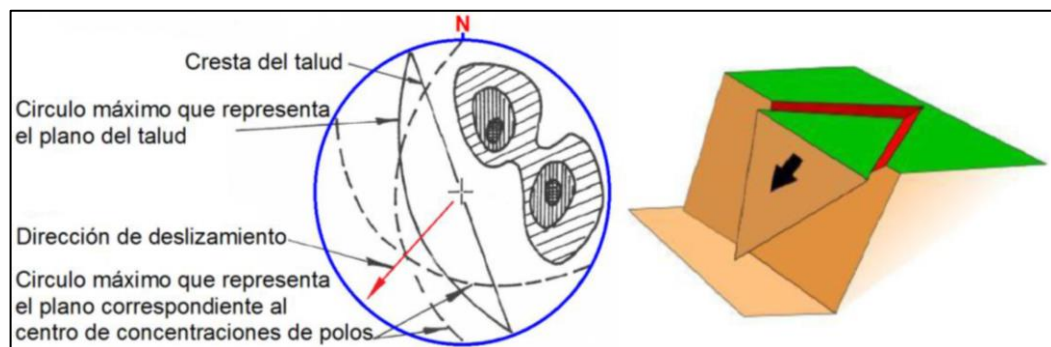


Figura N° 22: Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla por cuñas.

Fuente: Hoek & Bray, 1981.

Este tipo de roturas es sin duda alguna una de las más comunes en taludes excavados en roca, fácilmente observable en múltiples carreteras, cualquier cantera o mina a cielo abierto, y no extraña en zonas de montaña. Cuando la cuña está formada por la intersección de dos discontinuidades o superficies de debilidad, si ambas superficies se inclinan en sentido diferente se denomina cuña directa. Cuando la inclinación de dichas discontinuidades va en el mismo sentido, reciben el nombre de cuña inversa. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

2.2.8.1.3. Falla por vuelco

Las roturas por vuelco de taludes aparecen principalmente cuando el rumbo del plano de discontinuidades: falla, estratificación, etc., coincide aproximadamente con el del plano del talud y además tiene un fuerte buzamiento hacia el interior del macizo rocoso.

En la siguiente figura, se muestra la disposición típica del plano del talud y las discontinuidades que hace previsible la rotura por vuelco de bloques. Se ha utilizado en dicha figura la proyección estereográfica. Se aprecia la existencia de familias de discontinuidades de orientación similar a la del talud. (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

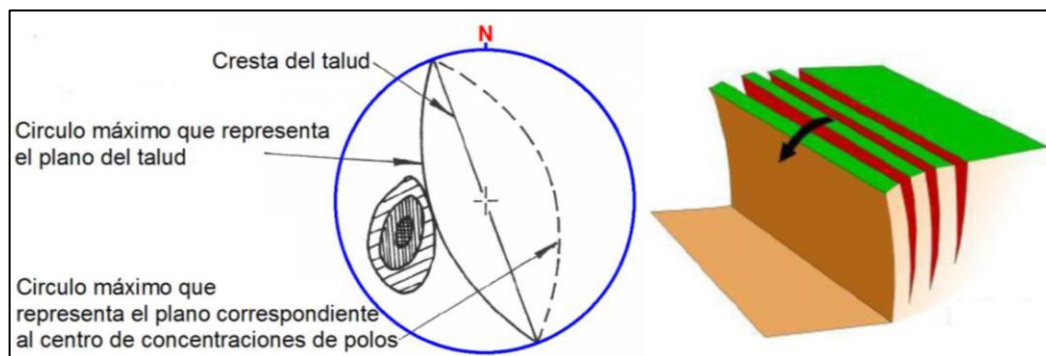


Figura N° 23: Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla por vuelco de bloques.

Fuente: Hoek & Bray, 1981.

El vuelco en taludes es posible siempre que un conjunto de discontinuidades bien definidos se incline 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).

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 conjugadas con la principal produciéndose en este caso un vuelco de bloques o un vuelco de bloques por flexión. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

2.2.8.1.4. Falla circular

En el caso de suelos, escombros y macizos rocosos de baja calidad muy alterados o meteorizados, la rotura se produce a través de la masa o el macizo (sin seguir discontinuidades) siguiendo la línea de menor resistencia. En el ámbito minero esta rotura es relativamente común en escombreras y presas de estériles, y también en taludes de

explotaciones de arcillas o arenas. También se da muy comúnmente en taludes de carretera y en laderas naturales.

Este tipo de deslizamiento se suele producir en terrenos homogéneos, ya sea suelos o rocas altamente fracturadas sin direcciones predominantes de fracturación, en los que además ha de darse la condición de que las partículas de suelo o roca tengan tamaño muy pequeño en comparación con las dimensiones del talud. (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

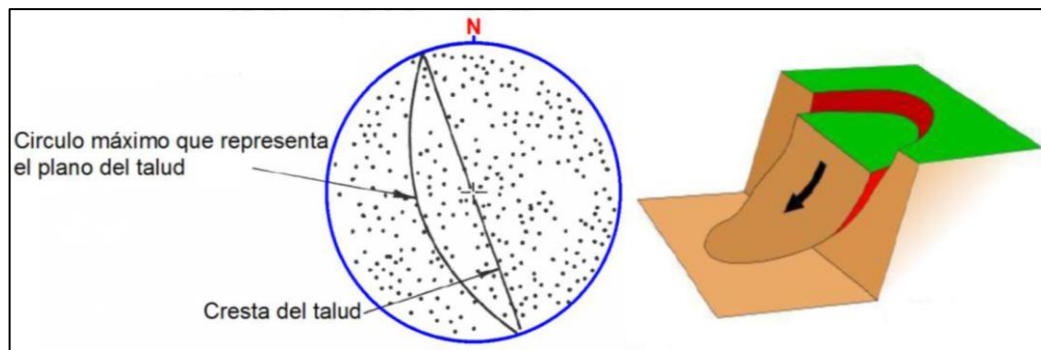


Figura N° 24: Disposición de discontinuidades en el estereograma para un modo de falla circular.

Fuente: Hoek & Bray, 1981.

Se produce a lo largo de una superficie de deslizamiento interna, de forma aproximadamente circular y cóncava. Se puede demostrar que en suelos homogéneos la superficie de rotura es una espiral logarítmica y que, por tanto, se aproxima mucho a un círculo. La mayoría de las teorías de análisis suelen partir de la hipótesis de que la superficie de rotura o deslizamiento es circular por lo que no cometen un error significativo. Los círculos de rotura suelen, además, pasar por el pie del talud. El movimiento tiene una naturaleza más o menos rotacional, alrededor de un eje dispuesto paralelamente al talud. Aunque las salidas de rotura tienden a pasar por el pie del talud, pueden también originarse en otras partes diferentes del talud, según las características resistentes del material, altura e inclinación del talud, en la superficie del terreno suelen aparecer grietas concéntricas y cóncavas hacia la dirección del movimiento, con un escarpe en su parte alta, tanto más acusado cuanto mayor desplazamiento sufre la masa deslizada. (Ramírez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

2.2.9. Métodos de equilibrio límite o analítico

Los métodos de equilibrio límite para el cálculo de estabilidad de taludes son los más utilizados en la práctica común por su gran sencillez y porque, a expensas de otras incertidumbres, el coeficiente de seguridad que proporcionan se asemeja enormemente al real. Se acude al cálculo de estabilidad empleando un factor de seguridad (FS) que reduce los parámetros de resistencia para llevar el talud al estado de equilibrio límite.



Existen dos procedimientos de aplicación dentro de este grupo:

- Métodos que suponen una superficie de deslizamiento predeterminada de la que se calcula su factor de seguridad.
- Métodos en los que se busca la superficie de deslizamiento pésima y su factor de seguridad.

Los métodos de equilibrio límite (los más utilizados) analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura. (González de Vallejo, 2002). Este método se basa en:

- La selección de una superficie teórica de rotura en el talud.
- El criterio de rotura de Hoek-Brown.
- El criterio de rotura de Mohr-Coulomb.
- El criterio de rotura de Barton-Bandis.
- La definición de coeficiente de seguridad.

En la ingeniería de taludes en roca, este método es de gran significancia en la detección de fallas de bloques simples a lo largo de distintas discontinuidades. Todos los métodos están basados en la comparación de fuerzas resistentes a la inestabilidad de la masa y otros que causan inestabilidad. Las secciones son analizadas en dos dimensiones asumiendo condiciones en un plano de esfuerzos. (Gundewar, 2014).

Se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte. En los métodos de equilibrio límite, la seguridad de un determinado talud se cuantifica por medio del factor (o coeficiente) de seguridad, FS, que se define como el cociente entre la resistencia al corte en la superficie de deslizamiento y la necesaria para mantener el equilibrio estricto de la masa deslizante. En la obtención del factor de seguridad se le supone constante en toda la superficie de deslizamiento. (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

2.2.9.1. Análisis de estabilidad en falla planar

En el caso de rotura planar el factor de seguridad FS se obtiene de forma directa como cociente entre las fuerzas que tienden a producir el deslizamiento y las fuerzas resistentes del terreno que se oponen al mismo, proyectadas todas según la dirección del plano de rotura. Al calcular FS de esta manera, se le supone implícitamente constante a lo largo de toda la superficie de rotura, lo cual se acepta a pesar de no ser estrictamente cierto. Por otra parte, se supone que la rotura se produce únicamente por deslizamiento,

considerando que los momentos que pueden aparecer sobre el plano de rotura tienen efecto despreciable. (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

El coeficiente de seguridad en la rotura plana se define como el cociente entre las fuerzas que se oponen al deslizamiento del bloque y las fuerzas que lo inducen. El valor de dicho cociente debe ser superior a la unidad para que el talud sea estable. Normalmente, con hipótesis de cálculo conservadoras, se considera que el talud es suficientemente estable si el coeficiente de seguridad es del orden de 1,3 o 1,1 si se considera el efecto sísmico. (Ramírez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

Las fallas planas ocurren a lo largo de una superficie aproximadamente plana y se analizan como un problema en dos dimensiones, aunque pueden existir otras discontinuidades que definen los límites laterales de los movimientos, solo se tiene en cuenta el efecto de la discontinuidad principal. El tamaño de las fallas planas puede ir desde unos pequeños metros cúbicos a montañas enteras.

El análisis cinemático tiene en cuenta cuatro condiciones estructurales así:

- La dirección de la discontinuidad debe estar a menos de 20 grados de la dirección de la superficie del talud.
- El buzamiento de la discontinuidad debe ser menor que el buzamiento de la superficie del talud.
- El buzamiento de la discontinuidad debe ser mayor que su ángulo de fricción.
- La extensión lateral de la masa potencial de falla debe ser definida por superficies laterales que no contribuyen a la estabilidad.

Si las condiciones anteriores se cumplen la estabilidad puede evaluarse por el método del equilibrio límite; el análisis de estabilidad requiere la solución de fuerzas perpendiculares y paralelas a la superficie de falla potencial.

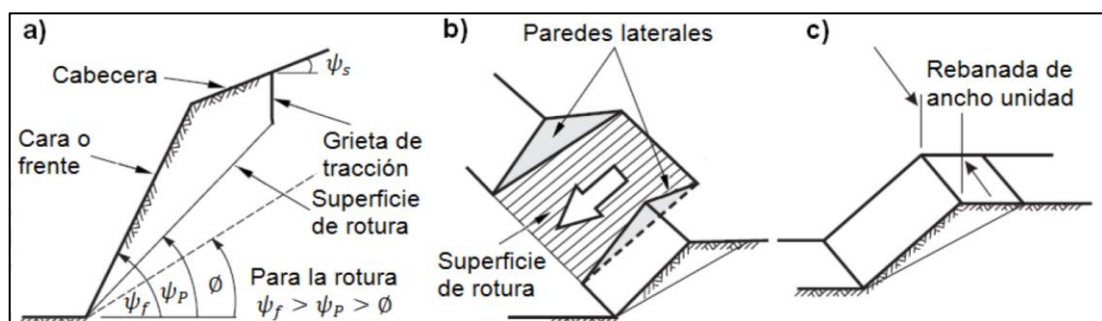


Figura N° 25: Rotura planar: a) Condiciones geométricas, b) Paredes laterales de la superficie de rotura, y c) Estudio bidimensional de rotura.

Fuente: Hoek & Bray, 1981.

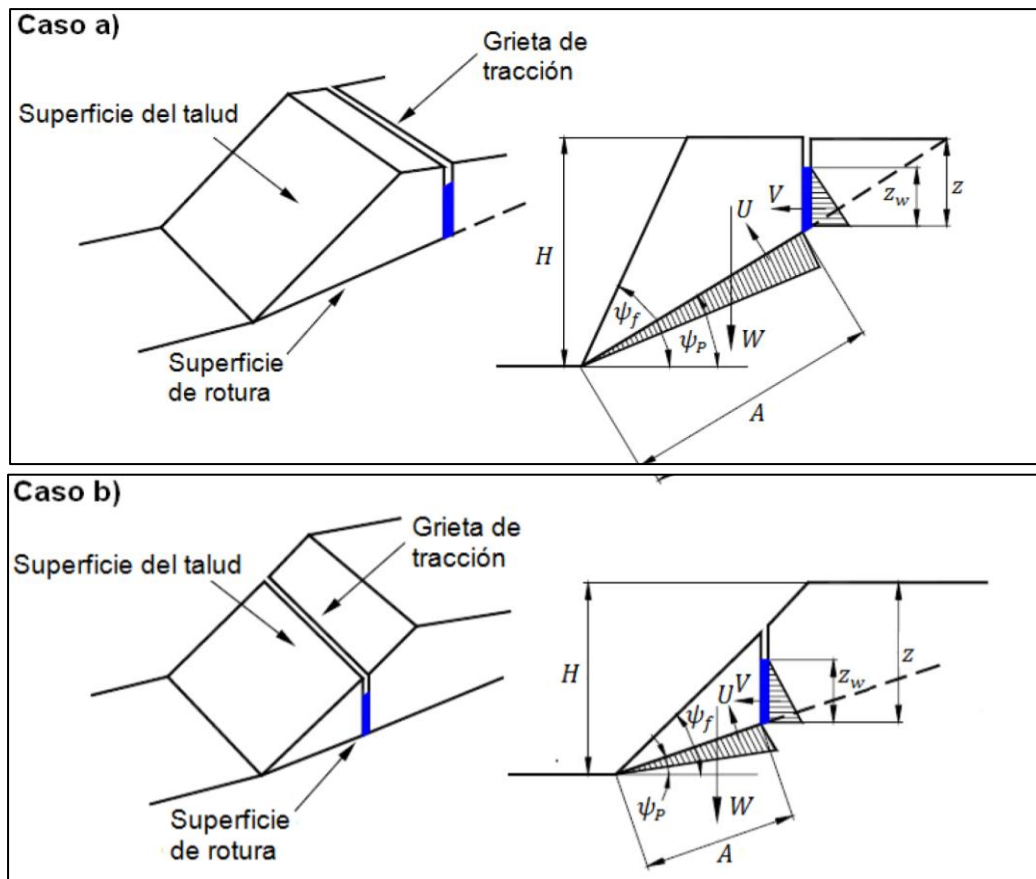


Figura N° 26: Rotura planar: a) Grieta de tracción ubicada en la cabecera del talud y b) Grieta de tracción ubicada en la cara del talud.

