



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



**ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN EL MACIZO
ROCO SO QUELLORCO MEDIANTE EL METODO DE
ELEMENTOS FINITOS, EQUILIBRIO LIMITE,
PROBABILÍSTICO Y PROPUESTA DE ESTABILIZACION -
PUNO, 2023**

TESIS

PRESENTADA POR:

MARCELO JOSE CUENTAS MERCADO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2024



NOMBRE DEL TRABAJO

**ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES
EN EL MACIZO ROCOSO QUELLORCO M
EDIANTE EL METODO DE ELEMENTOS FI
N**

AUTOR

MARCELO JOSE CUENTAS MERCADO

RECuento DE PALABRAS

30998 Words

RECuento DE CARACTERES

174171 Characters

RECuento DE PÁGINAS

188 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.2MB

FECHA DE ENTREGA

Jan 28, 2024 9:01 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jan 28, 2024 9:03 PM GMT-5

● **12% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base:

- 11% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)


Firma: M. R. Garcia Loayza
MARIANO R. GARCIA LOAYZA
CIP. 26223
INGENIERO CIVIL


Firma: Emilio Castillo Aroni
EMILIO CASTILLO ARONI
DOCENTE UNIVERSITARIO
CIP. 928514

Resumen



DEDICATORIA

A Dios, que me dio la fortaleza necesaria de lograr lo que me propongo, por cada lección que puso en mi camino y que me dio la sabiduría y el coraje para obrar bien, por bendecirme con grandes personas en mi vida y darme la oportunidad de desarrollarme como persona, hijo, hermano, amigo, alumno, pareja y ahora profesionalmente.

A mi madre Angelica Mercado y mi Padre John Cuentas que me brindaron su incondicional apoyo en todo este camino, a quienes espero enorgullecer día a día y de alguna manera devolver lo mucho que han hecho por mí.

A mis hermanos Carla y Juan Diego, a quienes quiero profundamente, augurando un gran futuro para ambos y deseando siempre, Dios nos mantenga unidos.

A mis abuelas Elsa Bustinza y Gladys Aguilar, quienes ya en el cielo les dedico este logro que en algún momento prometí, siempre las llevare en mi corazón.



AGRADECIMIENTOS

Primeramente, debo agradecer a mis padres por apoyarme en este camino de mi carrera profesional, quienes siempre me dieron fuerzas y el respaldo incondicional, también a los sacrificios que siempre hicieron para apoyar mi vocación.

Agradezco a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil y a su plana docente, por los conocimientos y lecciones impartidas durante mi etapa universitaria.

Agradezco a mis amigos cercanos y a mi pareja quienes emocionalmente me dieron su apoyo en los momentos más complicados del desarrollo de este proyecto.

También debo mencionar mi profundo agradecimiento a mi Asesor el Ing Mariano Roberto Garcia, a quien tengo especial estima por todas las lecciones que me entrego en este proyecto y durante los años de universidad.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	22
ABSTRACT.....	23
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	24
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	25
1.2.1. Pregunta general	25
1.2.2. Preguntas específicas.....	25
1.3. HIPOTESIS	25
1.3.1. Hipótesis general	25
1.3.2. Hipótesis específica.....	25
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
1.4.1. Objetivo principal.....	26
1.4.2. Objetivos específicos.....	26
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	26



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. BASES TEÓRICAS	28
2.1.1. Mecánica de rocas	28
2.1.2. Macizos rocosos	28
2.1.3. El talud y sus componentes	29
2.1.4. Estabilidad de taludes en roca	30
2.1.5. Caracterización geológica	31
2.1.5.1. Identificación	31
2.1.5.2. Meteorización.....	33
2.1.6. Caracterización geotécnica.....	35
2.1.6.1. Caracterización de la roca intacta	36
3.5.4.1.1 . Propiedades físicas	36
3.5.4.1.2 Propiedades mecánicas.....	37
2.1.6.2. Caracterización de las discontinuidades	39
3.5.4.1.3 Tipos de discontinuidades	40
2.1.6.3. Resistencia de los labios de la discontinuidad	41
2.1.6.4. Orientación.....	42
2.1.6.5. Espaciamiento	43
2.1.6.6. Persistencia.....	45
2.1.6.7. Rugosidad.....	45
2.1.6.8. Apertura	46
2.1.1.1.1. Relleno.....	46
2.1.6.9. Agua en las discontinuidades.....	47
2.1.7. Clasificación geomecánica del macizo rocoso	48



2.1.7.1. Índice de designación de calidad de la roca (RQD).....	49
2.1.7.2. Clasificación de Biewniawski (RMR)	52
2.1.7.3. Clasificación SMR	54
2.1.7.4. Clasificación GSI	57
2.1.8. Criterios de resistencia del macizo rocoso	59
2.1.8.1. Criterio de resistencia generalizado de hoek – brown	59
2.1.8.2. Criterio de resistencia de Mohr – Coulomb	64
2.1.9. Criterio de resistencia de discontinuidades	65
2.1.9.1. Criterio de resistencia de Barton Bandis.....	65
2.1.9.2. Estimación visual directa del JRC	66
2.1.9.3. Estimación de JCS	67
2.1.9.4. Criterio de resistencia de anisotropía generalizada.....	68
2.1.10. Análisis de estabilidad de taludes.....	70
2.1.10.1.Mecanismos de rotura en taludes	70
2.1.10.2.Rotura planar	71
2.1.10.3.Rotura en cuña	72
2.1.10.4.Rotura por vuelco.....	73
2.1.10.5.Rotura circular.....	74
2.1.10.6.Métodos de análisis de estabilidad de taludes.....	75
2.1.10.7.Métodos empíricos	77
2.1.10.8.Método cinemático o de proyecciones estereográficas.....	78
2.1.10.9.Método de equilibrio límite.....	79
2.1.10.10. Métodos numéricos	95
2.1.10.11. Métodos estadísticos.....	98
2.1.10.12. Análisis pseudoestatico	99



2.1.11. Sistema de estabilización	100
2.1.11.1.Cambio de las dimensiones del talud.....	101
2.1.11.2.Elementos de contención	101
2.1.11.3.Refuerzo de taludes	102
2.1.11.4.Inyección.....	102
2.1.11.5.Cosido con micropilotes.....	105
2.1.11.6.Anclajes.....	105
2.1.11.7.Conducción de aguas subterráneas y superficiales	106
2.1.11.8.Drenaje superficial	107
2.1.11.9.Drenaje subterráneo	108
2.1.12. Ensayos de laboratorio	108
2.1.13. Ensayo de propiedades físicas.....	109
2.1.13.1.Peso unitario y densidad	109
2.1.13.2.Porosidad.....	110
2.1.13.3.Absorción	110
2.1.13.4.Ensayo de compresión uniaxial en roca.....	111
2.1.13.5.Ensayo de tilt test	112
2.2. DEFINICIONES CONCEPTUALES	113
2.2.1. Roca intacta	113
2.2.2. Discontinuidad	113
2.2.3. Factor de seguridad	114
CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO	115
3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	115



3.3.	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PRELIMINAR	115
3.4.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	116
3.4.1.	Población	116
3.4.2.	Muestra.....	116
3.4.3.	Tamaño de muestra	116
3.5.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DEL ESTUDIO.....	117
3.5.1.	Ubicación	117
3.5.2.	Accesibilidad	117
3.5.3.	Aspectos climatológicos.....	118
3.5.3.1.	Temperatura	118
3.5.3.2.	Precipitación.....	119
3.5.3.3.	Velocidad y dirección del viento	120
3.5.4.	Geología	122
3.5.4.1.	Geología regional.....	122
3.5.4.2.	Formación ayabacas (Kis-ayb).....	122
3.5.4.3.	Deposito aluvial (Q-al).....	123
3.5.4.4.	Grupo puno (P-pu)	123
3.5.4.5.	Grupo tacaza (Pn-t).....	123
3.5.4.6.	Geología local	124
3.5.5.	Geomorfología	124
3.5.5.1.	Geomorfología regional	124
3.5.5.2.	Cordillera occidental	125
3.5.5.3.	Altiplano.....	125
3.5.5.4.	Geomorfología local	125
3.5.5.5.	Montañas	126



3.5.5.6. Vertiente aluvial.....	126
3.5.6. Estratigrafía.....	127
3.5.6.1. Estratigrafía regional.....	127
3.5.6.2. Estratigrafía local.....	127
3.5.7. Sismicidad y geodinámica interna.....	127
3.5.8. Hidrología.....	128
3.6. VARIABLES.....	129
3.6.1. Variables dependientes.....	129
3.6.2. Variables independientes.....	129
3.7. PROCEDIMIENTO DE LOS ANALISIS.....	129
3.8. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	131
3.9. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	132
3.9.1. Etapa de campo.....	133
3.9.1.1. Caracterización geotécnica y geológica.....	133
3.9.2. Etapa de laboratorio.....	134
3.9.2.1. Ensayos de laboratorio.....	134
3.9.3. Etapa de gabinete.....	134
3.9.3.1. Clasificación geomecánica.....	134
3.9.4. Análisis de estabilidad de talud.....	135
3.9.4.1. Análisis de estabilidad por el método empírico.....	135
3.9.4.2. Análisis de estabilidad por el método estereográfico o cinemático.....	135
3.9.4.3. Análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite.....	135
3.9.4.4. Análisis de estabilidad por el método numérico.....	136



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	137
4.1.1.	Discontinuidades	137
4.2.	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA	137
4.2.1.	Roca intacta	137
4.2.1.1.	Propiedades físicas de la roca	138
4.2.1.2.	Resistencia a la compresión uniaxial (UCS).....	139
4.2.1.3.	Angulo de fricción residual y básico.....	139
4.2.2.	Discontinuidades	140
4.2.2.1.	Resistencia	141
4.2.2.2.	Espaciamiento	142
4.2.2.3.	Persistencia.....	145
4.2.2.4.	Rugosidad.....	147
4.2.2.5.	Abertura	150
4.2.2.6.	Relleno	153
4.2.2.7.	Presencia de agua en las discontinuidades	155
4.2.2.8.	Meteorización.....	155
4.3.	CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO	156
4.3.1.	Índice de designación de la calidad de la roca (RQD)	156
4.3.2.	Clasificación por el método índice GSI	156
4.3.3.	Clasificación RMR Bieniawski	157
4.4.	VALORACIÓN GEOTÉCNICA	157
4.4.1.	Criterio de resistencia generalizado de Hoek – Brown – Diederichs (macizo rocoso)	157



4.4.2.	Criterio de resistencia de Barton – Bandis Y Mohr Coulomb (estructuras).....	159
4.4.3.	Criterio de resistencia por anisotropia generalizada	160
4.5.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.....	161
4.5.1.	Análisis de estabilidad por el método empírico	161
4.5.1.1.	Índice smr (slope mass rating)	161
4.5.2.	Análisis de estabilidad mediante el método estereográfico o cinemático	163
4.5.2.1.	Rotura planar.....	164
4.5.2.2.	Rotura por cuña.....	165
4.5.2.3.	Rotura por vuelco flexural	166
4.5.2.4.	Rotura por vuelco directo y oblicuo.....	166
4.5.3.	Análisis de estabilidad mediante el método equilibrio límite (MEL) .	167
4.5.3.1.	Rotura circular.....	168
4.5.4.	Análisis de estabilidad mediante método numérico	169
4.5.4.1.	Método de elementos finitos (MEF).....	169
4.5.5.	Análisis de estabilidad mediante método probabilístico	170
4.6.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ANALISIS.....	171
4.7.	PROPUESTA DEL SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN.....	172
4.7.1.	Modificación de la geometría.....	172
4.7.2.	Construcción de elementos de contención	173
4.7.3.	Sistema de drenaje.....	173
4.7.4.	Análisis de estabilidad para el sistema de estabilización.	173
V.	CONCLUSIONES.....	178
VI.	RECOMENDACIONES	179



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	180
ANEXOS.....	186

Área: Geotecnia

Tema: Desplazamientos Suelos y Aludes

Línea de investigación: Geotecnia

Fecha de sustentación: 31 de enero del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Control geológico de las propiedades de la matriz rocosa..... 32
Tabla 2	Esquema de clasificación de la roca según su origen geológico..... 32
Tabla 3	Explicación de la intensidad de desgaste del lecho rocoso en función del nivel de modificación de la piedra. 34
Tabla 4	Clasificación de la resistencia a compresión simple de la roca. 38
Tabla 5	Clasificación de la resistencia a tracción de la roca..... 38
Tabla 6	Tipos de discontinuidades..... 40
Tabla 7	Espaciado de las discontinuidades. 44
Tabla 8	Persistencia de las discontinuidades. 45
Tabla 9	Abertura de las juntas..... 46
Tabla 10	Grado de filtración de una discontinuidad sin relleno. 47
Tabla 11	Grado de filtración de una discontinuidad con relleno. 48
Tabla 12	Calidad de la roca según el porcentaje del RQD. 50
Tabla 13	Parámetros básicos de la clasificación RMR Bieniawski. 53
Tabla 14	Características de las condiciones de las discontinuidades..... 54
Tabla 15	Parámetros de corrección por ajuste de juntas. 56
Tabla 16	Valores correspondientes al factor F4..... 56
Tabla 17	Clasificación de taludes según SMR..... 57
Tabla 18	Clase de macizo según su GSI. 57
Tabla 19	Guía para evaluar el parámetro D en taludes. 60
Tabla 20	Ámbito de aplicación de los métodos numéricos. 96
Tabla 21	Ubicación de los Vértices del Área de Estudio..... 117
Tabla 22	Accesibilidad a el proyecto en la Zona investigada. 117



Tabla 23	Formaciones geológicas encontradas en el área de estudio.	127
Tabla 24	Cuadro de operacionalización de variables.....	131
Tabla 25	Resultados de densidad, peso específico, porosidad y absorción.	138
Tabla 26	Resultados de compresión simple en testigos de roca.	139
Tabla 27	Ángulos de fricción residual de las zonas del talud.	140
Tabla 28	Familias de discontinuidades por cada estación.	141
Tabla 29	Resistencia promedio de las discontinuidades.	141
Tabla 30	Datos de espaciamiento en las discontinuidades.	142
Tabla 31	Datos de persistencia en las discontinuidades.	145
Tabla 32	Datos de rugosidad en las discontinuidades.....	148
Tabla 33	Datos de abertura en las discontinuidades.	150
Tabla 34	Datos del relleno en las discontinuidades.	153
Tabla 35	RQD de cada estación geomecánica	156
Tabla 36	Valores de GSI obtenidos para cada estación geomecánica.	156
Tabla 37	RMR para cada estación.	157
Tabla 38	Parámetros de resistencia de entrada para el cálculo de resistencia de cada talud que compone al macizo rocoso Quellorco.	158
Tabla 39	Valores resultantes de los criterios de resistencia del macizo rocoso Quellorco.....	158
Tabla 40	Valores resultantes de los criterios de resistencia de las fracturas del macizo rocoso Quellorco.	159
Tabla 41	Resistencia direccional del macizo rocoso respecto a las familias de discontinuidades que lo componen.	160
Tabla 42	Valores de entrada para el análisis de estabilidad por el método SMR:	161
Tabla 43	Resultado del análisis de sostenibilidad por el método SMR.	162



Tabla 44	Valores de entrada para el análisis cinemático.	164
Tabla 45	Resultado de probabilidad de falla por mecanismo de rotura planar.	165
Tabla 46	Resultado de probabilidad de falla por mecanismo de falla por cuña.	165
Tabla 47	Resultado de probabilidad de falla por mecanismo de rotura por vuelco directo.	166
Tabla 48	Valores del FS para cada sección del talud por el MEL para falla circular.	168
Tabla 49	Valores del FS para cada sección del talud por el MEF para falla circular.	169
Tabla 50	Valores del FS para cada sección del talud por el método probabilístico para falla circular.	170
Tabla 51	Cuadro comparativo de los valores obtenidos de cada análisis - seco.	171
Tabla 52	Cuadro comparativo de los valores obtenidos de cada análisis - saturado.	171
Tabla 53	Análisis de estabilidad para el sistema de estabilización.	173



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Componentes y partes del talud.	30
Figura 2 Meteorización en diferentes tipos de rocas.	35
Figura 3 Propiedades de las discontinuidades	40
Figura 4 Ábaco para la obtención de la resistencia a compresión simple de una roca a partir de medidas con el martillo de Schmidt tipo “L”	41
Figura 5 Esquema de la representación geomecánica de una discontinuidad.	42
Figura 6 Espaciamiento real de cada discontinuidad.	44
Figura 7. Ejemplo de RQD	50
Figura 8 Índice de resistencia geológica para macizos rocosos articulados.	58
Figura 9 Linealización de la envolvente de Mohr - Coulomb.	62
Figura 10 Criterio de resistencia de Mohr Coulomb	65
Figura 11 Perfiles normalizados para la obtención del JRC.	67
Figura 12 Resistencia a corte direccional.	68
Figura 13 Superficie de falla del camino escalonado.	69
Figura 14 Definición del conjunto de direcciones donde la resistencia del macizo rocoso es igual a la resistencia de la discontinuidad.	69
Figura 15 Modos de falla en taludes de roca.	71
Figura 16 Condiciones para falla planar	72
Figura 17 Condiciones Cinemáticas para el deslizamiento flexural antes del volteo. .	74
Figura 18 Forma típica de superficies de deslizamiento circular.	75
Figura 19 Clasificación de métodos de análisis de estabilidad de taludes.	77
Figura 20 Representación de familias de discontinuidades en la proyección estereográfica.	79



Figura 21	Representación en el estereograma de los principales tipos de rotura.	79
Figura 22	Rotura planar.....	81
Figura 23	Rotura planar con grieta.....	81
Figura 24	Casos de nivel freático en aguas subterráneas	83
Figura 25	Rotura por cuña.....	84
Figura 26	Esquema de fuerzas para obtener el FS de la cuña.....	85
Figura 27	Geometría de la cuña usada para el análisis de estabilidad incluyendo la fricción, la cohesión y la presión del agua en la superficie de deslizamiento.	86
Figura 28	Estereograma con los datos requeridos para el análisis de estabilidad en rotura por cuña.....	88
Figura 29	Condiciones Cinemáticas para el deslizamiento flexural antes del volteo. .	89
Figura 30	Método de la dovela para una rotura circular.....	90
Figura 31	Parámetros geométricos y esquema de esfuerzos en una rebanada para el método de fellenuis.....	92
Figura 32	Método simplificado de Bishop y el método simplificado de Janbu, se examinan los parámetros geométricos y el esquema de esfuerzos en una rebanada.....	94
Figura 33	Malla para el análisis de un talud con elementos finitos.....	98
Figura 34	Método de estabilización por modificación de su geometría.....	101
Figura 35	Elementos de contención para preservar la estabilidad en el talud.....	102
Figura 36	Tipos de inyección en el terreno.....	103
Figura 37	Apertura eficaz o equivalente.....	104
Figura 38	Amarre de una falla rotacional con micropilote.....	105
Figura 39	Elementos de un anclaje.....	106



Figura 40	Consideraciones de protección y conducción de agua.....	107
Figura 41	Ensayo de Tilt Test.	113
Figura 42	Temperatura mín. y máx. promedio en Puno.....	119
Figura 43	Probabilidad diaria de precipitación en Puno	120
Figura 44	Velocidad promedio del viento en Puno.....	121
Figura 45	Orientación del viento en Puno.....	121
Figura 46	Microcuenca y ubicación de ojos de agua.	128
Figura 47	Histograma de precipitación Puno.	129
Figura 48	Procedimiento metodológico	130
Figura 49	Histograma de frecuencia de espaciamiento EST-01.	143
Figura 50	Histograma de frecuencia de espaciamiento EST-02.	143
Figura 51	Histograma de frecuencia de espaciamiento EST-03.	144
Figura 52	Histograma de frecuencia de espaciamiento EST-04.	145
Figura 53	Histograma de frecuencia de persistencia EST-01.	146
Figura 54	Histograma de frecuencia de persistencia EST-02.	146
Figura 55	Histograma de frecuencia de persistencia EST-03.	147
Figura 56	Histograma de frecuencia de persistencia EST-04.	147
Figura 57	Histograma de frecuencia de caracterización de rugosidad EST-01.	148
Figura 58	Histograma de frecuencia de caracterización de rugosidad EST-02.	149
Figura 59	Histograma de frecuencia de caracterización de rugosidad EST-03.	149
Figura 60	Histograma de frecuencia de caracterización de rugosidad EST-04.	150
Figura 61	Histograma de frecuencia de abertura EST-01.	151
Figura 62	Histograma de frecuencia de abertura EST-02.	151
Figura 63	Histograma de frecuencia de abertura EST-03.	152
Figura 64	Histograma de frecuencia de abertura EST-04.	152



Figura 65	Histograma de frecuencia de relleno EST-01.	153
Figura 66	Histograma de frecuencia relleno EST-02.	154
Figura 67	Histograma de frecuencia relleno EST-03.	154
Figura 68	Histograma de frecuencia relleno EST-04.	155
Figura 69	Prueba de hipótesis general.	175
Figura 70	Prueba de hipótesis específica	177



ACRÓNIMOS

MEF	: Método de Equilibrio Límite.
MEL	: Método de Elementos Finitos.
ISMR	: International Society for Rock Mechanics.
JCS	: Joint Wall Compressive Strength.
JRC	: Joint Roughness Coefficient.
RQD	: Rock Quality Designation.
RMR	: Rock Mass Rating



RESUMEN

La extracción de material, en el cerro Quellorco, situado sobre el barrio de la asociación poblacional vecinal (APV) Chejoña III Etapa - Puno, como cantera durante más de 50 años sin una planificación adecuada ha generado un alto riesgo de deslizamientos. Este peligro se agrava debido a la presencia de una urbanización asentada al pie del talud, lo que podría resultar en lesiones graves, pérdidas humanas y costos económicos significativos en caso de un colapso. El objetivo de la investigación es analizar la estabilidad del cerro Quellorco y proponer métodos de estabilización que cumplan con el factor de seguridad mínimo requerido. Se llevó a cabo un diseño de investigación con enfoque cuantitativo – no experimental, de nivel descriptivo – correlacional, dividiendo el trabajo en tres etapas: campo, laboratorio y gabinete. En la fase de campo, se definieron 4 Estaciones Geomecánicas para recolectar 264 datos de discontinuidades y muestras representativas. Estos datos se utilizaron en ensayos de laboratorio, y se llevó a cabo un análisis de estabilidad en condiciones secas y saturadas, estáticas y pseudoestáticas. La caracterización geomecánica reveló valores variables de RMR (40-61), GSI (29-69) y RQD (27.75-92.00). Los análisis de estabilidad mediante el Método de Equilibrio Limite (MEL) y el Método de Elementos Finitos (MEF) revelaron factores de seguridad que oscilan entre 1.109 y 7.568. Los taludes 2, 5, 6, 7 y 8 mostraron inestabilidad, especialmente bajo condiciones de saturación al 75% y pseudoestáticas. La propuesta de estabilización se centra en reducir peso en la cabecera del talud y agregar material en el pie de los taludes críticos (5, 6, 7 y 8). Además, se sugiere un sistema de drenaje de aguas superficiales en todo el macizo y la construcción de bancos en el talud 2 para estabilizar esa sección.

Palabras clave. Estabilidad, Geomecánica, MEL, MEF, Talud.



ABSTRACT

The extraction of material from Cerro Quellorco, located above the neighborhood of the Neighborhood Population Association (APV) Chejoña III Stage in Puno, as a quarry for over 50 years without proper planning, has generated a high risk of landslides. This danger is exacerbated by the presence of a settlement at the foot of the slope, which could result in serious injuries, loss of human life, and significant economic costs in the event of a collapse. The objective of the research is to analyze the stability of Cerro Quellorco and propose stabilization methods that meet the minimum required safety factor. A research design was implemented with a quantitative, non-experimental approach, at a descriptive-correlational level, divided into three stages: field, laboratory, and office. In the field phase, four Geomechanical Stations were defined to collect 264 data points on discontinuities and representative samples. These data were used in laboratory tests, and stability analysis was carried out under dry and saturated conditions, static and pseudo-static. Geomechanical characterization revealed variable values for RMR (40-61), GSI (29-69), and RQD (27.75-92.00). Stability analyses using the Method of Limit Equilibrium (MEL) and the Finite Element Method (FEM) revealed safety factors ranging from 1.109 to 7.568. Slopes 2, 5, 6, 7, and 8 showed instability, especially under 75% saturation and pseudo-static conditions. The stabilization proposal focuses on reducing weight at the slope's crest and adding material at the base of critical slopes (5, 6, 7, and 8). A surface water drainage system throughout the massif and the construction of benches on slope 2 to stabilize that section are suggested. These approaches offer comprehensive solutions to mitigate the risk of landslides.

Keywords: Stability, Geomechanics, MEL, FEM, Slope.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El cerro Quellorco, situado en la periferia de la ciudad de Puno, ha experimentado significativos cambios en las últimas dos décadas debido a la creciente urbanización en sus laderas más inestables. Esta expansión plantea una serie de desafíos, principalmente relacionados con la estabilidad del macizo rocoso, que se ve comprometida por la explotación sin control de la roca caliza y las condiciones climáticas adversas.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cerro Quellorco, ubicado en el Barrio Chejoña III Etapa a medio kilómetro de la plaza cívica de Salcedo en la ciudad de Puno, ha sido utilizado como cantera por más de 50 años, en la actualidad la extracción de material ha cesado, sin embargo, durante esos años no se tuvo una planificación de explotación que preserve la estabilidad de este macizo rocoso. Lo que ha generado un alto riesgo de deslizamiento en diferentes secciones del cerro Quellorco.

En la actualidad y durante los últimos 20 años se ha asentado una urbanización al pie y en la corona de este talud, las mismas que pueden verse afectadas por un eventual deslizamiento del macizo, pudiendo generar lesiones graves o incluso pérdidas humanas y un alto costo económico en la infraestructura de las construcciones aledañas.

Es esencial efectuar una caracterización detallada del macizo rocoso y examinar las propiedades mecánicas y físicas de la formación rocosa, con estos valores elaborar un modelo digital con los métodos MEL, MEF, probabilístico y calcular su estabilidad, primeramente, en condiciones actuales y, para concluir, con la implementación de un



método de estabilización que sea validado por factores de seguridad aceptables, mayores a 1.5.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Pregunta general

- ¿Cuál es la estabilidad de los taludes críticos del cerro Quellorco, analizados con el Método de Equilibrio Limite, Método de Elementos Finitos y Método Probabilístico expresados en factores de seguridad, que determinaran el método de estabilización que mejor se adapta al macizo?

1.2.2. Preguntas específicas

- ¿Cuáles son los valores del Factor de Seguridad del Macizo, analizados mediante el Método de Equilibrio Limite, Método de Elementos Finitos y el Método Probabilístico?
- ¿Cuál es el diseño del sistema de estabilización más óptimo que se adapte al macizo rocoso del cerro Quellorco?

1.3. HIPOTESIS

1.3.1. Hipótesis general

- Los valores del Factor de Seguridad resueltos por los MEL, MEF y Métodos probabilísticos oscilan entre los valores de 0.7 a 1.5.

1.3.2. Hipótesis específica

- El método de estabilización que se adapta al macizo rocoso es la construcción de bancos.



1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo principal

- Analizar la estabilidad del cerro Quellorco mediante el Método de Equilibrio Limite, Método de Elementos Finitos, Método Probabilístico y proponer un método de estabilización.

1.4.2. Objetivos específicos

- Calcular el factor de seguridad de los taludes que componen al cerro Quellorco mediante el Método de Equilibrio Limite, Método de Elementos Finitos y Método Probabilístico.
- Diseñar un método de estabilización que se adecue al macizo rocoso.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La presencia de una creciente urbanización en las faldas del cerro Quellorco involucra directamente a la comunidad local. La seguridad y bienestar de los residentes son de suma importancia, ya que la inestabilidad del terreno podría resultar en deslizamientos de rocas, representando un riesgo significativo para la vida y la integridad física de las personas. Garantizar un entorno seguro para la población es un imperativo social que justifica la realización de esta investigación.

La explotación descontrolada de la roca caliza ha dejado al macizo rocoso del cerro Quellorco altamente fracturado, aumentando la posibilidad de deslizamientos. La investigación se centrará en realizar un análisis técnico exhaustivo de la estabilidad de los taludes, utilizando herramientas avanzadas de geotecnología y modelado geomecánico. La aplicación de métodos innovadores y tecnologías actuales permitirá una evaluación



precisa de los riesgos y facilitará la formulación de soluciones técnicas adaptadas a las condiciones específicas del cerro.

Además de las consideraciones sociales y técnicas, la estabilidad del cerro Quellorco tiene implicaciones económicas significativas. Un deslizamiento de masa rocosa podría resultar en pérdidas económicas considerables para los habitantes y propietarios de las áreas afectadas. La implementación de medidas de estabilización adecuadas no solo preservaría la inversión realizada en la urbanización, sino que también evitaría costos futuros asociados con posibles daños a la infraestructura existente.

El impacto ambiental de la explotación descontrolada de la roca caliza y las condiciones climáticas agresivas ha contribuido a la fragilidad del macizo rocoso. La propuesta de métodos de estabilización deberá ser ambientalmente sostenible, minimizando la alteración del ecosistema circundante y promoviendo prácticas que fomenten la resiliencia del entorno natural.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. BASES TEÓRICAS

2.1.1. Mecánica de rocas

La ingeniería de rocas, como disciplina, se dedica a la exploración del dominio y el desempeño físico de los materiales pétreos, abordando tanto aspectos teóricos como prácticos. También se ocupa del estudio de su veredicto de estos materiales ante las fuerzas presentes en su contexto visible. (González De Vallejo, 2002, P.118).

En minería, la Mecánica de Rocas se emplea para desarrollar diseños que garanticen la estabilidad del proyecto en periodos relativamente breves. Por otro lado, en ingeniería civil, se llevan a cabo diseños que aseguran la estabilidad a lo largo de un plazo más prolongado. (Ramírez P. & Alejano L., 2004, P.14).

2.1.2. Macizos rocosos

Las masas rocosas, sujetas a diversas eventualidades naturales, experimentan la formación de planos de fractura o fragilidad que dividen la masa de roca en bloques de roca íntegra. Estos bloques resultan afectados por las condiciones de su entorno natural. (González De Vallejo, 2002,P.122).

Diferente de la gran parte de los suministros empleados en el ámbito de la ingeniería, el macizo rocoso exhibe distintos tipos de discontinuidades que le confieren un comportamiento anisotrópico debido a su estructura discontinua.(Ramírez P. & Alejano L., 2004, P.175).



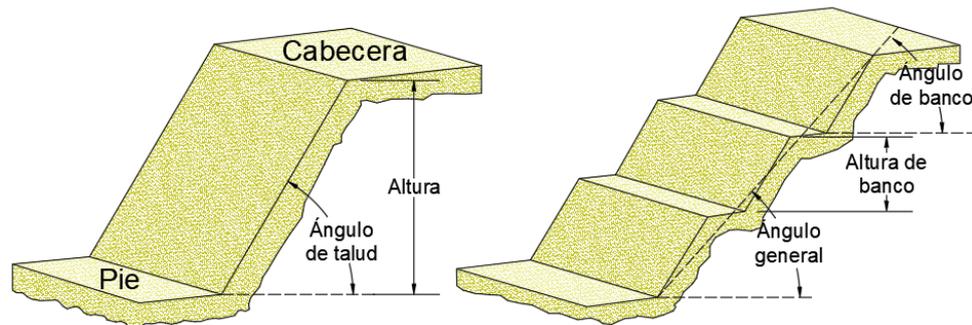
2.1.3. El talud y sus componentes

Un talud se refiere a la pendiente o inclinación de una superficie. Puede ser natural, como en el caso de laderas de montañas, o creado artificialmente, como en excavaciones para construcción. En la geotecnia y la ingeniería civil, la seguridad de las estructuras y del entorno adyacente se ve influenciada de manera significativa por la estabilidad de los taludes, constituyendo este aspecto una consideración crítica. Se realizan análisis detallados para evaluar y mitigar los riesgos asociados con posibles deslizamientos o colapsos de taludes. Estos pueden clasificarse según su proyección de sostenimiento como describe González De Vallejo (2002) en:

“Los taludes, ya sean permanentes y destinados a la construcción de infraestructuras o con propósitos edificatorios, se planifican para mantener la estabilidad en el tiempo. Cuando no es factible realizar excavaciones con las alturas y ángulos necesarios, se requieren medidas adicionales de estabilización. Por otro lado, los taludes temporales, cuyo diseño condiciona la disponibilidad y fondo del depósito, suelen ser característicos en depósitos minerales no metálicos dispuestos en estratos planos o inclinados. Estos taludes se planifican generalmente para quedar inalterable a corto o medio plazo.” (P.430)

Figura 1

Componentes y partes del talud.