Fuente: Hoek & Bray, 1981.

En la Figura N° 25 se presentan esquemas de una falla plana con grieta de tensión arriba de cabeza del talud, con grieta de tensión en la cara del talud, y en la figura N°26 una representación esquemática general de la falla plana.

De acuerdo con la localización de la grieta de tensión se pueden considerar dos casos:

- Con grieta de tensión arriba de la cabeza del talud.
- Con grieta de tensión en la cara del talud, abajo de la cabeza.

Las ecuaciones de estabilidad son las siguientes:

$$FS = \frac{c' A + [W \cos \psi_p - U - V \sin(\psi_p + \delta)] \tan \phi'}{V \cos \psi_p + W \sin(\psi_p + \delta)}$$

$$A = \frac{H - z}{\sin \psi_p}$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w Z_w \frac{H - z}{\sin \psi_p}$$



$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{1 - \left(\frac{z}{H}\right)^2}{\tan \psi_\rho} - \frac{1}{\tan \psi_t} \right] \dots\dots\dots \text{caso(a)}$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{\gamma H^2 \left[1 - \left(\frac{z}{H}\right)^2 \left(\frac{\tan \psi_t}{\tan \psi_\rho} - 1 \right) \right]}{\tan \psi_\rho} \dots\dots\dots \text{caso(b)}$$

Dónde:

FS = factor de seguridad.

H = altura del talud.

A = área de la superficie de deslizamiento (supuesta de ancho unidad).

Z_w = altura del agua en la grieta de tracción.

c' = cohesión efectiva en la superficie de deslizamiento.

ϕ' = ángulo de rozamiento interno efectivo en la superficie de deslizamiento.

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

ψ_s = ángulo de la superficie de la cabecera.

ψ_f = ángulo del buzamiento del talud.

ψ_ρ = ángulo que forma el plano de deslizamiento con la horizontal.

ψ_t = ángulo del talud con la horizontal.

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

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

W = peso de la masa deslizante.

γ = peso específico de la masa inestable.

γ_w = peso específico del agua.

g = aceleración de la gravedad.

2.2.9.2. Análisis de estabilidad en falla por cuña

La obtención del factor de seguridad es más compleja que en el caso de rotura planar debido a que el cálculo ha de hacerse en tres dimensiones, entrando en la caracterización geométrica del problema un número mucho mayor de variables angulares. (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

El coeficiente de seguridad de la rotura en cuña viene definido, como en la rotura plana, por el cociente entre las fuerzas que se oponen al deslizamiento y las que lo inducen. Las fuerzas que intervienen son las mismas que en la rotura plana, es decir, peso de la cuña, empujes de agua, esfuerzos sísmicos, fuerzas de anclaje, fuerzas de reacción y fuerzas resistentes: cohesión y fricción. A diferencia de la rotura plana, en la rotura en cuña se desarrolla una componente resistente sobre cada uno de los dos planos de discontinuidad que forman la cuña. Así mismo, los empujes de agua pueden actuar independientemente sobre cada plano de discontinuidad, por lo que la solución del problema se complica al convertirse en tridimensional. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

Para calcular el coeficiente de seguridad hay que obtener la resultante sobre la línea de caída de las componentes tangenciales de las fuerzas que actúan sobre la cuña y compararla con las fuerzas resistentes. La solución gráfica de los problemas de estabilidad de cuñas necesita de la proyección estereográfica.

La falla en cuña ocurre cuando la masa de roca se desliza a lo largo de dos discontinuidades que se interceptan en un ángulo oblicuo a la superficie del talud (Figura N° 27). La formación de una falla en cuña depende primordialmente, de la litología y de la masa de roca.

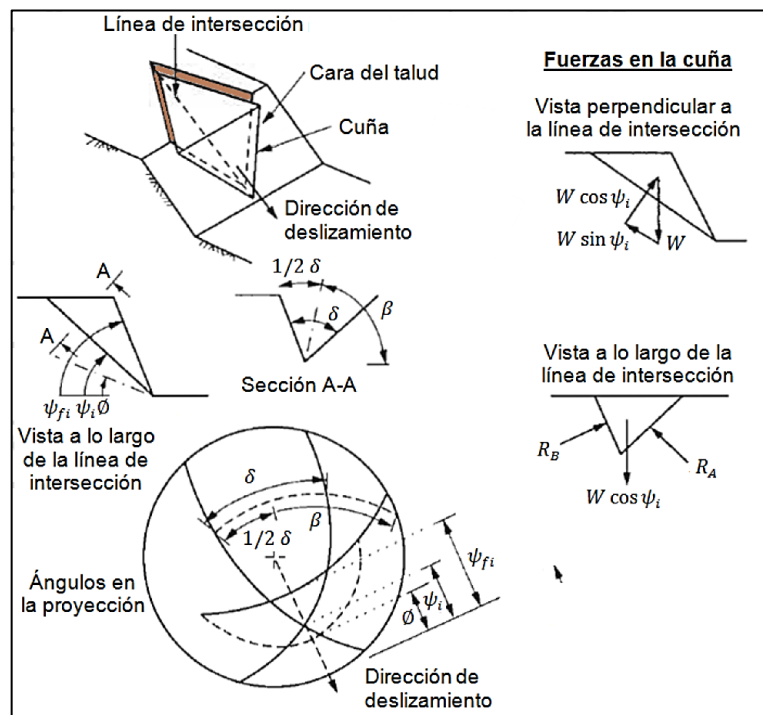


Figura N° 27: Geometría de un análisis estático de solo fricción de una falla en cuña.

Fuente: Hudson & Harrison, 1997.

El análisis cinemático de una falla en cuña es controlado por la orientación de la línea de intersección de los dos planos. Las condiciones estructurales que se deben cumplir son las siguientes:

- La dirección de la línea de intersección debe ser aproximadamente cercana a la del buzamiento de la superficie del talud.
- El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor que el de la superficie del talud.
- El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción promedio de las dos superficies.

Asumiendo que la dirección de deslizamiento es paralela a la línea de intersección de los dos planos, fuerzas paralelas a esta línea y perpendicular a los dos planos de deslizamiento pueden resolverse en orden de determinar el factor de seguridad con la siguiente expresión. (Hudson & Harrison, 1997).

$$FS = \frac{(R_A + R_B) \tan \emptyset}{W \sin \psi_i}$$

$$R_A + R_B = \frac{W \cos \psi_i \sin \beta}{\sin \left(\frac{1}{2} \delta \right)}$$

Dónde:

FS = factor de seguridad.

\emptyset = ángulo de fricción.

ψ_i = ángulo de inclinación de línea de intersección.

ψ_{fi} = ángulo de inclinación del talud, medido en la sección vertical indicada.

W = peso del bloque.

δ = ángulo de apertura de la cuña o ángulo que forman los planos A y B.

β = ángulo que forma con la horizontal la bisectriz de la cuña.

R_A = Es la reacción normal efectiva sobre el plano A.

R_B = Es la reacción normal efectiva sobre el plano B.



La resolución de problemas de rotura en forma de cuña que a veces resulta algo complicado realizar de manera manual ha sido implementada, en su versión basada en el cálculo vectorial (Hoek y Bray, 1974) ha sido implementada en algunos programas de cálculo como el denominado SWEDGE de la compañía ROCSCIENCE (2002), que también permite cálculos estadísticos y realización de análisis de sensibilidad.

2.2.9.3. Análisis de estabilidad en falla por vuelco

Este análisis se basa en los principios de los métodos de equilibrio límite por lo que únicamente se han considerado las ecuaciones generales de equilibrio estático sin tener en cuenta procesos dinámicos ni tenso-deformacionales. (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

Los métodos numéricos resultan una solución elegante, que permite a su vez observar y analizar mecanismos más o menos complejos, pero que suele resultar cara. Independientemente del método de cálculo utilizado, se deben emplear coeficientes de seguridad más bien altos para el diseño de estos taludes ya que al influir sobre ellos un número de parámetros muy elevado, la incertidumbre sobre los valores de éstos será también bastante grande, con lo que el diseño debe situarse bastante del lado de la seguridad; las roturas por vuelco tienen, en cambio, la ventaja de que se producen lentamente por lo que da tiempo para tomar medidas tendentes a reducir los daños. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

Existen herramientas para los modos de falla por vuelco directo (simultáneamente, existen soluciones para vuelcos flexurales pero también estas fallas envuelven deformaciones internas del bloque que es pobremente tratada usando técnicas de equilibrio límite). Otras consideraciones incluyen la posibilidad de que el bloque pueda deslizar, o que ambos deslizamiento y vuelco puedan ocurrir simultáneamente.

Las fallas al volteo ocurren en masas de roca que están subdivididas en una serie de columnas de gran buzamiento y con rumbo aproximadamente paralelo a la superficie del talud, en la falla al volteo la columna de roca rota alrededor de un punto cerca a la base de la misma columna.

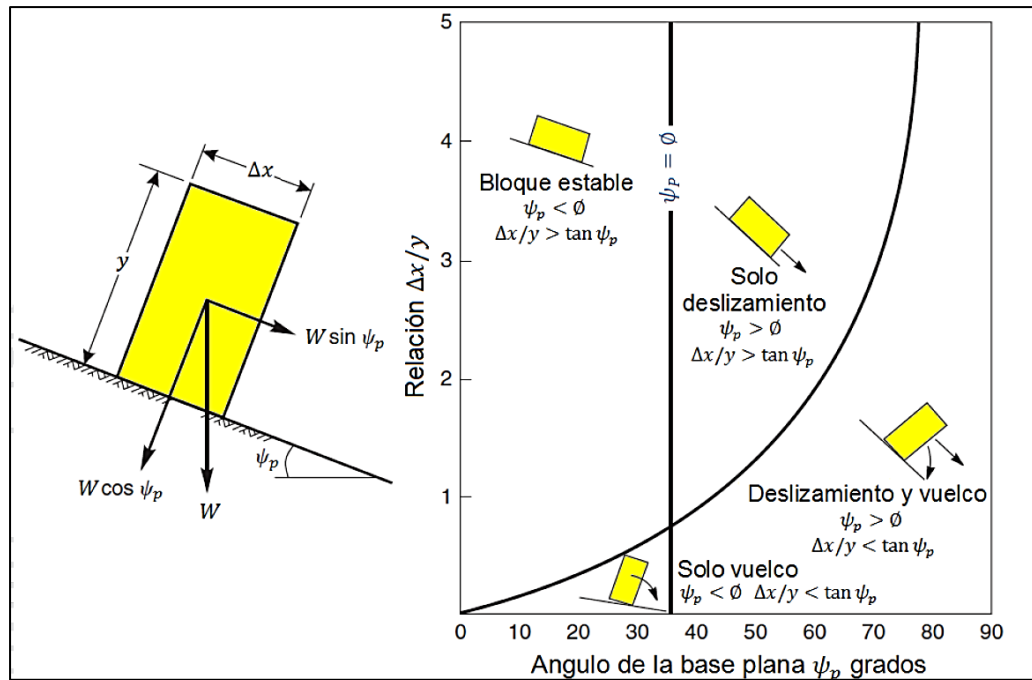


Figura N° 28: Deslizamiento e inestabilidad de bloques por vuelco en un plano inclinado.

Fuente: Hoek & Bray, 1981.

De los métodos analíticos para resolver los problemas de vuelco de taludes, uno de los difundidos es el propuesto por (Goodman & Bray, 1997), que se adapta sobre todo a taludes que presentan roturas con base escalonada ascendente regular, del tipo vuelco de bloques.

2.2.9.4. Análisis de estabilidad en falla circular

Para el análisis de esta tipología de rotura en macizos rocosos isótropos, muy alterados o intensamente fracturados y de baja resistencia, pueden utilizarse los métodos para rotura circular en suelo. (González de Vallejo, 2002)

El estudio de la estabilidad de un talud mediante formas de rotura circulares ha sido y es altamente utilizado, pues se acerca razonablemente a la realidad en una gran parte de los casos. Los métodos de cálculo más empleados son los llamados métodos de rebanadas o de dovelas, que requieren un cálculo muy laborioso por lo que su utilización se suele hacer mediante programas de cómputo. (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

2.2.10. Métodos numéricos

El uso de modelos numéricos en ingeniería de taludes puede contribuir a mejorar el conocimiento sobre los posibles mecanismos de rotura que pueden dar lugar a fenómenos de inestabilidad. Así mismo, puede ayudar a encontrar una geometría óptima



del talud y permite el análisis de la secuencia de excavación y construcción. Finalmente, y mediante el método de reducción de la resistencia al corte (y a la tracción) se pueden estimar los coeficientes de seguridad de taludes mediante técnicas numéricas. (Dawson & Roth, 1999)

Los modelos numéricos analizan el comportamiento de los taludes; para lo cual pueden incorporar diferentes comportamientos mecánicos (elástico, elastoplástico, viscoso, discontinuo) de los materiales afectados. Dada la complejidad natural de los materiales que se analizan, la aplicación de los modelos numéricos exigirá simplificaciones, tanto en términos geométricos (modelos bidimensionales o axisimétricos, mallas finitas), como en la implementación de los modelos de comportamiento (linealización, homogeneización, eliminación de discontinuidades).

Los modelos pueden ser usados como ayuda para explicar las observaciones físicas del contorno del macizo rocoso y la evaluación de diferentes modelos geológicos, modos de falla y opciones de diseño de taludes. Los modelos numéricos dividen el macizo rocoso en elementos, estos pueden ser conectados por un modelo continuo o separado por discontinuidades en un modelo discontinuo. (Read & Stacey, 2009).

Los métodos numéricos se basan en la resolución numérica, y por tanto no exacta, de las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento mecánico de los materiales (macizos rocosos o masas de suelo). Dada la complejidad del comportamiento de estos, es necesario simplificar sus propiedades para formalizar los modelos matemáticos. La solución de un problema concreto se presenta en forma de la distribución de las variables principales en el dominio considerado, tales como esfuerzos inducidos, deformaciones y desplazamientos. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

Los métodos numéricos se pueden dividir en:

- Elementos finitos (MEF)
- Diferencias finitas (MDF)
- Elementos discretos (MED)
- Elementos de contorno (MEC)

2.2.11. Métodos estadísticos

En una disciplina, como la ingeniería de los macizos rocosos, en la que la incertidumbre juega un papel bastante importante, la utilización de métodos estadísticos presenta gran interés. Aunque las técnicas estadísticas se han desarrollado para tratar casos en los que se cuenta con un elevado número de datos, al contrario de lo que suele ocurrir en geotecnia, una adecuada gestión de éstos en combinación con el uso de técnicas estadísticas puede contribuir a facilitar la resolución de los problemas, controlando y limitando los niveles de incertidumbre a lo largo del proceso de diseño, y sacando el



mayor partido posible de los escasos datos disponibles. Además, las técnicas estadísticas permiten evaluar, de manera más o menos aproximada, el riesgo asociado a una determinada propuesta de diseño y, por tanto, la fiabilidad de la misma. (Harr, 1987)

Aunque no es necesariamente un método estadístico, se trata por ser una técnica que contribuye a mejorar el conocimiento sobre la fiabilidad de los diseños y se usa frecuentemente para evaluar los riesgos asociados a una determinada solución constructiva. También resulta muy interesante para determinar cuáles son los parámetros que tienen mayor influencia sobre la estabilidad del talud. Si se trata de parámetros del terreno, habrá que conocer de la manera más exacta posible los valores que toman, mientras que si se trata de parámetros de diseño se modificarán de la manera más adecuada posible para asegurar la estabilidad. (Ramírez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

2.2.12. Tipos de presas

En el área de ingeniería se denomina presa o represa a una barrera artificial fabricada con piedra, hormigón o materiales sueltos que se construye habitualmente en una cerrada o desfiladero sobre un río o una laguna; con la finalidad de embalsar el agua en el cauce fluvial para su posterior aprovechamiento en abastecimiento o regadío para la agricultura para elevar su nivel con el objetivo de derivarla a canalizaciones de riego para laminación de avenidas (evitar inundaciones aguas abajo de la presa) o para la producción de energía mecánica al transformar la energía potencial del almacenamiento en energía cinética.

Una presa tiene los siguientes componentes:

- **El embalse:** es el volumen de agua que queda retenido por la presa.
- **El vaso:** es la parte del valle que inundándose contiene el agua embalsada.
- **La cerrada o boquilla:** es el punto concreto del terreno donde se construye la presa.
- **Pantalla o cortina:** propiamente dicha cuyas funciones básicas son, por un lado, garantizar la estabilidad de toda la construcción soportando un empuje hidrostático del agua y por otro no permitir la filtración del agua. A su vez en la presa se distingue:
- **Los paramentos, caras o taludes:** son las dos superficies más o menos verticales principales que limitan el cuerpo de la presa el interior o de aguas arriba que está en contacto con el agua y el exterior o de aguas abajo.
- **La coronación:** es la superficie que delimita la presa superiormente.
- **Los estribos o empotramientos:** son los laterales del muro que están en contacto con la cerrada contra la que se apoya.



- **La cimentación:** es la parte de la estructura de la presa a través de la cual se transmiten las cargas al terreno tanto las producidas por la presión hidrostática como las del peso propio de la estructura.
- **El aliviadero o vertedero hidráulico:** es la estructura hidráulica por la que rebosa el agua excede cuando la presa ya está llena.
- **Las compuertas:** son los dispositivos mecánicos destinados a regular el caudal de agua a través de la presa.
- **El desagüe de fondo:** permite mantener el denominado caudal ecológico aguas abajo de la presa y vaciar la presa en caso de ser necesario.
- **Las tomas:** son también estructuras hidráulicas, pero de menor cantidad y son utilizadas para extraer agua de la presa para un cierto uso. (Ray L. Joseph B. F. 1978).

2.2.12.1. Clasificación de presas

a. Según su función

- Para almacenamiento de agua.
- Para obtención de energía.
- Para derivar una corriente de agua.

b. Según los materiales que se emplean en su construcción

- **Presas de Tierra:** Es un terraplén bien compactado con un núcleo central impermeable. es importante tener en cuenta las filtraciones que es el pasaje del agua a través de los espacios vacíos del suelo y puede provocar lavado de suelo, como consecuencia sifonamiento y erosión interna en la presa.
- **Presas de Hormigón:** Son las más utilizadas en los países desarrollados ya que con este material se pueden elaborar construcciones más estables y duraderas; debido a que su cálculo es del todo fiable frente a las producidas en otros materiales. Normalmente todas las presas de tipo gravedad, arco y contrafuerte están hechas de este material.
Este tipo de presas tienen componentes muy permeables por lo que es necesario añadirles un elemento impermeabilizante. Además, estas estructuras resisten siempre por gravedad, pues la débil cohesión de sus materiales no les permite transmitir los empujes del agua al terreno. Este elemento puede ser arcilla (en cuyo caso siempre se ubica en el corazón del relleno) o bien una pantalla de



hormigón la cual se puede construir también en el centro del relleno o bien aguas arriba. Estas presas tienen el inconveniente de que si son rebasadas por las aguas en una crecida corren el peligro de desmoronarse y arruinarse.

- **Presas de Enrocado con cara de hormigón:** Este tipo de presas en ocasiones es clasificada entre las de materiales sueltos; pero su forma de ejecución y su trabajo estructural son diferentes. El elemento de retención del agua es una cortina formada con fragmentos de roca de varios tamaños que soportan en el lado del embalse una cara de hormigón la cual es el elemento impermeable. La pantalla o cara está apoyada en el contacto con la cimentación por un elemento de transición llamado plinto que soporta a las losas de hormigón. (Ray L. Joseph B. F. 1978).

c. Según su estructura

- **Presa de Arco:** Es aquella en la que su propia forma es la encargada de resistir el empuje del agua. Debido a que la presión se transfiere en forma muy concentrada hacia las laderas de la cerrada, se requiere que ésta sea de roca muy dura y resistente. Constituyen las represas más innovadoras en cuanto al diseño y que menor cantidad de hormigón se necesita para su construcción.
- **Presa de Bóveda o de Doble Arco:** Cuando la presa tiene curvatura en el plano vertical y en el plano horizontal, también se denomina de bóveda. Para lograr sus complejas formas se construyen con hormigón y requieren gran habilidad y experiencia de sus constructores que deben recurrir a sistemas constructivos poco comunes.
- **Presa de Arco-Gravedad:** Este tipo de presa combina características de las presas de arco y las presas de gravedad y se considera una solución de compromiso entre los dos tipos. Tiene forma curva para dirigir la mayor parte del esfuerzo contra las paredes de un cañón o un valle que sirven de apoyo al arco de la presa. Además, el muro de contención tiene más espesor en la base y el peso de la presa permite soportar parte del empuje del agua. Este tipo de presa precisa menor volumen de relleno que una presa de gravedad. (Ray L. Joseph B. F. 1978).

d. Según su aplicación

- **Presas Filtrantes o Diques de Retención:** Son aquellos que tienen la función de retener sólidos desde material fino hasta rocas de gran tamaño



transportadas por torrentes en áreas montañosas permitiendo sin embargo el paso del agua.

- **Presas de Control de Avenidas:** son aquellas cuya finalidad es la de laminar el caudal de las avenidas torrenciales con el fin de que no se cause daño a los terrenos situados aguas abajo de la presa en casos de fuerte tormenta.
- **Presas de Derivación:** el objetivo principal de estas es elevar la cota del agua para hacer factible su derivación controlando la sedimentación del cauce de forma que no se obstruyan las bocatomas de derivación. Este tipo de presas son en general de poca altura ya que el almacenamiento del agua es un objetivo secundario.
- **Presas de Almacenamiento:** El objetivo principal de estas es retener el agua para su uso regulado en irrigación, generación eléctrica, abastecimiento a poblaciones, recreación o navegación, formando grandes vasos o lagunas artificiales.
- **Presas de Relaves o Jales:** Son estructuras de retención de sólidos sueltos y líquidos de desecho producto de la explotación minera los cuales son almacenados en vasos para su decantación. Por lo común son de menores dimensiones que las presas que retienen agua, pero en algunos casos corresponden a estructuras que contienen enormes volúmenes de estos materiales. Al igual que las presas hidráulicas tienen cortina (normalmente del mismo tipo de material), vertedero y en vez de tener una obra de toma o bocatoma poseen un sistema para extraer los líquidos. (Ray L. Joseph B. F. 1978).

2.3. MARCO CONCEPTUAL

2.3.1. Abertura

Se define abertura como la distancia perpendicular que separa las paredes adyacentes de roca de una discontinuidad. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

2.3.2. Buzamiento

Ángulo que forma con la horizontal la línea de máxima pendiente de un plano. (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).



2.3.3. Caracterización

Es la descripción cuantitativa y cualitativa del macizo rocoso, para determinar sus propiedades físicas y mecánicas. (Chura, W. 2016).

2.3.4. Clasificación geomecánica

Son sistemas de clasificación que proporciona una evaluación y estimación de la calidad del macizo rocoso a partir de observaciones en el campo y ensayos sencillos, como son R.M.R. (Bieniawski), Q (Barton) y G.S.I. (Hoek & Brown). (Norly, B. et al. 2012).

La clasificación de macizos rocosos, permiten a su vez relacionar índices de calidad con parámetros de diseño y de sostenimiento. (Torrijo Echarri & Córtes Gimeno, 2007).

2.3.5. Deslizamiento

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelo o roca que deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura. (Gonzáles de Vallejo, 2002).

2.3.6. Dirección de buzamiento

Ángulo, medido en el sentido de las agujas del reloj, entre la dirección Norte y la proyección horizontal de la línea de máxima pendiente considerada siempre en el sentido hacia el que desciende el plano. (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

2.3.7. Discontinuidad

Cualquier rompimiento o pérdida de continuidad de una roca. Genera comportamiento no continuo de la matriz rocosa, y normalmente anisótropo, se clasifican en fallas, diaclasas y fracturas. (Apshana, Y. et al. 2011).

También (Gonzáles de Vallejo, 2002). Lo define como: Cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso. (Gonzáles de Vallejo, 2002).

2.3.8. Dominios geotécnicos

Los dominios geotécnicos están relacionados a los mecanismos de falla y/o rotura en una caracterización geomecánica a observarse y analizarse, los cuales pueden inducir a ser planar, circular, cuña y volcamiento. (Tejada, 2012).



2.3.9. Estabilidad de talud

Es la teoría que estudia la estabilidad de un talud a la hora de realizar un proyecto, o llevar a cabo una obra de construcción de ingeniería civil siendo un aspecto directamente relacionado con la geotecnia; la estabilidad de un talud, se puede producir por un desnivel, que tenga lugar a diversas razones.

2.3.10. Espaciamiento

Distancia perpendicular entre dos discontinuidades adyacentes, normalmente se refiere al espaciamiento medio de una familia de discontinuidades. (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

2.3.11. Factor de seguridad

El factor de seguridad es una medida determinística de la relación entre las fuerzas (capacidad) y las fuerzas impulsoras (demanda), del sistema en su entorno considerado. El factor de seguridad es el criterio más básico de diseño aceptado en la ingeniería de taludes. (Read & Stacey, 2009).

2.3.12. Macizo rocoso

Unidad geológica de afloramiento de todo tipo de roca que distingue habitualmente la geología, como la roca de basamento para obras de ingeniería; así como túneles; galerías subterráneas; casas de máquinas; cimentaciones y otros.

Matriz rocosa es de material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de “rocas intactas” que queda entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral. Mecánicamente queda caracterizada por su peso específico, resistencia y deformabilidad. Datos que detallan en el registro lineal. (Gonzalo de Vallejo L. 2002).

2.3.13. Matriz rocosa

Es el material rocoso exento de discontinuidades, o los bloques de roca intacta que quedan entre ellas. La matriz rocosa, a pesar de considerarse continua, presenta un comportamiento heterogéneo y anisótropo ligado a su fábrica y a su microestructura mineral. (González de Vallejo, 2002).



Roca o matriz rocosa puede definirse como agregado de más de una especie mineral, que presenta los mismos caracteres de conjunto en un área de cierta extensión de la corteza terrestre. (Plaza Diez, 2005).

2.3.14. Meteorización

La meteorización puede ser definida como la alteración físico-química de las rocas en superficie, debido a las reacciones con soluciones atmosféricas líquidas o gaseosas. La importancia de la meteorización radica en su efecto sobre las propiedades mecánicas de los materiales a los que afecta, así como en la influencia sobre las características friccionales de las superficies sobre las que actúa. Además, una roca sometida a un elevado grado de meteorización se convertirá finalmente en un material desagregado o poco cementado que se conoce por suelo, de forma que a medida que un macizo rocoso se va meteorizando tenderá a parecerse a este tipo de materiales. (Ramírez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

2.3.15. Orientación

Posición de la discontinuidad en el espacio, definida por la dirección del buzamiento y el buzamiento de la línea de máxima pendiente en el plano de la discontinuidad. (Instituto Geológico y Minero de España, 2006).

2.3.16. Relleno

Material que separa las paredes de una discontinuidad, normalmente más débil que la roca matriz. (González de Vallejo, 2002).

2.3.17. Resistencia a compresión simple

Llamada también resistencia uniaxial y se define como el esfuerzo máximo que soporta la roca sometida a compresión uniaxial, la cual se determina a través de una probeta cilíndrica sin confinar en el laboratorio.

2.3.18. Roca

Es un agregado natural duro y compacto de partículas minerales con fuertes uniones cohesivas permanentes que habitualmente se consideran un sistema continuo. (González de Vallejo, 2002).

Agregado natural compuesto de partículas de uno o más minerales, con fuertes uniones cohesivas, que no pueden ser disgregados o excavados con herramientas



manuales, originada en forma natural por procesos geológicos. (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2012).

2.3.19. Roca intacta

Son cuerpos continuos formados por asociaciones de una o varias especies minerales. Por sus propiedades pueden ser: Homogéneos o Heterogéneos e Isótropos o Anisotrópicos. (Barletta, 2008).

2.3.20. Rugosidad

Conjunto de irregularidades de diferentes órdenes de magnitud (asperezas, ondulaciones), que componen la superficie de las paredes de una discontinuidad. (González de Vallejo, 2002).

2.3.21. Talud

Inclinación de diseño dada al terreno lateral de la carretera, tanto en zonas de corte como en terraplenes, con estructura de roca o suelo.

Inclinación o pendiente de un terreno que queda al excavar. Perfil conseguido tras una excavación o terraplenado no necesariamente vertical, sino con cierto ángulo con la horizontal, llamado ángulo de talud. (Reglamento Nacional de Edificaciones, 2012).

2.3.22. Tipo de rotura

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



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Diseño metodológico

La metodología que se desarrolló en este trabajo de investigación es Descriptivo - Aplicativo, generalizado en un método denominado método de proyecciones estereográficas mediante el software Dips – Rocscience; Este programa permite al usuario analizar y visualizar datos estructurales siguiendo las mismas técnicas empleadas en los estereogramas. Asimismo, cuenta con características computacionales, tales como contorno estadístico de familias de discontinuidades, orientación principal y grado de confiabilidad, variabilidad de sistemas y características cualitativas y cuantitativas de los atributos del análisis.

3.1.1. Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación es de tipo descriptivo, aplicativo y causa-efecto; Respecto a las propiedades y características de los macizos rocosos en función de su fracturamiento y propiedades físico- mecánicas que presenten.

Causas:

Caracterización geomecánica de los macizos rocosos.

- Levantamiento y caracterización geotécnica litológica.
- Mapeo geotécnico de macizos rocosos en campo.
- Medición de espaciamiento. de fracturas en campo.
- Medición de crestas de rugosidad en campo.
- Visualización de las condiciones físicas del macizo rocoso.

Efectos:

Clasificación geomecánica para el diseño de la presa Chasca Cocha.

- Ensayo a la compresión uniaxial.
- Clasificación RQD por tablas según sus parámetros de campo.
- Evaluación mineralógica del macizo rocoso.
- Clasificación petrológica del tipo de roca.
- Modelamiento del macizo rocoso mediante el software DIPS.



3.2. Revisión, recopilación y elaboración de informaciones preliminares

Para este trabajo de investigación, se realizó la planificación según la metodología a aplicar, se revisó y recopiló información bibliográfica relacionada al tema a investigar.