Nota: Elaboración propia.

2.1.4. Estabilidad de taludes en roca

En toda la superficie terrestre, la atracción gravitatoria constantemente induce el desplazamiento de los elementos hacia niveles más bajos. Los desafíos asociados con la estabilidad de taludes, ya sean de origen natural o resultado de excavaciones, han sido examinados en diversos campos de actividad humana, con un enfoque particular en aquellos vinculados a la ingeniería civil. (Ayala & Andreu, 1986). Además, como indica González De Vallejo (2002) “la alteración de las condiciones iniciales en un medio rocoso, ya sea mediante la construcción de estructuras sobre las rocas o la excavación de un macizo, induce respuestas en el medio, que pueden manifestarse en deformaciones y/o fracturas.” (P. 118), que generan inestabilidad en los taludes rocosos, debe considerarse también los factores geológicos que pueden generar planos de debilidad y anisotropía del macizo, El comportamiento mecánico del terreno está condicionado por factores geomecánicos, mientras que la presencia humedad en el talud se relaciona con factores hidrogeológicos. Estos aspectos, esenciales en el análisis del talud, están interconectados.(González De Vallejo, 2002, P.432).



La aproximación tradicional para tratar la estabilidad de taludes implica ejecutar estudios estadísticos de los coeficientes de seguridad. Estos análisis no solo proporcionan un valor promedio del coeficiente de seguridad, sino también la probabilidad de que dicho coeficiente sea menor a uno. En términos simples, ofrecen la posibilidad de que, si la revisión de estabilidad es adecuada, el talud sufra un colapso. (Ramírez P. & Alejano L., 2004, P.259).

Para llevar a cabo la clasificación del macizo rocoso y analizar la estabilidad de taludes, ya sea en entornos naturales o como parte de una intervención para modificar su geometría, es esencial tener un conocimiento detallado de sus características. (Ayala & Andreu, 1986)

2.1.5. Caracterización geológica

Consiste en establecer una conexión entre la geomorfología del lugar y los procesos que llevan al desarrollo de depósitos minerales, con un enfoque en la descripción de estos depósitos en cuanto su origen, división, y, también la realidad de las superficies de cobertura junto con los tipos de roca presentes en la región. Además, se consideran las consecuencias de la modificación y desgaste. La comprensión básica de los principios fundamentales de la geología resulta crucial para la elaboración del modelo, especialmente en el contexto del diseño de taludes. (Read & Stancey, 2009)

2.1.5.1. Identificación

Considerando su composición, textura y las relaciones geométricas entre sus minerales, la identificación visual de un tipo de roca se lleva a cabo. A tales aspectos detallados se agregan las cualidades hereditarias,

que se deduce de la asociación mineral, la construcción química, la configuración y disposición del depósito, así como de los vínculos eventuales y espaciales con diferentes formaciones rocosas. (González De Vallejo, 2002, P.242).

Tabla 1

Control geológico de las propiedades de la matriz rocosa.

MATRIZ ROCOSO		
ORIGEN GEOLÓGICO	HISTORIA GEOLÓGICA	PROCESOS DE ALTERACIÓN Y METEORIZACIÓN
Sedimentario Ígneo Metamórfico	Tectónica (esfuerzos) Diagénesis Erosión Condiciones ambientales (agua, presión y temperatura)	Meteorización química y física

Nota: Ingeniería Geológica (González De Vallejo, 2002)

A continuación, se muestra una tabla que contiene la clasificación de las rocas por su origen geológico:

Tabla 2

Esquema de clasificación de la roca según su origen geológico

Tipos De Roca		
METAMÓRFICAS	SEDIMENTARIAS	IGNEAS
VOLCÁNICAS FILONIANAS INTRUSIVAS	DETRÍTICAS CARBONATADAS Y ORGÁNICAS EVAPORÍTICAS	METAMORFISMO REGIONAL Y DE CONTACTO DINAMOMETAMORFISMO
Obsidiana, riolita, andesita, dolerita, tobas volcánicas, lavas, obsidiana, dacita, basalto... Pórfido, diabasa...	Limolita, grauvaca conglomerada, brecha, arenisca, lutita, argilita, pizarras sedimentarias... Caliza micrítica, cristalina y esparítica, marga, dolomía, carbón...	Migmatita, granulitas, filita, gneiss, cuarcita, esquisto, anfíbolitas, pizarra... Cuarcita, mármol, Metarenisca, brechas cornubianitas...

Nota: INGEMMET



2.1.5.2. Meteorización

Según Gonzales De Vallejo (2002) menciona que, “La observación crucial del nivel de meteorización de una roca impacta significativamente en sus cualidades mecánicas. Mientras progresa la descomposición geológica, las propiedades como la permeabilidad, deformabilidad y porosidad de la roca aumentan, mientras su estabilidad disminuye” (P.244).

Según Ramirez et al, (1970) menciona que, “Dependiendo si se produce una descomposición química, que incluyen una desintegración de la roca debido a agentes físicos, existen dos tipos de meteorización. Generalmente los efectos físicos y químicos ocurren de manera simultánea, el predominio de uno depende del clima” (P. 114).

La meteorización física suele producirse en climas secos, afectando la superficie del macizo rocoso, permitiendo:

- Desprendimiento de partículas debido a la acción erosiva.
- Congelamiento del agua depositado en fracturas y grietas.
- Alteraciones en el volumen de la roca como consecuencia de fluctuaciones térmicas.
- La apertura del paso entre las fracturas de la roca a las raíces de los árboles.

Según Ramírez P. & Alejano L., (2004) menciona que, “En ambientes húmedos, la meteorización química es comúnmente observada, causada por procesos como la hidratación, oxidación, carbonatación,



hidrólisis y disolución. En este, los elementos clave involucrados son el agua, el oxígeno, los ácidos orgánicos y el dióxido de carbono” (P. 214).

Tabla 3

Explicación de la intensidad de desgaste del lecho rocoso en función del nivel de modificación de la piedra.

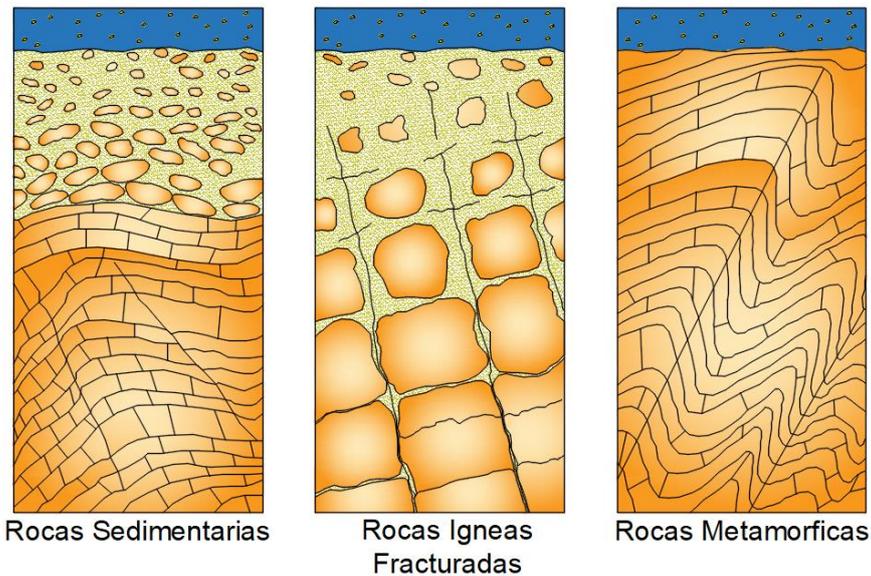
Termino	Descripción	Grado
Fresco	No hay indicios evidentes de modificaciones; en el mejor de los casos, se registran sutiles cambios cromáticos en las fracturas destacadas.	I
Ligeramente meteorizado	El desgaste de la sustancia pétreo y de las superficies de las grietas se manifiesta a través de la decoloración. Puede haber áreas externas más frágiles que en situaciones recientes.	II
Moderadamente meteorizado	En el suelo, se observa que no más de la mitad de la roca se encuentra fragmentado. Se aprecian áreas de piedra sana o descolorida, ya sea formando patrones discontinuos o presentándose como fragmentos aislados.	III
Muy meteorizado	En el suelo, se encuentra que más del 50% del material rocoso ha experimentado descomposición o desintegración. Se identifican áreas de roca sana o descolorida, ya sea en forma de patrones discontinuos o en fragmentos aislados.	IV
Completamente meteorizado	El suelo resultante ha surgido debido a la descomposición o desintegración completa del material rocoso, mientras que la estructura original del macizo rocoso permanece prácticamente sin cambios	V
Suelo residual	El suelo ahora constituye la totalidad de la roca, con la desaparición de la composición de la roca masiva y la fábrica, y se ha experimentado un notable incremento de volumen.	VI

Nota: (Brown, 1981)

Las etapas de meteorización afectan de manera variable a las distintas fitologías, siendo más intensos a medida que se prolonga la duración de la exposición a los elementos atmosféricos. La influencia desigual de estos procesos es evidente en las diferentes fitologías.

Figura 2

Meteorización en diferentes tipos de rocas.



Nota: Ejemplos de meteorización en diferentes tipos de rocas.

2.1.6. Caracterización geotécnica

Según Ramírez P. & Alejano L., (2004) menciona que, “La caracterización geotécnica es un proceso mediante el cual se recopila, información detallada sobre las características de las propiedades de la roca, discontinuidades y macizo rocoso para su aplicación en obras ingenieriles de un área específica o como descrita” (P.115).



2.1.6.1. Caracterización de la roca intacta

La matriz rocosa se refiere al cuerpo rocoso que no presenta interrupciones, o a los bloques de "roca intacta" que permanecen entre estas discontinuidades. Aunque se la considere como continua, la matriz rocosa exhibe un comportamiento no uniforme y anisotrópico, afectado por la composición y la estructura mineral microscópica. Desde el punto de vista mecánico, se caracteriza por su densidad, resistencia y capacidad de deformación.(González De Vallejo, 2002)

3.5.4.1.1. Propiedades físicas

Según González De Vallejo, (2002) menciona que, “diferentes comportamientos mecánicos ante fuerzas aplicadas en las rocas se definen por la resistencia del material y su modelo de deformación, manifestando así la notable variabilidad de estas propiedades” (P. 126).

Porosidad

Según González De Vallejo, (2002) menciona que, “Es la fracción del volumen total que ocupan sus huecos. Este factor desempeña un papel clave en las propiedades mecánicas, mostrando una relación inversa con la resistencia y la densidad, mientras que guarda una relación directa con la deformabilidad” (P. 128).

Peso específico

Según González De Vallejo (2002) menciona que, “Se describe como la carga ejercida por unidad de espacio. Las unidades utilizadas son



aquellas de fuerza (Newton, kilopondio, tonelada-fuerza, entre otras) por unidad de volumen” (P. 128).

Absorción

Es el aumento de peso de la roca debido a la presencia de agua que se encuentra en los intersticios, pero que no incluye el líquido que se encuentra en la superficie externa de las muestras objeto de estudio. (Suarez, 2014)

Alterabilidad

Buscan simular los procesos de deterioro de las rocas debido a la meteorización. Dada la variedad de factores que causan la degradación, es esencial establecer criterios para determinar el mecanismo de alteración predominante y seleccionar la prueba más apropiada para cuantificarlo. (Ayala & Andreu, 1986, P.96)

3.5.4.1.2 Propiedades mecánicas

Resistencia a compresión simple

Indica la capacidad de una roca para resistir fuerzas de compresión aplicadas en una sola dirección. Este valor es esencial en diversas aplicaciones y para entender el comportamiento de las rocas en diferentes contextos. En muchas fórmulas de diseño, la resistencia de compresión no confinada se emplea y, en ocasiones, se utiliza como una propiedad de referencia para la selección de la técnica de excavación adecuada. (ASTMD2983, n.d., P.1).

Tabla 4*Clasificación de la resistencia a compresión simple de la roca.*

Caracterización de resistencia uniaxial de la roca intacta	
Resistencia	σ_c (kp/cm²)
Muy baja	<50
Baja	50 – 200
Media	200 – 1000
Alta	1000 – 2000
Muy alta	>2000

Nota: (Jimenez Salas & et al, 1975)

Resistencia a tracción

La resistencia a la tracción en mecánica de rocas es una medida del potencial de una roca para resistir fuerzas que tienden a separar o fracturar la roca. Aunque muchas rocas son relativamente débiles en tracción en comparación con su resistencia a la compresión, la información sobre la resistencia a la tracción es importante en diversas aplicaciones.

Tabla 5*Clasificación de la resistencia a tracción de la roca.*

Caracterización de resistencia a tracción de la roca intacta	
Resistencia	σ_t (kp/cm²)
Muy baja	0 – 15
Baja	15 – 35
Media	35 – 65
Alta	65 – 100
Muy alta	>100

Nota: (Deere & Miller, 1968)

Cohesión y ángulo de fricción

Los valores de cohesión y ángulo de rozamiento mecánica de rocas son parámetros fundamentales que describen el comportamiento de las



rocas bajo cargas y deformaciones. Estos valores son esenciales en el diseño de taludes o de su estabilidad.

Deformabilidad

El valor de deformabilidad en mecánica de rocas indica la capacidad de una roca para deformarse bajo la aplicación de fuerzas externas. Es un parámetro crucial en varias aplicaciones que esta comúnmente representado por el Módulo de Young.

2.1.6.2. Caracterización de las discontinuidades

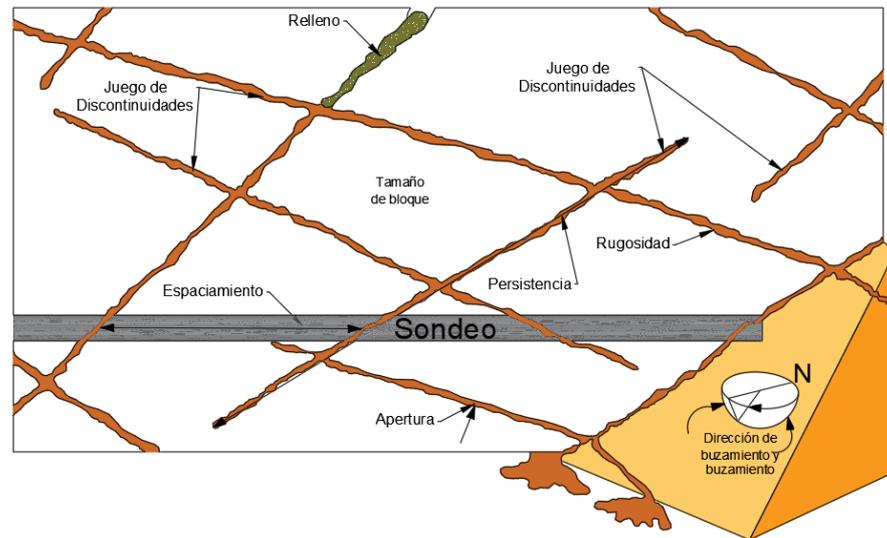
Las interrupciones se pueden caracterizar en términos generales como superficies de fragilidad en la masa rocosa, donde el material exhibe discontinuidad estructural y una resistencia a la tracción que es inexistente o débil. (ISMR, 1977)

Se requiere examinar de antemano cómo se comportan las interrupciones naturales con el fin de comprender y describir de manera efectiva el comportamiento mecánico de las masas rocosas, dado que en la naturaleza suelen presentar una cantidad significativa de estas discontinuidades. (Ramírez P. & Alejano L., 2004, P.82).

Según Jorda et al., (2016) menciona que, “el rendimiento mecánico del macizo rocoso se ve fuertemente influenciado por la presencia de estas discontinuidades. Pueden ser sistémicas, agrupadas en familias con orientación predominante, o singulares, sin una tendencia estadística clara en su orientación” (P. 61).

Figura 3

Propiedades de las discontinuidades



Nota:

(Hudson, 1989)

3.5.4.1.3 Tipos de discontinuidades

Según Gonzales de Vallejo (2002) menciona que, “Los distintos tipos de discontinuidades en sistemáticas, cuando están presentes en familias, y singulares, cuando el macizo rocoso es atravesado por un solo plano rocoso” (P. 178).

Tabla 6

Tipos de discontinuidades

Tipos de discontinuidades		
Discontinuidades	Sistemáticas	Singulares
	Planos de estratificación Planos de laminación Diaclasas o juntas Planos de esquistosidad	Fallas Diques Discordancias
Planares		
Lineales	Intersección de discontinuidades planares Lineaciones	Ejes de pliegues

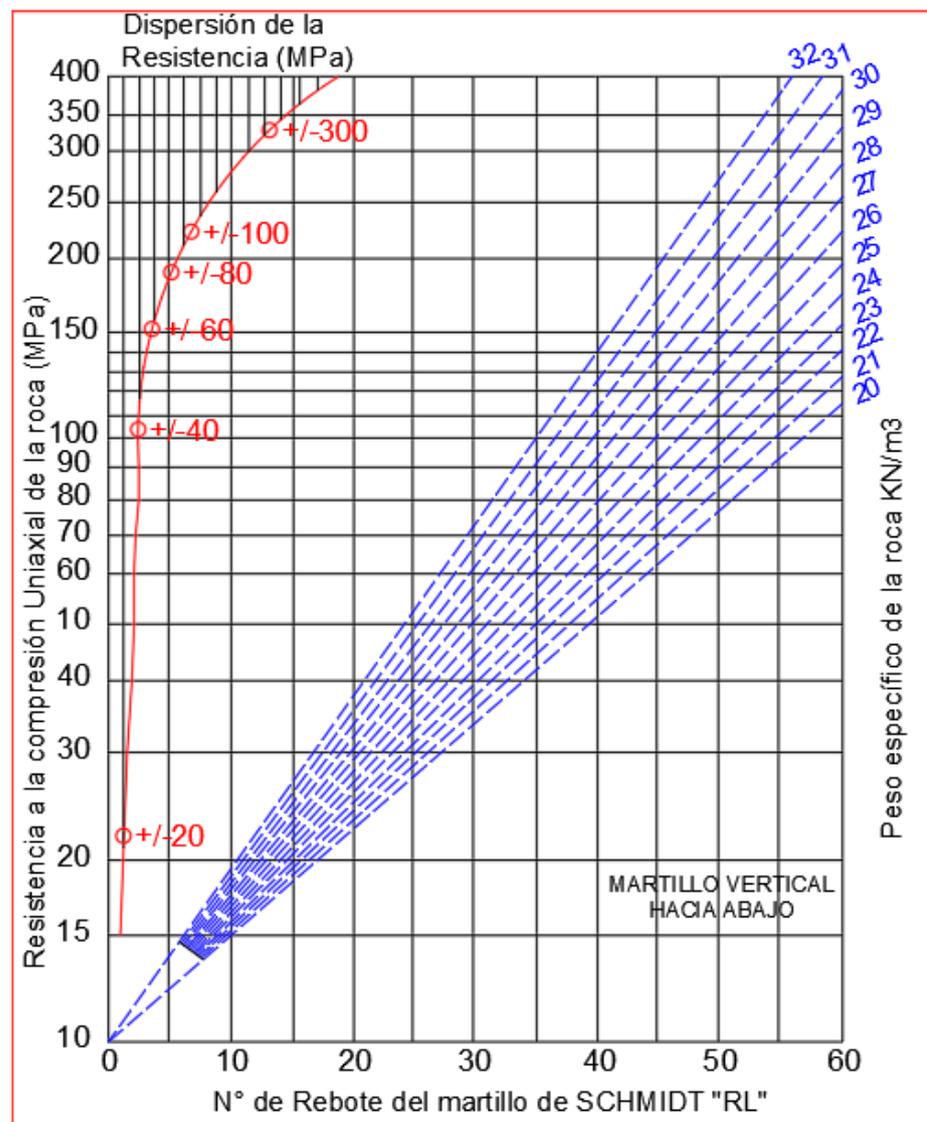
Nota: (González De Vallejo, 2002)

2.1.6.3. Resistencia de los labios de la discontinuidad

La capacidad de resistencia de una pared de discontinuidad impacta tanto en su resistencia al corte como en su capacidad de deformación, factores que son influenciados por la naturaleza de la matriz rocosa, el nivel de alteración y la presencia de relleno. (González De Vallejo, 2002)

Figura 4

Ábaco para la obtención de la resistencia a compresión simple de una roca a partir de medidas con el martillo de Schmidt tipo "L"



Nota: (González De Vallejo, 2002)

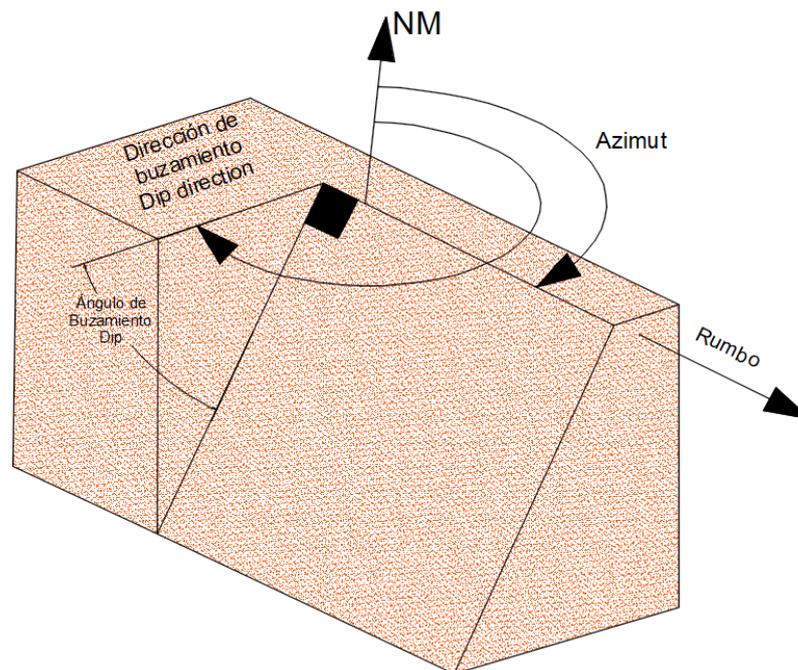
2.1.6.4. Orientación

La orientación de las discontinuidades tiene gran influencia en la estabilidad del macizo, (Jorda et al., 2016) indica que:

“La posición y orientación relativas de las discontinuidades con respecto a la orientación media del talud condiciona en gran medida la estabilidad del macizo rocoso. A su vez, la presencia de diversas familias de discontinuidades con distintas orientaciones determina el tamaño y la forma de los bloques en que se divide el macizo rocoso” (P. 67).

Figura 5

Esquema de la representación geomecánica de una discontinuidad.



Nota: Elaboración propia

Buzamiento

Se refiere a la inclinación o ángulo de inclinación de una superficie geológica, como una estratificación, una falla o una junta, en relación con



la horizontal. Es un término que describe el grado de inclinación de las capas rocosas o estructuras geológicas y es un concepto clave en la caracterización de la geometría de las formaciones rocosas. Se expresa en grados en los rangos de 0° a 90° .

Dirección de buzamiento

Se refiere a la orientación en la cual una estructura geológica, como una capa, falla o junta, inclina con respecto al norte. Se expresa comúnmente como una brújula o en grados, entre los rangos de 0° a 360° .

2.1.6.5. Espaciamiento

La distancia promedio que se extiende perpendicularmente entre los planos de interrupciones que pertenecen a la misma familia, identificada como espaciado, cumple una función fundamental en el comportamiento global del macizo rocoso. Asimismo, influye directamente en las dimensiones de los bloques de roca matriz que componen las distintas familias de fracturas. (González De Vallejo, 2002) se pueden definir los siguientes tipos de espaciados:

- Espaciado Total: Es el espaciado entre dos discontinuidades consecutivas (pertenezcan o no al mismo set)
- Espaciado de familia: Es el espacio entre dos discontinuidades de la misma familia, sin necesidad de ser medidos en la misma dirección de la perpendicular a los planos de discontinuidad.

- Espaciado normal de familia: Es el espacio medido entre discontinuidades de la misma familia, en sentido perpendicular a los planos de las discontinuidades de dicha familia.

Tabla 7

Espaciado de las discontinuidades.

Espaciado (cm)	Descripción
0 - 2	Extremadamente cerrado
2 - 6	Muy cerrado
6 - 20	Cerrado
20 - 60	Moderado
60 - 200	Amplio
200 - 600	Muy amplio
>600	Extremadamente amplio

Nota: (Ramirez et al., 1970)

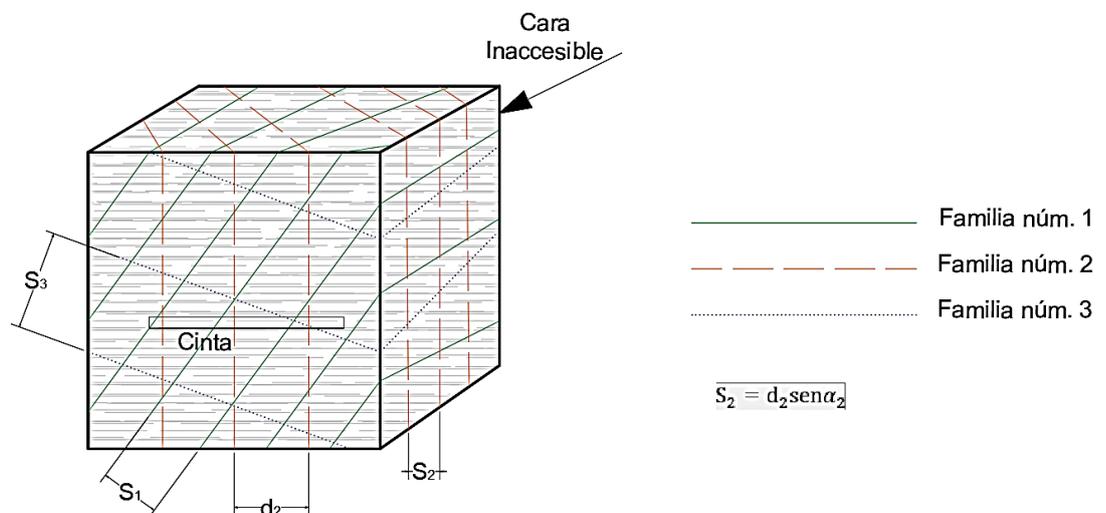
El espaciado más frecuente de cada familia se calcula mediante:

$$S = d_m \text{sen} \alpha$$

Donde: d_m = La distancia mas frecuente obtenida.

Figura 6

Espaciamiento real de cada discontinuidad.



Nota: Elaboración propia

2.1.6.6. Persistencia

La extensión del plano de discontinuidad, en gran medida, determina la participación de la matriz rocosa en los procesos de fractura del macizo rocoso y la influencia que ejerce en los parámetros resistentes globales de este. Define si la matriz rocosa se verá afectada por los procesos de rotura del macizo rocoso y en qué medida condicionará sus parámetros resistentes globales.(González De Vallejo, 2002) (P. 181) Además, la persistencia junto con la apertura favorece la entrada y circulación de agua a través del macizo rocoso. (Jorda et al., 2016, P.97)

Tabla 8

Persistencia de las discontinuidades.

Persistencia (m)	Descripción
0 – 1	Muy baja continuidad
1 – 3	Baja continuidad
3 – 10	Continuidad media
10 – 20	Alta continuidad
>20	Muy alta continuidad

Nota: (ISMR, 1977)

2.1.6.7. Rugosidad

El concepto de "rugosidad" abarca las ondulaciones en las superficies de la discontinuidad y las pequeñas irregularidades presentes en ella. (ISMR, 1977), por lo que se entiende que la resistencia aumenta con mayor rugosidad. La presencia de irregularidades complica el desplazamiento durante los procesos de corte tangencial a favor de las discontinuidades.(González De Vallejo, 2002, P.181).

2.1.6.8. Apertura

La apertura se refiere a la distancia perpendicular entre las dos superficies de las discontinuidades. Estos valores pueden ser milimétricos en juntas cerradas o llegar a valores métricos en juntas extremadamente anchas. (Jorda et al., 2016)

Tabla 9

Abertura de las juntas.

Abertura (mm)	Descripción
0 – 0.1	Muy cerrada
0.1 – 0.25	Cerrada
0.25 – 0.5	Parcialmente abierta
0.5 – 2.5	Abierta
2.5 – 10	Moderadamente ancha
10 – 100	Muy ancha
100 - 1000	Extremadamente ancha
>1000	Cavernosa

Nota: (ISMR, 1977)

2.1.1.1.1. Relleno

El elemento que llena el espacio entre los extremos de una interrupción se conoce como relleno. Por lo general, la distancia perpendicular entre los bordes define el espesor del relleno. (Ramírez P. & Alejano L., 2004) (P. 195), Las propiedades físicas y mecánicas del material de relleno, como la resistencia al corte, la deformabilidad y la permeabilidad, pueden mostrar una considerable variabilidad y tienen un impacto en el comportamiento de la interrupción. (González De Vallejo, 2002, P.181).

2.1.6.9. Agua en las discontinuidades

Por lo general, el flujo de agua en las formaciones rocosas ocurre a lo largo de las discontinuidades (permeabilidad secundaria), a excepción de las rocas sedimentarias donde el agua circula a través de la propia roca (permeabilidad primaria). La conexión entre estratos permeables, a menudo a través de discontinuidades, es crucial para esta permeabilidad. (Ramírez P. & Alejano L., 2004, P.196)

Tabla 10

Grado de filtración de una discontinuidad sin relleno.

DISCONTINUIDADES SIN RELLENO	
Grado de filtración	Descripción
I	La discontinuidad se encuentra en una condición cerrada y sin presencia de humedad evidente. No parece factible que haya un flujo de agua a través de esta.
II	No hay evidencia de flujo de agua en la discontinuidad, la cual se encuentra en una condición de sequedad.
III	Pese a que, la discontinuidad presenta indicios de flujo de agua, como manchas de roña, se encuentra en una condición de sequedad.
IV	Aunque la discontinuidad presenta humedad, no se detecta flujo de agua en su interior.
V	Se observan filtraciones de agua y gotas ocasionales en la discontinuidad, sin embargo, no hay un flujo continuo de agua presente.
VI	Se presenta una circulación ininterrumpida de agua en la discontinuidad. Será necesario realizar una estimación del caudal en litros por minuto y proporcionar una descripción de la presión, ya sea baja, media o alta, para obtener una caracterización más precisa.

Nota: (Brown, 1981)

Tabla 11

Grado de filtración de una discontinuidad con relleno.

Discontinuidades con relleno	
Grado de filtración	Descripción
I	Debido a la alta consolidación y sequedad de los materiales de relleno, la posibilidad de que se genere un flujo es muy remota, ya que la permeabilidad es muy baja.
II	Aunque los materiales de relleno presentan humedad, no se observa la circulación de agua en ellos.
III	Se encuentran con humedad los materiales de relleno, presentando eventualmente gotas de agua.
IV	Se aprecia un flujo constante de agua en los materiales de relleno, lo cual se evidencia por los signos de lavado presentes. Es necesario realizar una estimación del caudal en litros por minuto para una evaluación más detallada.
V	Se observa un lavado localizado en los materiales de relleno, con un flujo significativo de agua a lo largo de los canales de erosión. Para una evaluación más detallada, se requiere estimar tanto el caudal en litros por minuto como la presión, clasificada como baja, media o alta.
VI	Por la acción del agua, los materiales de relleno muestran una erosión total, con flujo a presiones significativamente altas, especialmente en las zonas de afloramiento. Es esencial realizar una estimación del caudal en litros por minuto y proporcionar una descripción detallada de la presión para una evaluación completa.