Se consideró bibliografía como: trabajos de investigación, tesis, artículos; así obtener una visión del estado de conocimiento en relación a la caracterización de macizos rocosos para el diseño de presas y la metodología relacionada a las características geomecánicas, los parámetros geotécnicos, la resistencia a la compresión simple para determinar la clasificación geomecánica y el factor de seguridad de los macizos rocosos para el diseño de la presa Chasca Cocha.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

La población considerada para el presente trabajo de investigación, está comprendida por afloramientos de macizos rocosos un área de embalse de 38,503.00 m², para el diseño de la presa Chasca Cocha del Distrito de Crucero, Provincia de Carabaya de la Región de Puno.

3.3.2. Muestra

La muestra se obtuvo de los macizos rocosos, y consecuentemente de las estaciones geomecánicas; comprendidas en el margen derecho: MD-A1; MD-A2; MD-A3 y en el margen Izquierdo: MI-B1; MI-B2; MI-B3 de la presa Chasca Cocha. Para su ubicación se utilizó el sistema de posicionamiento global (GPS) y la respectiva descripción de sus características geomecánicas in-situ.

3.4. Operacionalización de variables

3.4.1. Variable independiente

Caracterización geomecánica de los macizos rocosos.

3.4.2. Variable dependiente

Clasificación geomecánica para el diseño de la presa Chasca Cocha- Crucero-Carabaya-Puno.

3.4.3. Operación de variables

Cuadro N° 20

Operacionalización de variables

Variables	Categoría	Indicadores	Índices	Instrumentos de medición	
V. Independiente Caracterización geomecánica	Zona y dominios geotécnicos	Número de familias de fracturas.	RMR	Levantamiento y caracterización geotécnica litológica.	
		Espaciamiento de las fracturas.		GSI	Mapeo geotécnico de macizos rocosos en campo.
		Rugosidad de las fracturas.	Q		Medición de espaciamiento de fracturas en campo.
		Condiciones físicas y geométricas de las fracturas.			Medición de crestas de rugosidad en campo.
		Afloramiento o presencia de agua	Visualización de las condiciones físicas del macizo rocoso.		
V. Dependiente Clasificación geomecánica	Tipo de roca	Resistencia a la compresión simple.	RQD	Ensayo a la compresión uniaxial.	
		RQD (Rock Quality Designation).		Clasificación RQD por tablas según sus parámetros de campo.	
		Composición mineralógica.	Clasificación de roca	Ensayo de composición mineralógica del macizo rocoso.	
		Proyección estereográfica del macizo rocoso.		Clasificación petrológica del tipo de roca.	
	Modelamiento del macizo rocoso mediante el software DIPS.				

Fuente: Elaboración propia del tesista.

3.5. Técnicas de recolección de datos

3.5.1. Etapa de campo

La recolección de datos de campo constituye la parte más importante en la caracterización de macizos rocosos. Cuya técnica empleada en la presente investigación es la observación y la caracterización; que consiste en observar atentamente el afloramiento rocoso, fenómeno, hecho o caso, tomar información y registrarla para su posterior análisis. Los instrumentos usados en esta etapa son para la obtención de los datos en campo in situ.



De estos datos se obtienen: características, parámetros y propiedades que definen las condiciones del macizo rocoso, la topografía y geometría del afloramiento de análisis. En esta etapa se realizaron las siguientes actividades:

- Reconocimiento del área de análisis de la investigación.
- Levantamiento topográfico, para la elaboración de los planos de ubicación, geológico, planta, perfil, y secciones.
- Caracterización preliminar mediante el mapeo línea de detalles de aspectos geológicos estructurales y geotécnicos.
- Muestreo de rocas para la realización de ensayos en laboratorio.

3.5.2. Caracterización geotécnica del macizo rocoso.

A través de los trabajos geológicos de campo, se identificaron las diferentes litologías presentes en el área de investigación, el grado de meteorización del macizo rocoso en análisis.

En la caracterización geotécnica del macizo rocoso se realizó un mapeo detallado; tomándose como datos de campo: dirección de buzamiento, buzamiento, espaciamiento, persistencia, apertura, rugosidad, relleno, alteración, resistencia a la compresión simple de las juntas y la presencia de agua, que se determinó en forma cualitativa y cuantitativa; y la correspondiente toma de muestras para realizar pruebas en laboratorio.

3.5.3. Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio se realizaron en el Laboratorio de Geotecnia y Mecánica de Rocas de la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, cuyos ensayos están referidos bajo la normativa del ASTM D 3148, D 2918.

Resistencia a la compresión uniaxial (UCS).

Este ensayo de laboratorio se realizó, para determinar la mecánica de la roca, las propiedades de la roca intacta, propiedades de resistencia, mediante muestras de testigos obtenidos de bloques de roca, extraídas y recolectadas durante los trabajos de campo.

3.5.4. Técnicas de procesamiento de datos

Los datos obtenidos en campo fueron procesados con la utilización de software especializados mediante la aplicación de programas computacionales, Microsoft Excel y



Dips v.6.0. Estos fueron almacenados en histogramas, relacionados con la orientación de la estructura y el análisis de los modos de falla presentes en los macizos rocosos del presente trabajo de investigación.

El programa Dips es un software diseñado para identificar, estimar y analizar las orientaciones medias de las familias de discontinuidades, medidas en el macizo rocoso tomando en cuenta los datos geológicos recolectados en campo y estos nos permiten realizar un análisis cinemático mediante proyección estereográfica los posibles mecanismos de rotura.

3.6. Materiales, instrumentos y equipos.

Los materiales que se utilizaron en el presente trabajo de investigación, son los siguientes:

- Formatos de registro.
- Planos.
- Ábacos y tablas.
- Libreta de notas.
- Tableros acrílicos A4.
- Útiles de escritorio.
- Bolsas de muestreo.

Los instrumentos que se utilizaron para la recolección de datos para la caracterización geomecánica de los macizos rocosos, son los siguientes:

- Brújula Brunton.
- Martillo de geólogo.
- GPS.
- Lupa de geólogo.
- Protractor ruler.
- Flexómetro.
- Wincha de 50m.
- Softwares especializados.

Los equipos utilizados en este trabajo de investigación son los siguientes:

- Estación total
- Sonda saca testigos.
- Cortadora de disco diamantino.
- Balanza electrónica con precisión a 0.01 g.
- Equipo de compresión uniaxial.
- Impresora.
- Cámara.
- Laptop.



CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Ubicación

El presente trabajo de investigación se realizará específicamente en los afloramientos rocosos de la zona denominada Chasca Cocha, el cual está situado en el Distrito de Crucero de la Provincia de Carabaya de la Región Puno.

Ubicación política

Región : Puno
Provincia : Carabaya
Distrito : Crucero
Lugar : Chasca Cocha

Ubicación geográfica

Ubicada entre las coordenadas geográficas:
Latitud sur 14° 20' 40"
Longitud oeste 70° 00' 37"
Altitud 4211 m.s.n.m.

Coordenadas UTM

Zona: 19 L Hemisferio: Sur
Este: 391058.8
Norte: 8413941.3

4.2. Acceso

Para llegar a la zona del trabajo de investigación, se toma de las siguientes rutas como son:

Cuadro N° 21

Accesibilidad

PARTIDA	LLEGADA	DISTANCIA (Km)	TIEMPO (Hrs)	TIPO DE VIA	FRECUENCIA VEHICULAR	SERVICIO DE TRANSPORTE
Puno	Juliaca	42	0.45	Asfaltada	Constante	Combi, Bus.
Juliaca	Azángaro	69	1.20	Asfaltada	Constante	Combi, Bus.
Azángaro	San Antón	48	1	Asfaltada	Constante	Combi, Bus.
San Antón	Dv. Crucero	37	0.45	Asfaltada	Constante	Combi, Bus.
Dv. Crucero	Presa Chasca Cocha	53	1	Afirmada	Particular	Particular.

Fuente: Elaboración propia del tesista.



4.3. Clima vegetación

4.3.1. Clima

Las condiciones climáticas en el ámbito geográfico que abarca el presente trabajo de investigación, tienen un rango de 8° C a 11° C y las variaciones estacionales no exceden de 5° C, por tanto, corresponde al tipo semi-seco y frío en su generalidad, existiendo temperaturas mínimas en la temporada de otoño e invierno llegando por debajo de 0° C.

El trabajo de investigación, se encuentra dentro de un clima frígido de alta montaña con características de Clima frío boreal-seco en invierno (DWB) con temperatura media superior a 10°C, por lo menos durante cuatro meses en épocas de avenida. (Clasificación climática de Köppen W.) y en épocas de estiaje las temperaturas descienden (-15°) aproximadamente.

4.3.2. Lluvias

Las precipitaciones pluviales mayormente se presentan entre los meses de diciembre a marzo; época apropiado y recomendable para la construcción de estructuras de concreto.

4.3.3. Temperatura

La temperatura es uno de los elementos fundamentales que condicionan el comportamiento del clima, siendo variada e irregular debido a diversos factores, como la ubicación geográfica, altitud, nubosidad, entre otros. La temperatura en las madrugadas llega a -15°C bajo cero en día varían de 8° a 11°C.

4.3.4. Vientos

Los vientos son variables debido a la velocidad, frecuencia y dirección de estos, resultado del flujo atmosférico en el ámbito de la zona de estudio es seco a húmedo. El periodo frecuentemente mayor de vientos, son los meses de agosto y octubre.

4.3.5. Heladas

Durante la estación de invierno (mayo, junio, julio, agosto) se presentan las heladas en dicha zona de investigación. Así mismo, hacen su presencia después del invierno, es decir, en la estación de la primavera (setiembre). En el ámbito de estudio las heladas son más intensas en los meses de junio, julio y agosto.



4.3.6. Vegetación

La vegetación es variada típico del altiplano puneño, los más resaltantes de esta microcuenca son: Ichu, iru y chilligua.

4.4. Hidrografía

La red hidrográfica que discurre en superficie de la zona de estudio, forma parte de la cuenca del Titicaca.

El área drenada de la micro cuenca de la zona de investigación y los ríos próximos, están delimitada por la Cordillera de Carabaya, la laguna constituye la divisoria de aguas con los ríos del sistema hidrográfico del Amazonas y la vertiente del Pacífico.

El río crucero, próximo a la zona del presente trabajo de investigación constituye en el colector principal de los distintos sistemas de drenaje, que forman parte de la cuenca endorreica del Titicaca, siendo un afluente del río Azángaro.

4.5. Laguna Chasca Cocha

La laguna Chasca Cocha, es de origen glaciar, que es la principal fuente de escorrentía que drena al río Crucero.

La acumulación de aguas se produce en una depresión formada por la erosión glaciar y la barrera formada por un depósito morrénico.

4.6. Geomorfología

En el presente trabajo de investigación, se tiene una topografía muy variada, reconociéndose sectores de suave pendiente, superficies onduladas que contrastan con paisajes agrestes.

La zona evaluada se encuentra sujeta morfo estructuralmente por el flanco Oriental de la Cordillera de los Andes en el Sureste peruano; éste accidente geomorfológico ha controlado las condiciones climáticas, presentando una variedad de relieves, debido a diferentes procesos geomorfológicos que han actuado sobre las diversas litologías, condicionados por otros elementos morfo estructurales, como la depresión tectónica de Crucero y Herciniana Andina, en las partes altas del distrito Ñuñoa. los bloques paleozoicos levantados, así como la variación de las condiciones climáticas.

En la zona de estudio de este trabajo de investigación, se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas:



4.6.1.1. Relieve cordillerano

Unidad geomorfológica que comprende entre 4800 – 6000 m.s.n.m. Constituidos con nieves perpetuas, producto de las últimas glaciaciones más recientes en la zona del Chaska Cocha, que presenta fuertes pendientes y entre otros casos picos pronunciados los mismos que son afectados por desplazamientos laterales, rupturas en los casquetes glaciares que ocasionan caída de bloques de pizarras, andesitas, granodioritas y detritos de roca descompuesta; tectónicamente están deformados por la tectónica Herciniana y Andina, en las partes altas del distrito Ñuñoa.

Regionalmente en el área de estudio en su mayor parte es de relieve accidentado, conformando una cadena de nevados y montañas, mientras que el área con relieve homogéneo solo se observa en la pampa de Crucero y áreas aledañas que se encuentran conformadas por colinas.

La glaciación cuaternaria es el agente que actuó en el modelado del terreno de toda la zona de estudio, pero es el relieve cordillerano en donde se nota la acción del hielo sobre la roca.

4.6.1.2. Pre cordillera de Carabaya

Esta unidad esta al SO del valle de rio Grande y sus límites se extienden fuera de la zona de estudio. La precordillera se orienta de SE-NO y se caracteriza porque las colinas tienen perfiles redondeados, cuyas crestas están entre 4,400 a 4,800 m.s.n.m. y algunos superan los 5,000 m.n.s.m (Cerro Yanaccacca llega hasta 5,143 m.s.n.m., esta cordillera esta modelada sobre rocas del Paleozoico y parcialmente sobre rocas Cretáceas.

4.6.1.3. Valle fluvioglaciario

Esta unidad geomorfológica se presenta en vaso de la zona de estudio, presenta pendientes fuertes, moderados, con perfiles asimétricos y están disectados por quebradas.

Forma un nexo entre el relieve cordillerano y el horizonte de las aguas de las lagunas inmersas en la zona de estudio; la glaciación cuaternaria es uno de los agentes modeladores, dando lugar y origen al valle.

4.6.1.4. Colinas

En la zona de estudio se presentan elevaciones de terreno con desnivel inferior a 300 m, cuyas laderas se inclinan en promedio con valores superiores a 16% de pendiente.

4.6.1.5. Terrazas

Las terrazas aluviales o terraza de río constituyen pequeñas plataformas sedimentarias o mesas construidas en un valle fluvial por los propios sedimentos del río que se depositan a los lados del cauce.



4.6.1.6. Lecho Aluvial altiplánico

Lo encontramos en la escorrentía proveniente de la laguna Chasca Cocha, se caracteriza por una sección transversal en forma de “V”, con pendientes moderadas, emplazadas en un fondo rellenado por depósitos fluviales.

4.6.1.7. Drenaje

El río Crucero es el colector principal del área de estudio, el proyecto se sitúa aguas arriba, tiene su origen en los deshielos de la cordillera oriental, cuyo caudal es incrementado por pequeños tributarios en la naciente y en el trayecto por quebradas y ríos tributarios, finalmente el río Azángaro confluye con el río Pucará dando lugar al río Ramis que desemboca en el lago Titicaca; el modelo de drenaje que presenta la cuenca es dendrítica a subparalela.

4.7. Geología Regional

Representada por pizarra, cuarcita y filitas prácticamente la mayor parte de la cordillera oriental, variando hacia la cuenta del Titicaca constituido de areniscas, conglomerado, lutitas rojas y verdes, calizas bioclásticas, cuaternario constituido de limos, arcillas, arenas y material detrítico heterogéneo y los intrusivos. (Antenor, 1996).