Nota: (Brown, 1981)

2.1.7. Clasificación geomecánica del macizo rocoso

Actualmente, las clasificaciones geomecánicas son ampliamente utilizadas, especialmente en estudios geotécnicos de túneles. Aproximadamente el 80 % de los túneles se excavan considerando estas clasificaciones, pero es crucial aplicarlas teniendo en cuenta los datos subyacentes.

En relación con los taludes, las clasificaciones geomecánicas ofrecen la ventaja de proporcionar, a través de correlaciones establecidas, los parámetros



mecánicos clave del macizo rocoso, como el módulo de elasticidad y los coeficientes del criterio de rotura Hoek-Brown. El uso exclusivo de clasificaciones para evaluar la estabilidad de los taludes puede ser beneficioso en las primeras etapas del análisis, pero resulta cuestionable depender exclusivamente de ellas como la única herramienta de toma de decisiones a nivel de proyecto (Bieniawski, 2003)

Los criterios de clasificación deben ser precisos y coherentes para evitar confusiones en su aplicación. Además, las categorías deben ser excluyentes entre sí, evitando la asignación de dos categorías diferentes a un mismo macizo rocoso. (Ramírez P. & Alejano L., 2004, P.145) Entre las clasificaciones más importantes para taludes están la clasificación de Bieniawski (RMR), clasificación de Hoek – Brown (GSI), clasificación Calidad de designación de la roca de Deere (RQD) y la clasificación SMR

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

Deere en 1967 desarrolló el Índice de Designación de Calidad de Roca (RQD) para ofrecer una evaluación cuantitativa de la calidad del macizo rocoso basada en registros de núcleos de perforación. (HOEK, 2008)

El valor RQD es la correlación entre la suma de las longitudes de los pedazos de testigo superiores de 10 cm y la longitud total de la sección considerada:

$$RQD = \frac{\Sigma \text{longitud de los trozos de testigo} > 10\text{cm}}{\text{longitud total}} \times 100$$

Para calcular el RQD, se toman en cuenta solo los fragmentos frescos del testigo, excluyendo los fuertemente alterados que se designan como $RQD = 0\%$. La medición se realiza en cada maniobra de sondeo o cambio litológico, con una longitud de maniobra ideal de 1,5 m y un diámetro mínimo de testigo de 48 mm. La longitud se mide a lo largo del eje central, considerando fragmentos con al menos un diámetro completo.

El siguiente cuadro relaciona la calidad del macizo rocoso con el porcentaje del RQD%:

Tabla 12

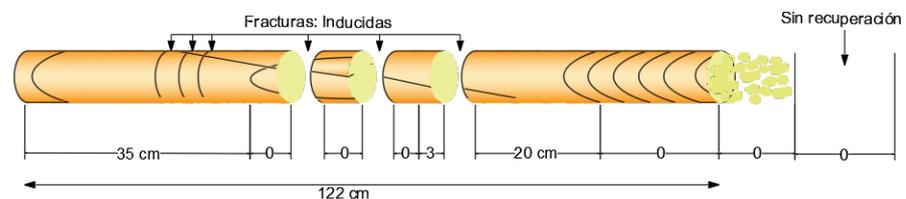
Calidad de la roca según el porcentaje del RQD.

RQD %	Calidad
< 25	Muy mala
25 – 50	Mala
50 – 75	Media
75 – 90	Buena
90 – 100	Muy buena

Nota: Hoek 2008

Figura 7

Ejemplo de RQD



Nota: Forma de cálculo y ejecución del RQD.

$$RQD = \frac{35 + 3 + 20}{122} \times 100 = 48\%$$



Palmstrom (1982) propuso que, en ausencia de testigos, pero con tazas de discontinuidades visibles en afloramientos o socavones exploratorios, el RQD puede estimarse según el número de discontinuidades por unidad de volumen.

El RQD se calcula considerando el número de fisuras por metro cúbico (J_v) identificadas durante el levantamiento litológico-estructural en el área especificada. Esta información se utiliza en operaciones de voladura y se establece en función de la relación entre RQD y J_v .

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

Donde:

J_v : Conteo de discontinuidades volumétrico, número de discontinuidades interceptando un volumen de 1 m³.

Priest & Hudson (1976) propone también que “A partir de mapeos geotécnicos: comprende el cálculo del RQD en función del número de fisuras por metro lineal, determinadas al realizar el levantamiento litológico - estructural (mapeo por línea de detalles) en el área o zona predeterminada de la operación minera u obra civil.”

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

Donde:

λ : Número medio de discontinuidades por metro lineal.

2.1.7.2. Clasificación de Biewniawski (RMR)

Fue desarrollada en 1973 y actualizada en 1979 y 1989, esta metodología clasifica macizos rocosos según Mohammadi & Hossaini (2017) “vinculando índices de calidad con parámetros geotécnicos, criterios de excavación y sostenimiento. Es ampliamente utilizada en la mecánica de rocas.”

La clasificación RMR cuenta con los siguientes parámetros geomecánicos:

- **La resistencia uniaxial de la matriz rocosa (UCS):** Es la resistencia en compresión uniaxial de la roca “intacta”, y el puntaje asociado a la misma puede variar de 0 (si $UCS < 1$ MPa) a 15 (si $UCS > 250$ MPa).
- **El grado de fracturación en parámetros del RQD:** Es la designación de la calidad de la roca definida por Deere, y el puntaje asociado a la misma puede variar de 3 (si $RQD < 25\%$) a 20 (si $90 < RQD \leq 100$)
- **El espaciado de las discontinuidades:** Es el espaciamiento entre las estructuras, y el puntaje asociado al mismo puede variar de 5 (si $s < 60$ mm) a 20 (si $s > 3$ m).
- **Las condiciones de las discontinuidades:** El puntaje asignado a la condición de las discontinuidades puede fluctuar desde 0, que corresponde a estructuras continuas y abiertas con más de 5 mm, o aquellas con rellenos arcillosos blandos de espesor superior a 5 mm y alteración descompuesta, hasta 30, que se aplica a estructuras discontinuas.

- **Condiciones hidrogeológicas:** El puntaje asignado a la condición de la presencia de agua puede oscilar desde 0, que se aplica a estructuras con flujos de agua, hasta 15, que corresponde a estructuras completamente secas.

Tabla 13

Parámetros básicos de la clasificación RMR Bieniawski.

Parametro		Valoración				
1	Carga puntual	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Ver UCS
	Resistencia (MPa) Compresión simple	<250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25 1 - 5
Valoración (Rc)		15	12	7	4	2 1 0
2	RQD (%) Rock Quality Designation	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25
	Valoración (Rr _{qd})	20	17	13	8	3
3	Espaciamiento	>2.00	0.60 - 2.00	0.20 - 0.60	0.06 - 0.20	<0.06
	Valoración (Rd)	20	15	10	8	6
4	Condición de las juntas	Muy rugosas Discontinuas Sin espacios Bordes sanos y duros	Ligeramente rugosas Aberturas de más de 1mm Bordes duros	Ligeramente rugosas Aberturas de más de 1mm Bordes blandos	Espejos de falla o Relleno <5mm o Separación entre 1 - 5mm	Relleno blando superior a 5mm o Abertura >5mm
	Valoración (Rs)	30	25	20	10	0
5	Agua freática en juntas	Seco	Algo húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo
	Valoración (Ru)	15	10	7	4	0

Nota: (Bieniawski Z. T., 1989)

Tabla 14

Características de las condiciones de las discontinuidades.

Parámetro		Valoración				
4	Longitud de la discontinuidad o persistencia	<1m	1 – 3m	3 – 10 m	10 – 20 m	>20 m
	Valoración	6	4	2	1	0
	Separación (Abertura)	Nada	<0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	>5 mm
	Valoración	6	5	4	1	0
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave
	Valoración	6	5	3	1	0
	Relleno	Ninguno	Relleno duro		Relleno blando	
			<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm
	Valoración	6	4	2	2	0
	Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto
	Valoración	6	5	3	1	0

Nota: (Bieniawski Z. T., 1989)

2.1.7.3. Clasificación SMR

La clasificación geomecánica de Slope Mass Rating (Romana, 1985) se desarrolló como una secuela del sistema Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski, que era casi imposible de utilizar en pendientes debido al rango extremo de los factores de corrección y a la indefinición de los mismos. Una definición cuantitativa detallada de los factores de corrección es una de las ventajas de la clasificación SMR. (Romana et al., 2015)

El índice de Talud en Roca (SMR), una clasificación geomecánica creada por Romana en 1985, se emplea extensamente para la evaluación de taludes rocosos. Su cálculo implica la adición al índice de masa rocosa base (RMR), el cual se determina a partir de características inherentes a la masa rocosa, de factores de corrección relacionados con la orientación y ángulo de las discontinuidades, así como el ángulo relativo entre estas y el



talud, junto con el método de excavación aplicado. (Ramírez P. & Alejano L., 2004)

El índice se deriva del RMR, incorporando factores de ajuste basados en la orientación de discontinuidades y el método de excavación. El factor de orientación resulta de la combinación de subfactores F_1 , F_2 y F_3 . ((González De Vallejo, 2002)

$$SMR = RMR_b + (F_1 + F_2 + F_3) + F_4$$

Donde:

RMR_b : Es el índice RMR básico resultante de la clasificación del macizo rocoso de Bieniawski.

F_1 : Depende del paralelismo entre la dirección del buzamiento de la discontinuidad, α_j , y el buzamiento de la pendiente, α_s ,

F_2 : Está relacionado con la probabilidad de resistencia al corte de la discontinuidad y depende del buzamiento de la discontinuidad, $B=\beta_j$, en el caso de falla plana. En caso de fallo por derrumbe, este parámetro adopta el valor 1,0.

F_3 : Depende de la relación entre la pendiente, β_s , y la discontinuidad, β_j , buzamientos. Este parámetro es el factor de ajuste original de Bieniawski (de 0 a -60 puntos) y expresa la probabilidad de que la discontinuidad aflore en la cara del talud para una falla plana.

F_4 : Es un factor de corrección que depende del método de excavación

Tabla 15

Parámetros de corrección por ajuste de juntas.

Tipo de Rotura		Muy favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy favorable
Planar	$\alpha s - \alpha j$					
Cuña	$\alpha s - \alpha j$					
Volteo	$\alpha s - \alpha j - 180$	>30	30 – 20	20 – 10	10 – 5	<5
P/C/V	F1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Planar	βj					
Cuña	βj	<20	20 – 30	30 – 35	35 – 45	>45
P/C	F2	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Volteo	F2			1.00		
Planar	$\beta j - \beta s$					
Cuña	$\beta j - \beta s$	>10	10 – 0	0	0 – (-10)	<-10
Volteo	$\beta j + \beta s$	<110	110 – 120	>120	---	---
P/C/V	F3	0	-6	-25	-50	-60

FALLA: P: Planar; C: Cuña; V: Volteo; **DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO:** αs : Talud; αj : Discontinuidad; **BUZAMIENTO:** βs : Talud; βj : Discontinuidad

Nota: (Romana, 1985)

Tabla 16

Valores correspondientes al factor F4.

Método	Talud Natural	Pre – Corte PS	Voladura controlada SB	Voladura regular RB	Voladura deficiente DB
F4	15	10	8	0	-8

Nota: (Romana, 1985)

De acuerdo con los valores obtenidos de la clasificación SMR, Romana (1985) definió cinco clases geomecánicas con sus calidades y tipos de inestabilidad asociados a cada clase. Esta clasificación es ampliamente aceptada como una herramienta válida para el pre – diseño de taludes de obras civiles. **Tabla 17** muestra las clases de estabilidad según el SMR.

Tabla 17

Clasificación de taludes según SMR.

Clase N°	V	IV	III	II	I
SMR	0 – 20	21 – 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable
Probabilidad de rotura	0.9	0.6	0.4	0.2	0
Rotura	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Re excavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Nota: (Romana, 1985)

2.1.7.4. Clasificación GSI

La clasificación GSI, creada por Hoek & Brown en 1997, es aplicable a macizos rocosos fuertes y débiles. Para ingenieros y geólogos en el campo, ofrece una evaluación práctica, rápida y confiable basada en la inspección visual. Su escala de 0 a 100 permite definir 5 categorías de macizos.

Tabla 18

Clase de macizo según su GSI.

Clase	Valor	Descripción
Clase I	$80 < GSI \leq 100$	Muy Buena
Clase II	$60 < GSI \leq 80$	Buena
Clase III	$40 < GSI \leq 60$	Regular
Clase IV	$20 < GSI \leq 40$	Mala
Clase V	$0 < GSI \leq 20$	Muy Mala

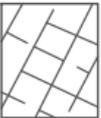
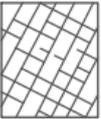
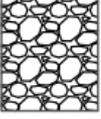
Nota: Hoek & Brown (1997)

Su base radica en una observación meticulosa del macizo rocoso, principalmente cualitativa, que toma en cuenta aspectos como litología, estructura y estado de las superficies de discontinuidad, ya sea en

aflojamientos, cortes de excavación o testigos de sondeos. De esta manera, aborda dos elementos esenciales: el grado y tipo de fragmentación, así como las condiciones de las superficies de discontinuación.

Figura 8

Índice de resistencia geológica para macizos rocosos articulados.

CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO SEGUNSI MODIFICADO		CONDICIÓN SUPERFICIAL					
ESTRUCTURA		MUY BUENA (EXTREMADAMENTE RESISTENTE, FRESCA) SUPERFICIE DE LAS DISCONTINUIDADES MUY RUGOSAS E ALTERADAS, CERRADAS, (FC > 250 MPa) (SE ASTILLA CON GOLPES DE PICOTA)	BUENA (MUY RESISTENTE, LEVEMENTE ALTERADA) DISCONTINUIDADES RUGOSAS, LEV. ALTERADA. (FC DE 100 A 250 MPa) (SE ROMPRE CON VARIOS GOLPES DE PICOTA)	REGULAR (RESISTENTE Y LEVEMENTE ALTERADA) DISCONTINUIDADES LISAS, MODERADAMENTE ALTERADA, LIGERAMENTE ABIERTAS (FC DE 50 A 100 MPa) (SE ROMPRE CON UNO O 2 GOLPES DE PICOTA)	POBRE (MODERADAMENTE RESIT. MODERADAM. ALTER.) SUPERFICIE PULIDA O CON ESTRUCIONES, MUY ALTERADA, RELLENO COMPLETO CON FRAGMENTOS DE ROCA, (FC 25 A 50 MPa) - (SE INDENTA SUPERFICIALMETE)	MUY POBRE (BLANDA MUY AL TERADA) SUPERFICIE PULIDA Y ESTRADA, MUY ABIERTA CON RELLENO DE ARCILLAS BLANCAS, FC < 25 MPa) (SE INDENTA PROFUNDAMENTE)	
	LEVEMENTE FRACTURADA. TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MUY ESPACIADAS ENTRE SI. (RQD 75 - 100) (1 A 5 FRACT. POR METRO) 20cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<100cm.	95 LF/MA	90 LF/B	80 LF/R	70 LF/P	LF/MP	
	MODERADAMENTE FRACTURADAS. TRES SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES MUY ESPACIADAS ENTRE SI. (RQD 50 - 75) (6 A 10 FRACT. POR METRO) 10cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<20cm.	65 F/MB	F/B	F/R	F/P	F/MP	
	MUY FRAGMENTADA CUATRO MAS SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES (RQD 25 - 50) (11 A 20 FRACT. POR METRO) 5cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<10cm.	75 MF/MB	MF/B	MF/R	MF/P	MF/MP	
	INTENSAMENTE FRACTURADA PLEGAMENTO Y FALLAMIENTO, CON MUCHAS DISCONTINUIDADES INTERCEPTADAS FORMANDO FRAGMENTOS ANGULOSOS O IRREGULARES. (RQD 0 - 25) (MAS DE 20 FRACT. POR METRO) 2cm<ESPAC. ENTRE DIACLASAS<5cm.	65 IF/MB	55 IF/B	45 IF/R	IF/P	IF/MP	
	TRITURADA O BRECHADA MASA ROCOSA EXTREMADAMENTE ROTA CON UNA MEZCLA DE FLAGMENTOS FACILMENTE DISGREGABLES, ANGULOSOS Y REDONDEADOS EN MATRIZ ARCILLOSA (SIN RQD)	T/MB	T/B	35 T/R	25 T/P	45 T/MP	

Nota: (Marinos & Hoek, 2000)

En los primeros días del GSI, los diseñadores de esta clasificación sugirieron (Hoek y Brown, 1997) calcular el GSI a partir del RMR con ajustes. Actualmente, se reconoce que este enfoque puede ser válido solo en macizos rocosos de alta calidad y carecer de relevancia en los de baja calidad. (Marinos & Hoek, 2000) en macizos rocosos débiles y heterogéneos, no se aconseja aplicar la correlación que se proporciona a continuación, 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.

2.1.8. Criterios de resistencia del macizo rocoso

Un principio de rotura es una correlación entre tensiones que anticipa la resistencia de una roca bajo un campo tensional. Por lo general, se refiere a la resistencia de pico, aunque también puede aplicarse a la resistencia residual. Los criterios de rotura comúnmente empleados en mecánica de rocas son los de Mohr–Coulomb y Hoek–Brown (1980).

2.1.8.1. Criterio de resistencia generalizado de hoek – brown

Según Hoek, Carranza y Corkum (2002) El criterio generalizado es expresado por la ecuación:

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

Donde:

m_b : Es un valor reducido de la constante del material m_i y está dado por:

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

s y a son constantes para el macizo rocoso dados por las siguientes relaciones:

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

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}}\right)$$

El factor D , que está principalmente vinculado al grado de alteración causado por voladuras o por la relajación de esfuerzos en el macizo rocoso, varía desde 0 en macizos rocosos in situ sin alteraciones hasta 1 en macizos rocosos altamente afectados.

Tabla 19

Guía para evaluar el parámetro D en taludes.

Taludes en ingeniería civil y minería	
Condición del macizo rocoso	D
Realización de excavación mecanizada en macizos geotécnicamente deficientes, con una perturbación mínima al macizo rocoso.	0.7
Realización de excavación controlada mediante voladuras, con un impacto mínimo en el macizo rocoso.	
Realización de excavación en taludes de obras civiles mediante voladuras de calidad deficiente.	
Realización de voladuras de producción para el desarrollo de expansiones en tajos de considerables dimensiones y profundidad.	1.0

Nota: (Hoek, Carranza, & Corkum, 2002)

La resistencia a la compresión uniaxial se obtiene haciendo $\sigma'_3 = 0$, dando así:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^\alpha$$

Y haciendo $\sigma'_3 = \sigma'_1 = 0$ la resistencia a la tracción:

$$\sigma_t = \frac{-s\sigma_{ci}}{m_b}$$

Dado que la mayoría de los programas geotécnicos emplean el criterio de rotura de Mohr-Coulomb y los ingenieros suelen estar más familiarizados con los parámetros de cohesión y fricción que con los específicos del criterio de rotura de Hoek-Brown, es esencial poder calcular los ángulos de fricción y cohesión correspondientes para cada tipo de macizo rocoso y rango de tensiones. (Hoek, 2008)

Recordemos que el criterio de rotura de Mohr-Coulomb se expresa en ejes tensión cortante-tensión normal en la forma:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Que al pasarlo a unos ejes $\sigma'_1 - \sigma'_3$ tales como los que se utilizan para representar el criterio de rotura de Hoek-Brown, quedaría en la forma:

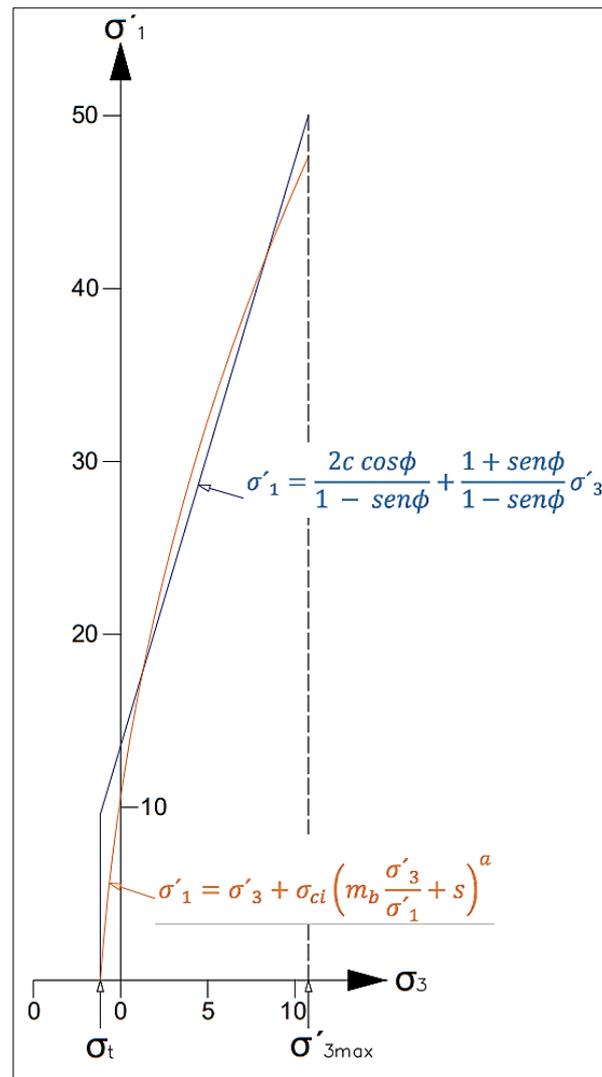
$$\sigma'_1 = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma'_3$$

Evidentemente, nunca se puede ajustar de manera exacta una parábola (Hoek-Brown) a una recta (Mohr-Coulomb). Ajustando una envolvente lineal a la de Hoek-Brown, basado en una regresión lineal media en una gama de valores de la tensión principal menor tal que $\sigma'_1 >$

$\sigma'_3 > \sigma'_{3\max}$, en el proceso de ajuste llevaría consigo equilibrar las áreas que quedarían por encima y debajo de la recta de Mohr-Coulomb. Este ajuste daría como resultado las siguientes expresiones de fricción y cohesión, del macizo rocoso como se muestra en la **Figura 9**.

Figura 9

Linealización de la envolvente de Mohr - Coulomb



Nota: (Hoek, Carranza, & Corkum, 2002)

Por lo que es posible determinar los valores de cohesión (c) y el ángulo de fricción ϕ , del macizo rocoso de la siguiente forma:

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

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

Donde:

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

Para cada problema, se determinará específicamente el valor de σ'_{3max} , que representa el límite superior de la tensión de confinamiento. Sobre esta base, se estimará la relación entre los criterios de rotura de Hoek-Brown y Mohr-Coulomb.

Si es necesario, se podrá calcular la resistencia a compresión simple del macizo rocoso con base en estos valores, de la siguiente manera:

$$\sigma'_{cm} = \frac{2c' \cos \phi}{1 - \text{sen} \phi}$$

Donde, si c' y ϕ' se determinan para la gama de tensiones $\sigma'_1 > \sigma'_3 > \sigma_{ci}/4$, se podría también obtener como:

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{m_b + 4s - \alpha(m_b - 8s) \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{\alpha-1}}{2(1+\alpha)(2+\alpha)}$$

En estudios relacionados llevados a cabo en el campo de la ingeniería de taludes, que se basaron especialmente en el método de fajas de Bishop para analizar la rotura circular de taludes considerando diversas

geometrías y propiedades de macizos rocosos, Hoek et al. (2002) propusieron el siguiente valor para la estimación del parámetro:

$$\frac{\sigma'_{3 \max}}{\sigma_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}$$

Donde en este caso H se refiere a la altura del talud.

Para el cálculo del Módulo de deformación del macizo rocoso (Hoek & Diederichs, 2006) propusieron la expresión más completa para determinar el Módulo de deformación del macizo rocoso:

$$E_m = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{\left(\frac{60 + 15D - GSI}{11} \right)}} \right)$$

Donde:

E_i : Módulo de deformación de la roca intacta.

D: Factor de disturbancia

GSI: Índice de resistencia geológica

2.1.8.2. Criterio de resistencia de Mohr – Coulomb

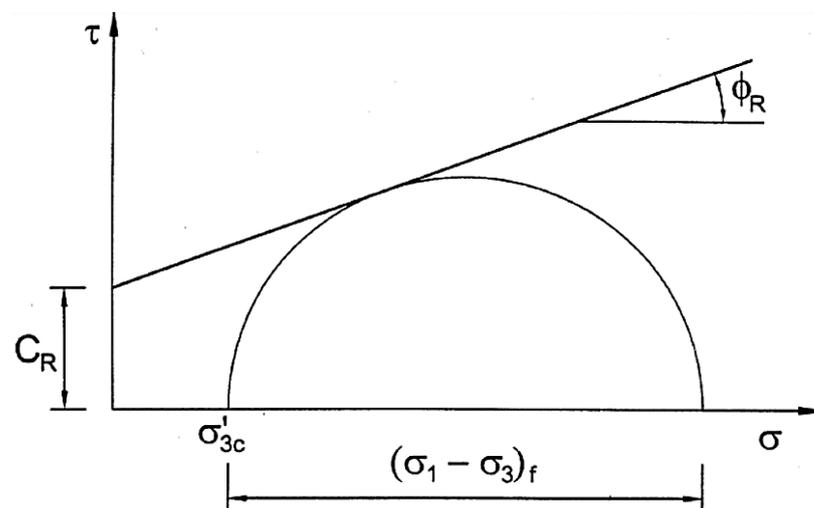
Por muchos años el Criterio de Mohr Coulomb como un criterio clásico ha sido ampliamente aplicado en geotecnia. La resistencia teórica indica que la combinación de los esfuerzos cortante (τ) y la normal (σ_n) en el plano de falla es gradualmente movilizada de manera que ellos puedan intersecar el contorno de la envolvente de resistencia, luego que la ruptura ocurre. La proyección de una tangente al círculo de esfuerzos en el punto de falla forma una relación lineal entre los parámetros del esfuerzo del corte y el esfuerzo normal, tal como se muestra en la Figura 8.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Donde: ϕ representa el ángulo de fricción interno, τ representa la resistencia al corte de la roca, c representa la cohesión de la roca. (Yazdani, Jahed, & Mohd, 2014).

Figura 10

Criterio de resistencia de Mohr Coulomb



2.1.9. Criterio de resistencia de discontinuidades

2.1.9.1. Criterio de resistencia de Barton Bandis

El criterio de rotura no lineal ha sido ampliamente adoptado por numerosos investigadores para el análisis de la estabilidad de taludes rocosos, siendo el criterio de resistencia de la discontinuidad o junta de Barton Bandis el más ampliamente utilizado.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

Donde:



τ : Es el esfuerzo cortante en el plano estructural

σ_n : Es el esfuerzo normal del plano estructural

JRC: Es el coeficiente de rugosidad de la discontinuidad.

JCS: Es la resistencia a la compresión de la discontinuidad.

ϕ_b : Es el ángulo de fricción básico de roca no alterada

Los valores de JRC, JCS pueden ser determinados por:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_o} \right)^{-0.02 JRC_0}$$

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_o} \right)^{-0.03 JRC_0}$$

Donde:

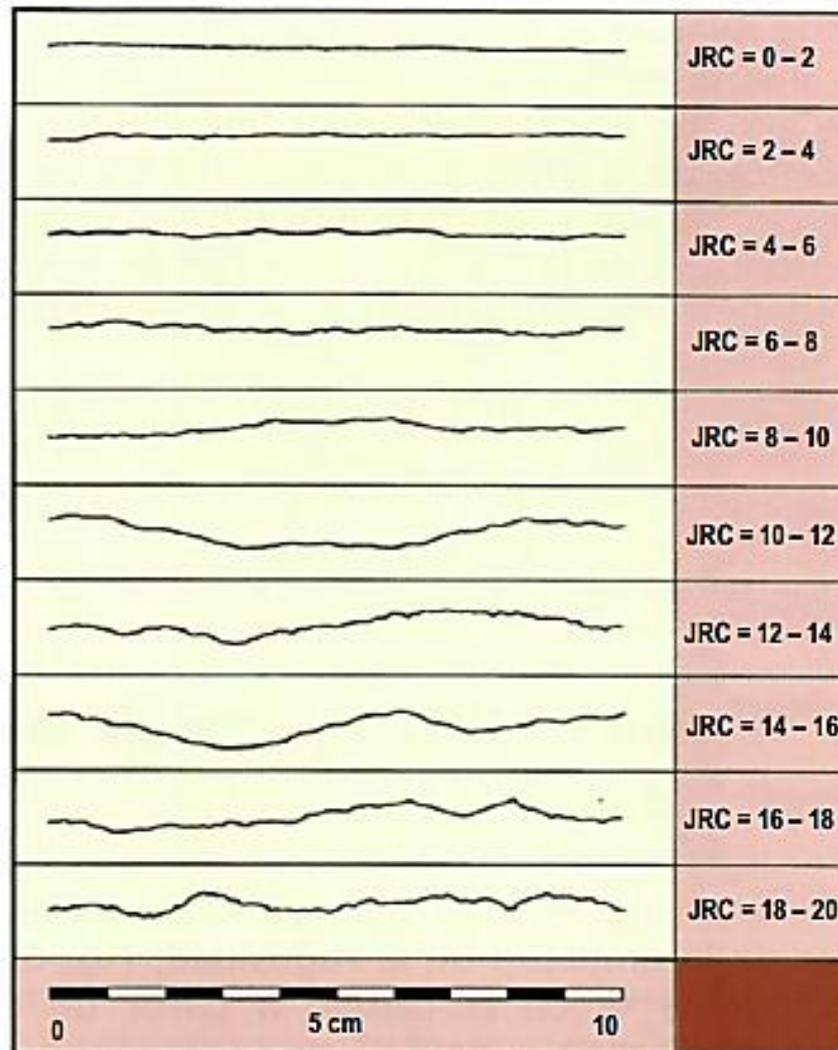
JRC_n y JRC_0 : Son los coeficientes de rugosidad para discontinuidades de L_n y L_o respectivamente y de la misma forma para JCS (Barton, Lien, & Lunde, 1974).

2.1.9.2. Estimación visual directa del JRC

La estimación visual del valor de JRC se logra al comparar un perfil de discontinuidad con perfiles de referencia, como se muestra en la siguiente figura, establecidos por Barton & Choubey (1977) basándose en pruebas reales de corte directo.

Figura 11

Perfiles normalizados para la obtención del JRC.



Nota: (Barton & Choubey, 1977)

2.1.9.3. Estimación de JCS

El Joint Wall Compression Strength (JCS) es un parámetro utilizado para prever la resistencia a la compresión de las paredes de una discontinuidad. Se utiliza la siguiente expresión: (ISRM, 2015)

$$\log_{10}JCS = 0.00088 \cdot \gamma_{roca} \cdot r + 1.01$$

Donde:

γ_{roca} : Es el peso específico de la roca en KN/m³

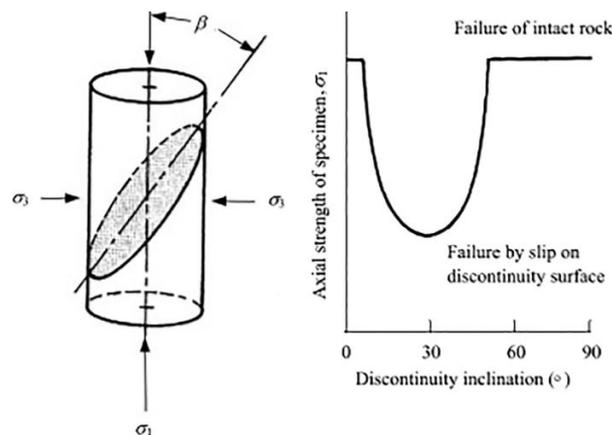
r: Es el índice de rebote de martillo Schmidt en la discontinuidad.

2.1.9.4. Criterio de resistencia de anisotropía generalizada

Los criterios de resistencia de Hoek-Brown y CNI asumen que el macizo rocoso está compuesto por trozos isotrópicos de roca intacta separados por juntas ampliamente espaciadas, sin una dirección de falla preferida, lo cual rara vez se verifica. No obstante, utilizando los mismos principios de la teoría del plano de debilidad, es factible definir la resistencia al corte direccional para el macizo rocoso articulado de la siguiente manera. (Read & Stacey, 2017)

Figura 12

Resistencia a corte direccional.

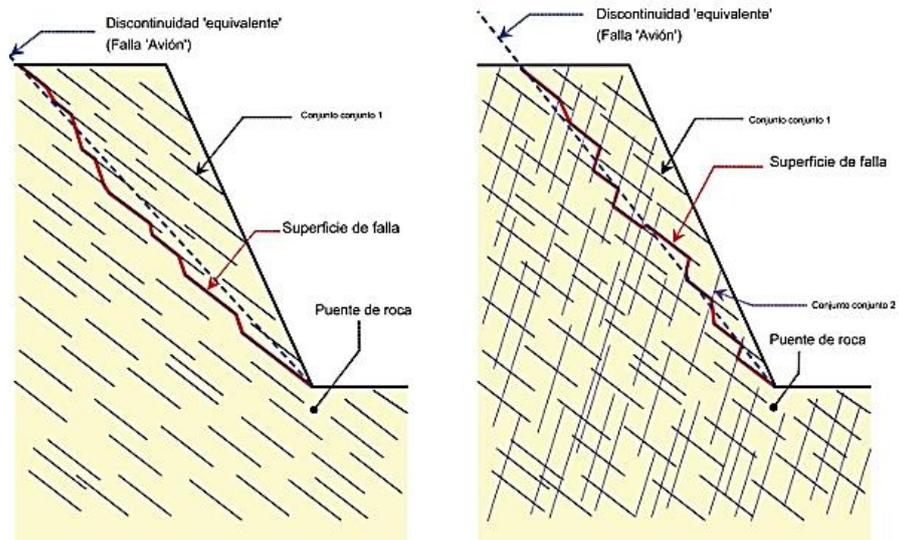


Nota: Resistencia residual y pico en una discontinuidad.

En un talud de roca con discontinuidades no persistentes se producirá una superficie de falla en forma de trayectoria escalonada a través de una combinación de discontinuidades y puentes de roca.

Figura 13

Superficie de falla del camino escalonado.

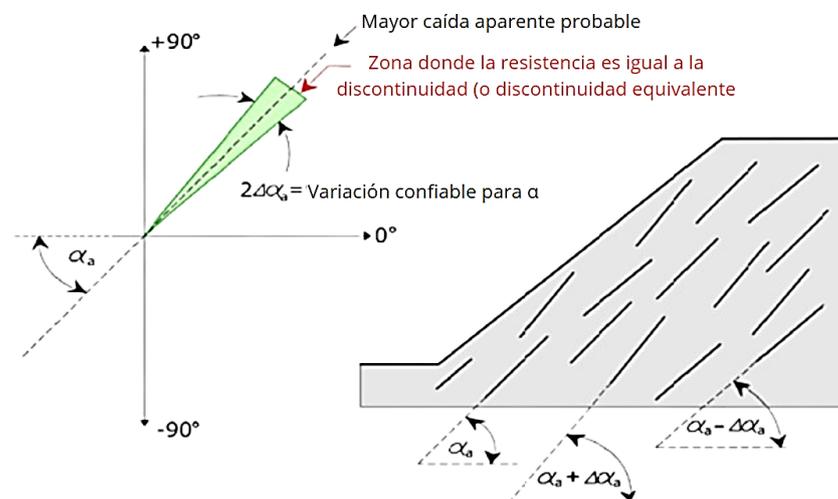


Nota: (Kazulovik, 2006)

Para cada discontinuidad situada subparalela a la orientación del talud se debe determinar el valor más probable de su buzamiento aparente en la sección del talud.

Figura 14

Definición del conjunto de direcciones donde la resistencia del macizo rocoso es igual a la resistencia de la discontinuidad.



Nota: (Read & Stacey, 2017)



2.1.10. Análisis de estabilidad de taludes

El análisis puede determinar la configuración de excavación o la fuerza externa requerida para lograr el factor de seguridad requerido. Este análisis facilitará el diseño de medidas correctivas o de estabilización apropiadas para evitar mayores desplazamientos en condiciones de taludes inestables.(González De Vallejo, 2002)

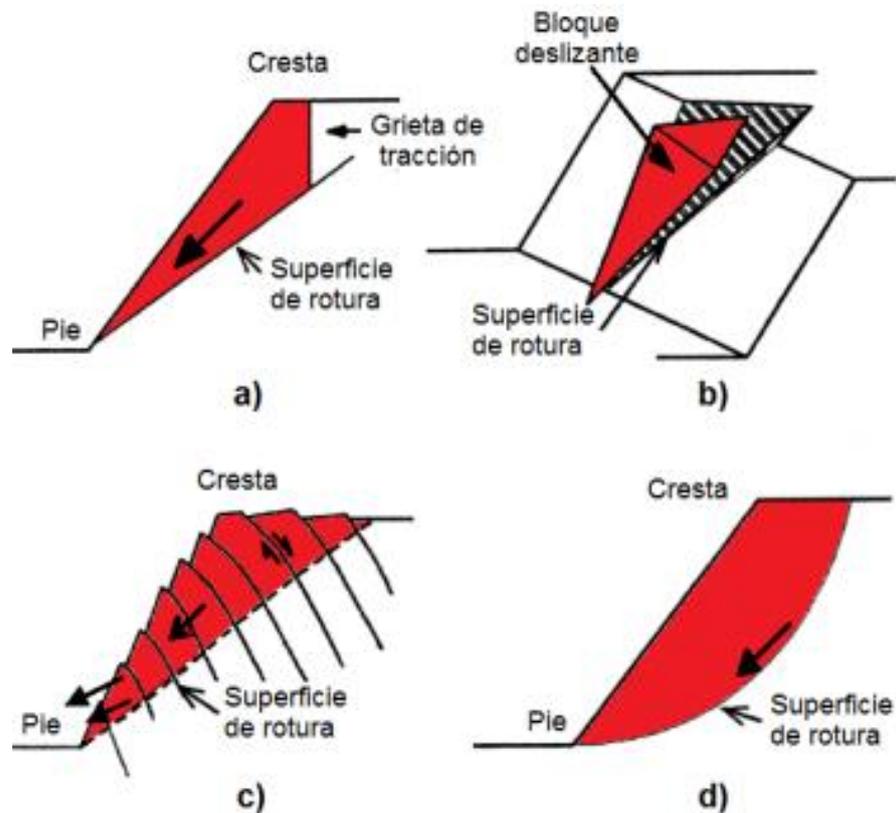
Los estudios de estabilidad se utilizan cuando surgen problemas de inestabilidad o al diseñar taludes. La elección del factor de seguridad depende de la naturaleza temporal o permanente de la pendiente, así como de los costos, la seguridad, las consecuencias y los riesgos asociados con una posible falla. Para taludes estables se recomienda un factor de 1,5 a 2,0 en relación a la fiabilidad de los datos geotécnicos. Para pendientes temporales, este factor suele rondar el 1,3. Pero en algunos casos pueden ser aceptables valores más bajos..(González De Vallejo, 2002)

2.1.10.1.Mecanismos de rotura en taludes

La evaluación para el sostenimiento de un talud inicia al identificar el modo de falla y elegir un modelo adecuado para llevar a cabo dicho estudio (Call, 1999) . Realizo la categorización de las fallas en mecanismos de roca utilizando criterios geométricos, que incluyen: Falla planar, Falla por flujo de bloques (vuelco) y Falla rotacional (circular), Falla por cuna.

Figura 15

Modos de falla en taludes de roca.



Nota: (Coates, 1973)

Hay dos categorías de falla de taludes: falla estructuralmente controlada y falla estructuralmente no controlada. Los modos de falla plana, en cuña e inversa pertenecen a la primera categoría y los modos de falla circular pertenecen al segundo grupo. (Hoek & Karzulovic, 2000)

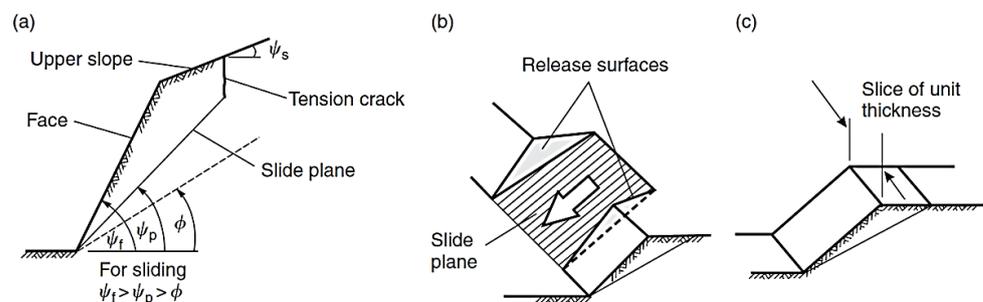
2.1.10.2. Rotura planar

En pendientes rocosas altas, las fallas planas son muy raras debido a las condiciones estructurales inherentes. Estas condiciones incluyen que la superficie de deslizamiento esté orientada paralela o casi paralela a la pendiente, que el ángulo de pendiente exceda el ángulo de pendiente de la superficie de deslizamiento y que el ángulo posterior sea mayor que el

ángulo de fricción. La rotura se dice que una grieta es plana si se produce deslizamiento a lo largo de una superficie plana. Esta forma de falla ha demostrado ser la más simple, pero cuando hay una grieta grande en la roca en la dirección correcta con respecto a la pendiente, generalmente aparece como una falla a lo largo de la pendiente. (Instituto Geológico Minero de España, 2006)

Figura 16

Condiciones para falla planar



Nota: (a) Sección transversal que muestra los planos que forman una rotura planar. (b) Superficies de desprendimiento en los extremos del plano de rotura. (c) Diafragma de espesor unitario utilizado en el análisis de estabilidad

2.1.10.3. Rotura en cuña

Está formado por la intersección de dos planos discontinuos formando un bloque deslizante en forma de cuña. Para que se produzca una grieta deben aparecer dos planos en el talud. Si aparece como dos discontinuidades colocadas oblicuamente a la superficie del talud, y la junta parece estar más alta que la superficie del talud y buza en una dirección desfavorable, tenemos una fractura en la forma. Este tipo de daño ocurre principalmente en macizos rocosos que tienen disposiciones de



juntas precisas en términos de orientación y buzamiento.(Instituto Geologico Minero de España, 2006)

2.1.10.4.Rotura por vuelco

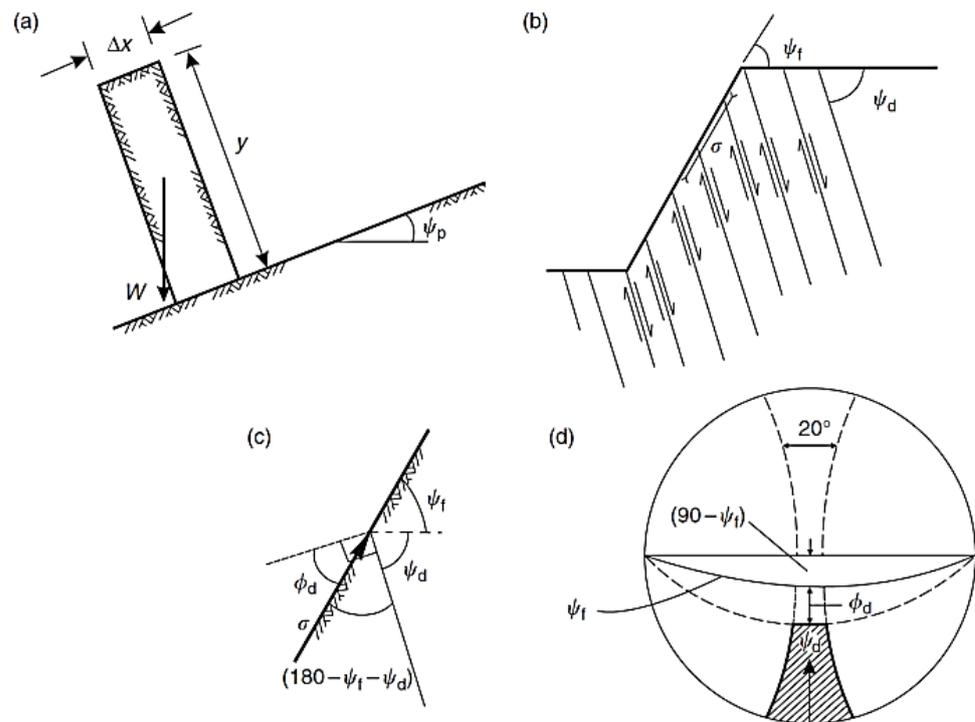
Este fenómeno es más notable en rocas que se hunden en la dirección opuesta a la pendiente y tienen una estructura orientada paralela o casi paralela a la pendiente. La rotación de la columna de piedra está controlada por las propiedades de soporte y las discontinuidades del macizo rocoso. El fallo rotacional de taludes implica la rotación de bloques o columnas de piedra, incluso si se produce por vuelco. (Instituto Geologico Minero de España, 2006)

Según Wyllie & Mah (2005) para que se dé una rotura por vuelco, se deben generar las siguientes condiciones:

- Condiciones de corte entre capas.
- Dirección de deslizamiento y carga sobre el talud de roca.
- Ensayo de colapso en altura/ancho del bloque.
- Proyección estereoscópica del hemisferio inferior.

Figura 17

Condiciones Cinemáticas para el deslizamiento flexural antes del volteo.



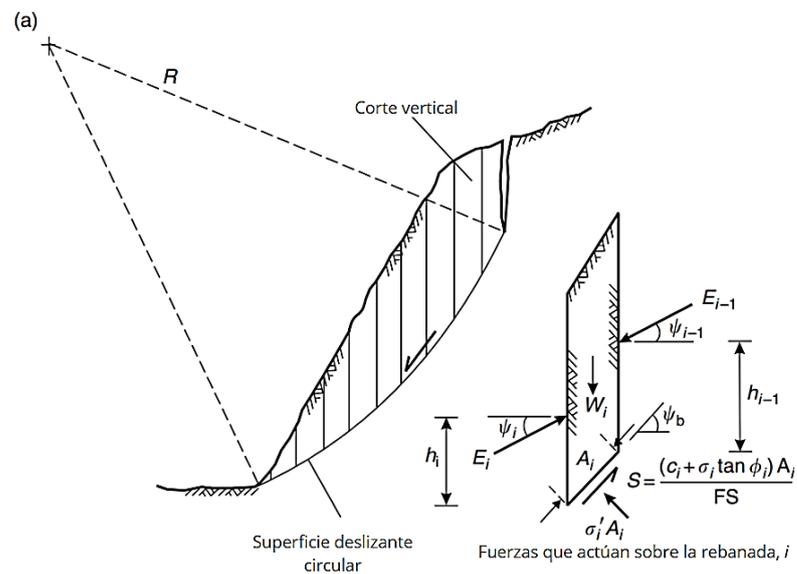
Nota: (a) prueba de altura / anchura del bloque para el derrumbamiento; (b) direcciones del esfuerzo y direcciones de deslizamiento en el talud de roca; (c) condición para el deslizamiento entre capas; (d) prueba cinemática definida en la proyección estereográfica del hemisferio inferior

2.1.10.5. Rotura circular

Este tipo de falla ocurre en bloques de baja resistencia, muy erosionados o estructuralmente afectados. Esto ocurre cuando el bloque se comporta como un material isotrópico y la superficie de fractura no controla significativamente sus propiedades mecánicas. Una falla en la cual la superficie de deslizamiento se asemeja a una superficie cilíndrica con una sección transversal correspondiente a un arco circular se llama falla circular. (Instituto Geológico Minero de España, 2006)

Figura 18

Forma típica de superficies de deslizamiento circular.



Nota: En material homogéneo y débil, se analizan superficies circulares de gran radio, destacando las fuerzas que actúan sobre la rebanada.

2.1.10.6. Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Los factores a considerar al precisar el método de análisis incluyen la etapa del proyecto, el tamaño del talud y las propiedades de los materiales que lo componen. Se encuentran disponibles varios métodos analíticos, como el empírico, el de equilibrio límite y el numérico, cuya elección se basa en las características específicas de la situación. (Read & Stacey, 2017)

Actualmente, se observan divergencias en las estrategias empleadas para enfrentar la estabilidad de taludes en macizos rocosos, siendo uno de estos enfoques el método de proyección estereográfica o cinemática. Gundewar (2014) señala que estos métodos se dedican a analizar los potenciales modos de falla que puedan manifestarse en el



macizo rocoso, sentando, de esta manera, los cimientos para un análisis subsiguiente mediante el método de equilibrio límite.

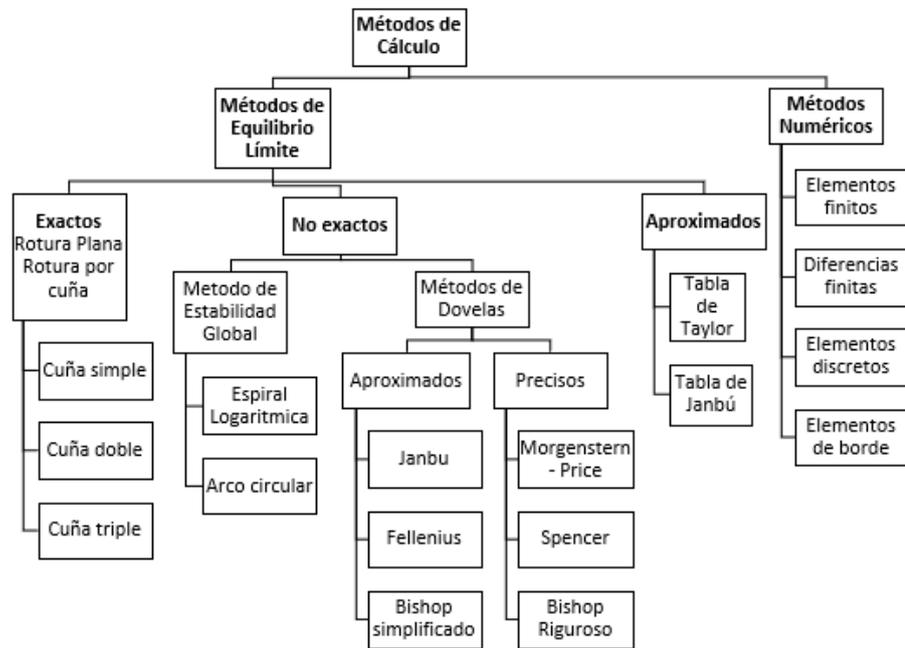
Este método constituye la base necesaria para la aplicación y el análisis detallados del equilibrio límite mediante el análisis de los diversos modos de falla que pueden ocurrir en los macizos rocosos. Evaluar la estabilidad de taludes y desarrollar estrategias efectivas de mitigación de riesgos en ingeniería geotécnica requiere una comprensión profunda de los modos de falla.

Según Ayala & Andreu (1986) menciona que “los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud se pueden clasificar en dos grandes grupos, métodos de cálculo en deformaciones y métodos de equilibrio límite”, como se describe a continuación:

- **Métodos de cálculo en deformaciones (numéricos)**, Los cálculos incorporan las leyes de la estática junto con las deformaciones del terreno. La aplicación efectiva de tales métodos resulta ser intrincada, y abordar el problema implica la utilización de técnicas como el MEF o distintos métodos numéricos.
- **Métodos de equilibrio límite**, Evaluar el equilibrio de una masa de terreno, que podría enfrentar riesgos de inestabilidad, se basa exclusivamente en las leyes de la estática. En estos métodos, no se toman en cuenta las deformaciones del terreno, y se asume que la resistencia al corte se activa de manera total y simultánea a lo largo de la superficie de corte.

Figura 19

Clasificación de métodos de análisis de estabilidad de taludes.



2.1.10.7. Métodos empíricos

En las primeras etapas de un proyecto, cuando la información es limitada y el modelo aún no está definido, los gráficos empíricos son muy útiles para crear un diseño de pendiente inicial. Sin embargo, es necesario reconocer y tener en cuenta sus limitaciones. (Read & Stacey, 2017)

La aplicación de estas técnicas experimentales plantea desafíos importantes, aunque los resultados son específicos de un macizo rocoso o condición de agua subterránea en particular, y debido a que se muestran gráficamente, los diseñadores interesados en el análisis de estabilidad tienen opciones limitadas.



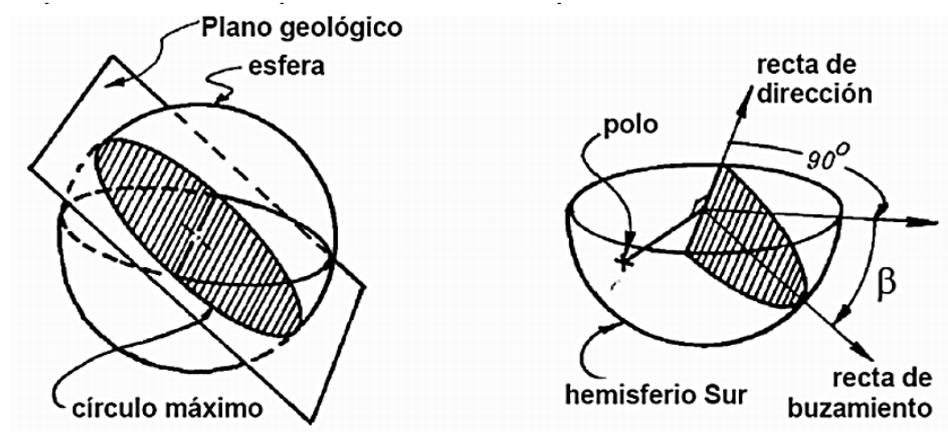
2.1.10.8. Método cinemático o de proyecciones estereográficas

El cálculo de la estabilidad de un macizo rocoso se encuentra mayormente influenciada por las discontinuidades presentes en la masa rocosa, las cuales tienen orientaciones desfavorables. Es crucial evaluar estas orientaciones para determinar si la condición estructural conduce a una posible inestabilidad. Este proceso, conocido como análisis cinemático, es esencialmente geométrico y prescinde de considerar cualquier fuerza o esfuerzo que actúe sobre la roca. En situaciones donde el análisis cinemático señala la inestabilidad del talud rocoso, se lleva a cabo un estudio de sostenibilidad mediante el MEL. De este análisis, se calcula el FS. Usualmente, la realización del análisis cinemático se efectúa mediante el método los estereogramas. (Park, Lee, Kim, & Um, 2016)

Los macizos están formados por macizos rocosos separados por fracturas y pueden estar organizados en agregados o familias, o menos estructurados o distribuidos de forma más aleatoria. La Figura 20 muestran que las proyecciones estereográficas facilitan la identificación de conjuntos o familias que representan planos espaciales arbitrarios utilizando dos parámetros clave: dirección de incrustación y dirección de incrustación. (Gundewar G. S., 2014)

Figura 20

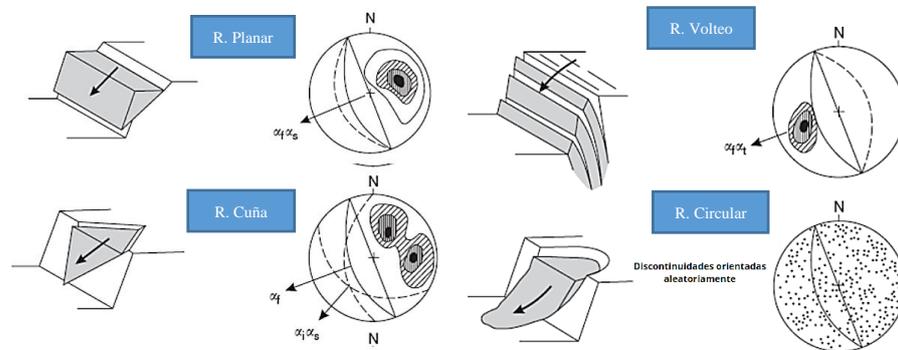
Representación de familias de discontinuidades en la proyección estereográfica.



Nota: (Gundewar G. S., 2014)

Figura 21

Representación en el estereograma de los principales tipos de rotura.



Nota: (Wyllie & Mah, 2005)

2.1.10.9. Método de equilibrio límite

Los MEL estos utilizan información sobre geometrías características, propiedades de los materiales, peso unitario de los materiales, resistencia al corte de las discontinuidades, presencia de agua subterránea y condiciones de carga/soporte. Estos métodos se basan en un

conjunto de supuestos mecánicos simplificados para determinar el factor de seguridad de la pendiente. (Read & Stacey, 2017) (P. 248)

Dentro de este grupo se definen dos procedimientos para la aplicación aplicación:

- Métodos que calculan mediante un plano de deslizamiento previsto de el que se calcula su FS (falla planar, cuña, volteo o circular) ya desarrolladas en el capítulo anterior.
- Métodos en los que se encuentra la superficie de falla y su FS.

Análisis de estabilidad por falla planar

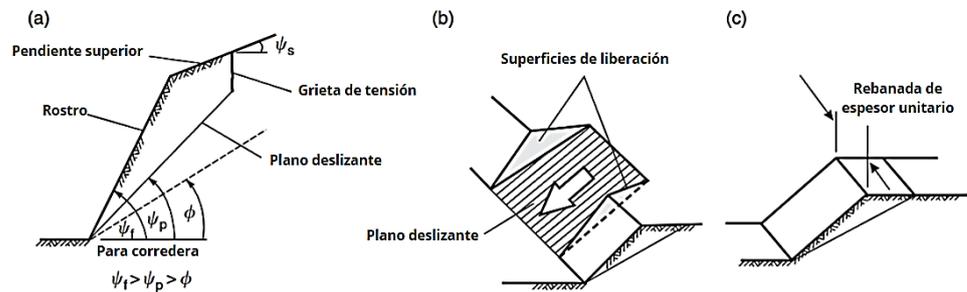
La rotura planar se manifiesta cuando una masa rocosa, tratada como un bloque sólido, experimenta un desplazamiento en la extensión de una superficie inclinada, pero parcialmente plana, según se ilustra en la **Figura 22** Este tipo de falla puede acontecer bajo ciertas condiciones específicas.

Según (Chaulya & Prasad, 2016) se da si se presentan las siguientes condiciones:

- La orientación del plano de rotura (ψ_p) es inferior que la orientación de la superficie del talud (ψ_f) y el ángulo interno de fricción (ϕ) es inferior a la orientación del plano de fractura (ψ_p).
- El pie del plano de rotura debe estar entre el pie y la cresta del talud.
- El rumbo del plano de rotura debe oscilar entre ± 20 grados del rumbo de la cabeza del talud.

Figura 22

Rotura planar.

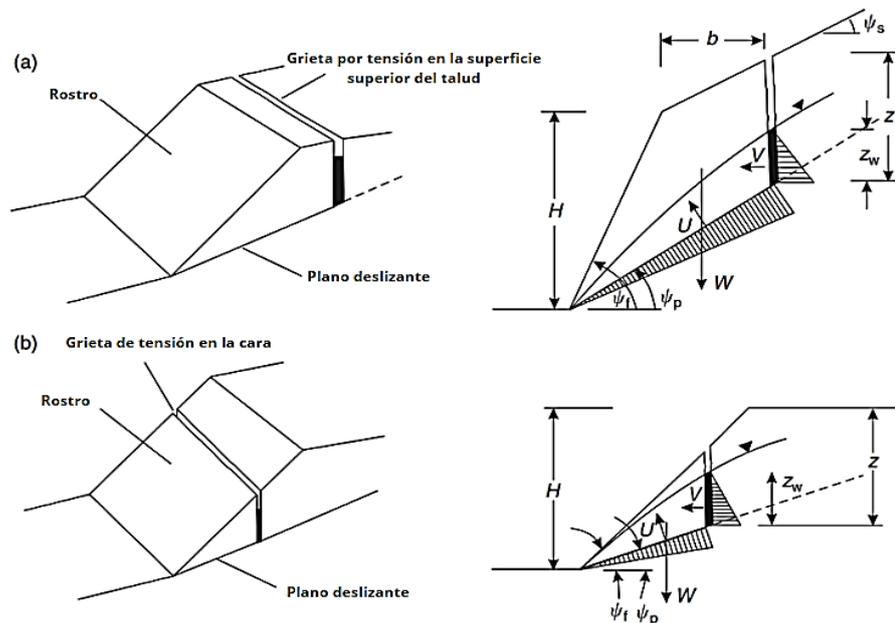


Nota: En el análisis de estabilidad, se emplea un diafragma de espesor unitario, como se muestra en el corte de la figura que revela los planos responsables de un tipo de falla o rotura planar (a). Las superficies de falla en los laterales del plano de falla se ilustran en (b).

Para las roturas planares con grieta se analiza así:

Figura 23

Rotura planar con grieta.



Nota: (a) Grieta de tracción en la parte superior del talud; (b) grieta de tracción en la superficie del talud.

$$FS = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + v \cos \psi_p}$$



$$A = \frac{h + b \tan \psi_p - z}{\sin \psi_p}$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w z_w \frac{(H + b \tan \psi_s - z)}{\sin \psi_p}$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2$$

Para el caso a:

$$W = \gamma_r \left[\left(1 - \frac{\tan \psi_p}{\tan \psi_f} \right) \left(bH + \frac{H^2}{2 \tan \psi_f} \right) + \frac{1}{2} b^2 (\tan \psi_s - \tan \psi_p) \right]$$

Para el caso b:

$$W = \frac{1}{2} \gamma_r H^2 \left[\frac{\left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 \left(\frac{\tan \psi_f}{\tan \psi_p} - 1 \right)}{\tan \psi_p} \right]$$

Donde:

A: Es el área del plano de deslizamiento

U: Es la fuerza ejercida por el agua

V: Fuerza ejercida por la grieta de tracción

C: Cohesión

γ_w : Peso unitario del agua

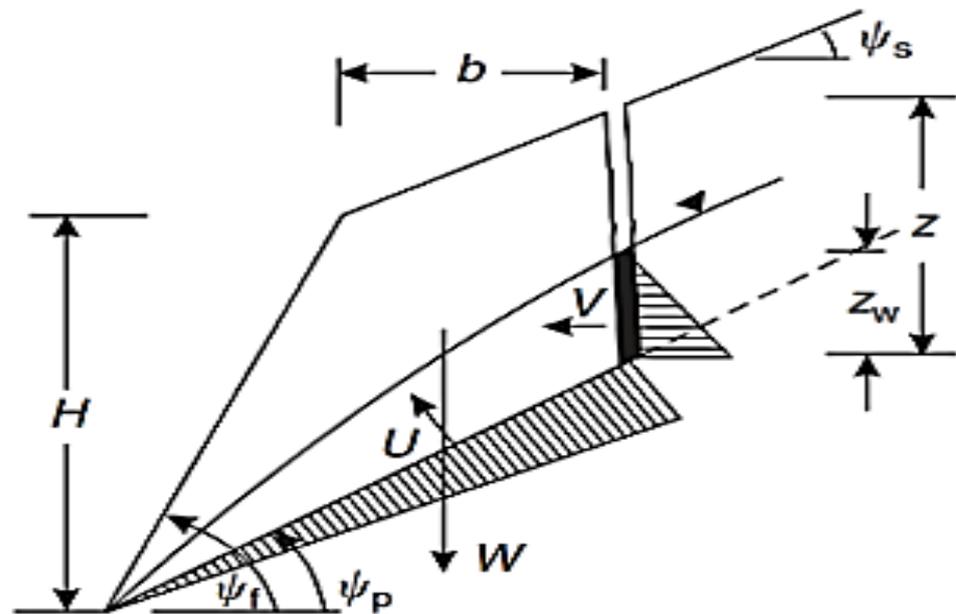
γ_r : Peso unitario de la roca

U: Es la fuerza ejercida por el agua

Para casos en los que se considera el nivel de las aguas subterráneas:

Figura 24

Casos de nivel freático en aguas subterráneas



Nota: En la base del talud, se presenta una presión uniforme en el plano de deslizamiento cuando el drenaje está bloqueado.

$$U = \frac{1}{2} \frac{z_w}{2 \operatorname{sen} \psi_p} h_w \gamma_w$$

Análisis de estabilidad por falla cuña

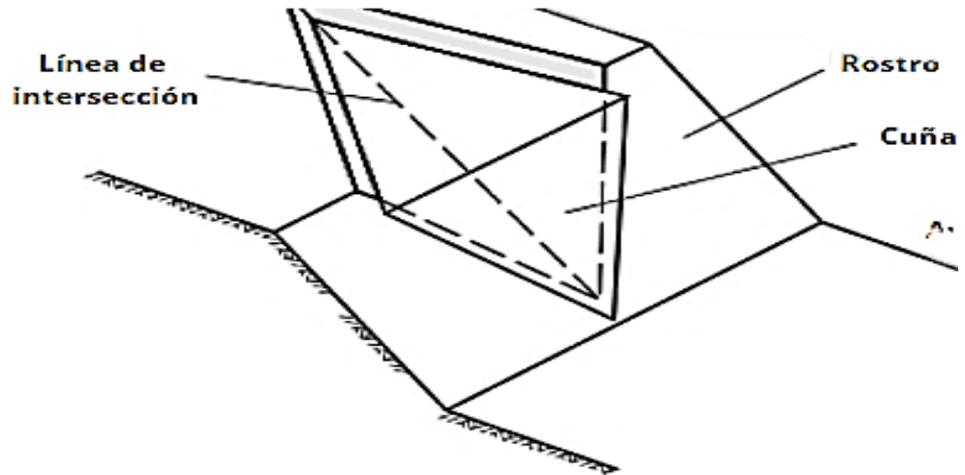
Según Wyllie & Mah (2005) se debe tener la siguiente información para comprobar si se da una rotura por vuelco:

- Vista isométrica de la rotura por cuña.
- Estereograma que muestra la orientación de la línea de intersección y el rango de la inmersión de la línea de intersección ψ_i donde la rotura es factible.
- Vista del talud ortogonal a la línea de intersección.