4.8. Estratigrafía regional

4.8.1. Paleozoico

4.8.1.1. Formación Sandia (Os-s)

Esta unidad estratigráfica solo aflora en el sector norte de la región (cerca del Cerro Pichinchani). La formación Sandia pertenece a la edad Ordovícico Superior, fue descrita por LAUBACHER (1973) en el valle de Sandia. Su contacto estratigráfico con la unidad infrayacente no se observa, mientras que el contacto con la Formación Ananea es anormal a través de un sobrecurrimiento. En la base se presentan un conjunto de siltitas (Pizarras silicificadas) finas de 150 m de espesor, con una foliación paralela denominada como de color gris oscuro a negro; inmediatamente después, vienen unos 700 m de una alternancia métrica o milimétrica de areniscas de grano fino, con cristales de muscovita y siltitas de grano fino, también con cristales de muscovita distribuidas subparalelamente a la esquistosidad, en bancos cuyos espesores varían entre 1 y 5 m. también se tiene areniscas y meta areniscas grises de grano fino micáceas finamente laminadas, pizarras limolíticas con microdunas y laminación paralela. GONZALES, et. al (2012) también incluyen dentro de la litología de esta formación a filitas deformadas con alto contenido de sulfuros.



4.8.1.2. Formación Ananea (SD-a)

La formación Ananea pertenece a la edad Silúrico – Devónico con una potencia promedio de 500 metros, Toma su nombre de la localidad de Ananea en el departamento de Puno donde Laubacher 1978, la describe como una gruesa secuencia de pizarras y esquistos aflorantes a lo largo de la ruta entre Ananea a Cuyo – Cuyo. Esta unidad sobre yace concordante sobre los niveles rítmicos de la Formación Sandia. En la región conforma los núcleos de los sinclinales a lo largo de los valles de Sandia y Tambopata. Consiste de esquistos gris oscuros afectados por una esquistosidad de flujo que en muchos casos impide observar la estratificación, estando plegada fuertemente en varios sectores. Sus niveles inferiores conservan láminas de areniscas finas en estructuras lenticulares. A partir de este punto, esta formación pierde paulatinamente su metamorfismo con dirección NE; es así que al norte de Camarón y río Lanza, esta unidad presenta la apariencia de lutitas y limoarcillitas micáceas, conservando una incipiente esquistosidad y de bajo ángulo con respecto a la estratificación. Entre Sandia y Huancaluque se midió un flanco del sinclinal donde aflora la Formación Ananea en dirección SO.

Las minas de la Rinconada, Pampa Blanca, Chaquiminas y otros están enmarcadas dentro de la Formación Ananea que representa a secuencias pelíticas depositadas en un ambiente marino algo profundo. Sus primeros niveles pueden corresponder a sedimentos turbidíticos y flysh, consecuencia de la inestabilidad tectónica a finales del Ordoviciano.

4.8.1.3. Grupo Ambo (Ci-a)

En el altiplano de la región sur, la unidad ha sido descrita por Klinck B. y Palacios O. Y otros (1991). La unidad genera una morfología moderada a abrupta dependiendo de la estructura que esté formando.

En base a su posición estratigráfica, ya que sobre yace a la Formación Ananea del Siluro-Devoniano e infrayace al Grupo Tarma del Carbonífero Superior; así como por la presencia de restos fósiles encontrados en esta unidad se la puede considerar en edad como Carbonífero Inferior (Mississipiano). Constituido por conglomerados, arenisca con estratificación oblicua, areniscas sub arcosas y lutitas negras, su espesor alcanza 2000 metros. Próximo a la laguna Cocaña se tienen pizarras carbonosas intercaladas con lutitas en capas delgadas característicamente laminares y areniscas cuarzosas de grano fino gris oscuro en capas tabulares de 30 a 40 cm.

4.8.1.4. Grupo Tarma (Ci-a)

Denominado así por Dumbar G. y Newell N. (1946) para referirse a una secuencia pelito-calcárea que aflora en el Perú central.



La unidad está conformada por una intercalación de areniscas, calizas y limoarcilitas, cuyas proporciones resultan ser variables según la aparente paleogeografía que tuvo durante su denostación.

La parte media de la secuencia se tiene una intercalación de areniscas, calizas, limoarcilitas abigarradas, en capas delgadas. Las areniscas son de grano fino y cemento calcáreo con algunas estructuras sedimentarias como flaser bedding, ripples y otros niveles con laminación horizontal paralela.

Al tope se tiene una serie de secuencias estratificadas más continuas con intercalaciones de areniscas feldespáticas de color gris verduzco en capas tabulares de grano medio con areniscas calcáreas, calizas con presencia de óxidos de fierro y algunos niveles con nódulos de chert las areniscas presentan niveles con estratificación sesgada de mediana y pequeña escala.

4.8.1.5. Grupo Copacabana (Pi-c)

Douglas J. (1920), describe por primera vez una secuencia calcáreo-pelítica en la península de Copacabana en el Lago Titicaca Bolivia.

Su expresión morfológica es característica y generalmente abrupta, dado que genera grandes escarpas verticales en los que destacan nítidamente sus planos de estratificación. Estos afloramientos resultan fácilmente distinguibles a la distancia, debido al color blanquecino que presentan sus rocas componentes en superficie alterada. Estas características sumadas a su estratificación marcada facilitan su identificación.

El Grupo Copacabana tiene un grosor de 500 m. y está conformado por calizas micríticas, espáticas, caliza arenosa y limoarcilitas calcáreas, predominantemente se presentan en capas gruesas. El Grupo Copacabana suprayace concordantemente al Grupo Tarma, habiéndose colocado el contacto donde terminan las areniscas y comienza una sucesión enteramente calcárea, infrayace en algunas partes en discordancia angular suave y en otras en concordancia a las areniscas rojas y volcanitas del Grupo Mitu.

Existen muestras paleontológicas recolectadas que reportan la presencia de Neospirifer muestras paleontológicas recolectadas que han sido estudiadas por el INGEMMET en Limbani.

4.8.2. Mesozoico

4.8.2.1. Grupo Cotacucho (Km-c)

Este grupo está formado por areniscas cuarzosas de grano medio, de color rojo – marrón a marrón anaranjado está intercalado con lutitas rojas yesíferas interestratificadas con areniscas arcósicas rojas. Tiene un espesor superior a los 700m y se presenta con buzamientos subverticales. Perteneciente al cretáceo superior.



4.8.2.2. Formación Viquechico (Ks-v)

Circunscrita solamente a la Cordillera Oriental a su facie sedimentaria; se ubica entre los cuadrángulos de Moho, Huancané, Azángaro y Nuñoa (cerros de Quishuarani, Torillo Jarita, Pacahuacha, Chataqueña, Putuni, Tarangani). Su litología tipo según PALACIOS et. al, (1993), consta de: arenisca cuarzosa de grano fino a medio, redondeados, blanquecina con laminación cruzada; lutitas y fangolitas que varían de marrón rojizo a caqui, gris verdoso purpura a negro, aunque el color no es indicador estratigráfico, los tonos rojo y verde de los sedimentos son los que dominan la mitad inferior de la secuencia y el tono caqui en la mitad superior. Casi toda la secuencia tiene una laminación muy fina y las fangolitas intemperizadas se presentan como pequeños bloques subcuboidales, se observa también huecos tabulares laminación de ondulas y algunas estructuras de escape de agua (PALACIOS et. al, 1993). Así mismo se observan intercalaciones de limolitas endurecidas de 1 a 10 cm. de espesor las cuales muestran como característica ondulas y a menudo señalan en la base ciclos con disminución en tamaño de grano hacia arriba, sus colores son verdes a caqui y pueden ser calcáreas localmente. Las capas de arenisca son duras grises, cuarzosas y de grano medio a grueso de 5 a 30 m de espesor con estratificación cruzada de canal de bajo ángulo, algunas horadaciones tabulares y localmente con laminación de ondulas. Algunos niveles de areniscas calcáreas de grano fino yacen en la parte superior de la secuencia.

4.8.2.3. Formación Muñani (Ti-m)

Sus afloramientos se ubican de forma muy dispersa en la zona central de la región, reposando concordantemente sobre la Formación Vilquechico, como ocurre al NW del Poblado de Vilquechico y en el Cerro Cerazo a 5 km. al N de Moho. Fue descrita por primera vez por NEWELL (1949) y PALACIOS et. al, (1993) menciona que consiste en areniscas anaranjadas a marrón rojizo, friables de grano grueso a fino con estratificación cruzada de canal y con un desarrollo irregular de cuarzo secundario como cemento que da lugar a rasgos escarpados. En algunos lugares la arenisca se halla completamente recristalizada a una cuarcita purpura azulina (NE de la Laguna Huajracota), PALACIOS et. al, (1993). Hay también intercalaciones subordinadas de limolitas marrón rojiza de más de 10 m de espesor. En el cuadrángulo de Moho aflora cerca del Cerro Sillane y alrededores de la Pampa Uncayllani, ya en el cuadrángulo de Putina sus mejores afloramientos se ubican en el Cerro Codi-Buyo, Cerro Amaline, Cerro Velacunca, Cerro Velamocco y Cerro Pinaya.

4.8.2.4. Volcánico Macusani (Ts-m)

Volcánico Macusani está constituido por Ignimbritas, pórfidos dacíticos, con un espesor de 30 metros.



4.8.3. Cenozoico

4.8.3.1. Depósitos Fluvioglaciares y aluviales (Q-fg Q-al)

La acción fluvial se limita al cauce de los riachuelos que conectan a las diferentes lagunas. El cauce fluvial es poco desarrollado con anchos de 2.0 a 3.0 m., el material de relleno proveniente de las laderas de los cerros aledaños a las lagunas existentes dentro del área de estudio está conformado por boleos, gravas subangulosas a subredondeadas de composición calcárea, arenosa y microdiorítica en su mayor parte con arena gruesa y algo de limo depositados y acumulados en los flancos de la Cordillera Oriental, regionalmente el área circundante se caracteriza por acumulaciones de materiales de rocas metamórficas en la parte norte del área de estud.

4.8.3.2. Depósitos morrenicos (Qpl-mo)

Se considera a las acumulaciones sueltas que ocurren rellenando las laderas o flancos de los picos montañosos y colinas producto de la crioclastia y derrubiación de los paquetes sedimentarios expuestos favorecidos por la acción del intemperismo.

Estos tienen gran distribución en los alrededores del embalse constituyendo detritos de talud que cubren en gran parte las vertientes en sus laderas medias y bajas. Los materiales depositados por acción combinada de la gravedad y las lluvias son de naturaleza arcillo-arenosa, englobando bloques, piedras y gravas de composición calcárea.

Cuadro N° 22
Columna lito estratigráfica

EDAD m. a.	EON	ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	POT. (m)	LITOLÓGICA	DESCRIPCIÓN			
Hoy	FANEROZOICO	CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Depósitos fluvio-glaciares y aluviales	50		Limos, arcillas, arenas, material detrítico heterogéneo			
0.005				PLEISTOCENO	Q – fg Q – al	120					
2.5			NEOGENO	PLIOCENO		Volcánicos Macusani	30		Ignimbritos, pórfidos, dacíticos		
07						Ts – m					
38											
			FANEROZOICO	CENOZOICO	TERCIARIO PALEOGENO	EOCENO	Formación Muñani	720		Areniscas. Conglomerados Lutitas Rojas	
						PALEOCENO	Ti – m				
65					MESOZOICO	CRETASICO	SUPERIOR	Formación Vilquechico	550		Lutitas Verdes Arenisca de grano fino y medio. Areniscos cuarzosos sub arcasicos con grano medio. conglomerados
							MEDIO	Grupo Cotacucho	500		
141											
230	FANEROZOICO	PALEOZOICO			PERMICO	INFERIOR	Grupo Copacabana	700		Calizas bioclásticas finos intercalados con areniscos Areniscos cuarzosos de grano fino a medio con tonalidad verdoso	
280											
					CARBONIFERO	PENNSYLVANIANO	Grupo Tarma	Cs – f	700		
						MISISIPIANO	Grupo Ambo	Ci – a	2000		
347	DEVONICO		Formación Ananea	SD – a	500		Pizarras negras, y cuarcita.				
395	SILURICO										
435	ORDOVISICO	SUPERIOR	Formación Sandia	Os – s	2000		Pizarras negras con interrelación de cuarcita y filitas.				

Fuente: Velásquez, (2010). Evaluación del yacimiento Cumuni – Santa Ana. Puno, Perú.



4.9. Geología local

4.10. Paleozoico

4.10.1. Grupo Tarma (Cs-t)

El Grupo Tarma litológicamente se caracteriza por contener una intercalación de areniscas, limoarcilitas y calizas micríticas de proporción muy variable. La morfología que presenta es relativa dependiendo de la posición de las capas ya que puede mostrar morfología suave o abrupta, en el área del embalse del Chasca Cocha la morfología es abrupta. Hacia el lado oeste de la laguna se observa la base de esta unidad que se encuentra concordante sobre las areniscas cuarzosas y limolitas carbonosas del Grupo Ambo.

La secuencia inferior del Grupo Tarma constituida principalmente de areniscas feldespáticas de color verde característico de grano medio a fino, se intercala con areniscas calcáreas de color beige y gris en capas medianas de 20 a 50 cm. de potencia, va acompañado de óxidos de fierro que dan una coloración rojiza, esta formación geológica abarca la laguna Silicucucho y la comunidad de Oskoroque pertenecientes al distrito de Crucero.

4.10.2. Grupo Copacabana (Pi-c)

Se observa en toda el área de embalse y eje de presa, siendo una de las características más resaltantes su expresión morfológica ya que se presenta escarpas verticales notorias y una posición bien definida, buena estratificación de color gris claro, rojizo y beige claro, generando un suelo de color amarillento a rojizo. La litología esencialmente está dada por calizas de color crema, gris oscuro y rojizo, en muchos casos silicificadas y dolomitizadas, con intercalaciones de caliza dolomítica y limoarcillitas calcáreas de color gris con intercalaciones de óxido de fierro.

4.10.3. Grupo Mitu (Ps-mi)

En el área de estudio, este grupo aflora por el Sureste del eje de la presa y está constituido por arenisca rojiza y gris cubierta por un conglomerado arenoso, se describe también areniscas, grawackas de grano fino en estratos delgado con intercalaciones de lutita, derrames volcánicos, lavas, brechas porfíricas y piroclastos riolíticos a andesíticos de naturaleza plagiorfírica de color rojizo a violáceo; muestra una potencia aproximada de 2750m. Este grupo pertenece al pérmico medio.

4.11. Mesozoico

4.11.1. Intrusivo Microdiorítico (Nm-md)



Son cuerpos intrusivos microdioríticos, que afectan principalmente a rocas Paleozoicas tales como Grupo Ambo, Tarma y Grupo Copacabana. Su textura fina presenta pequeños cristales de color verdusco además muestra una ligera cloritización, seritización, débil argilitización y una incipiente epidotización. El aspecto que presenta es macizo con un fuerte diaclazamiento perpendicular en la zona Norte del área de estudio, este macizo forma parte de la laguna Naranjacochoa.

4.12. Cenozoico

4.12.1. Depósitos Morrénicos (Qpl-mo)

Esta unidad litoestratigráfica aflora en forma disgregada en la zona Sureste y Suroeste del área de estudio que se encuentran por encima de los 4000 m.s.n.m. Estos depósitos no presentan estratificación, se observan bloques dispersos que derivaron después de una actividad glacial, tiene una matriz de arena guijarrosa o grava arenosa, Su composición litológica contiene clastos de areniscas, calizas, chert e ignimbritas. Los depósitos morrénicos tienen una importancia económica debido a su contenido de placeres auríferos, alcanzando valores comerciales, sobre todo las morrenas provenientes de la Cordillera Oriental más no las que provienen de la pre-cordillera del Carabaya tal es el caso de nuestra área de estudio. Se describe que estas geoformas son depósitos porosos que retienen el agua y alimentan manantiales.