- Estereograma indicando el rango en la tendencia de la línea de intersección αi en la que una rotura por cuña es posible.

Figura 25

Rotura por cuña.



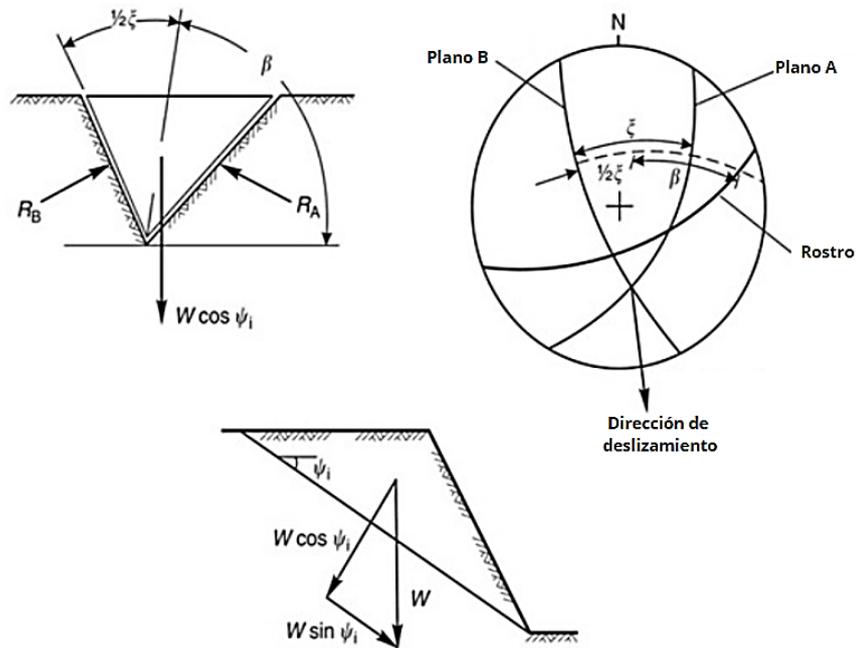
Nota: La convención adoptada en este análisis es que el plano mas plano siempre se denomina plano A.



Nota: En la vista isométrica se visualiza la cuña. El análisis estereográfico destaca la orientación de la línea de confluencia de planos y el rango de inmersión de la misma, indicando las condiciones en las cuales la rotura es posible. La vista del talud perpendicular a la línea de intersección se muestra en, mientras que el estereograma ilustra el rango de ocurrencia de la línea de intersección αi donde la falla por cuña.

Figura 26

Esquema de fuerzas para obtener el FS de la cuña.



Nota: se presentan diversas perspectivas de la cuña y sus componentes. En la vista (a), se observa la cuña desde el ángulo definido por los ángulos β y ξ , con las reacciones en los planos deslizantes R_A y R_B . El estereograma (b) ofrece una representación visual de las mediciones de los ángulos β y ξ . La sección transversal de la cuña se exhibe en (c), destacando la resolución del peso de la cuña W .

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

$$R_A \sin \left(\beta - \frac{1}{2} \xi \right) = R_B \sin \left(\beta + \frac{1}{2} \xi \right)$$

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

$$R_A + R_B = \frac{W \cos \psi_i \sin \beta}{\sin \frac{\xi}{2}}$$

$$FS = \frac{\sin \beta}{\sin \frac{\xi}{2}} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \psi_i}$$

Donde:

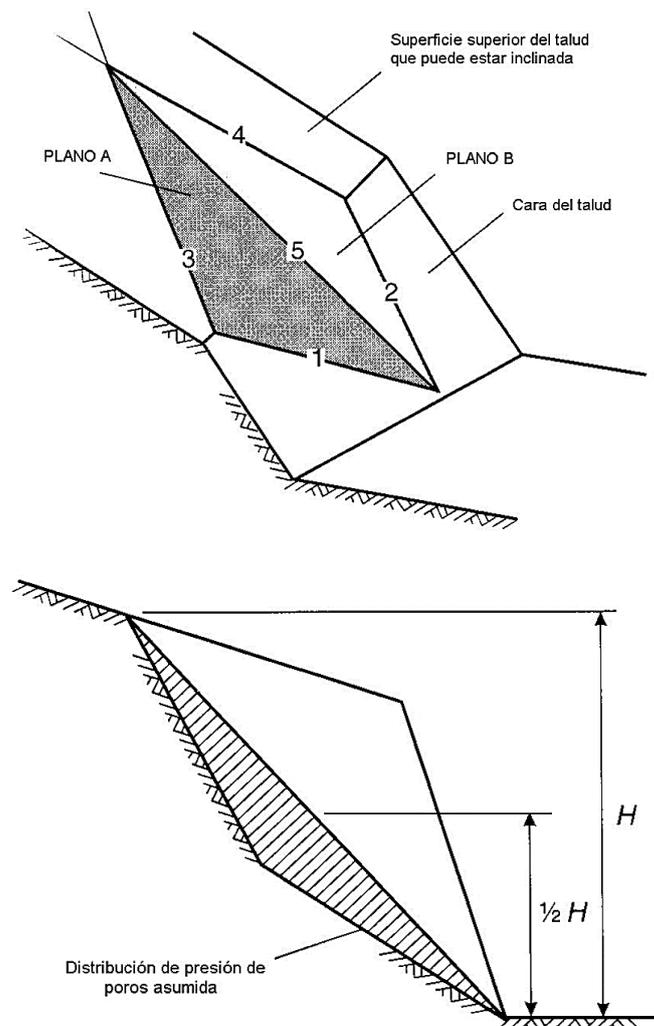
R_A y R_B : Son las reacciones normales a los planos A y B.

ξ y β : Son los ángulos definidos en la **Figura 26**.

Cuando se considera la cohesión, la fricción y la presión que ejerce el agua:

Figura 27

Geometría de la cuña usada para el análisis de estabilidad incluyendo la fricción, la cohesión y la presión del agua en la superficie de deslizamiento.



Nota: (Wyllie & Mah, 2005)



$$FS = \frac{3}{\gamma_r H} (c_A X + c_B Y) + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} X \right) \tan \phi_A + \left(B - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} Y \right) \tan \phi_B$$

Donde:

c_A y c_B : Son las resistencias cohesivas

ϕ_A y ϕ_B : Ángulos de fricción de los planos A y B respectivamente

γ_r : Es el peso unitario de la roca

γ_w : Es el peso unitario del agua

Y los valores X, Y, A y B son:

$$X = \frac{\text{sen}\theta_{24}}{\text{sen}\theta_{45} \cos\theta_{2.na}}$$

$$Y = \frac{\text{sen}\theta_{13}}{\text{sen}\theta_{35} \cos\theta_{1.nb}}$$

$$A = \frac{\cos\psi_a - \cos\psi_b \cos\theta_{na.nb}}{\text{sen}\psi_5 \text{sen}^2\theta_{na.nb}}$$

$$B = \frac{\cos\psi_b - \cos\psi_a \cos\theta_{na.nb}}{\text{sen}\psi_5 \text{sen}^2\theta_{na.nb}}$$

Donde:

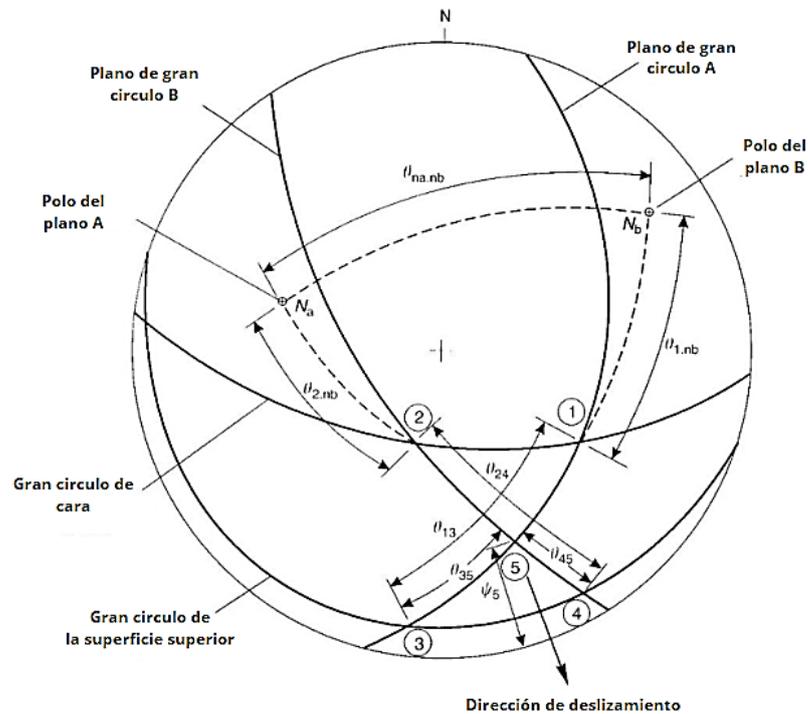
ψ_a y ψ_b : Son los buzamientos de los planos A y B respectivamente.

ψ_5 : Es el buzamiento de la línea de intersección.

Y los ángulos vienen del estereograma de análisis.

Figura 28

Estereograma con los datos requeridos para el análisis de estabilidad en rotura por cuña.



Nota: (Wyllie & Mah, 2005)

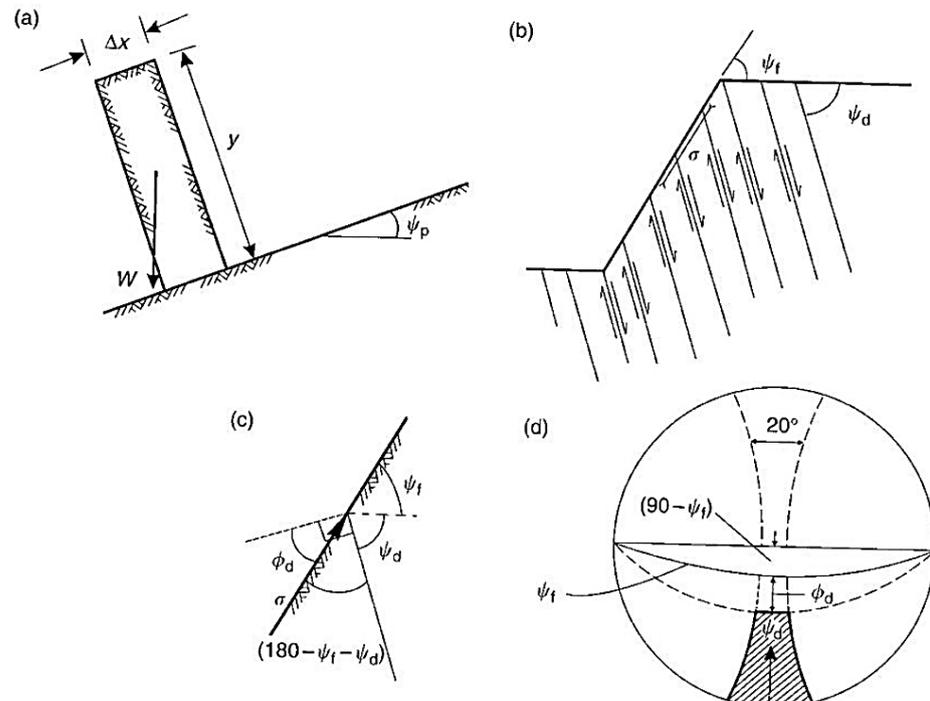
Análisis de estabilidad por falla volteo

Según Wyllie & Mah (2005) se deben cumplir las siguientes condiciones para que se de una rotura por vuelco:

- Condición para el deslizamiento entre capas.
- Direcciones del esfuerzo y direcciones de deslizamiento en el talud.
- Prueba de altura / anchura del bloque para el derrumbamiento.
- Prueba cinemática definida en la proyección estereográfica del hemisferio inferior.

Figura 29

Condiciones Cinemáticas para el deslizamiento flexural antes del volteo.



Nota: (a) vista isométrica de la rotura por cuña de cuña; (b) estereograma que muestra la orientación de la línea de intersección y el rango de la inmersión de la línea de intersección ψ_i donde la rotura es factible; (c) vista del talud perpendicular a la línea de intersección; (d) estereograma mostrando el rango en la tendencia de la línea de intersección α_i donde la rotura por cuña es factible

Condición de deslizamiento inter capa:

$$(180 - \psi_f - \psi_d) \geq (90 - \phi_d) \Rightarrow \text{Deslizamiento}$$

$$\psi_d \geq (90 - \psi_f) + \phi_d \Rightarrow \text{Deslizamiento}$$

Condición de forma del bloque:

$$\psi_p < \phi_p \Rightarrow \text{Estable}$$

$$\frac{\Delta x}{y} < \tan \psi_p \Rightarrow \text{Volcamiento}$$

Condición de alineamiento de bloque:

$$|(\alpha_f - \alpha_d)| < 10^\circ \Rightarrow \text{Volcamiento}$$

El factor de seguridad para el volteo puede definirse dividiendo la tangente del ángulo de rozamiento que se cree que se aplica a las capas de roca ($\tan\phi_{disponible}$), por la tangente del ángulo de fricción requerido para el equilibrio ($\tan\phi_{requerido}$). (Wyllie & Mah, 2005).

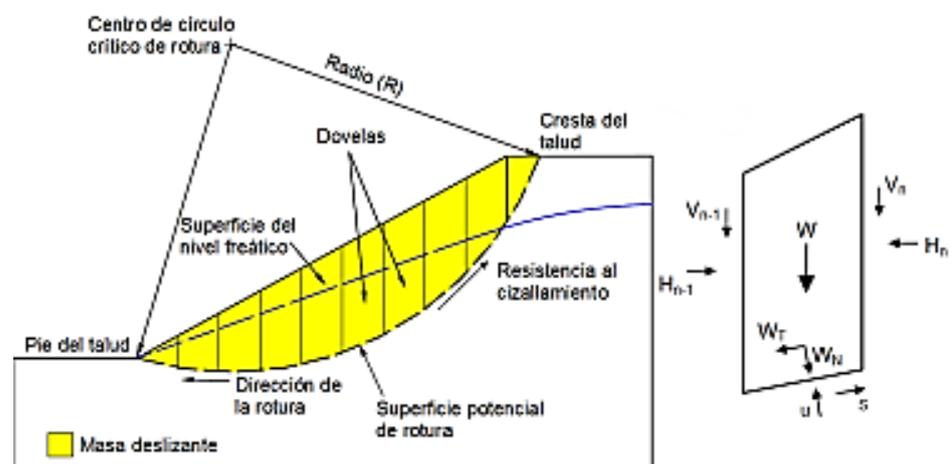
$$FS = \frac{\tan\phi_{disponible}}{\tan\phi_{requerido}}$$

Métodos de dovelas

El enfoque de análisis por secciones o dovelas aborda este problema de forma bidimensional y analiza la estabilidad de taludes en secciones transversales. Divide el área propensa a deslizamientos de tierra en franjas verticales y verifica el equilibrio de cada franja como se muestra en la **Figura 30**.

Figura 30

Método de la dovela para una rotura circular.





Los métodos de segmentación por secciones o dobelas se utilizan ampliamente porque pueden resolver una variedad de problemas con un grado razonable de precisión en la mayoría de los casos. Estos métodos permiten tener en cuenta el efecto de la presión de poro, la presencia de cargas externas que actúan sobre el talud, la presencia de materiales con diferentes propiedades y en muchos casos son adecuados para diferentes tipos de superficies de falla. (Instituto Geológico Minero de España, 2006)

El enfoque de fajas o dovelas, en sus diversas variantes, resultan en un método práctico y versátil para realizar cálculos en condiciones geotécnicas complejas, teniendo en cuenta geometrías complejas y factores externos como sobrecargas y anclajes. Este método se utiliza ampliamente para tratar fallas circulares. Existen problemas y hasta hace poco la incorporación de métodos numéricos se ha utilizado prácticamente como la única opción. Surge en respuesta a las limitaciones y dificultad de otro método, así como a la necesidad de evaluar con precisión los factores de seguridad en el terreno tipo Mohr-Coulomb, lo cual requería tener en cuenta la distribución de tensiones efectivas normales a lo largo de la línea de deslizamiento, un aspecto no abordado completamente por los métodos previos. (Ramírez P. & Alejano L., 2004).

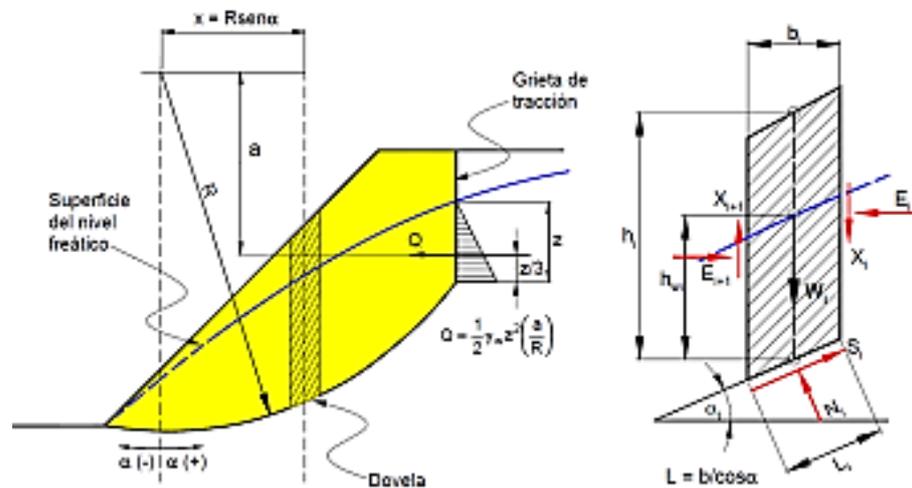
Los factores de seguridad se determinan mediante las condiciones estáticas de equilibrio en métodos convencionales de dovelas o fajas. Entre las opciones más frecuentes se encuentran:

Método de Fellenius

También llamado como método sueco, método de segmento o U.S.B.R. método, se supone que la superficie de falla potencial es circular y solo calcula el factor de seguridad siguiendo la ecuación de equilibrio de momentos.

Figura 31

Parámetros geométricos y esquema de esfuerzos en una rebanada para el método de fellenius.



En este caso, el FS se expresa por la resolución de la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c' L_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i L_i) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w Z^2 \left(\frac{a}{R} \right)}$$

Método de bishop simplificado

El método de dovelas fue planteado en 1955 por Bishop donde se analiza un plano de falla partiendo de la premisa de que se ocasionara por un tramo circular. El factor de seguridad se calcula siguiendo la ecuación

de equilibrio de fuerza y momento vertical utilizada para determinar la fuerza normal. En este método se supone que la componente horizontal de la fuerza transversal generada en cada sección es horizontal, simplificando el procedimiento al suponer que las fuerzas que actúan sobre las otras tiras en los bordes de la sección respectiva tienen una componente vertical cero.

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{c'b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'}{M_i(\alpha_i)} \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \operatorname{sen} \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w Z^2 \left(\frac{a}{R} \right)}$$

$$M_i(\alpha_i) = \operatorname{cos} \alpha_i \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{FS} \right)$$

Una redundancia se presenta en este enfoque, que comparte similitudes con el método de Fellenius, al tener más ecuaciones que incógnitas, lo que provoca una sobre determinación del coeficiente de seguridad. Esta, sin embargo, genera una disminución en la precisión al calcular el factor de seguridad, dando como resultado valores que tienden a ser hasta 1,5 veces menores que los valores reales, generalmente inclinándose hacia la conservación de la sostenibilidad.

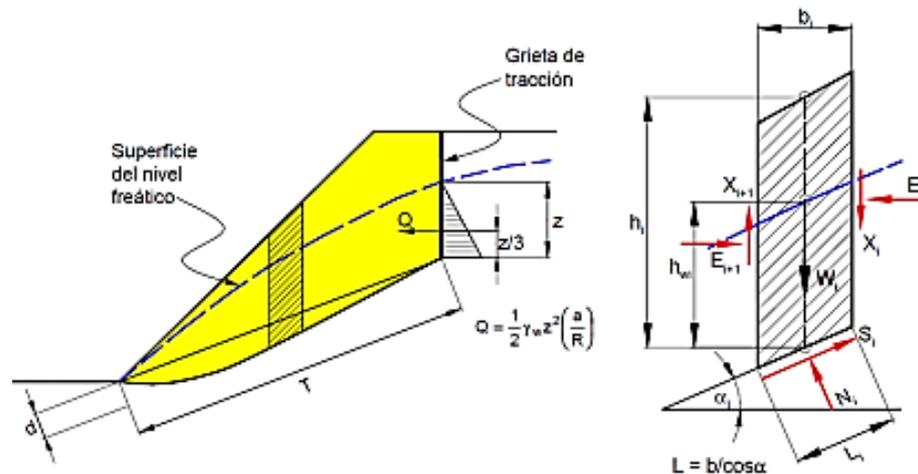
Método de Janbu simplificado

Se introduce un método de dovelas por Janbu en 1968, enfocado en tratar el análisis de estabilidad en superficies de falla no circulares, aplicando las ecuaciones de equilibrio para fuerzas horizontales y verticales. Este método elimina la necesidad de considerar la componente vertical de la fuerza entre los segmentos. La aproximación de Janbu esto implica determinar la altura del punto de aplicación para la respuesta normal de un segmento al siguiente, introduciendo n-1 suposiciones y

demostrando así ser un método impreciso como su predecesor. A pesar de estas limitaciones, el método de Janbu demuestra la capacidad de analizar superficies de cualquier forma, asegurando el equilibrio de fuerzas verticales en cada franja y el equilibrio horizontal general de toda la masa.

Figura 32

Método simplificado de Bishop y el método simplificado de Janbu, se examinan los parámetros geométricos y el esquema de esfuerzos en una rebanada.



$$FS = \frac{f_0 \sum_{i=1}^n \left[\frac{(c' + (\gamma h_i - \gamma_w h_{wi}) \tan \phi') (1 + \tan^2 \alpha_i) b_i}{N_i(\alpha_i)} \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \tan \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w Z^2}$$

$$N_i(\alpha_i) = \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{FS} \right)$$

$$f_0 = 1 + k \left(\frac{d}{T} - 1.4 \left(\frac{d}{T} \right)^2 \right)$$

$k=0.31$ si $c'=0$; $k=0.50$ si $c'>0$ y $\phi'>0$



Donde:

γ : Peso específico del terreno

h_w : Altura del nivel de agua

Z: Altura del nivel de agua en la grieta de tracción

L: Longitud de la base de la dovela

γ_w : Peso específico del agua

h: Altura de la dovela en la parte media

B: Ancho de la dovela

ϕ' : Ángulo de fricción interna

W: Peso de cada dovela

c' : Cohesión en términos de tensiones efectivas

α : Ángulo positivo o negativo de la base de la dovela

2.1.10.10. Métodos numéricos

A pesar de la versatilidad y sencillez de aplicación de métodos como el de cortes en el análisis de equilibrio límite para enfrentar problemas de estabilidad en taludes de macizos rocosos articulados, presentan restricciones al no poder representar adecuadamente la deformación o desplazamiento del macizo rocoso al experimentar fallas. Esta carencia ha sido mitigada en gran medida mediante el empleo de métodos de análisis numéricos, que permiten modelar condiciones

complejas presentes en laderas rocosas, incluyendo el comportamiento no lineal tensión-deformación, la anisotropía y cambios en la geometría. (Read & Stacey, 2017).

Existen dos categorías principales de métodos numéricos utilizados en ingeniería: los "métodos de dominio", donde se simula todo el material objeto de análisis, y los "métodos de contorno", que se centran principalmente en las condiciones límite, trabajando en los contornos. El primer grupo está compuesto por los siguientes métodos:

- Método de Elementos Finitos
- Método de Diferencias Finitas
- Métodos de Elementos Discretos

Tabla 20

Ámbito de aplicación de los métodos numéricos.

Método	MEF	MDF	MED
Ámbito de aplicación	Análisis lineales y no-lineales. Materiales no homogéneos y moderadamente fisurados.	Análisis lineales y no-lineales. Materiales no homogéneos y moderadamente fisurados. Especialmente indicado para análisis muy no lineales, transitorios y grandes deformaciones.	Análisis no-lineales. Materiales heterogéneos altamente fisurados.

Método de elementos finitos

Según este enfoque, se considera que un macizo rocoso o cualquier medio continuo está formado por una serie de elementos estructurales que



se conectan entre sí mediante un número reducido de nodos. (Zienkiewicz, 1968)

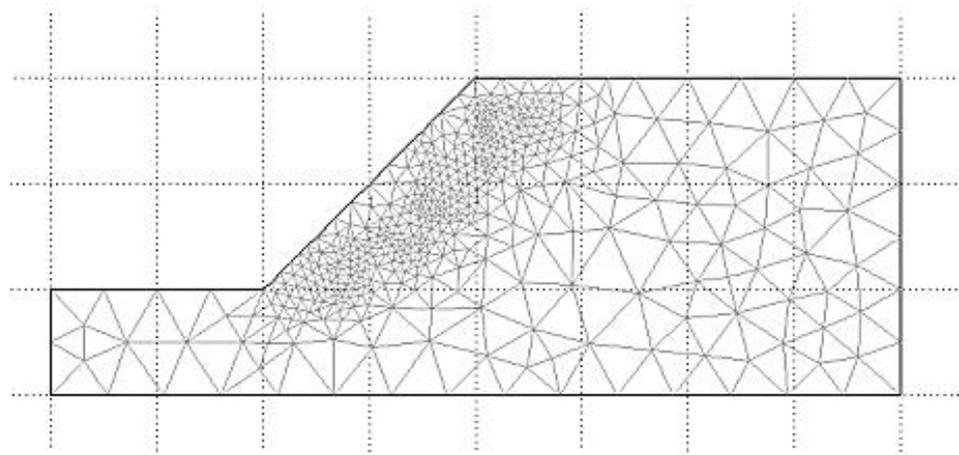
Al elegir un dominio que define un macizo rocoso, se intenta reconstruirlo y segmentarlo en varios componentes pequeños de diferentes formas. Cada uno de estos componentes tiene tamaños finitos y límites de tamaño definidos geoméricamente que reflejan propiedades específicas del macizo rocoso, como la densidad, las propiedades elásticas, de fractura y post-fractura. A medida que aumenta el número de componentes, la aproximación a la realidad se vuelve más precisa. Se supone que el desplazamiento de cada nodo es desconocido y calculado, donde el estado tensional se determina en uno o más puntos de cada componente. (Pande , Beer, & Wiilliams, 1990)

Después de configurar la malla e introducir las características mecánicas y físicas de los materiales, así como las condiciones de frontera, el software procede a calcular de forma numérica y paralelamente el sistema de ecuaciones que gobierna la mecánica del material rocoso. Este sistema engloba ecuaciones constitutivas, ecuaciones de equilibrio mecánico, ecuaciones constitutivas que abarcan condiciones de rotura, elasticidad, y post-rotura, su comportamiento, además de parametros de contorno y continuidad. Dichas ecuaciones se almacenan en un formato matricial y suelen resolverse mediante un enfoque de resolución implícito. Importante destacar que la elección entre esquemas de integración temporal (implícitos o explícitos) no está directamente ligada al modelo de discretización espacial (diferencias finitas, elementos finitos, etc.), lo que

posibilita encontrar códigos basados en el Método de Elementos Finitos (MEF) que emplean enfoques explícitos. (Ramírez P. & Alejano L., 2004)

Figura 33

Malla para el análisis de un talud con elementos finitos.



Nota: (Ramírez P. & Alejano L., 2004)

2.1.10.11. Métodos estadísticos

En el ámbito de la aplicación de macizos rocosos en la ingeniería, donde la incerteza representa un rol importante, la aplicación de estadística resulta relevante. Aun cuando estas técnicas suelen desarrollarse para situaciones con un gran volumen de datos, a diferencia de la geotecnia que a menudo cuenta con datos limitados, una gestión adecuada de estos datos combinada con técnicas estadísticas puede simplificar la resolución de problemas.

Esto facilita la gestión y disminución de la inquietud en el transcurso del diseño, mejorando la utilización eficiente de la escasa información existente. Asimismo, el empleo de técnicas estadísticas



posibilita una cercana evaluación del riesgo vinculado a un diseño concreto, ofreciendo una indicación de su confiabilidad. (Harr, 1987)

A pesar de no ser estrictamente catalogada como una técnica estadística, esta metodología se valora por su aporte al mejor entendimiento de la confiabilidad de los análisis y planteamientos de un diseño de taludes, y se emplea con regularidad en analizar los peligros que conllevan una propuesta constructiva. Asimismo, resulta extremadamente útil para identificar los factores que ejercen una influencia más significativa en la estabilidad del talud. En lo que concierne a los parámetros vinculados al terreno, es fundamental obtener con la máxima precisión posible sus valores, mientras que, en el caso de los parámetros de diseño, se requiere ajustarlos de forma óptima para cerciorar la estabilidad. (Ramírez P. & Alejano L., 2004)

2.1.10.12. Análisis pseudoestático

Un rasgo crítico en la ingeniería geotécnica son los taludes estables en roca, ya que los deslizamientos pueden tener consecuencias significativas en términos de seguridad, impacto ambiental y costos asociados. El análisis pseudoestático emerge como una herramienta valiosa en la valoración de este mismo, permitiendo considerar la interacción dinámica entre el macizo rocoso y las fuerzas sísmicas. (Vargas & Olgun, 2015)

La creciente conciencia de la vulnerabilidad de las infraestructuras a eventos sísmicos ha impulsado la importancia de incorporar el análisis pseudoestático en el diseño y la evaluación de taludes en ambientes

rocosos. Este enfoque se basa en la consideración de fuerzas sísmicas equivalentes, proporcionando una metodología robusta para evaluar la estabilidad de taludes en condiciones de sismicidad. (Kramer, 1996)

El área de investigación está ubicada dentro de la zona 3, según la clasificación establecida por el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE, 2018). Existe un mapa donde se muestra los criterios de aceleración máxima horizontal para diferentes zonas del país, considerando una probabilidad del 10% de que sean superados en un período de 50 años.

Comúnmente, el coeficiente sísmico pseudoestático se asocia principalmente con la aceleración horizontal, y en la mayoría de los casos, ya que, en los controles de sostenibilidad, se excluye la consideración de la aceleración vertical. El coeficiente correspondiente se considera una fuerza horizontal. Se aconseja emplear valores que oscilen entre el 30% y el 50% de la aceleración máxima pronosticada, es decir $C= 0.12$. (Sepúlveda, 2011)

2.1.11. Sistema de estabilización

Es esencial aplicar medidas de estabilización cuando se observan roturas o deformaciones en un talud que indiquen la probabilidad de desequilibrio. Del mismo modo, cuando surgen circunstancias diversas (ya sean de índole constructiva, ambiental, económica, entre otras) que demandan la excavación de un talud con un ángulo superior al que la resistencia natural del terreno puede sostener, se hace imprescindible la adopción de medidas de estabilización. (González De Vallejo, 2002)

2.1.11.1. Cambio de las dimensiones del talud

Al modificar la configuración geométrica de los taludes, se produce una redistribución de las fuerzas causadas por la carga de los materiales, logrando así una nueva disposición que es más estable (González De Vallejo, 2002). Las intervenciones más comunes incluyen:

- Anular el peso de la parte superior del talud («descabezamiento»).
- Disminuir la inclinación.
- Construir niveles y bermas escalonadas.
- Incrementar el peso en la parte inferior del talud (escolleras).

Figura 34

Método de estabilización por modificación de su geometría.



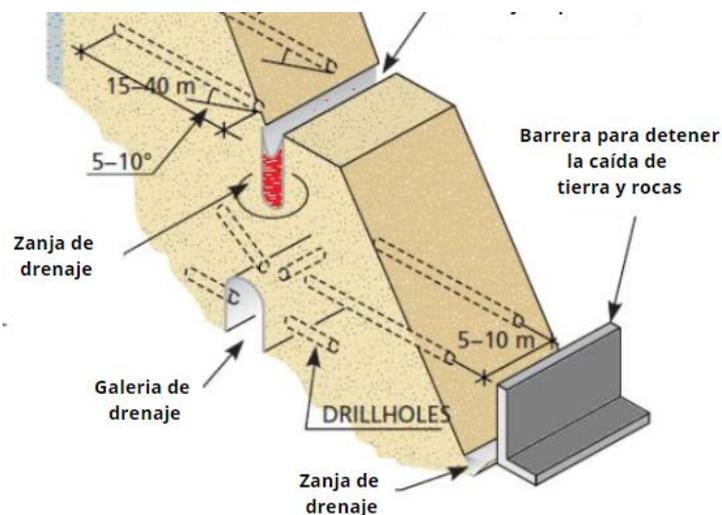
2.1.11.2. Elementos de contención

Cuando el suelo en la base del talud ofrece resistencia y la inestabilidad no es de gran profundidad, se puede optar por la edificación de una pared sólidamente cimentado en la parte inferior del talud. En algunos casos, incluso se podría realizar un recorte ligero en el talud. El

área entre el muro y el suelo, conocida como trasdós, puede llenarse estratégicamente para agregar peso adicional a esta región. Este relleno, además de proporcionar estabilidad, puede servir como protección frente a las influencias ambientales que puedan afectar al suelo natural. (González De Vallejo, 2002)

Figura 35

Elementos de contención para preservar la estabilidad en el talud.



2.1.11.3. Refuerzo de taludes

Son sistemas que, de diversas maneras, aumentan el aguanete del macizo rocoso son objeto de consideración.

2.1.11.4. Inyección

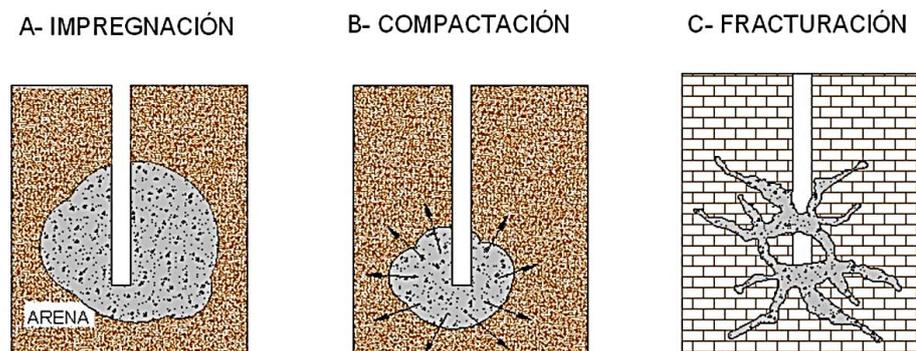
La consolidación del macizo rocoso se logra mediante un proceso que introduce un compuesto fluido, el cual se endurece para sellar fisuras existentes de manera adecuada. Desde los ochenta, existen notables progresos en las técnicas de esta práctica que han sido impulsados por una mayor comprensión textura, cohesión y trabajabilidad de los fluidos, así

como por la presión ejercida en la inserción de esta mezcla. Este método, por ende, contribuye a disminuir la permeabilidad del conjunto, al mismo tiempo que potencia la cohesión y fricción del macizo. Además, se han diseñado nuevos agregados y aditivos para las mezclas que cumplen con determinados controles, en el ámbito de laboratorios como en obra o campo.

La permeabilidad del macizo, durante la aplicación de una mezcla, de forma esencial desempeña, junto con las propiedades del concreto inyectado. La Figura 39 presenta las variantes más representativas de inyección. En los macizos, se aplica la técnica de inyección de fracturación, donde la lechada se introduce por medio de las discontinuidades ya presentes y fomenta la generación de nuevas fracturas, que posteriormente se llenan. (Ramírez P. & Alejano L., 2004)

Figura 36

Tipos de inyección en el terreno.



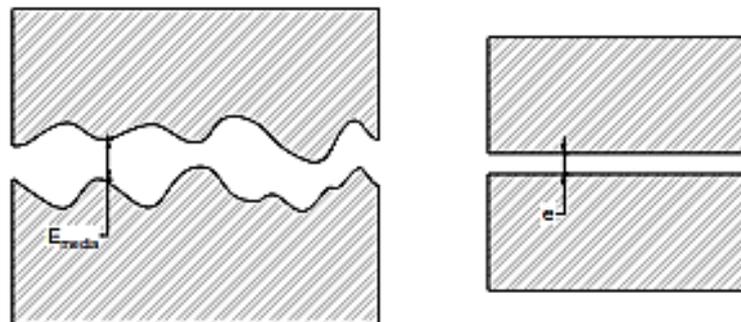
Nota: (Bielza Feliú, 1999)

Las características del lugar y la fuerza de inyección son las condicionales para definir la capacidad de la lechada para penetrar el macizo, siendo más pronunciada cuando el macizo rocoso cuenta con una

mayor cantidad de poros y fisuras. En esta situación específica, cobra relevancia la exploración de las aperturas en las discontinuidades, subrayando la necesidad de reconocer la diferencia entre la apertura eficaz o equivalente (e) y la apertura media real (E_{media}), esta última suele ser de menor magnitud, debido al impacto de la rugosidad, tal como se evidencia en la **Figura 37**.

Figura 37

Apertura eficaz o equivalente.



Nota: (Barton N. , 2004)

Se puede estimar la apertura eficaz de las juntas mediante ensayos de permeabilidad de tipo Lugeon. De acuerdo con estudios realizados por autores como Barton (2004), se llega a la conclusión de que:

$$e = \sqrt{6 \cdot L \cdot S \cdot 10^{-8}}$$

Donde:

S: E el espaciamiento medio de las discontinuidades.

L: El ensayo de Lugeon da este valor.

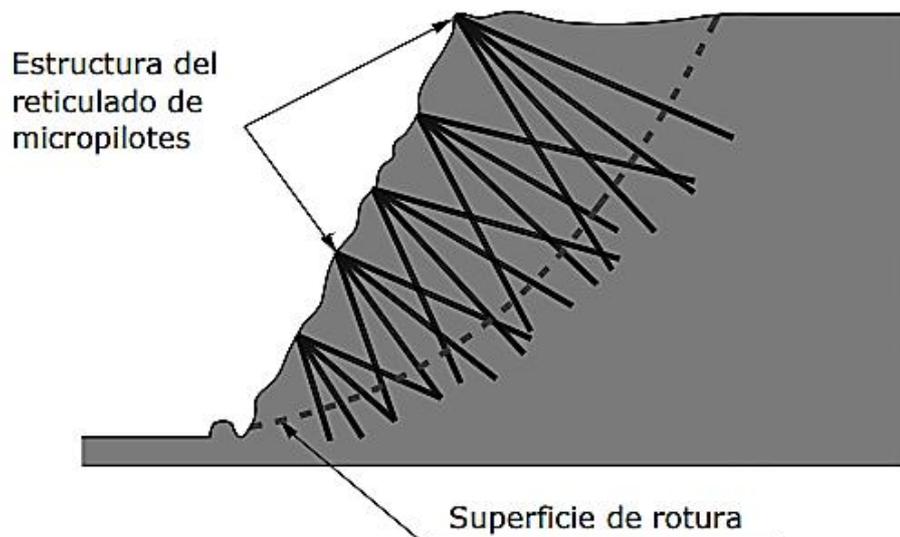
e: Eficaz o equivalente en mm.

2.1.11.5. Cosido con micropilotes

Para unir un macizo inestable al talud resistente, se emplean elementos como micropilotes. Aunque su coste es elevado, esta práctica de refuerzo no es común. La técnica consiste en la sujeción de la parte no estable o suelta al macizo rocoso estable con la instalación de micropilotes. La **Figura 38** ofrece un ejemplo de la aplicación de estos pilotes para contener una rotura rotacional.

Figura 38

Amarre de una falla rotacional con micropilote.



Nota: (González De Vallejo, 2002)

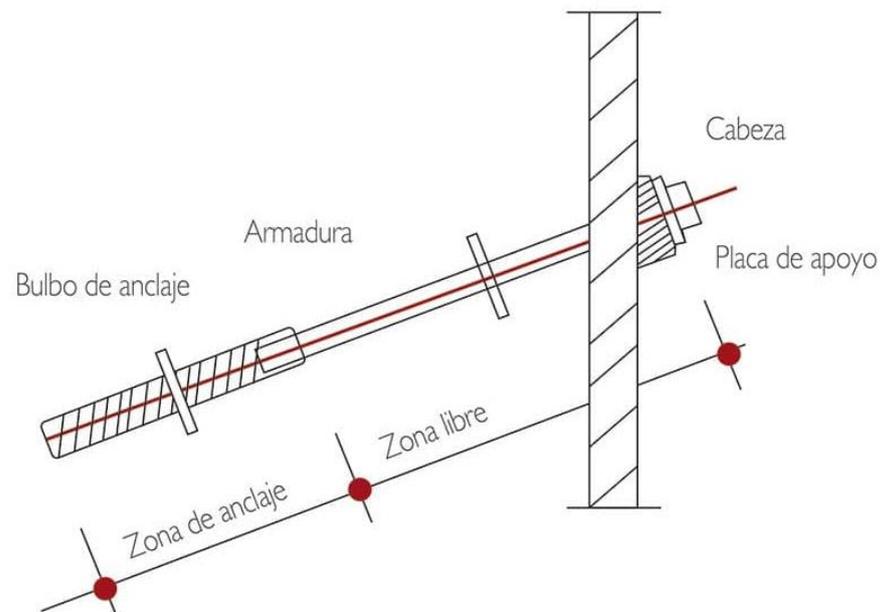
2.1.11.6. Anclajes

Estos elementos tienen el potencial de resistir el corrimiento y aplicar una fuerza habitual a la superficie donde podría ocurrir la ruptura, aumentando de esta manera la resistencia al deslizamiento mediante la fricción o la dilatación. Se suele hacer una distinción común entre pernos y cables.

Según la descripción de Calavera Ruiz (2001), “Se determina como perno o bulón a aquella pieza de longitud variable, generalmente de dos a seis metros, que se introduce en un taladro perforado.” Con distintos materiales se pueden confeccionar los pernos, siendo los cables de acero capaces, debido a su gran flexibilidad, de alcanzar medidas de 30 m o incluso más. Estos pernos pueden estar fabricados con diversos materiales.

Figura 39

Elementos de un anclaje.



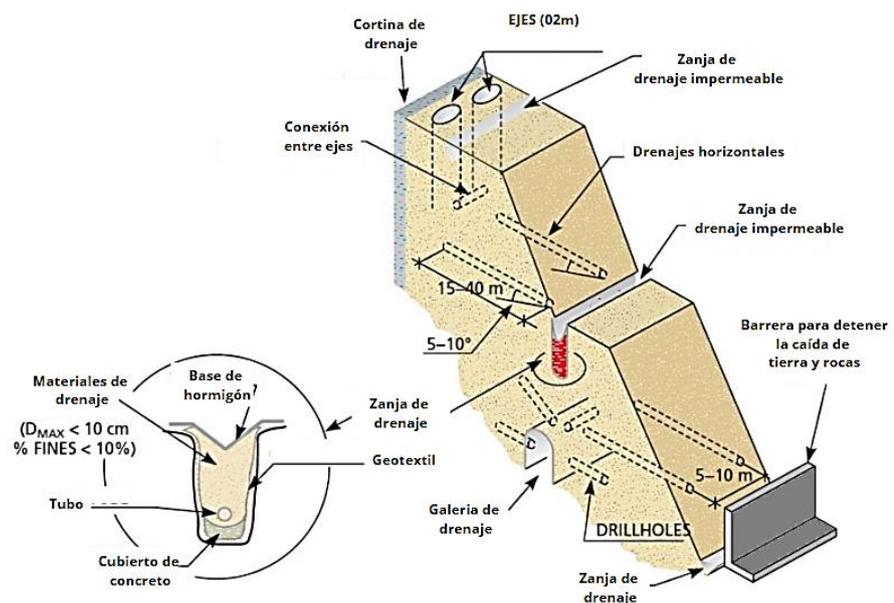
2.1.11.7. Conducción de aguas subterráneas y superficiales

Las estrategias de drenaje tienen como objetivo principal la reducción o del nivel freático, y de las presiones intersticiales que aportan a la inestabilidad en los planos de tracción. Además, dado que el nivel freático disminuye la resistencia en ciertos tipos de materiales. Provocando problemas de inestabilidad en los taludes, el agua, como principal agente desencadenante, contribuye al aumento del peso de la zona inestable,

aumenta el agua en los espacios vacíos y la presión interna, genera presiones hidrostáticas, ocasiona el reblandecimiento del predio y erosiona las orillas del talud, entre otros efectos. (González De Vallejo, 2002)

Figura 40

Consideraciones de protección y conducción de agua.



Nota: (Uriel, 1991)

2.1.11.8. Drenaje superficial

Prevenir la filtración o entrada de aguas de escorrentía a través de discontinuidades y grietas en el talud es el objetivo principal de los sistemas de drenaje superficial. Esto podría ocasionar un aumento del grado freático, la generación de presiones intersticiales y la saturación del suelo. Además, se plantea reducir la erosión ocasionada por el movimiento del agua y la erosión en masas rocosas no continuas. Estas medidas, más que proporcionar estabilidad, se centran en la prevención.



Es crucial idear estrategias para evitar el arribo y sobresaturación en el talud, principalmente la parte superior. Durante las estaciones lluviosas, es frecuente la formación de charcos en estas áreas planas. Mediante cunetas y zanjas se realiza la conducción y evacuación de la escorrentía, generalmente situadas en la cabeza y lados del talud, denominadas zanjas perimetrales. Gonzales de Vallejo (2002), “Se calcula la sección y características de estas zanjas en función de los caudales que deben evacuarse. Además, como medidas preventiva, se tiene en cuenta la conducción, desvío o impermeabilización de los fluentes cercanos al talud y cotas superiores”.(González De Vallejo, 2002)

2.1.11.9.Drenaje subterráneo

Los sistemas de drenaje profundo tienen como objetivo principal controlar y reducir el nivel freático, así como evacuar a nivel subterráneo el agua presente. Este enfoque se emplea con frecuencia como solución en taludes rocosos afectados por problemas de inestabilidad. (González De Vallejo, 2002)

2.1.12. Ensayos de laboratorio

Las muestras recolectadas mediante diversos métodos de extracción son transportadas al laboratorio con el propósito de realizar ensayos. Como describe Delgado (2015) “Proporcionar una clasificación precisa del material extraído y determinar parámetros cualitativos y cuantitativos que reflejen el comportamiento físico, mecánico y, en algunas instancias, el comportamiento químico del material rocoso son los objetivos esenciales de realizar pruebas de laboratorio.”

2.1.13. Ensayo de propiedades físicas

Para este ensayo se utiliza la normativa ASTM C97 (Métodos para Absorción y peso específico aparente de Dimensión Piedra de prueba estándar). Como menciona Delgado (2015), “Un parámetro físico es aquella que puede ser evaluada mediante ensayos de aplicación sencilla en ejemplares de roca, estos ofrecen un dato que no tiene un significado mecánico directo, pero pueden relacionarse con algunos aspectos mecánicos del elemento rocoso” (P.217).

2.1.13.1. Peso unitario y densidad

La pesadez en una roca, γ , se refiere a la relación entre el volumen total (V_T) y el peso (W) de la muestra.

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

(p) La densidad, esta referida a la correlación entre la masa (M) y el volumen (V_T) de la roca.

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

Directamente con una balanza se halla la masa de una muestra de material. En cuanto a la medición del volumen bruto de la muestra, se pueden emplear un par de métodos según el tipo de muestra disponible. Uno implica utilizar un calibrador para cuerpos de prueba con formas geométricas regulares, donde se tiene en cuenta el volumen del elemento. El otro método es aplicado a cuerpos con formas irregulares donde se



puede aplicar el principio de Arquímedes, utilizando una balanza hidrométrica.

2.1.13.2. Porosidad

La porosidad en rocas se traduce a la cantidad de espacio vacío o hueco del volumen total de la roca. Estos espacios porosos pueden estar llenos de fluidos como agua, petróleo o gas.

La porosidad (ϕ) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} \times 100$$

Donde:

ϕ : Es la porosidad expresada como un porcentaje.

V_p : Espacio total de vacíos (poros).

V_t : Volumen absoluto, incluyendo los espacios porosos y los sólidos.

2.1.13.3. Absorción

La absorción en rocas se refiere a la capacidad de una roca para absorber agua. Este parámetro es relevante en geología y geotecnia, ya que puede influir en propiedades como la resistencia y la durabilidad, principalmente de agua.

A continuación, la fórmula para calcular la absorción (A) es:

$$A = \left(\frac{W_s - W_d}{W_d} \right) \times 100$$



Donde:

A: Es la absorción expresada como un porcentaje.

W_s : Peso de la roca con los vacíos saturados.

W_d : Peso de la roca con los vacíos no saturados.

En términos generales, la absorción puede variar entre diferentes tipos de rocas y puede estar influenciada por factores como la porosidad, la permeabilidad y la presencia de fracturas o discontinuidades en la roca.

2.1.13.4. Ensayo de compresión uniaxial en roca

La ASTM D2938-86 y la ISMR (Método sugerido para determinar la resistencia a la compresión uniaxial de elementos rocosos) son las normas que rigen el UCS en testigo de roca.

El ensayo más relevante y comúnmente empleado en la mayoría de estudios de mecánica de rocas, es la prueba ya mencionada. Se utiliza especialmente en materiales rocosos que presentan resistencia y solidez, y que pueden ser preparados para su análisis. En el desarrollo de este análisis, se generan cilindros de evaluación a partir de pequeños pedazos de muestras o núcleos de perforación llamados testigos. Como describe Delgado (2015), “La resistencia máxima a la compresión uniaxial de un cuerpo de examen de material rocoso se establece como el valor del esfuerzo final registrado justo antes de que se produzca el error, al aplicar un esfuerzo en paralelo al eje axial del ejemplar sin confinamiento”.



Realizar el cálculo de la resistencia a compresión simple o uniaxial confiere una tarea de suma importancia, dado que posibilita la categorización de las rocas conforme a su capacidad resistiva. Este aspecto adquiere relevancia fundamental en los protocolos de ruptura preeminentemente empleados, tales como los criterios Mohr-Coulomb y Hoek-Brown.(Ramírez P. & Alejano L., 2004)

2.1.13.5. Ensayo de tilt test

La ejecución del Tilt Test implica un procedimiento en el cual se vinculan dos testigos de roca sobre una plataforma plana, buscando la interconexión de las muestras y evitando su capacidad de desplazamiento. Posteriormente, se sobrepone una pieza encima de las ya colocadas, inclina en dirección a la verticalidad alrededor de un eje hasta que la pieza superior de núcleo inicia su desplazamiento. El ángulo de fricción básico se calcula con:

$$\phi_b = \arctan(1.155 \tan \alpha)$$

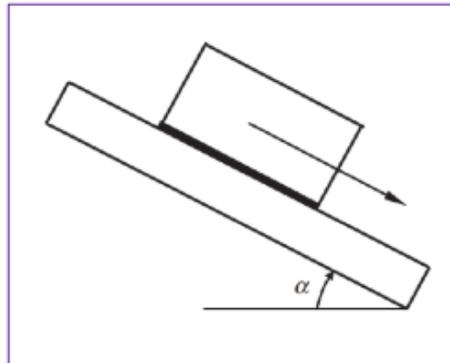
Donde:

α : Es el ángulo en el que el testigo resbala.

ϕ_b : Es el ángulo de fricción básico

Figura 41

Ensayo de Tilt Test.



2.2. DEFINICIONES CONCEPTUALES

2.2.1. Roca intacta

También llamado roca intacta, es aquella masa de roca que se encuentra libre de discontinuidades, caracterizada mecánicamente por su resistencia, deformabilidad y peso definido. (González De Vallejo, 2002) (P. 123).

2.2.2. Discontinuidad

Describe un concepto amplio que engloba cualquier tipo de separación o fractura mecánica en una masa rocosa, destacando la resistencia a la tracción próxima o igual a cero. Las irregularidades pueden surgir de diversas formas geológicas, tales como fracturas, planos, superficies de esquistos, áreas fallas; también pueden presentarse de manera antropogénica, como fracturas inducidas por actividades de voladura, esfuerzos generados por la acción humana o aquellas provocadas por la presión del agua. (ISMR, 1977)



2.2.3. Factor de seguridad

Determinado como FS, se calcula como la correlación más baja entre las fuerzas externas que apoyan el movimiento y las fuerzas que resisten al desplazamiento presentes en el talud rocoso. En líneas generales, una pendiente se considera activamente inestable cuando su factor de seguridad oscila entre 0 y 1.0, mientras que un valor superior a 1.0 señala que la pendiente se considera como estable. (Vardon, Wang, & Hicks, 2017)

Conforme a las regulaciones peruanas, se estipula que el FS mínimo para un talud debe oscilar entre 1.5 en situaciones estáticas y 1.25 al tener en cuenta las cargas sísmicas. (RNE, 2018)



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO

En la Urbanización Chejoña III Etapa, el Área del Proyecto de Investigación se ubica a unos 0.5 km de la Plaza Cívica de Salcedo y en dirección Sur-Oeste de la ciudad de Puno. Políticamente, forma parte del distrito de Puno, provincia de Puno, en el departamento de Puno.

3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

La naturaleza de la investigación actual es cuantitativa y no experimental. Se clasifica como descriptiva y correlacional, estableciendo una conexión entre las características geomecánicas del macizo rocoso en el talud del cerro Quellorco (**consideradas como variables independientes**) y la propuesta del sistema de estabilización (**tratada como variable dependiente**).

3.3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PRELIMINAR

Realizamos una revisión completa de la literatura, analizando tanto trabajos no publicados como tesis bibliográficas relacionadas con la evaluación de la estabilidad de taludes en macizos rocosos. El enfoque se dirigió hacia la clasificación geomecánica, el cálculo del factor de seguridad específico para taludes particulares y las propuestas de estabilización. Se priorizaron las metodologías asociadas con la caracterización geológica estructural y geotécnica.



3.4. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.4.1. Población

El estudio está enfocado en el cerro Quellorco, específicamente en la zona sur de este macizo en el Asentamiento Poblacional Vecinal Chejoña III Etapa.

3.4.2. Muestra

Dado que no resulta práctico llevar a cabo la toma de muestras en cada pequeña área del espacio de estudio, se implementó un método de muestreo no probabilístico (no aleatorio). En su lugar, las muestras se seleccionan con base en los afloramientos de rocas disponibles, teniendo en cuenta las estaciones de monitoreo geomecánico y de los taludes con mayor inestabilidad aparente, en la medida en que el acceso sea posible.

3.4.3. Tamaño de muestra

La apertura de la muestra es de 264 datos en el mapeo por map-window, distribuidos en 4 estaciones geomecánicas. Para el mapeo geomecánico se consideraron las siguientes descripciones:

- Litología
- Macizo rocoso
- Fracturas
- Roca intacta

3.5. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DEL ESTUDIO

3.5.1. Ubicación

Los taludes del cerro Quellorco analizados en esta investigación están ubicados en la zona este del cerro, en la III Etapa del Barrio Chejoña a medio kilómetro de la plaza cívica de Salcedo en Puno. Su ubicación política se describe en el distrito de Puno, provincia de Puno, departamento de Puno. Con un área delimitada por los siguientes vértices en coordenadas UTM:

Tabla 21

Ubicación de los *Vértices del Área de Estudio*

Vértice	Este	Norte	Altitud
1	392647.00	8245475.00	3844 msnm
2	392707.71	8245446.17	3835 msnm
3	392683.00	8245354.00	3850 msnm
4	392529.00	8245362.00	3904 msnm
5	392493.00	8245417.00	3912 msnm
6	392549.00	8245479.00	3875 msnm

Nota: Elaboración propia

3.5.2. Accesibilidad

Desde la Plaza de Mayor de Puno, se encuentran las calles y avenidas que conducen al acceso de la zona del proyecto, como se presenta en la **Tabla 22**.

Tabla 22

Accesibilidad a el proyecto en la Zona investigada.

Calle	Distancia (Km)	Tiempo	Condición de la Pista
Jr. Puno – Jr Arequipa	0.1	1 min	Asfaltada
Jr. Arequipa – Av. Laykakota	0.9	3 min	Asfaltada
Av. Laykakota – Av. El Ejercito	0.7	3 min	Asfaltada
Av. El Ejercito – Av. Sideral	2.5	5 min	Asfaltada
Av. Sideral – Zona del Proyecto	0.4	2 min	Asfaltada

Nota: Elaboración propia

3.5.3. Aspectos climatológicos

El proyecto se encuentra entre las altitudes de 3850.00 m.s.n.m. y 3915.00 m.s.n.m. perteneciendo a la región denominada Suni con un sub clima lluvioso y frío característico de la sierra. Se encuentran dos estaciones meteorológicas en la ciudad de Puno según el SENAMHI, una Estación Meteorológica Convencional y otra Estación Meteorológica Automática, de las cuales se corroboró los valores promedios de Temperatura, Precipitación y Velocidad del viento presentados a continuación.

3.5.3.1. Temperatura

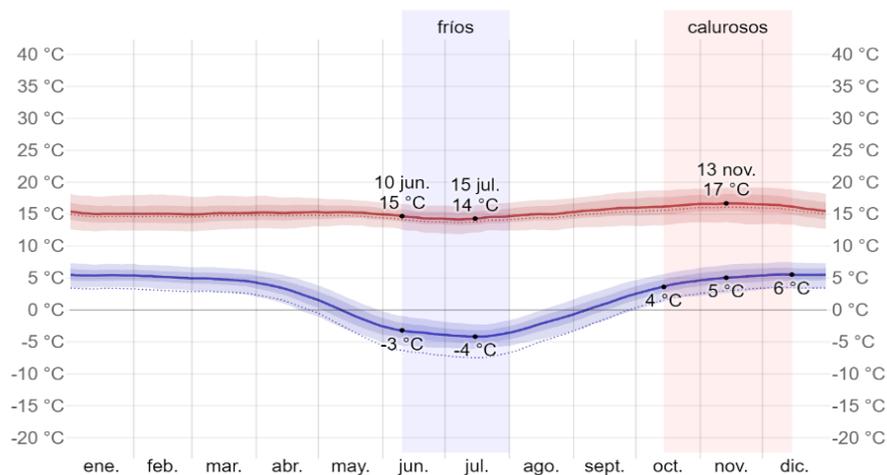
En Puno, las temperaturas se caracterizan por su brevedad, frescura y nubosidad en los veranos, mientras que los inviernos son cortos, extremadamente fríos y predominantemente despejados. La región experimenta condiciones de sequedad durante todo el año. Las fluctuaciones térmicas a lo largo del año generalmente oscilan entre $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $17\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo raras las ocasiones en que la temperatura desciende por debajo de $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ o supera los $19\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La temporada cálida abarca un período de 2 meses, desde mediados de octubre hasta mediados de diciembre, caracterizada por una temperatura diaria máxima promedio mayor a 16°C . Noviembre destaca como el mes más caluroso en Puno, con una temperatura máxima promedio que oscila entre 5 y $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. En contraste, la época fría tiene una duración de casi 2 meses, desde inicios de junio hasta inicios de agosto, con una temperatura diaria máxima promedio inferior a 15°C . Julio se

posiciona como el con la temperatura más baja en Puno de -4°C y la mas alta de 14°C .

Figura 42

Temperatura mín. y máx. promedio en Puno.



Nota: <https://es.weatherspark.com/>

3.5.3.2. Precipitación

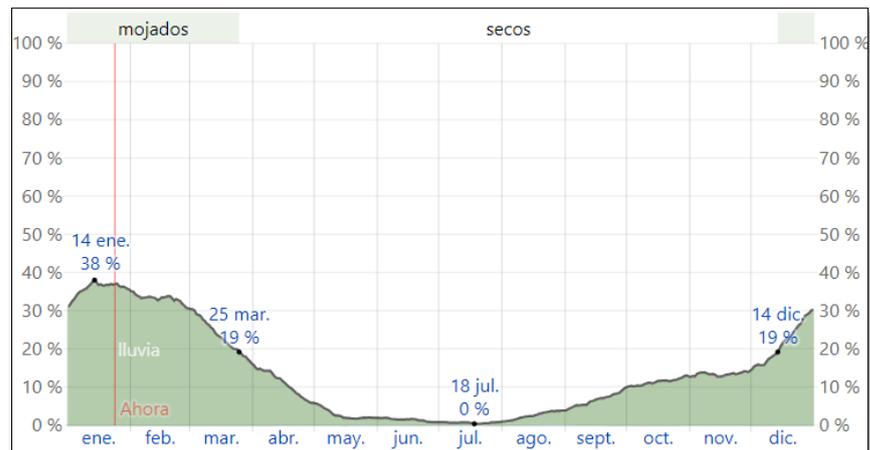
La probabilidad de días mojados en Puno experimenta variaciones considerables a lo largo del año, definiendo como tal, a aquellos días en los que se registra como mínimo 1,00 milímetro de agua precipitada.

El periodo más lluvioso abarca casi 4 meses, desde mediados de diciembre los últimos días de marzo, presentando un porcentaje de lluvia superior al 19 % de que en un día determinado se registre precipitación. Enero destaca como el mes con mayor cantidad de días lluviosos en Puno, con una media de 11,1 días con mínimamente 1 milímetro de lluvia. En contraste, la estación más seca comprende 8,6 meses, desde el 26 de marzo hasta el 15 de diciembre. Julio se posiciona como el mes con la menor

cantidad de días lluviosos en Puno, con una media de 0.2 días con mínimamente 1 milímetro de lluvia.