4.12.2. Depósitos Glaciofluviales (Qh-gf)

Constan en gran parte de derrubios estratificados, compuestos de gravas y arenas depositadas por agua de derretimiento, formando llanuras de depósitos glaciares a altitudes que han sido alcanzados por el hielo glacial, se observa en el área de estudio en la zona Sur del eje de la presa Chasca Cocha, sector que está por encima de los 4000 m.s.n.m (Cordillera Occidental y Oriental). litológicamente está compuesta por depósitos clásticos de transición, escasa selección, insipiente estratificación y gran extensión; constituidos por arenas gruesas, gravillas, gravas y en menor proporción bloques.

4.12.3. Depósito Aluviales (Qh-al)

La acción aluvial se limita al cauce de los riachuelos que conectan a las diferentes lagunas llegando hasta el Chasca Cocha. El cauce fluvial es poco desarrollado con anchos de 2.0 a 3.0 m., el material de relleno que ha sido depositado en el trayecto de los riachuelos están conformados por arcillas y limos, arenas y gravas no consolidadas depositadas por la corriente de los ríos flujos de agua y corriente laminares. En el área de estudio se tienen materiales aluviales que han sido derivados del retrabajo de detritos glaciares de morrena y de fluvioglaciares de bloques de grava no consolidados y de gravas de canto que han rellenado los valles.



4.13. Geología estructural

El presente trabajo de investigación está relacionado al ciclo evolutivo de la tectónica herciniana y tectónica andina, donde estos movimientos tectónicos han controlado la sedimentación y deformación de las unidades litológicas del paleozoico y consecuentemente del mesozoico las que evidencian una superposición de fases tectónicas. De acuerdo a estas características se puede observar una falla inversa que pone en contacto la formación Ananea contra el grupo ambo, al Oeste de la laguna Cocaña, donde el grupo Tarma suprayace al grupo Ambo.

4.14. Sismicidad

Para el presente trabajo de investigación se tomó en cuenta lo siguiente:

4.14.1. Sismicidad histórica

Los sismos más importantes que afectaron la región, cuya historia se conocen son:

Sismo del 31 de marzo de 1650 con intensidad IX en Paucartambo – Cusco y V en Puno.

- El sismo de Ayapata – Puno de 1747 con intensidad VIII en el Distrito de Ayapata Provincia de Carabaya región de Puno.
- El sismo del 9 de abril de 1928 en Ayapata – Puno con intensidad local de VIII y V en Puno.
- El sismo del 23 de junio de 2001 a las 15:33Hrs, terremoto de magnitud $m_b=6.9$ ($m_s=7.0$) afectó toda la región sur de Perú, incluyendo las ciudades de Arica e Iquique (Chile) y La Paz (Bolivia); con epicentro cercano a la línea de costa a 82Km NW de la localidad de Ocoña Región de Arequipa. Tiene las particularidades de poseer una ruptura heterogénea y un modo de propagación sísmica con ondulamiento de la superficie. Localidades más afectadas: Ocoña, Camaná, Mollendo, Arequipa, Moquegua, Tacna Grado VII a VIII Mercalli Modificada.

4.14.2. Zonificación sísmica según RNC

De acuerdo al Reglamento Nacional de Construcciones, se tiene la clasificación del área de investigación en el siguiente cuadro:



Cuadro N° 23

Zonificación sísmica según RNC

Zona	2	Mapa de zonificación sísmica
Factor de zona	0.3	Tabla 1
Perfil de suelo	Tipo S1	Roca o Suelos rígidos
Parámetro del suelo	$T_p = 0.4 \text{ s}$	Periodo dominante
Tabla 2	$S=1.0$	Factor de amplificación de suelo

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. CARACTERÍSTICAS GEOMECANICAS DE LOS MACIZOS ROCOSOS

5.1.1. Exploración y muestreo

La descripción y caracterización del macizo rocoso se realizó en los afloramientos que presenta cada margen de talud, para lo cual se realizó un mapeo superficial de estructuras expuestas in situ, utilizando el método de mapeo geomecánico por celdas, este método fue seleccionado por tratarse de una obra civil aplicado al diseño de una presa; que son las estructuras que se presentan a modo de grietas en el afloramiento del macizo rocoso, estas estructuras predominantes son las rocas sedimentarias que comprende las calizas de la Grupo Copacabana, los cuales fueron mapeados y caracterizados, pues estas estructuras son las que controlan la estabilidad y rotura de un talud.

El muestreo de roca intacta (matriz) o inalterada se realizó a partir de un reconocimiento visual que se establecieron de zonas representativas de cada estación geomecánica (muestras de bloques de roca), haciendo una selección de las mismas, la extracción de estos bloques de roca se realizó en el pie del talud sin fisuras y grietas con dimensiones mayores a 20 x 20 cm, pues las probetas talladas o extraídas en laboratorio deben ser cilíndricas con diámetros mayores a 54 mm y su altura debe ser 2.0 veces igual o mayor el diámetro de la probeta, para obtener ensayos óptimos de compresión simple y propiedades físicas según las normas establecidas.

5.1.2. Mapeo de las estructuras geológicas

La caracterización de las estructuras geológicas se realizó con el mapeo geomecánico por celdas, en tres estaciones geomecánicas por cada margen de la presa que se disponen en el pie del talud.

En cada una de ellas se realizó una descripción cuantitativa de todas las estructuras presentes, los parámetros tomados en consideración son los siguientes: Orientación, número de familias (sistemas) espaciamento, persistencia o continuidad, abertura, meteorización o alteración, rugosidad, relleno, resistencia de las paredes de las discontinuidades, agua en las discontinuidades (condiciones hidrogeológicas); la recolección de datos se encuentran en un registro de mapeo geomecánico por celdas, (Ver anexo A-2).

De los datos tomados en campo, son agrupados en familias de discontinuidades principales a través del análisis estereográfico realizado con la ayuda del software Dips v.6.0, cada uno de los parámetros ya agrupados a una familia estos pueden ser procesados estadísticamente, teniendo como resultado parámetros y características típicas para cada una de las familias.



5.1.3. Evaluación Geomecánica

Para la evaluación geomecánica del macizo rocoso en afloramiento, se toman en cuenta los factores que se deben describir “in situ” como son: Identificación, meteorización o alteración y resistencia a compresión simple, el macizo rocoso se encuentra aflorando en la Grupo Copacabana es roca caliza, Las características de resistencia y deformación de los macizos rocosos, dependen fundamentalmente de las características que presentan las discontinuidades estructurales, las cuales actúan como planos débiles.

5.1.3.1. Identificación del Sistema de Discontinuidades

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

La identificación de las discontinuidades, su evaluación influye en el comportamiento y la estabilidad, que dependerá únicamente de los parámetros físicos y comportamiento mecánico. La descripción detallada de las características de discontinuidades se observa en el registro de mapeo geomecánico por celdas correspondiente, para la estación geomecánica zonificada, para ello se ha considerado la rugosidad, resistencia de paredes, apertura y relleno, que determinan el comportamiento mecánico y la resistencia a la corte de las discontinuidades.

5.1.3.2. Orientación e Inclinación

La orientación de estructuras o sistemas de discontinuidades, son datos que se han obtenido en el mapeo geomecánico; por familias de discontinuidades, con datos de buzamiento y dirección de buzamiento; para determinar si los planos de juntas son favorables o desfavorables.

Los valores obtenidos de buzamiento y dirección de buzamiento, (cuadro N°24) que presentan y que va a determinar las familias de discontinuidades correspondientes (Anexo A-2).

Cuadro N° 24

Descripción de buzamiento y Dir/Buzamiento, obtenido de estereograma

Margen	Estación	N° Familia	Buz	Dir. Buz
Margen Derecho	MD-A1	F1	22	256
		F2	43	16
		F3	62	354
	MD-A2	F1	19	185
		F2	66	316
		F3	42	41
	MD-A3	F1	22	237
		F2	72	326
		F3	42	22
Margen Izquierdo	MI-B1	F1	32	200
		F2	72	314
		F3	42	121
	MI-B2	F1	31	188
		F2	63	311
		F3	46	105
	MI-B3	F1	48	146
		F2	38	212
		F3	72	289

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.1.3.3. Espaciamiento de las estructuras

El espaciado de las discontinuidades fue medido in situ colocando una cinta métrica perpendicular a las discontinuidades en el afloramiento de cada estación geomecánica.

El espaciamiento de las estructuras presentes en cada estación geomecánica del talud del análisis del diseño de la presa se muestra en los anexos A-2. A continuación, resumimos los valores obtenidos del análisis correspondiente. Como se muestra en el cuadro N°25.

Cuadro N° 25

Descripción del espaciado

Margen	Descripción	Espaciado	Valoración
Margen Derecho	Moderadamente juntas	0.2 – 0.6 m.	10
Margen Izquierdo	Juntas	0.06 – 0.2 m.	8

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.1.3.4. Continuidad o persistencia

La persistencia de las discontinuidades se cuantificó observando la extensión y/o longitud de las discontinuidades en los afloramientos, en la dirección del rumbo y en la de buzamiento; la persistencia se considera uno de los parámetros más importantes del macizo rocoso en el comportamiento para su estabilidad y el tiempo máximo de auto sostenimiento; que presta un talud natural y uno de los más difíciles de cuantificar.

La persistencia de las estructuras presentes en cada estación geomecánica se presenta a continuación, en el siguiente cuadro.

Cuadro N° 26

Descripción de la continuidad o persistencia

Margen	Descripción	Persistencia	Valoración
Margen Derecho	Continuidad baja	1 – 3 m.	4
Margen Izquierdo	Continuidad media	3 – 10 m.	2

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.1.3.5. Abertura de las estructuras

La abertura de las discontinuidades en campo, fueron medidas y mapeadas con la ayuda de una cinta métrica, estos fueron medidos perpendicular a las paredes adyacentes de una discontinuidad para cada una de las estaciones geomecánicas,

donde el espacio es rellenado por aire, agua o roca triturada. Las aberturas en el afloramiento del macizo no siempre continúan con las mismas características en profundidad, estas han sido evaluadas, en su gran mayoría están rellenos con productos de alteración de la descomposición de la misma.

La descripción se realiza según la valoración, adoptando los valores medios más representativos de cada una de ellas que se presenta a continuación:

Cuadro N° 27

Descripción de la Abertura

Margen	Descripción	Abertura	Valoración
Margen Derecho	Moderadamente abierta	1 – 5 mm.	1
Margen Izquierdo			

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.1.3.6. Rugosidad

La rugosidad presente en cada una de las discontinuidades se caracteriza, en las fichas del mapeo geomecánico por celdas in situ (anexo A-3), la rugosidad la pared o labio de las discontinuidades fueron medidos con la clasificación de perfiles típicos de rugosidad y valores asociados al coeficiente de rugosidad JRC.

Del mapeo realizado en campo y datos procesados, los resultados se muestran en el cuadro N° 28; este parámetro es muy importante ya que controla la estabilidad estructural de los bloques presentes en el talud.

Cuadro N° 28

Descripción de la Rugosidad

Margen	Estación	Descripción	Valoración
Margen Derecho	MD-A1	Ligeramente rugosa	3
	MD-A2	Lisa	1
	MD-A3	Ligeramente rugosa	3
Margen Izquierdo	MI-B1	Ligeramente rugosa	3
	MI-B2	Lisa	1
	MI-B3	Ligeramente rugosa	3

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.1.3.7. Relleno

La caracterización de relleno en las estructuras presentes en cada estación geomecánica se realizó en campo in situ (Anexo A-3), tomando en consideración el material que se encuentra separando las paredes adyacentes de una discontinuidad; los rellenos fueron reconocidos según el material de relleno que presentan las discontinuidades.

Cuadro N° 29

Descripción del relleno en las discontinuidades

Margen	Descripción	Valoración
Margen Derecho	Suave < 5 mm.	1
Margen Izquierdo		

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.1.3.8. Meteorización o Alteración

En la zona de estudio, la evaluación de grado de alteración o meteorización del macizo rocoso se realiza por observación directamente en el aforamiento y comparación con los índices estándares recogidos, (ver anexo A-3).

Para la zona de estudio en el talud al estar expuesto a la intemperie y no haber estado sometido a cambios endógenos; no hay presencia de alteraciones hidrotermales significativas de tal manera que se encuentra con una meteorización ligeramente a moderadamente intemperizada. Como se muestra en el cuadro N°30.

Cuadro N° 30

Descripción de Meteorización del macizo rocoso

Margen	Estación	Descripción	Valoración
Margen Derecho	MD-A1	Ligeramente intemperizada	5
	MD-A2	Moderadamente intemperizada	3
	MD-A3	Moderadamente intemperizada	3
Margen Izquierdo	MI-B1	Moderadamente intemperizada	3
	MI-B2	Ligeramente intemperizada	5
	MI-B3	Ligeramente intemperizada	5

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.1.3.9. Agua en Discontinuidades

En la zona de estudio se tiene dos estaciones bien determinadas, temporada de estiaje y la temporada de avenidas.

El agua en el interior de un macizo rocoso procede generalmente del flujo que circula por las discontinuidades (permeabilidad secundaria), aunque en ciertas rocas

permeables las filtraciones a través de la matriz rocosa (permeabilidad primaria) pueden ser también importantes.

Cuadro N° 31

Descripción Agua en las Discontinuidades

Margen	Descripción	Valoración
Margen Derecho	Ligeramente Húmedo	10
Margen Izquierdo		

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.1.3.10. Permeabilidad del macizo rocoso

La permeabilidad del macizo rocoso depende de la abertura y tipo de relleno que presente este; también de la permeabilidad de la matriz rocosa, por tanto, el análisis de filtraciones se efectúa para calcular el volumen de pérdidas de agua en cada uno de los embalses a través del cuerpo de la presa y por la cimentación de la misma; así obtener los gradientes hidráulicos respectivos, para la cimentación, filtros, los drenes que se utilizarán y los valores de permeabilidad equivalente; por tanto, para la determinación de las permeabilidades equivalentes se ha considerado el sentido del flujo y la correspondiente orientación de la estratificación.

La abertura se encuentra condicionada por el estado de esfuerzos del macizo rocoso; por tanto, la permeabilidad es también en función de los esfuerzos in situ. Si se considera la discontinuidad plana y limpia, el valor k viene dado por:

$$k = a^2 g / 12 \eta$$

$$k = a^2 \gamma_w / 12 \mu$$

Donde:

a = abertura de las discontinuidades.

g = aceleración de la gravedad.

η = coeficiente de viscosidad cinemática del agua (0.0101 cm²/s a 20°).

μ = coeficiente de viscosidad dinámica del agua (0.001005 kg/(m.s) cm a 20°).

γ_w = Peso específico del agua.

Si consideramos una familia de discontinuidades la permeabilidad depende del grado de espaciado entre los planos y el coeficiente de permeabilidad o la conductividad

hidráulica de un sistema de discontinuidades planas y limpias, con espaciado **b** puede estimarse a partir de las siguientes expresiones empíricas:

$$k_f = a^3 g / 12 \eta b$$

$$k_f = a^3 y_w / 12 \mu b$$

Si se tiene las discontinuidades rellenas, el coeficiente de permeabilidad será menor y la permeabilidad de la matriz rocosa puede influenciar en la permeabilidad global del macizo rocoso; en este caso la permeabilidad del macizo rocoso viene a darse por la siguiente expresión:

$$k = a / b k_r + k_j$$

Donde:

k_r = coeficiente de permeabilidad del material de relleno.

k_j = coeficiente de permeabilidad en la matriz rocosa.

Cuadro N° 32

Valores típicos de permeabilidad en macizos rocosos

ROCA	K(m/s)
Arenisca	10^{-5} a 10^{-10}
Caliza y dolomita	10^{-6} a 10^{-12}
Esquisto	10^{-7} a 10^{-8}
Pizarra	10^{-11} a 10^{-13}
Granito	10^{-9} a 10^{-12}
Lutita	10^{-9} a 10^{-13}
Rocas metamórficas	10^{-9} a 10^{-12}
Rocas volcánicas	10^{-7} a 10^{-12}
Sal	$< 10^{-11}$ a 10^{-13}

Fuente: González de Vallejo (2002).



Para los afloramientos de la presa Chaska Cocha, se tiene:

i. Permeabilidad del afloramiento margen derecho del cuerpo de presa Chaska Cocha.

Datos:

Abertura de fracturas $a = 0.005 \text{ m. (dato más crítico)}$

Gravedad $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Viscosidad cinemática del agua $\eta = 1.01 \text{ E-06 m}^2/\text{s}$

Espaciado de aberturas $b = 0.20 \text{ m. (dato más crítico)}$

P.E. del agua $\gamma_w = 1000 \text{ kg/m}^3$

Viscosidad dinámica del agua $\mu = 0.001005 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$

$k_f = 0.2424 \text{ E} - 05 \text{ m/s}$

ii. Permeabilidad del afloramiento margen izquierdo del cuerpo de presa Chaska Cocha.

Datos:

Abertura de fracturas $a = 0.005 \text{ m. (dato más crítico)}$

Gravedad $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Viscosidad cinemática del agua $\eta = 10.1 \text{ E-06 m}^2/\text{s}$

Espaciado de aberturas $b = 0.11 \text{ m. (dato más crítico)}$

P.E. del agua $\gamma_w = 1000 \text{ kg/m}^3$

Viscosidad dinámica del agua $\mu = 0.001005 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$

$k_f = 0.1333 \text{ E} - 05 \text{ m/s}$

5.1.3.11. Infiltración en el macizo rocoso

La infiltración en los macizos rocosos se viene dando por el flujo de agua que atraviesa el cuerpo rocoso por las discontinuidades y la matriz rocosa, Por tanto, el caudal de infiltración de los afloramientos rocosos se calcula para flujos laminares mediante la



ley de Darcy el cual liga el flujo del agua (caudal) con el gradiente hidráulico, mediante la siguiente formula:

$$Q = K \times i \times A$$

$$A = L \times H$$

Dónde:

K = Coeficiente de permeabilidad.

i = Gradiente hidráulico ($\Delta H/\Delta L$)

L = Longitud de la sección.

H = Altura de la sección.

A = Área de la sección.

Entonces, se tiene:

Afloramiento margen derecho de la presa Chaska Cocha.

$$L = 145.3 \text{ m.}$$

$$H = 5.0 \text{ m.}$$

$$i = 0.01$$

$$A = 726.5 \text{ m}^2$$

$$Q = 1.1761 \text{ E-05 m}^3/\text{s}$$

$$Q = 1.5215351 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Q = 555.360312 \text{ m}^3/\text{año}$$

Afloramiento margen izquierdo de la presa Chaska Cocha.

$$L = 108.6 \text{ m.}$$

$$H = 5.0 \text{ m.}$$

$$i = 0.01$$

$$A = 543.0 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.7238 \text{ E-05 m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0.6253796 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Q = 228.263559 \text{ m}^3/\text{año}$$

Al realizar los cálculos correspondientes, se tienen los resultados del análisis de infiltración de los afloramientos rocosos del margen derecho e izquierdo, estos indican que los caudales que atraviesan el cuerpo de la presa Chaska – Cocha no son significativos.

5.1.3.12. Resistencia de las Paredes de las Discontinuidades.

Para la determinación de los valores de resistencia de las paredes de las Discontinuidades, Los ensayos fueron realizados de acuerdo a la norma ASTM D 3148, D2938; a partir de testigos cilíndricos, cumpliendo con todos los procedimientos y protocolos de trabajo en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de Minas, el equipo utilizado para este ensayo fue una prensa hidráulica de capacidad de 2000 KN de capacidad. (ver Anexo A-4).

La resistencia de las paredes de las discontinuidades (cuadro N°33) influye en su resistencia al corte y en su deformabilidad, esto depende del tipo de matriz rocosa, del grado de alteración y de la existencia de rellenos en discontinuidades.

Cuadro N° 33

Resistencia de las paredes de las discontinuidades

Margen	Descripción	UCS	Valoración
Margen Derecho	Muy dura	100 – 250 MPa	12
Margen Izquierdo			

Fuente: Elaboración propia del tesista.

Cuadro N° 34

Resultados de la resistencia a la compresión simple

Margen Derecho (MD-A1, A2, A3)			
Parámetros Estadísticos	UCS MPa	UCS corregido MPa	UCS corregido (Kg-f/cm ²)
Valor máximo, MAX	127.42	129.14	1316.83
Valor mínimo, MIN	105.17	107.25	1093.60
Mediana, MED	114.79	117.00	1193.07
Valor promedio, MEAN	115.79	117.80	1201.17
Desviación estándar, SDEV	11.16	10.97	111.84
Coefficiente de variación, CV	0.10	0.09	0.09

Fuente: Anexo Ensayo de Laboratorio

Cuadro N° 35

Resultados de la resistencia a la compresión simple

Margen Izquierdo (MI-B1, B2, B3)			
Parámetros Estadísticos	UCS MPa	UCS corregido MPa	UCS corregido (Kg-f/cm2)
Valor máximo, MAX	160.36	161.86	1650.51
Valor mínimo, MIN	130.97	133.54	1361.70
Mediana, MED	156.15	158.99	1621.26
Valor promedio, MEAN	149.16	151.46	1544.49
Desviación estándar, SDEV	15.89	15.59	158.97
Coefficiente de variación, CV	0.11	0.10	0.10

Fuente: Anexo Ensayo de Laboratorio.

5.2. CLASIFICACIÓN GEMECANICA DE LOS MACIZOS ROCOSOS

La caracterización geomecánica se define por las propiedades mecánicas del macizo rocoso, es decir de las discontinuidades y de la roca intacta del área de investigación, valiéndonos de metodologías para la caracterización de macizos rocosos, ejecución de ensayos de laboratorio, tratamiento y procesamiento de la información.

La clasificación geomecánica del macizo rocoso se realizó para cada uno de los tramos, a partir de mapeo lineal realizado in situ, de las cuales se obtuvieron el índice RQD, los valores de las clasificaciones RMR, Q y GSI.

5.2.1. 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 lineal determinadas al realizar el levantamiento litológico-estructural, y por el mapeo por celdas, calculados con la ecuación; los resultados obtenidos del RQD calculados a partir del número de fisuras por metro (espaciamiento de las discontinuidades), que se presentan en el cuadro N°36, este muestra los valores de RQD característicos para cada una de las zonas de análisis del mapeo geotécnico realizado.

Entonces, calculamos el índice de roca teniendo en cuenta la siguiente fórmula:

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

Donde: λ es el número de juntas por metro lineal.

Reemplazando en la fórmula propuesta, se tiene:

Cuadro N° 36

Descripción de índice de calidad de roca

Margen	Estación	Calidad	λ (fra/m)	RQD prom	Valoración
Margen Derecho	MD-A1	Buena	5.5	89.5	17
	MD-A2	Buena	5.7	88.6	17
	MD-A3	Buena	5.4	89.7	17
Margen Izquierdo	MI-B1	Buena	9.1	76.9	17
	MI-B2	Buena	9.4	75.6	17
	MI-B3	Buena	7.9	81.1	17

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.2.2. Clasificación RMR (Bieniawski)

Para el cálculo de RMR se ha considerado resistencia a la compresión simple, índice de la calidad de roca RQD, espaciamento de las discontinuidades, estado de las discontinuidades, flujo de agua en las juntas y la orientación de las discontinuidades, son estados de las discontinuidades primordiales, resultado de las sumatorias será el resultado final para RMR_{89} , para lo cual se tiene el siguiente cuadro.

Cuadro N° 37

Resultados de valores de RMR_{89}

Margen	Estación	RMR_{Basic}	$RMR_{Corregido}$	Clase	Calidad
Margen Derecho	MD-A1	63	58	III A	Regular
	MD-A2	57	52	III A	Regular
	MD-A3	61	56	III A	Regular
Margen Izquierdo	MI-B1	57	52	III A	Regular
	MI-B2	57	52	III A	Regular
	MI-B3	59	54	III A	Regular

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.2.3. Clasificación por el Sistema (Q)

Para el cálculo del índice **Q**, se ha considerado los parámetros del RQD, número de familias, rugosidad, alteración y presencia de agua en las discontinuidades; así mismo el factor de reducción por tensiones, haciendo uso de las tablas de valores de los seis parámetros característicos del sistema **Q**.

Entonces, calculamos el índice **Q** teniendo en cuenta la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Dónde:

RQD: Designación de la calidad de la roca.

J_n: Número de familias de discontinuidades.

J_r: Numero de rugosidad de las discontinuidades.

J_a: Numero de alteración de las discontinuidades.

J_w: factor de reducción por presencia de agua en las discontinuidades.

SRF: factor de reducción por tensiones.

Cuadro N° 38

Resultados de valores de Sistema Q

Margen	Estación	Q	Parámetro	Descripción
Margen Derecho	MD-A1	7.5	4 – 10	Regular
	MD-A2	4.94	4 – 10	Regular
	MD-A3	7.47	4 – 10	Regular
Margen Izquierdo	MI-B1	4.27	4 – 10	Regular
	MI-B2	4.20	4 – 10	Regular
	MI-B3	4.50	4 – 10	Regular

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.2.4. Clasificación por el método GSI

Los valores del índice de resistencia geológica GSI se obtuvieron con la correlación del RMR de Bieniawski, para lo cual se consideró la recomendación dada por (Hoek, 2005), donde se menciona que el GSI es igual al RMR - 5, cuando el RMR > 23; y si RMR < 23, entonces no puede estimarse el valor de GSI debido a que la estimación resulta poco confiable.

Los resultados obtenidos del GSI, mediante la correlación con el RMR, para cada uno de los tramos mapeadas por línea de detalles, se muestran en el Anexo A-6, del presente trabajo de investigación.

El resumen de estos datos se muestra en el cuadro N° 39, estos valores de GSI indican el índice de calidad del macizo rocoso, y también se incluye el índice de calidad Q de Barton, determinado a partir de la correlación del RMR; que constituye a cada estación geomecánica.

Cuadro N° 39

Resultados de valores del índice GSI

Margen	Estación	GSI	RMR	Q	Símbolo
Margen Derecho	MD-A1	63	58 - III A	7.50	LF/R
	MD-A2	57	52 - III A	4.94	LF/R
	MD-A3	61	56 - III A	7.47	LF/R
Margen Izquierdo	MI-B1	57	52 - III A	4.27	F/R
	MI-B2	57	52 - III A	4.20	F/R
	MI-B3	59	54 - III A	4.50	F/R

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.3. PARAMETROS GEOTECNICOS FUNDAMENTALES

5.3.1. Análisis de Estabilidad de Taludes

El análisis de estabilidad de taludes en los macizos rocosos no puede realizarse a nivel general, sino talud por talud, por las características que constituye el macizo rocoso en cada talud; también no existe una solución única para análisis, sino varias alternativas como los métodos empíricos, cinemáticos, analíticos, numéricos y estadísticos que fueron descritos en apartados anteriores, cada uno de estos métodos de análisis tienen características muy particulares, algunos son más complicados que otros y a la vez son más confiables.

La etapa en la que se encuentre el proyecto y la magnitud, se realizan los análisis de estabilidad con mayor o menor detalle, es así que teniendo en consideración este criterio; los métodos empíricos son utilizados a nivel de perfil en un estudio, mientras en una etapa de operación será necesario un análisis por métodos cinemáticos, analíticos, numéricos y estadísticos.

El método empírico es muy sencillo y práctico de utilizar, pero no ofrece valores confiables. En cambio, un análisis de estabilidad por el método estereográfico o cinemático ayuda a identificar la probabilidad de falla en los macizos rocosos como los modos de falla planar, por cuña, vuelco, y circular, pero este método tampoco da un valor



cuantitativo o cualitativo de estabilidad, este método es de suma importancia para un posterior análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite o analítico, ya que determina los modos de falla que se presentan en el talud. El método de equilibrio límite, el cual trabaja con datos de parámetros geométricos geotécnicos del talud, y mecanismos de rotura más comunes obteniendo valores como el factor de seguridad y la probabilidad de falla los cuales hacen más confiables los resultados. Mientras que la aplicación del método numérico en taludes afronta el análisis de roturas más complejas, es el más complicado ya que involucra tener más datos de campo y laboratorio, para un correcto análisis, y los métodos estadísticos es a través de la presentación de las técnicas de análisis de sensibilidad, sin embargo, se puede considerar que es muy poco común y complicado.

Los métodos de equilibrio límite o analíticos son los más utilizados y siguen siendo la base de los análisis de estabilidad de taludes, y están basados en la resolución exacta de las ecuaciones de equilibrio, permiten obtener soluciones exactas; por ello resultan fáciles de aplicar en muchos casos y muy adecuados para la realización de un análisis.

5.3.2. Análisis de Estabilidad por el Método Estereográfico o Cinemático

El análisis de estabilidad, por el método estereográfico o cinemático es de suma importancia ya que este método ayuda a la identificación de los modos de falla más frecuentes y comunes en un talud; no determina el tamaño ni la forma de los bloques, tampoco da un valor cuantitativo del factor de seguridad, pero nos da una idea de cómo podrían producirse la rotura del macizo rocoso en un determinado talud.

Este análisis depende básicamente del número de datos tomados en campo como son: dirección de buzamiento y buzamiento, ya que estos deben ser lo suficientemente representativo para que representen de una mejor manera las orientaciones de las discontinuidades presentes en el talud y así obtener el número de familias de discontinuidades presentes en el macizo rocoso.

El análisis de estabilidad por el método estereográfico, se realizó con la aplicación del software Dips v.6.0, el cual es muy práctico, confiable y la aplicación del mismo para el análisis mediante el método estereográfico o cinemático para taludes en macizo rocoso, que es lo mismo que identificar los modos de falla más comunes en un determinado talud con la utilización de proyecciones estereográficas.



Cuadro N° 40

Datos para el análisis de modos de falla MD-A1

Descripción	Valor
Número de datos	14
Familia de discontinuidades principales F1	22 / 256
Familia de discontinuidades principales F2	43 / 16
Familia de discontinuidades principales F3	62 / 354
Talud	38 / 84
Angulo de fricción	30°

Fuente: Elaboración propia del tesista.