Figura 43

Probabilidad diaria de precipitación en Puno



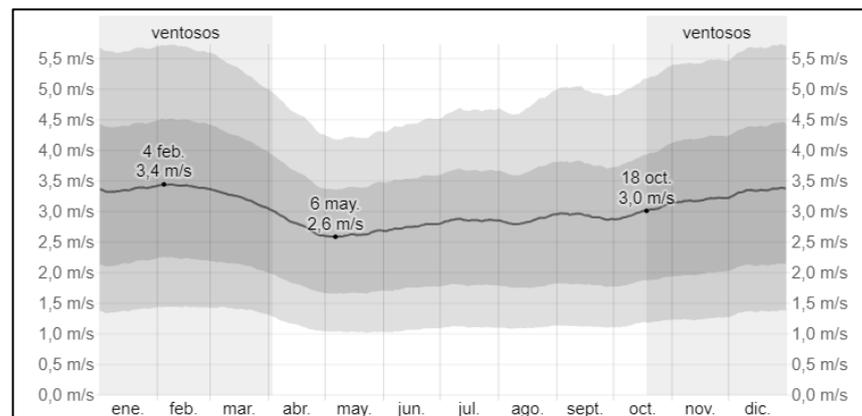
Nota: <https://es.weatherspark.com/>

3.5.3.3. Velocidad y dirección del viento

Con una duración casi 6 meses, desde la quincena de octubre hasta inicios de abril, se registra la fase más ventosa del año en Puno, caracterizada por velocidades promedio del viento superiores a 3,0 metros por segundo. Febrero destaca como el mes con mayores velocidades del viento, alcanzando una media de 3,4 metros por segundo. Por otro lado, la temporada más tranquila abarca poco más de 6 meses, inicios de abril hasta los primeros días de octubre, siendo mayo el mes de menor actividad, con vientos a una velocidad promedio de 2,6 metros por segundo.

Figura 44

Velocidad promedio del viento en Puno

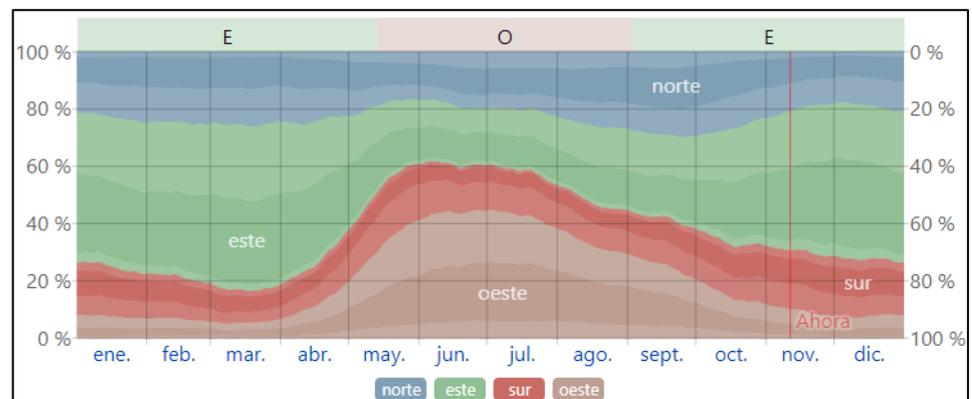


Nota: <https://es.weatherspark.com/>

Durante casi 4 meses, desde la quincena de mayo hasta inicios de septiembre, prevalece con mayor frecuencia el viento proveniente del oeste, destacándose especialmente inicios de julio con un máximo del 45 %. En contraste, durante poco más de 8 meses, desde inicios de septiembre hasta la quincena de mayo, el viento que presenta mayor frecuencia sopla desde el este, alcanzando pico máximo del 52 % los primeros días de enero.

Figura 45

Orientación del viento en Puno.



Nota: <https://es.weatherspark.com/>



3.5.4. Geología

El Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) tiene mapeado el área del proyecto y Zonas cercanas a ella, esta información se encuentra en el cuadrángulo de Puno hoja 32v en la Carta Geológica Nacional.

3.5.4.1. Geología regional

Sobre la zona del proyecto en su Geología regional se destacan 4 unidades litoestratigráficas según material técnico del INGEMMET (ANEXO M).

3.5.4.2. Formación ayabacas (Kis-ayb)

La formación Ayabacas logra definirse como grupo caótico masas de gran amplitud (50-500 m), los cuales parecen "flotar" en el seno de una matriz más suave. Estos bloques, que exhiben frecuentes plegamientos y se disponen en diversas orientaciones, están mayoritariamente compuestos por calizas del Cretácico pertenecientes a la Formación Arcurquina, aunque también incluyen materiales de formaciones anteriores como la Formación Huancané, Formación Muni, Formación Sipin, Grupo Mitu y Paleozoico. La matriz se caracteriza por ser una brecha con clastos de tamaños variables, que comprenden tanto calizas como areniscas fracturadas, embebidos en una matriz de pelitas multicolores, generalmente de tonalidades rojas, así como en areniscas. (Callot et al., 2006)



3.5.4.3. Deposito aluvial (Q-al)

Los depósitos aluviales se definen como acumulaciones ubicadas en las bases de escarpas y laderas prominentes, compuestas mayormente por material de desprendimiento que incluye bloques de gravas y guijarros con formas subangulosas a angulosas. La matriz de estos depósitos está compuesta por sedimentos areno-limosos y ha experimentado un transporte relativamente limitado.

3.5.4.4. Grupo puno (P-pu)

El Grupo Puno exhibe en su base una composición que incluye areniscas y lutitas; conforme se asciende en la secuencia estratigráfica, las lutitas van desapareciendo y se inicia la presencia de conglomerados, los cuales se vuelven más prevalentes hacia el techo de la secuencia, culminando con la ausencia de las areniscas. En términos generales, este conjunto geológico se ajusta a una secuencia que muestra un aumento gradual en el tamaño de los granos y en la estratificación, indicando el asentado de entornos fluviales próximos (y abanicos aluviales) junto a entornos fluviales exentos con llanuras inmersión. (Rodríguez Mejía et al., 2015)

3.5.4.5. Grupo tacaza (Pn-t)

El Grupo Tacaza está mayormente conformado por lavas andesíticas porfíricas, intercaladas con brechas y niveles de origen volcanoclástico. Se presenta en forma de lavas sub horizontales que se superponen de manera concordante a la Formación Pichu. Estas lavas



suelen encontrarse predominantemente en las elevaciones de los cerros Yaretana y Antasalla. (Rodríguez et al., 2020)

3.5.4.6. Geología local

En pro del proyecto presente se realizó un mapeo mediante el recorrido de la zona de proyecto para identificar las unidades litoestratigráficas que la componen obteniendo la siguiente descripción:

Con el uso de los cuadrantes publicados en las cartas nacionales del INGEMET se identificó la Formación Ayabaca (Kis-ayb) conformada por calizas con una aparente tectónica de pliegues y cabalgamiento entre los estratos de los perfiles sedimentarios, múltiples fracturas en la superficie causadas por karstificación y por fuerzas mecánicas también. En el pie del talud se encuentra un volumen importante de material coluvial que ha sido desprendido de la matriz por efectos de intemperismo en la roca y transportado por erosión hacia la parte inferior.

3.5.5. Geomorfología

3.5.5.1. Geomorfología regional

La topografía abrupta en la parte sierra de nuestro país se encuentra fuertemente influenciada por la existencia de la cordillera de los Andes, dando lugar a toda una variedad de geoformas morfo-estructurales con atributos particulares en distintas zonas. De acuerdo a las descripciones geomorfológicas existentes del territorio peruano, esta zona de enfoque se ubica en las unidades morfo-estructurales conocidas como Altiplano –



cordillera occidental, englobando el espacio entre región sur del Perú y las cordilleras Occidental de los Andes.

3.5.5.2. Cordillera occidental

La Cordillera Occidental se encuentra en la porción suroccidental de la región de estudio, con una orientación regional que va del noroeste al sureste. No obstante, en el área de investigación, experimenta una desviación en dirección este-oeste, delimitada al norte por la Falla Mañazo. Su extensión hacia el sur se prolonga hasta el cuadrángulo de Pichacani (33v), influido por la estructura del lineamiento Colpacollo. Con altitudes que sobrepasan los 4600 metros sobre el nivel del mar, las cimas más elevadas desempeñan el papel de *divortium aquarum*, marcando la división entre las cuencas del lago Titicaca al norte y del río Tambo al sur.

3.5.5.3. Altiplano

El Altiplano constituye la mayor extensión territorial en la región de investigación, caracterizándose por la presencia de llanuras, colinas y cadenas de cerros dispuestos en alineamientos, situados a altitudes comprendidas dentro de las cotas de 3800 y 4200 msnm. Dentro del Altiplano, se reconocen diversas configuraciones geológicas, entre las que se incluyen el domo estructural de Cabanillas y un área montañosa, cuya elevación puede llegar hasta los 4600 metros sobre el nivel del mar.

3.5.5.4. Geomorfología local

En la parte meridional de la ciudad de Puno, la configuración geomorfológica engloba formaciones de colinas en rocas sedimentarias y

volcánicas, así como declives aluviales en la región adyacente al Lago Titicaca. Además, se identifican elementos de origen humano, como carreteras y construcciones residenciales.

3.5.5.5. Montañas

En el Altiplano, se hallan cadenas montañosas dispuestas en alineamientos, compuestas predominantemente por areniscas y conglomerados pertenecientes al Grupo Puno, con una menor proporción de calizas de la Formación Ayabacas y depósitos volcánicos del Grupo Tacaza y la Formación Umayo. Con altitudes que pueden llegar hasta los 4300 metros sobre el nivel del mar, estas configuraciones geológicas presentan pendientes que oscilan desde moderadas hasta pronunciadas, siendo más destacadas en las cimas. (Rodríguez et al., 2020)

3.5.5.6. Vertiente aluvial

Esta unidad geológica representa una extensión de terreno con una topografía de glaciares que se encuentra en las proximidades de sistemas montañosos y escarpes de altiplanicies. Su formación se atribuye a procesos de sedimentación llevados a cabo por corrientes de agua estacionales. Formada por secuencias de abanicos aluviales y aluvio-diluviales, la configuración incluye conos de deyección que presentan composiciones granulométricas tanto similares como diversas. (INGEMMET, 2020)

3.5.6. Estratigrafía

3.5.6.1. Estratigrafía regional

Las edades de las rocas que constituyen la estratigrafía regional abarcan desde el Cretácico Superior hasta el Cuaternario Holoceno. Principalmente, se componen de basaltos, conglomerados, areniscas, andesitas, limoarcillitas y calizas.

Tabla 23

Formaciones geológicas encontradas en el área de estudio.

Era	Sistema	Serie	Unidad Litoestratigráfica
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósito aluvial Qh-al
	Paleógeno	Eoceno	Grupo Tacaza PN-t Grupo Puno P-pu
Mesozoico	Cretácico	Superior	Formación Ayabacas Kis-ayb

Nota: INGEMMET

3.5.6.2. Estratigrafía local

Para obtener la estratigrafía local se realizaron 04 calicatas en diferentes zonas del talud, definiendo un perfil predominado por calizas grises con recubrimiento de suelo coluvial en algunas zonas del talud.

3.5.7. Sismicidad y geodinámica interna

Según la evaluación de la información, se revela que, como se muestra en el Mapa sísmico sectorizado planteado en la actual Norma de Diseño Sismorresistente E.030 del Reglamento Nacional de Construcciones (2018), la región estudiada está clasificada en la Zona 3, lo que indica una sismicidad de nivel medio, presentando un factor de zona (Z) de 0.35. La interpretación de este

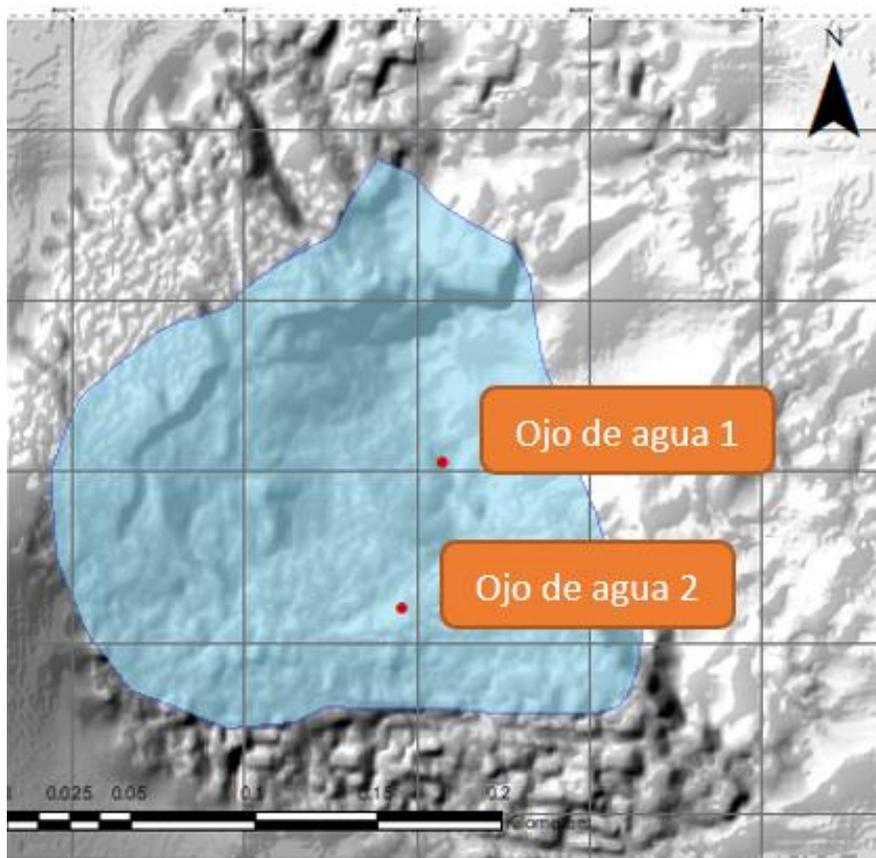
factor señala la máxima aceleración del terreno, con un 10 % de ocurrencia de ser sobrepasada en un lapso de 50 años.

3.5.8. Hidrología

Según la información presentada por el INGEMMET, la zona del proyecto presenta acuíferos locales o acuíferos extensos, en campo se pudo apreciar la existencia de dos ojos de agua que según gente de la zona nunca se secan a pesar del uso constante de los pobladores.

Figura 46

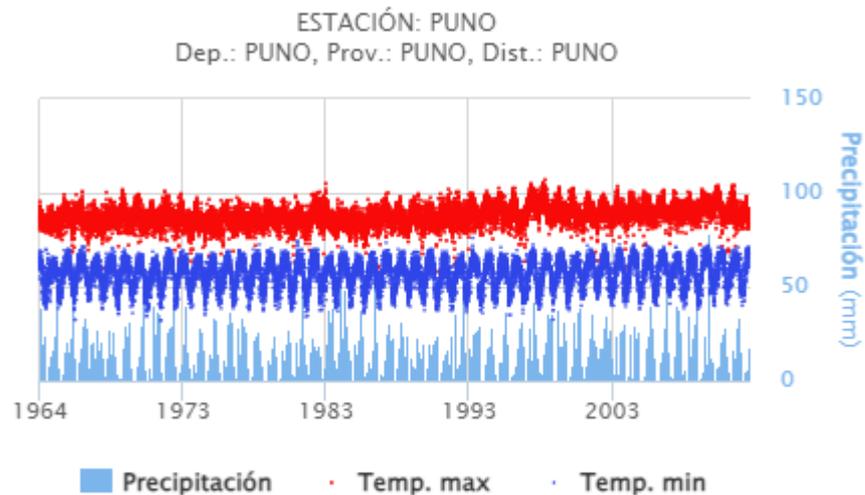
Microcuenca y ubicación de ojos de agua.



Nota: Elaboración propia

Figura 47

Histograma de precipitación Puno.



Nota: SENAMHI

La precipitación media anual según el SENAMHI es 740.88 mm/m² y el área de la microcuenca que define nuestra zona estudiada es 38,104 m², por lo tanto, el volumen de agua percibido por el talud Quellorco es de 282,307 m³.

3.6. VARIABLES

3.6.1. Variables dependientes

- Propuesta de estabilización

3.6.2. Variables independientes

- Análisis de estabilidad de taludes

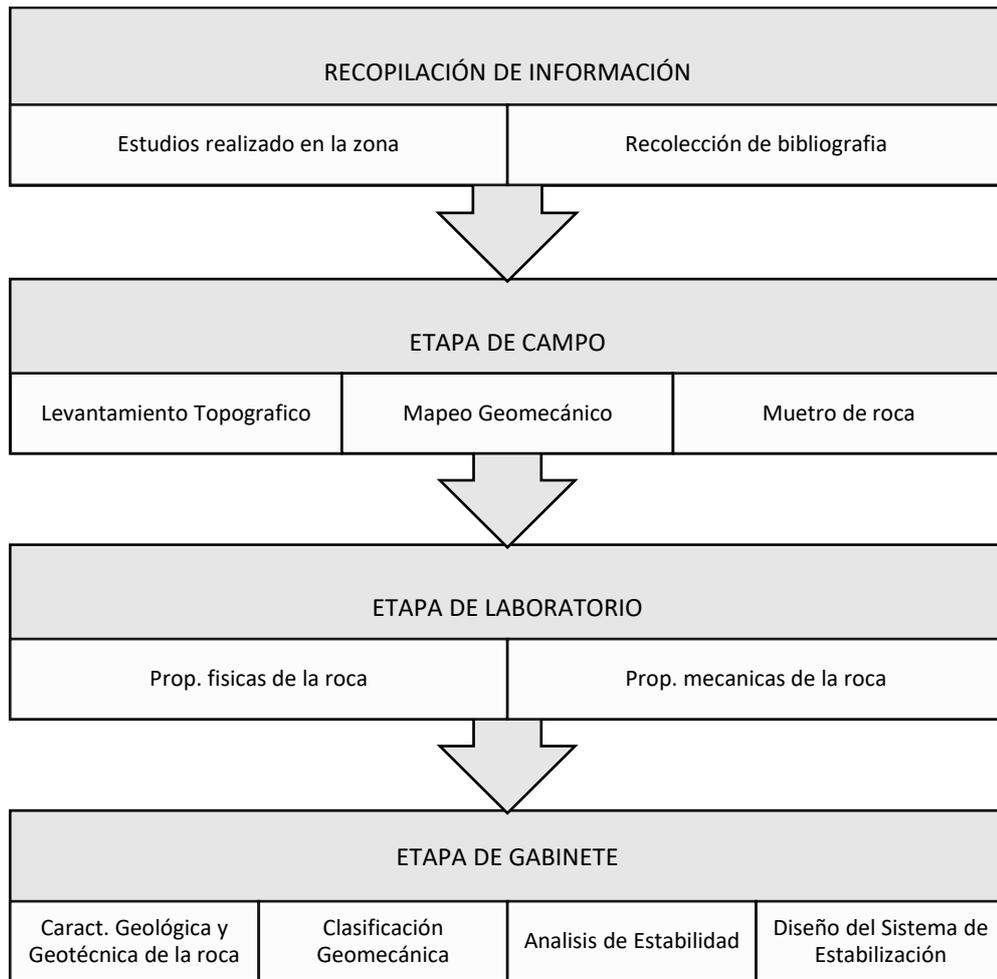
3.7. PROCEDIMIENTO DE LOS ANALISIS

Para el propósito de analizar el sostenimiento del macizo rocoso Quellorco y proponer el método y sistema de remediación o prevención de inestabilidad esta investigación llevó a cabo la caracterización geológica y geotécnica de la roca, junto

con la clasificación geomecánica del macizo rocoso. Para alcanzar los objetivos mencionados previamente, se ejecutaron los siguientes pasos detallados en:

Figura 48

Procedimiento metodológico



Nota: Elaboración propia

3.8. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 24

Cuadro de operacionalización de variables

Variab le (s)	Dimensió n (es)	Indicador (es)	Categoría (s)	Índice (s)	Instrument o (s)	
Variables Independientes	Análisis de Estabilidad del macizo rocoso Quellorco - Puno	Condición de juntas	Adimensional	Alfanumérico	Inspección visual, criterio	
		Resistencia a la compresión	Resistencia	Mega pascales (MPa)		
		RQD	Adimensional	Numérico	Inspección Visual, criterio.	
		Espaciamiento	Longitud	Numérico	Inspección Visual, criterio.	
		Presencia de agua	Adimensional	Descriptivo	Inspección Visual, criterio.	
		Buzamiento	Angulo	Grados (°)	Brújula	
		Dirección de buzamiento	Angulo	Grados (°)	Brújula	
		GSI	-	-	-	Inspección Visual, criterio.
SMR	-	-	-	-		
Variable Dependiente	Diseño del sistema de estabilización	Sistema de Estabilización	Modo de Rotura Estructural	Adimensional	Porcentaje (%)	Software Rocscience
				MEL	FS	-
		Factor de Seguridad		MEF	SRF	-
			Método Probabilístico		%	-

Nota: Elaboración propia.



3.9. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Los datos recolectados y la información procesada previos a la propuesta de estabilización son los siguientes:

Escala nominal:

- Existencia de agua (seco, lig. húmedo, húmedo, goteando, fluyendo)
- Alteración del macizo (inalterado, lig. alterado, moderadamente alterado, muy alterado, descompuesto)
- Relleno (ninguno, duro, duro, suave, suave)
- RQD (muy buena, buena, regular, mala, muy mala)
- Rugosidad (muy rugosa, rugosa, lig. rugosa, lisa, espejo de falla)

Escala de Intervalo

- Resist. a la compresión simple de la roca intacta
- Abertura de las fracturas
- Factor de seguridad
- Continuidad o persistencia
- Contenido de humedad
- Dirección de buzamiento y buzamiento
- Peso específico
- RQD

3.9.1. Etapa de campo

Las intervenciones de terreno representan etapa fundamental y primordial en los estudios de análisis de sostenimiento en taludes. El procedimiento empleado en este estudio es la observación y caracterización, que implica examinar detenidamente la exposición, fenómeno, suceso o situación, recopilar la data y organizarla generando un análisis posterior. Los dispositivos utilizados para la ejecución de esta fase están diseñados con el fin de adquirir datos en el lugar específico, utilizando el levantamiento de información por ventana de mapeo.

Estos instrumentos proporcionan detalles, características y lineamientos que definen las condicionales del macizo rocoso, así como el relieve y dimensiones del talud bajo consideración. En esta parte del estudio, se llevaron a cabo los próximos pasos:

- Exploración visual, delimitación y sectorización (fallas locales y globales) de la zona del proyecto.
- Levantamiento Topográfico, realizado mediante vuelo de dron y gps Diferencial.
- Caracterización geológica y geotécnica preliminar mediante mapeo por ventana.
- Muestro de rocas representativas a cada estación geomecánica.

3.9.1.1. Caracterización geotécnica y geológica

En el lugar de análisis a través de actividades centradas exclusivamente en aspectos geológicos, se consiguió la identificación de



las distintas litologías presentes en la región de investigación. Además, se evaluó la extensión de la meteorización en los taludes considerados.

Se realizó un mapeo por ventana en las estaciones establecidas en los afloramientos de roca, donde se tenía acceso de manera segura, durante la caracterización geológica estructural.

3.9.2. Etapa de laboratorio

3.9.2.1. Ensayos de laboratorio

Se obtuvieron mediante ensayos, las propiedades físicas y mecánicas de la roca intacta en el talud del macizo Quellorco, las cuales son representativas de las condiciones reales en el campo. Los siguientes ensayos se llevaron a cabo en laboratorio con las muestras del talud del proyecto:

- Ensayo de resistencia a la compresión simple (ASTM D2983 - 95).
- Ensayo Tilt test (ISMR)
- Ensayo de propiedades físicas en roca (ASTM C97).

3.9.3. Etapa de gabinete

3.9.3.1. Clasificación geomecánica

Una vez obtenidas las características geológicas, geotécnicas y los valores finales de sus atributos físicos, mecánicas de las discontinuidades y el macizo rocoso, procedí con el procesamiento de los datos en hojas de cálculo de Excel, esta información se aplicó a un sistema de clasificaciones geomecánicas como lo son el RMR y GSI.

3.9.4. Análisis de estabilidad de talud

Utilizando programas computacionales especializados, se procesaron los datos obtenidos, siendo en los macizos rocosos sus valores relacionados a la geológica estructural insertados en el programa computacional Microsoft Excel y representada gráficamente como histogramas. Además, las secciones de investigación y su cálculo de modos de rotura, así como también su información relacionada con la orientación de la estructura, se llevaron a cabo mediante la aplicación de software dedicado. Dips v.7.0

3.9.4.1. Análisis de estabilidad por el método empírico

En primer lugar, se analizó la sostenibilidad del talud mediante el Método SMR para la totalidad de los taludes en el cual se utilizó información obtenida del software Dips 7.0 en la hoja de cálculo SMR tool.

3.9.4.2. Análisis de estabilidad por el método estereográfico o cinemático

En los taludes 1,2,8,9 y 10 se sectorizo como una zona con tendencia a falla local por lo que esta zona fue analizada con el método estereográfico, utilizando información de buzamiento y dirección de las familias predominantes obtenida mediante el uso del software dips 7.0.

3.9.4.3. Análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite

El estudio de equilibrio limite se aplicó a la totalidad de los taludes con el uso del software Slide 6.0. En fallas del tipo global se utilizó el criterio de Anisotropía generalizada.



3.9.4.4. Análisis de estabilidad por el método numérico

En los taludes de falla global se generó el modelamiento mediante el programa computacional Phase2.0 además de su análisis, aplicando el MEF, en las secciones críticas.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

4.1.1. Discontinuidades

Respecto a las discontinuidades que dan lugar al macizo de la zona del proyecto, se identificaron múltiples familias en cada una de las 4 estaciones geomecánicas, de las cuales se realizó el mapeo de sus caracteres como: inclinación, orientación, espaciado, persistencia, abertura, relleno, rugosidad, alteración y agua presente en el macizo, detalladas en el ANEXO A. Se tomo una totalidad de 264 discontinuidades con sus respectivas características ya mencionadas, repartidas en las 4 estaciones geomecánicas. Mediante el método de mapeo por ventanas o map window.

4.2. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Para la caracterización geotécnica se realizaron los ensayos e inspecciones minuciosas para obtener los valores de las características y propiedades de la roca, discontinuidades y del macizo, como se describe y se representa en las Tablas de cada ítem a continuación.

4.2.1. Roca intacta

En la sección del Marco Teórico de este estudio, se explora y desarrolla conceptualmente la noción de la roca sin fracturamientos. En el estudio del sostenimiento de este talud mediante los métodos previamente mencionados, las características cruciales de la roca incluyen el peso específico, la porosidad, el

ángulo de fricción, módulo de deformación, absorción, UCS y cohesión. A través de experimentos realizados en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil y con el respaldo de correlaciones respaldadas por bibliografía, se determinaron los valores pertinentes.

4.2.1.1. Propiedades físicas de la roca

El ensayo de propiedades físicas fue realizado dentro de la normativa ASTM C97, de donde se obtuvo los valores de densidad, peso específico, porosidad y absorción presentados en la **Tabla 25**.

Tabla 25

Resultados de densidad, peso específico, porosidad y absorción.

Ensayo de propiedades físicas					
Parámetro estadístico	Densidad seca (g/cm ³)	Densidad saturada (g/cm ³)	Peso específico aparente (KN/m ³)	Porosidad	Absorción
Valor máximo, MAX	2.63	2.64	26.28	0.09	3.57
Valor mínimo, MIN	2.41	2.43	24.10	0.01	0.32
Mediana, MED	2.52	2.61	25.22	0.03	1.17
Valor promedio, MEAN	2.53	2.57	25.32	0.04	1.54
Desv. Estándar, SDEV	0.11	0.10	1.67	0.03	1.39
Coef. De variación, CV	4.43	3.74	6.58	85.38	90.54

Nota: Elaboración propia.

Los valores de peso específico, densidad saturada y densidad seca fueron utilizados en el análisis por MEL con el programa computacional Slide 6.0 y en el análisis por MEF con el programa computacional Phase2.

4.2.1.2. Resistencia a la compresión uniaxial (UCS)

Este ensayo de compresión fue realizado dentro de lo que establece la normativa ASTM D2983 – 95, de donde se obtuvo los valores de resistencia axial (ANEXO B) de los testigos de roca, información importante en el uso del principio de rotura por anisotropía generalizada en el modelamiento de los taludes del macizo rocoso y las correlaciones de otros valores de diseño. Se presenta el cuadro

Tabla 26

Resultados de compresión simple en testigos de roca.

Ensayo de compresión uniaxial UCS			
Parámetro estadístico	ZONA I1	ZONA I2	ZONA I3
Numero de resultados	3	3	3
Valor máximo, MAX	38.80 Mpa	38.50 Mpa	30.18 Mpa
Valor mínimo, MIN	33.63 Mpa	23.05 Mpa	22.91 Mpa
Mediana, MED	34.92 Mpa	34.14 Mpa	23.64 Mpa
Valor promedio, MEAN	35.78 Mpa	31.89 Mpa	25.58 Mpa
Desv. Estándar, SDEV	2.69	7.97	4.00
Coef. De variación, CV	7.52	24.99	15.64

Nota: Elaboración propia.

4.2.1.3. Angulo de fricción residual y básico

A través del ensayo de Tilt Test, presentado en el ANEXO C y sugerido por la ISMR, se determinó el ángulo de fricción. Para ello, se empleó un inclinómetro y un plano inclinable, midiendo así el ángulo de fricción y obteniendo un valor promedio de 42.13° para el ángulo de fricción básico (ϕ_b), calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\phi_b = \arctan(1.155 \tan \alpha)$$

En la **Tabla 27** se presenta el ángulo de fricción residual (ϕ_r) donde se puede definir a través de la formula planteada por Nick Barton & Choubey (1977) que aún se aplica en investigaciones actuales:

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \frac{r}{R}$$

Tabla 27

Ángulos de fricción residual de las zonas del talud.

Parámetro estadístico	Ensayo de Tilt Test (ϕ_r)		
	ZONA I1	ZONA I2	ZONA I3
Numero de resultados	3	3	3
Valor máximo, MAX	41.95°	44.02°	41.40°
Valor mínimo, MIN	39.95°	39.73°	36.60°
Mediana, MED	40.85°	41.72°	38.20°
Valor promedio, MEAN	40.91°	41.83°	38.73°
Desv. Estándar, SDEV	1.00	2.15	2.44
Coef. De variación, CV	2.45	5.13	6.31

Nota: Elaboración propia.

Para el estudio de sostenibilidad a través del método cinemático y MEL, se emplearon los valores del ángulo de fricción residual, según el principio de resistencia propuesto por Barton & Bandis (1990).

4.2.2. Discontinuidades

Las fracturas mapeadas en las zonas de mapeo del macizo rocoso se detallan en el ANEXO A, posteriormente, se presenta en la **Tabla 27** con la información procesada de las familias de más influencia en cada estación:

Tabla 28*Familias de discontinuidades por cada estación.*

Estación	Orientación del Talud	Familia	Dip	Dip dirección
EST-01	50/200	J1	60	199
		J2	86	156
		J3	86	74
EST-02	65/188	J1	16	89
		J2	80	299
		J3	80	3
		J4	86	42
EST-03	89/09	J1	56	139
		J2	77	7
		J3	28	31
EST-04	62/89	J1	41	61
		J2	83	146
		J3	77	238

4.2.2.1. Resistencia

La resistencia en los labios de discontinuidad se lecturaron en campo mediante el uso del martillo Schmidt, presentando a continuación el valor promedio de resistencia en el labio de la discontinuidad (r) y en una superficie no alterada (R) para cada Estación.

Tabla 29*Resistencia promedio de las discontinuidades.*

Estación	R_{prom}	r_{prom}	γ_{prom}	JCS
EST-01	23.20	21.40	25.32	33.64
EST-02	17.40	16.20	25.32	24.98
EST-03	21.60	18.60	25.32	30.99
EST-04	22.20	20.20	25.32	31.96

Nota: Elaboración propia.

Los valores de R y r fueron necesarios para el hallar el ángulo de fricción residual (ϕ_r) mediante una correlación de valores con el ángulo de fricción básico, además, el JCS se validó al tener similitud en los valores con el ensayo de compresión uniaxial en roca intacta.