Cuadro N° 41

Datos para el análisis de modos de falla MD-A2

Descripción	Valor
Número de datos	18
Familia de discontinuidades principales F1	19 / 185
Familia de discontinuidades principales F2	66 / 316
Familia de discontinuidades principales F3	42 / 41
Talud	52 / 131
Angulo de fricción	30°

Fuente: Elaboración propia del tesista.

Cuadro N° 42

Datos para el análisis de modos de falla MD-A3

Descripción	Valor
Número de datos	16
Familia de discontinuidades principales F1	22 / 237
Familia de discontinuidades principales F2	72 / 326
Familia de discontinuidades principales F3	42 / 22
Talud	57 / 164
Angulo de fricción	30°

Fuente: Elaboración propia del tesista.

Cuadro N° 43

Datos para el análisis de modos de falla MI-B1

Descripción	Valor
Número de datos	15
Familia de discontinuidades principales F1	32 / 200
Familia de discontinuidades principales F2	72 / 314
Familia de discontinuidades principales F3	42 / 121
Talud	32 / 8
Angulo de fricción	30°

Fuente: Elaboración propia del tesista.

Cuadro N° 44

Datos para el análisis de modos de falla MI-B2

Descripción	Valor
Número de datos	16
Familia de discontinuidades principales F1	31 / 188
Familia de discontinuidades principales F2	63 / 311
Familia de discontinuidades principales F3	46 / 105
Talud	35 / 304
Angulo de fricción	30°

Fuente: Elaboración propia del tesista.

Cuadro N° 45

Datos para el análisis de modos de falla MI-B3

Descripción	Valor
Número de datos	21
Familia de discontinuidades principales F1	48 / 146
Familia de discontinuidades principales F2	38 / 212
Familia de discontinuidades principales F3	72 / 289
Talud	45 / 246
Angulo de fricción	30°

Fuente: Elaboración propia del tesista.

Las principales familias de discontinuidades para las estaciones geomecánicas se muestran en los cuadros N°40 al 45, donde se identificaron para cada estación tres familias predominantes por el análisis estereográfico. Para el tramo del Margen derecho se identificaron tres familias de discontinuidades principales, y tres familias para el tramo del Margen izquierdo.

Cuando los análisis son conservadores y aceptables, se asume a menudo que el ángulo de fricción básico sea de 30°. Los ángulos de fricción básico para las discontinuidades en roca pueden variar cerca de 0° a tan altos como de 60° grados, pero el rango de valores típico es de 25° a 35°; para este análisis adoptamos valores de 30°.

5.3.3. Modos de falla

Los modos de falla para cada talud son muy diferentes, se generan zonas de inestabilidad para cada estación geomecánica de análisis en el estereograma que se identifica la probabilidad de falla, es así que los resultados de estos análisis son expresados en porcentajes y para cada una de las formas de falla, según sea el modo de falla estudiado, se detallan a continuación.

5.3.3.1. Modo de falla planar

La identificación de un posible modo de falla planar en cada talud de análisis, se realizó con las proyecciones estereográficas por métodos cinemáticos con el software Dips v.6.0, mediante tipo de falla planar, considerando restricciones de límites laterales de 20°.

El análisis por el método cinemático para este tipo de falla planar con límites laterales de 20°, se presenta en el cuadro N° 46, del cual se realizó para cada margen y estación geomecánica, la zona más crítica es la de polos que se encuentran sombreadas de color rojo, lo cual representa la probabilidad de falla en porcentajes del modo de falla.

Los resultados obtenidos al realizar este tipo de análisis deben de ser tomados con mucho criterio, ya que necesariamente deberán de ser un fiel reflejo de la realidad en el campo, por lo cual se considera que no presenta falla planar en ninguna de los análisis cinemáticos realizados, con una probabilidad de falla planar total de 0.00% (ver anexo A-5).

Cuadro N° 46

Resultados de modo de falla planar, según su incidencia

Margen	Estación	Intersección de familias	N° Intersec. Críticas	Porcentaje
Modo de falla planar con límite lateral de 20°				
Derecho	MD-A1	Ninguna	0	0.00 %
	MD-A2	Ninguna	0	0.00 %
	MD-A3	Ninguna	0	0.00 %
Izquierdo	MI-B1	Ninguna	0	0.00 %
	MI-B2	Ninguna	0	0.00 %
	MI-B3	Ninguna	0	0.00 %

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.3.3.2. Modo de falla por cuña

El análisis de modos de falla por cuña, también se utilizó las proyecciones estereográficas con la aplicación del software Dips v.6.0, de los polos ploteados se identifica todas las intersecciones formadas entre planos en el estereograma para considerar los puntos de intersección, se observan en las representaciones estereográficas mostrados en los Anexos A-5, las zonas sombreadas de color rojo formado por las intersecciones representan la probabilidad del modo de falla por cuña.

Por este modo de falla por cuña tenemos el margen izquierdo en la estación geomecánica MI-B3, los bloques de este tramo son propensos a fallar estructuralmente por cuña con una probabilidad de 34.76%, puede sufrir una rotura por este método de falla; para lo cual resulta necesario realizar un análisis de estabilidad por el método de equilibrio limite o analítico para determinar el factor de seguridad.

Cuadro N° 47

Resultados de modo de falla por cuña, según su incidencia

Margen	Estación	Intersección de familias	N° Intersec Críticas	Porcentaje
Modo de falla planar con limite lateral de 20°				
Derecho	MD-A1	F2 y F3	5	5.49 %
	MD-A2	Ninguna	0	0.00 %
	MD-A3	Ninguna	0	0.00 %
Izquierdo	MI-B1	Ninguna	0	0.00 %
	MI-B2	Ninguna	0	0.00 %
	MI-B3	F2 y F3	13	34.76 %

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.3.3.3. Modo de falla por vuelco

El análisis para este tipo de falla por vuelco, se realizó mediante el método cinemático para cada estación geomecánica de análisis que se muestra en los Anexos A-5, de los cuales los polos ploteados en el estereograma que se encuentran en la zona crítica es de color rojo sombreado, este valor representa una probabilidad de falla en porcentajes del total de polos para este modo de falla.

El tramo de la estación geomecánica MD-A2 es muy propenso a sufrir una rotura por este tipo de falla con un 16.67%, y el tramo de la estación geomecánica MD-A3 con un 31.25%, para lo cual debería considerarse un análisis de estabilidad por el método de equilibrio limite o analítico, para determinar el factor de seguridad.

Cuadro N° 48

Resultados de modo de falla por vuelco, según su incidencia

Margen	Estación	Intersección de familias	N° Intersec Críticas	Porcentaje
Modo de falla planar con limite lateral de 20°				
Derecho	MD-A1	Ninguna	0	0.00 %
	MD-A2	F1 y F2	1	16.67 %
	MD-A3	F1 y F2	5	31.25 %
Izquierdo	MI-B1	Ninguna	0	0.00 %
	MI-B2	Ninguna	0	0.00 %
	MI-B3	Ninguna	0	0.00 %

Fuente: Elaboración propia del tesista.

5.4. Selección del tipo de presa

Para la selección de tipo de presa existen casos excepcionales, la selección del tipo de presa más adecuada técnica o económica para un emplazamiento dado, podrá hacerse a simple vista. Sin embargo, normalmente se requieren de tanteos técnico-económicos para poder tomar las decisiones correctas con el criterio apropiado.

La elección depende de la disponibilidad de mano de obra y maquinaria o de la facilidad de acceso al emplazamiento. Estas consideraciones cobran particular importancia cuando el tiempo para el desarrollo de una presa es un factor restrictivo.

El mejor tipo de presa para un determinado emplazamiento, se elige teniendo en cuenta las características de cada tipo y relacionándolas tanto con las características geológicas del propio emplazamiento y adaptación a las necesidades que la presa trata de servir, como a las limitaciones impuestas por razones económicas o de seguridad.

La elección definitiva de un tipo de presa, se hace entonces luego de conocer todos estos factores. Normalmente el factor que más influye es el costo, también existen otros factores más importantes que intervienen en la elección del tipo de presa que se va a ejecutar teniendo en cuenta la geomorfología, y entre otros como:

- Topografía
- Geología y condiciones de cimientos
- Materiales disponibles

Por las condiciones presentadas para este diseño de presa, según la topografía presentada y las dimensiones de la cerrada o boquilla donde se emplazarán las



estructuras de cimentación se plantea construir una presa por gravedad de concreto, ya que tiene como objetivo fundamental el almacenamiento de agua para riego.



VI. CONCLUSIONES

- Las características geomecánicas de los macizos rocoso, según sus propiedades geomecánicas indican que son muy favorables para el diseño de la presa Chasca Cocha - Crucero – Carabaya – Puno.
- Se determinó que la clasificación geomecánica de los macizos rocosos son de calidad buena a regular y moderada a levemente fracturada, según los sistemas de clasificación RMR, Q y GSI.
- Se determinó que el tipo de roca donde se emplazara la presa, presenta una litología de calizas del grupo Copacabana en ambos márgenes, y los parámetros geotécnicos tales como: RQD promedio varía entre 75 – 90%; resistencia a la compresión simple varía entre 107 - 161 MPa. Para ambos márgenes.



VII. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones adoptadas para la presente investigación, proponen una alternativa de solución al problema de inestabilidad y probabilidad de falla en taludes de macizo rocoso analizados.

- Se recomienda realizar la caracterización global de los macizos rocosos en los afloramientos, para evaluar las fallas más potenciales en los macizos rocosos, mediante los métodos analíticos (equilibrio límite o analítico).
- Se sugiere realizar un estudio de hidrogeológico; usando estaciones meteorológicas cercanas o parecidas al lugar de análisis, para tener un mejor conocimiento del drenaje del macizo rocoso y un adecuado análisis en los taludes.
- Se recomienda continuar con la investigación aplicando un análisis de estabilidad de taludes que permitan calcular el factor de seguridad para un tipo supuesto de falla en el diseño de la presa.



VIII. REFERENCIAS

- ALBARRACÍN, O. Gómez D. (2000). “Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso del sector la sierra” Sogamoso, Boyacá, Colombia.
- APSHANA Y. et al. (2011). “Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso para determinar la estabilidad óptima de los taludes” municipio de Bosconia, departamento del Cesar.
- BARLETTA, I. (2008). Representación Gráfica y Evaluación de Problemas Estructurales en Macizos Rocosos. Universidad Nacional de la Plata.
- BARTON, N., Løset, F., Lien, R. and Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* 6(4), 189-239.
- BARTON, N., Løset, F., Lien, R. and Lunde, J. (1980). Application of the Q-system in design decisions. In *Subsurface space*, (ed. M. Bergman) 2, 553-561. New York: Pergamon.
- BIENIAWSKI, Z.T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. In *Exploration for rock engineering, proc. of the symp.*, (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town: Balkema.
- BLANCO, R. (2005). “Características físico y mecánicos estructurales del macizo rocoso” Proyecto CYTED XIII, Córdoba, Argentina.
- CABRERA, L. J. (2005). Tesis: Estudio de la Estabilidad de Taludes del Tajo Sur y Suro Norte Mina Virgen. Puno: Facultad de Ingeniería de Minas - Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- CHURA, W. (2016) “Caracterización geomecánica del macizo rocoso y su aplicación en el diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la unidad económica administrativa Ana María – L a Rinconada” Tesis. FIM-UNA- PUNO.
- COATES, D. F. (1973). *Fundamentos de Mecánica de Rocas*. Madrid: Blume.
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (1979). “Manual de diseño de obras civiles” B-3.4, México.
- CONDORI A. E. (2010). Evaluación geomecánica de San Andrés de la mina La Rinconada.
- CRUZADO P. B. (2017). Evaluación Geomecánica del Túnel de la Central Hidroeléctrica Potrero – San Marcos – Cajamarca. Tesis Ing. Cajamarca, Perú, UNC.
- DEERE, D.U. and Deere, D.W. (1988). The rock quality designation (RQD) index in practice. In *Rock classification systems for engineering purposes*, (ed. L. Kirkaldie), ASTM Special Publication 984, 91-101. Philadelphia: Am. Soc. Test. Mat.
- DUMBAR G. y NEWELL N. (1946) Geología del Grupo Tarma.
- DOUGLAS J. (1920) Geología del Grupo Copacabana.



- FERRER, M. Y GONZÁLEZ DE VALLEJO, L., Eds. (1999). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. IGME.
- FIGUERAS, M. (2008). Diseño de presas pequeñas, Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de: maestro en ingeniería, MÉXICO.
- FLORES, G., & Karzulovic, A. (2002). Geotechnical Guidelines For A Transition From Open Pit To Underground Mining. Australia: Benchmarking Report, JKMRC.
- GONZÁLEZ, L. (2002). Ingeniería Geológica.
- GUAMÁN, V. Mendieta F. (2013). “Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la cantera de materiales de construcción las Victorias” Universidad de Cuenca.
- HOEK, E. y Brown, E. T. (1985). Excavaciones subterráneas en roca, Mexico, McGraw-Hill.
- ISRM (1981). Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. ISRM Suggested methods. Ed. E.T. Brown. Pergamon Press.
- INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPAÑA. (2006). Manual de Ingeniería 2984 taludes 2da Reimpresión. Madrid: IGME.
- KLINCK B. y PALACIOS O. Y. (1991) Geología del Perú, Grupo Ambo.
- LAUBACHER (1978). Geología de la Formación Ananea formacion Sandia.
- MARINOS, P., & Hoek, E. (2000). GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Melbourne: Technomic Publishing Co.
- PALACIOS, O. DE LA CRUZ, J. DE LA CRUZ, N. KLINCK, B.A. ALLISON, R.A. y HAWKINS, M.P (1993) Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al Oeste del Lago Titicaca – Sur del Peru. Lima.
- PLAZA DIEZ, O. (2005). Geología Aplicada. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- RAMIREZ Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. (2007). Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- RAY K.L. & Joseph B. F. (1978) Engenharia de Recursos Hídricos Editora da Universidade de Sao Paulo e Editora McGraw-Hill do Brasil, Ltda.
- READ, J., & Stacey, P. (2009). Guidelines For Open Pit Slope Design - 1ra edición. Australia: CSIRO Publishing.
- REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES. (2012). CE.020 Estabilización de Suelos y Taludes. Lima - Perú: Macro.
- ROGER, M. (2016). “Análisis de la estabilidad de taludes en macizo rocoso de la carretera Sina Yanahuaya tramo III – Sub Tramo 02, a partir de la caracterización geológica y resistencia a la compresión simple”. Tesis. EPIC. UNAP. PUNO. PERÚ.



- SUAREZ, D. J. (1998). Deslizamiento y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda.
- TEJADA, L. (2012). “Mecánica de rocas”, Escuela de Post Grado Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.
- TORRIJO Echarri, F. J., & Córtes Gimeno, R. (2007). Los Suelos y las Rocas en Ingeniería Geológica. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- VELÁSQUEZ, D. (2010). “Evaluación del yacimiento Cumuni – Santa Ana”. Puno, Perú.
- WYLLIE, D., & Mah, C. (2005). Rock Slope Engineering Civil And Mining - 4th edition. London and New York: Library of Congress Cataloging.



ANEXOS