4.2.2.2. Espaciamiento

El espaciamiento de las fracturas fue medido in situ utilizando el criterio de mapeo por ventana.

Tabla 30

Datos de espaciamiento en las discontinuidades.

Estación	EST-01	EST-02	EST-03	EST-04
<20	0	4	5	0
20 a 60	10	10	27	13
60 a 200	39	31	34	36
200 a 600	9	23	1	14
600 a 2000	3	1	0	4
2000 a 6000	0	0	0	0
>6000	0	0	0	0

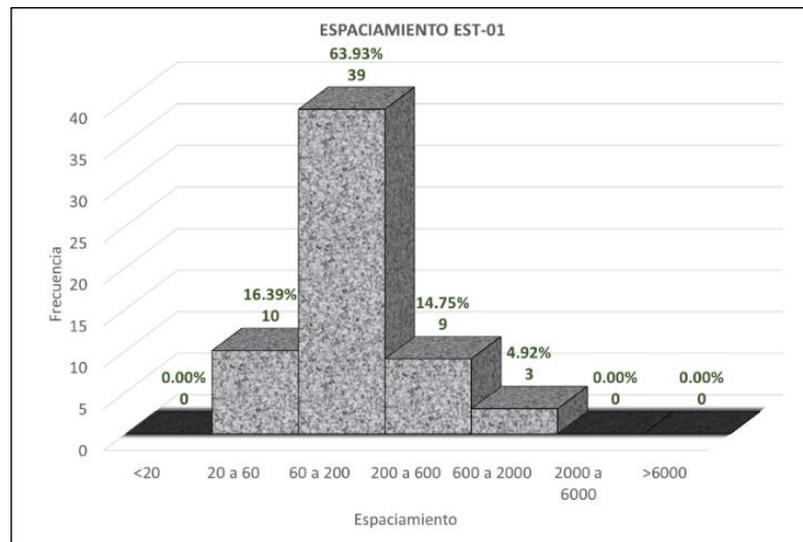
Nota: Elaboración propia.

Se definieron los espaciamientos representativos de cada estación geomecánica bajo los criterios de la media, moda y valor más conservador, según corresponda en cada caso.

Para la estación geomecánica EST-01, se utilizó el criterio de la moda, ya que existe una gran frecuencia de valores agrupados en un solo rango, definiendo el espaciamiento representativo entre 60 a 200.

Figura 49

Histograma de frecuencia de espaciamiento EST-01.

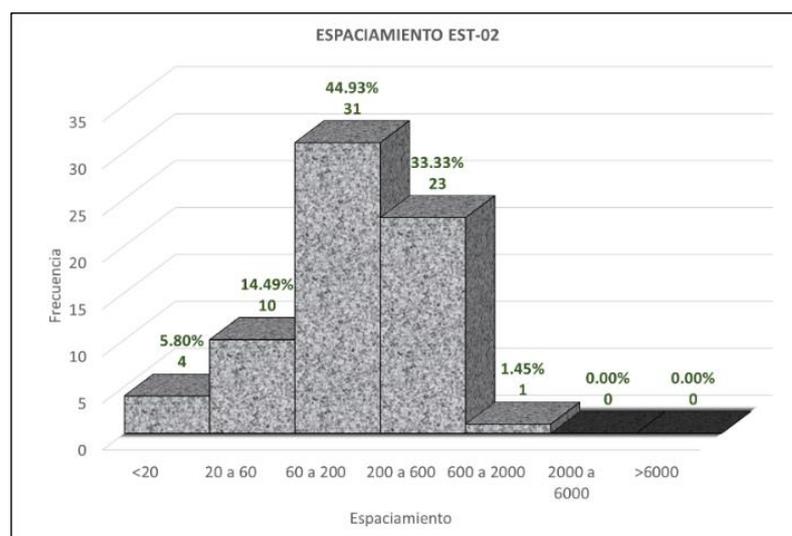


Nota: Elaboración propia.

Para el estudio en la zona de mapeo EST-02, se aplicó el criterio de la media aritmética entre los rangos de mayor frecuencia, resultando el valor de 233 y definiendo el espaciamiento representativo entre 200 a 600.

Figura 50

Histograma de frecuencia de espaciamiento EST-02.

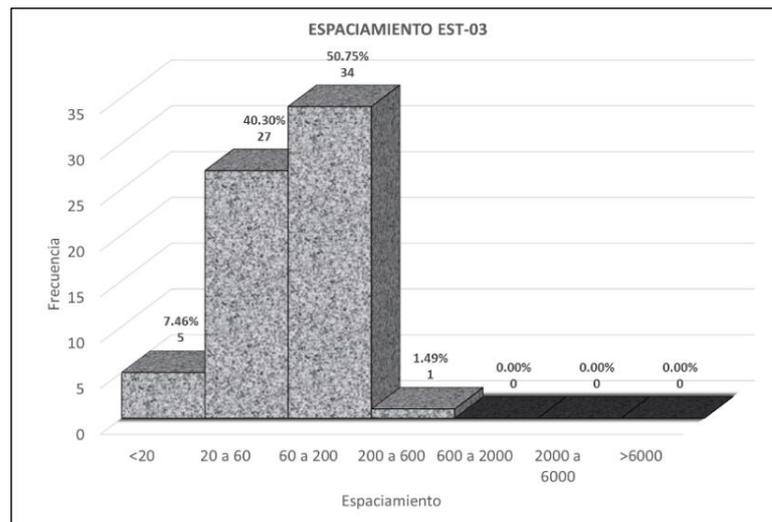


Nota: Elaboración propia.

Para la estación geomecánica EST-03 se tomó el criterio de la moda, eligiendo el valor representativo al rango con mayor frecuencia, definiendo el espaciamiento entre los rangos de 60 a 200.

Figura 51

Histograma de frecuencia de espaciamiento EST-03.

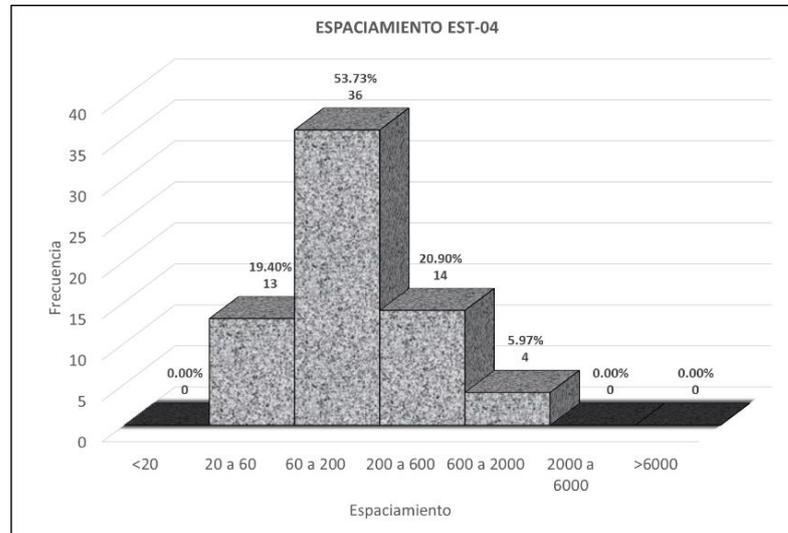


Nota: Elaboración propia.

Para la estación geomecánica EST-04 se aplicó el criterio de la media aritmética, entre el rango de mayor frecuencia y el siguiente más crítico a este, dando como resultado 133, un valor dentro del rango de 60 a 200.

Figura 52

Histograma de frecuencia de espaciamiento EST-04.



Nota: Elaboración propia.

4.2.2.3. Persistencia

La persistencia de los fracturamientos fue medida in situ utilizando el criterio de mapeo por ventana, obteniendo información detallada en la siguiente tabla:

Tabla 31

Datos de persistencia en las discontinuidades.

Estación	EST-01	EST-02	EST-03	EST-04
<1	15	42	46	39
1 a 3	27	22	21	27
3 – 10	19	5	0	1
10 – 20	0	0	0	0
>20	0	0	0	0

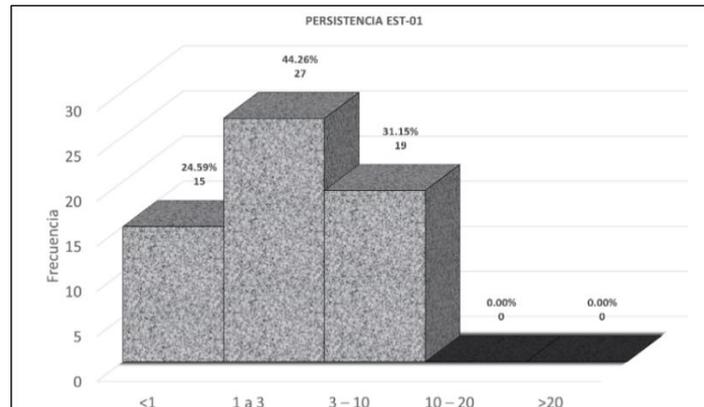
Nota: Elaboración propia.

Se establecieron los valores de las medias de cada estación bajo los criterios de moda y media, según corresponda en cada caso.

En la estación geomecánica EST-01 se definió el valor representativo del macizo mediante el uso del criterio de la media aritmética, teniendo así un valor de 1.9, dentro del rango de 1 a 3 metros.

Figura 53

Histograma de frecuencia de persistencia EST-01.

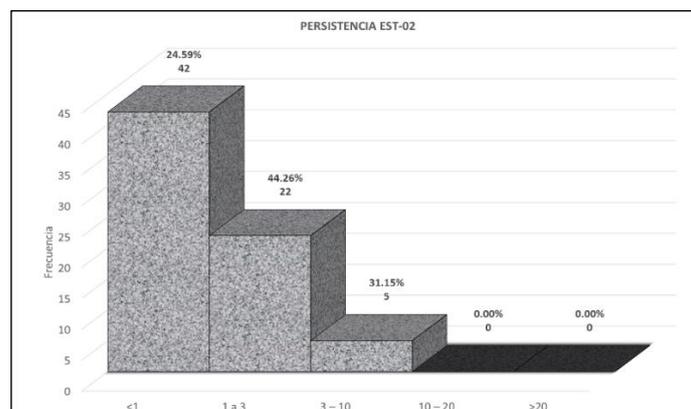


Nota: Elaboración propia.

Para la estación geomecánica EST-02, se tomó el criterio de la media aritmética, dando como resultado 2.2 valor dentro del rango de 1 a 3 metros.

Figura 54

Histograma de frecuencia de persistencia EST-02.

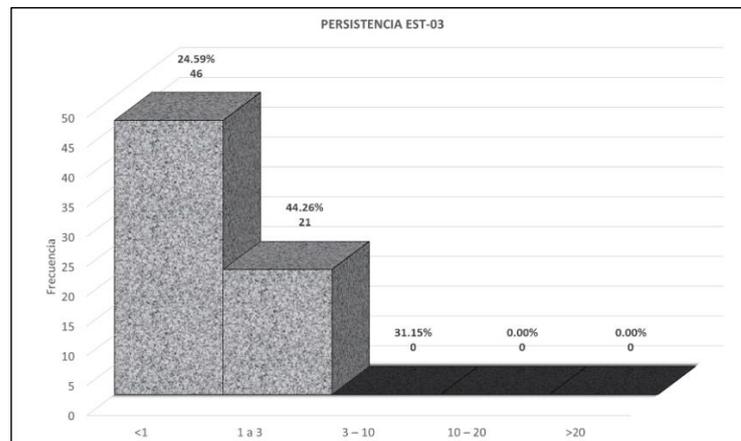


Nota: Elaboración propia.

En la estación geomecánica EST-03 se utilizó el criterio de media aritmética, dando como resultado 0.9, valor dentro del rango <1 metro.

Figura 55

Histograma de frecuencia de persistencia EST-03.

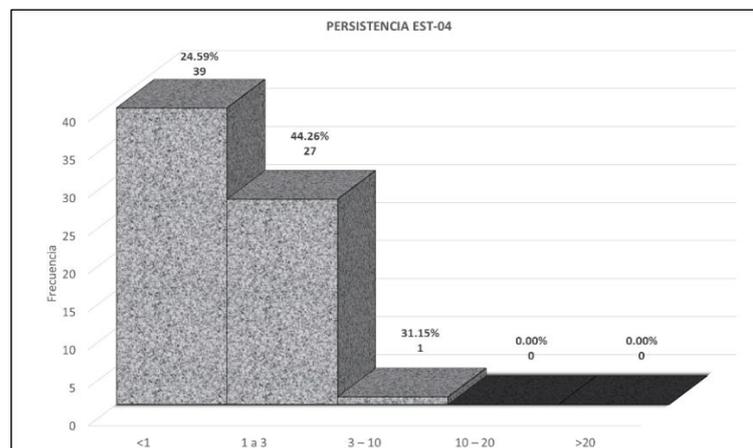


Nota: Elaboración propia.

Para la estación geomecánica EST-04 se empleó el criterio de media aritmética, dando como resultado 1.9, valor que se encuentra dentro del rango de 1 a 3 metros.

Figura 56

Histograma de frecuencia de persistencia EST-04.



Nota: Elaboración propia.

4.2.2.4. Rugosidad

La rugosidad de las discontinuidades fue medida en campo de forma cualitativa, utilizando el método de perfil de rugosidad JRC, obteniendo la información detallada en la **Tabla 32**.

Tabla 32

Datos de rugosidad en las discontinuidades.

Estación	EST-01	EST-02	EST-03	EST-04
Muy rugosa	0	9	0	8
Rugosa	0	9	5	22
Ligeramente Rugosa	30	41	13	23
Ondulada	28	2	41	7
Suave	2	0	0	1

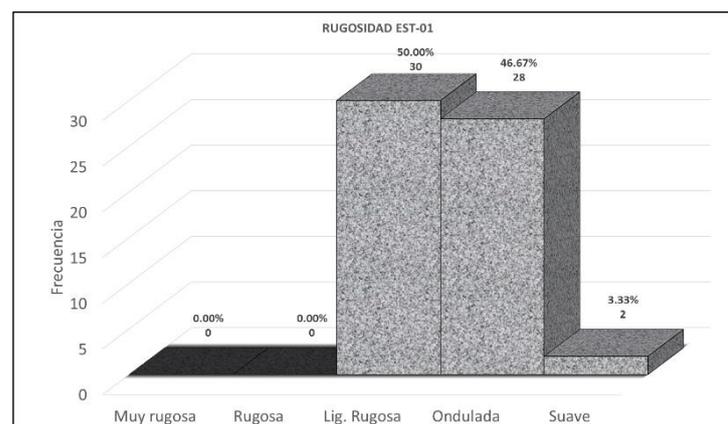
Nota: Elaboración propia.

Se definieron los valores de las rugosidades representativas de cada estación geomecánica bajo los criterios de la media, moda y valor más conservador, según corresponda en cada caso.

Para el caso de la estación geomecánica EST-01 se tomará el criterio del valor más conservador, tomando así la característica de rugosidad “ondulada”.

Figura 57

Histograma de frecuencia de caracterización de rugosidad EST-01.

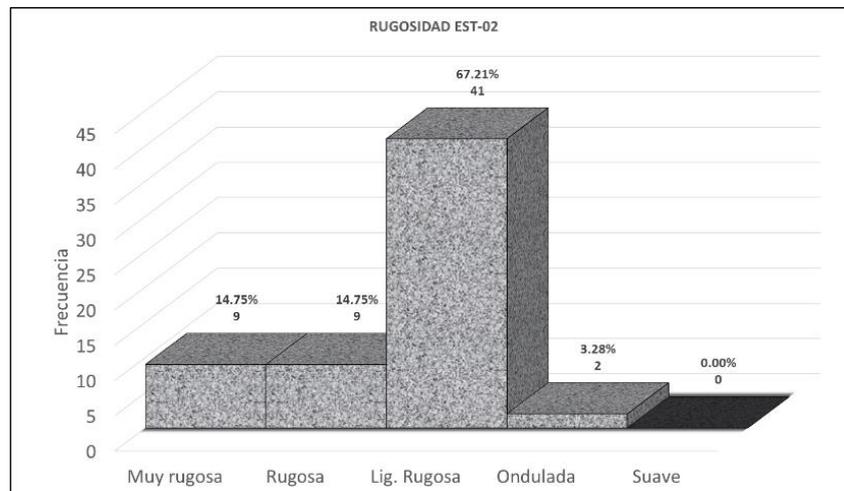


Nota: Elaboración propia.

Para el estudio en la zona de mapeo EST-02 se tomará el criterio de la moda, tomando así la característica de rugosidad “ligeramente rugosa”.

Figura 58

Histograma de frecuencia de caracterización de rugosidad EST-02.

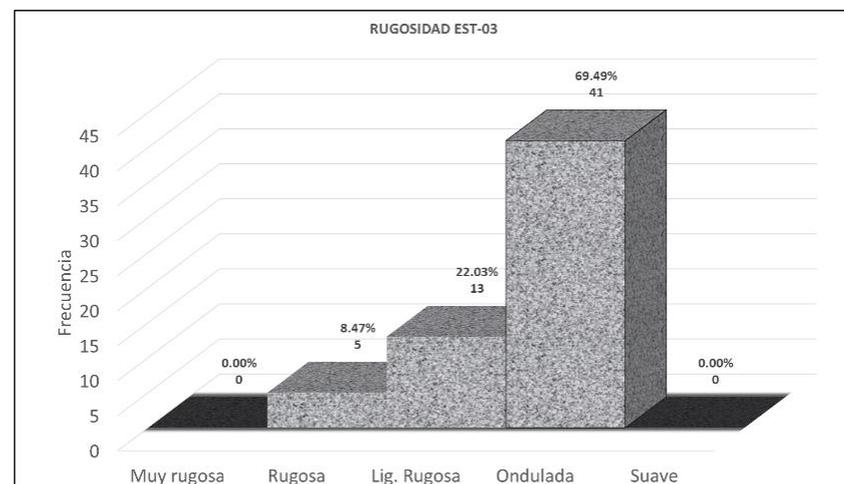


Nota: Elaboración propia.

Para el estudio en la zona de mapeo EST-03 se tomará el criterio de la moda, tomando así la característica de rugosidad “ondulada”.

Figura 59

Histograma de frecuencia de caracterización de rugosidad EST-03.

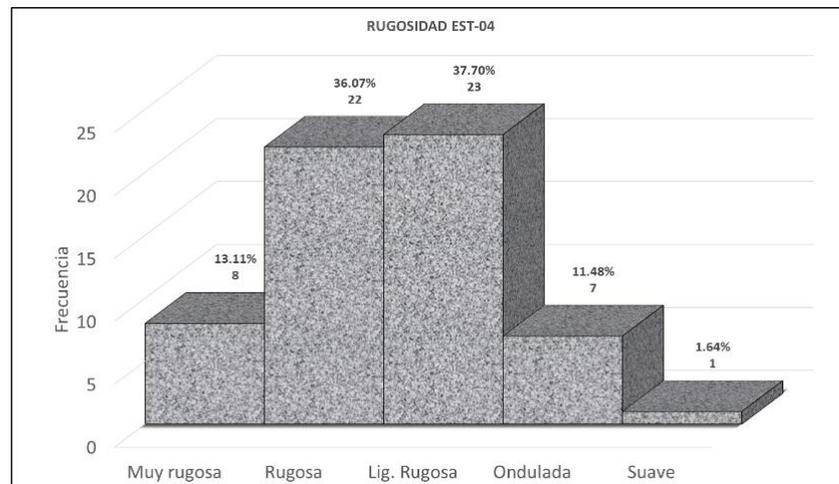


Nota: Elaboración propia.

Para el estudio en la zona de mapeo EST-04 se tomará el criterio del valor más conservador, tomando así la característica de rugosidad “ligeramente rugosa”.

Figura 60

Histograma de frecuencia de caracterización de rugosidad EST-04.



Nota: Elaboración propia.

4.2.2.5. Abertura

La abertura de las discontinuidades fue medida en campo de forma cuantitativa, utilizando el método de mapeo por ventana, obteniendo la información detallada en la **Tabla 33**.

Tabla 33

Datos de abertura en las discontinuidades.

Estación	EST-01	EST-02	EST-03	EST-04
Cerrada	18	33	36	18
<0.1 mm	0	0	0	17
0.1 – 1.0 mm	0	0	2	16
1.0 – 5 mm	43	36	29	10
>5 mm	0	0	0	7

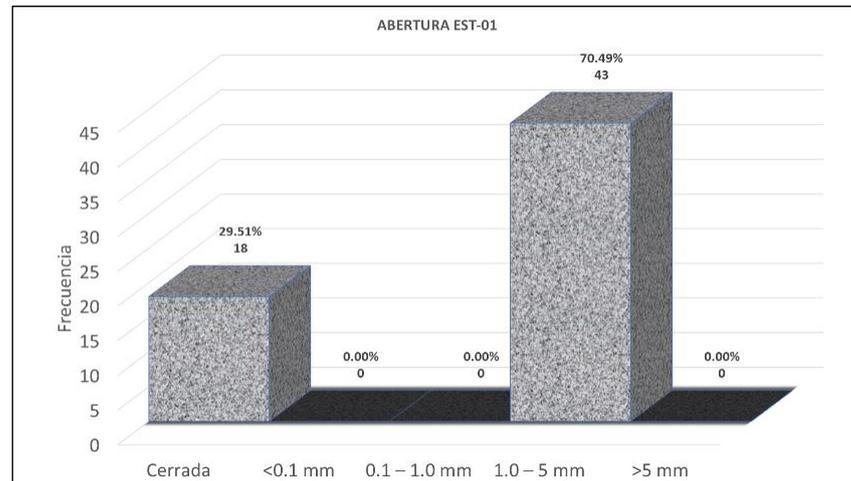
Nota: Elaboración propia.

Se definieron los valores de las rugosidades representativas de cada estación geomecánica bajo los criterios de la media, moda y valor más conservador, según corresponda en cada caso.

Para la estación geomecánica EST-01 se empleó el criterio de moda, definiendo el rango de 1.0 a 5 milímetros.

Figura 61

Histograma de frecuencia de abertura EST-01.

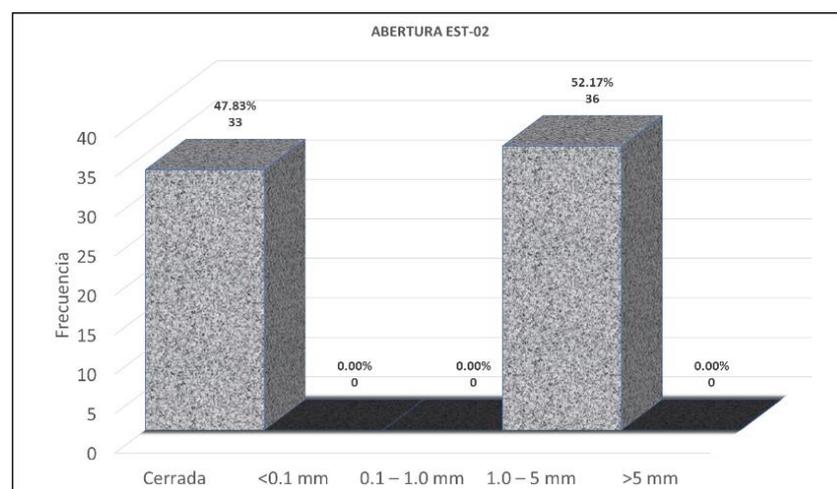


Nota: Elaboración propia

Para la estación geomecánica EST-02 se empleó el criterio de moda, definiendo el rango de 1.0 a 5 milímetros.

Figura 62

Histograma de frecuencia de abertura EST-02.

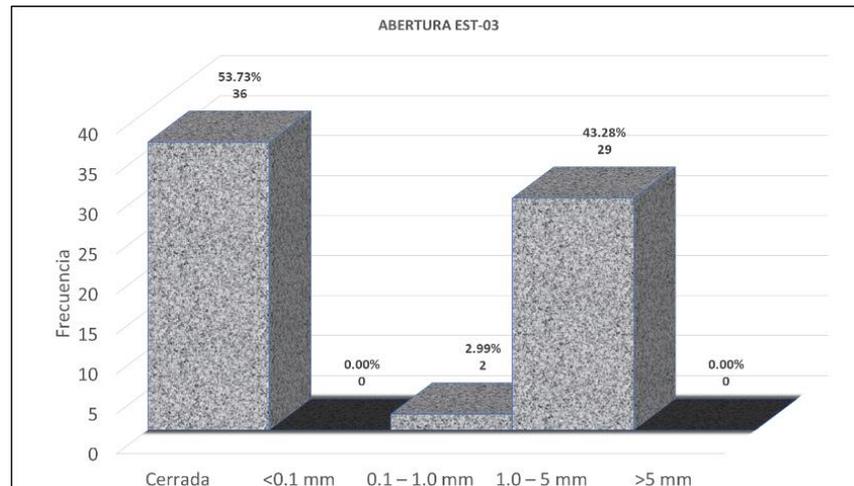


Nota: Elaboración propia

Para la estación geomecánica EST-03 se empleó el criterio de moda, definiendo el rango de 1.0 a 5 milímetros.

Figura 63

Histograma de frecuencia de abertura EST-03.

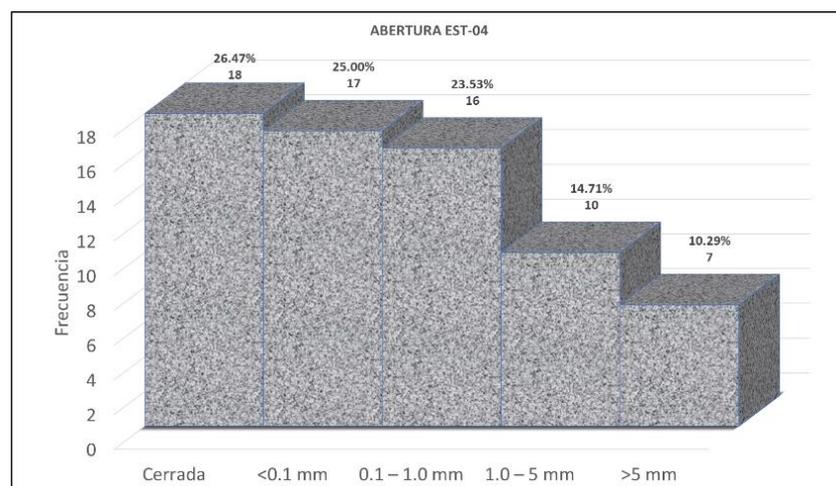


Nota: Elaboración propia

Para la estación geomecánica EST-04 se empleó el criterio de media aritmética, definiendo el rango de 0.1 a 1 milímetros.

Figura 64

Histograma de frecuencia de abertura EST-04.



Nota: Elaboración propia

4.2.2.6. Relleno

El relleno de las discontinuidades fue medida en campo de forma cualitativa y cuantitativa, utilizando el método de mapeo por ventana, obteniendo la información detallada en la **Tabla 34**.

Tabla 34

Datos del relleno en las discontinuidades.

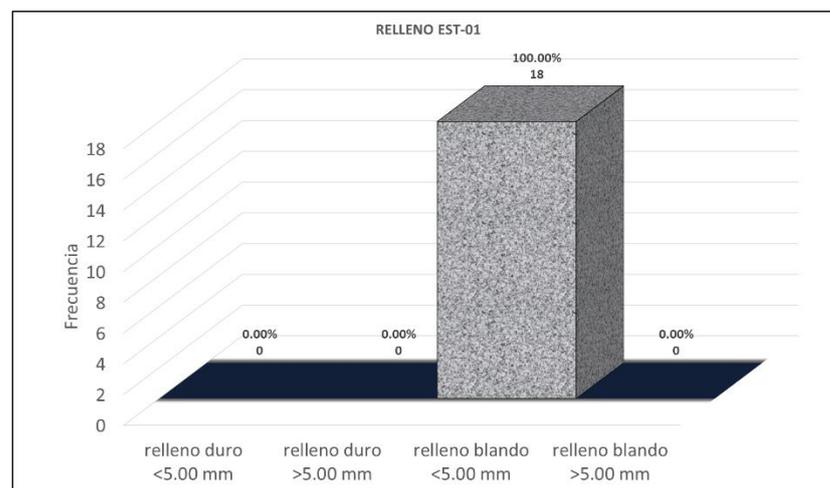
Estación		EST-01	EST-02	EST-03	EST-04
Relleno	<5.00 mm	0	24	2	0
duro	>5.00 mm	0	0	0	0
Relleno	<5.00 mm	18	9	30	16
blando	>5.00 mm	0	0	4	1

Nota: Elaboración propia.

Para la estación geomecánica EST-01 se definió como valor representativo de relleno “relleno blando <5.00 milímetros”

Figura 65

Histograma de frecuencia de relleno EST-01.

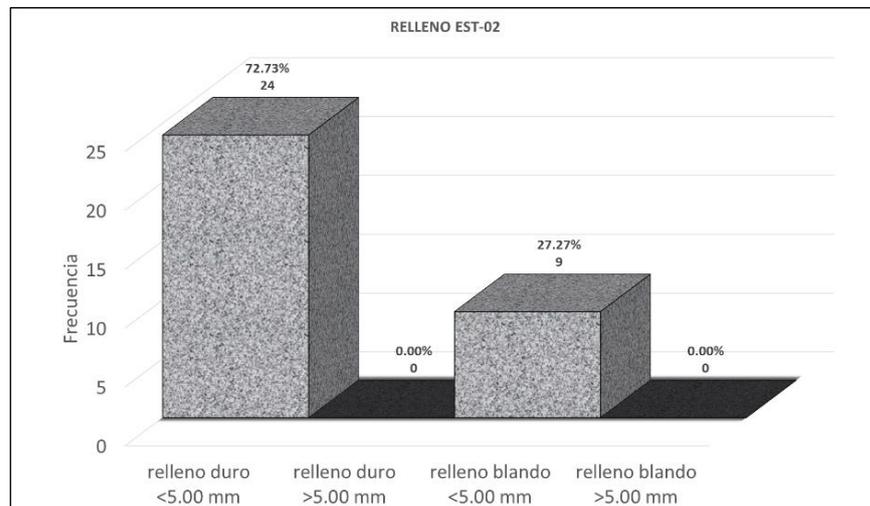


Nota: Elaboración propia.

Para la estación geomecánica EST-02 se definió como valor representativo de relleno “relleno duro <5.00 milímetros”

Figura 66

Histograma de frecuencia relleno EST-02.

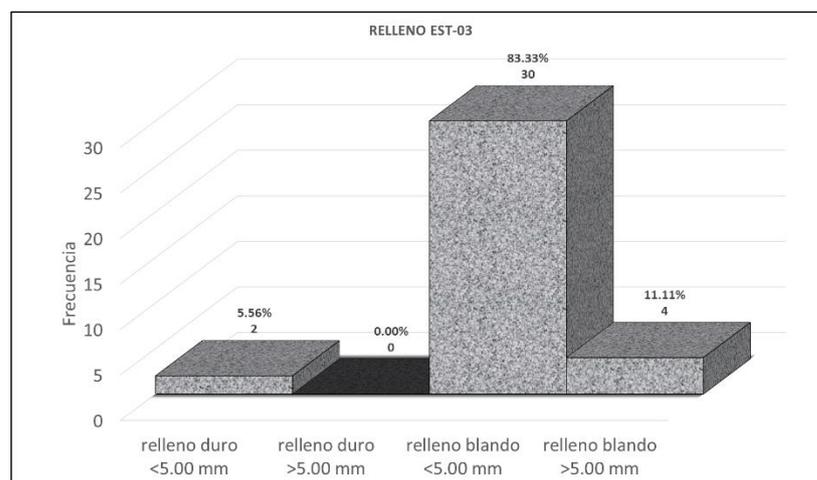


Nota: Elaboración propia.

Para la estación geomecánica EST-03 se definió como valor representativo de relleno “relleno blando <5.00 milímetros”

Figura 67

Histograma de frecuencia relleno EST-03.

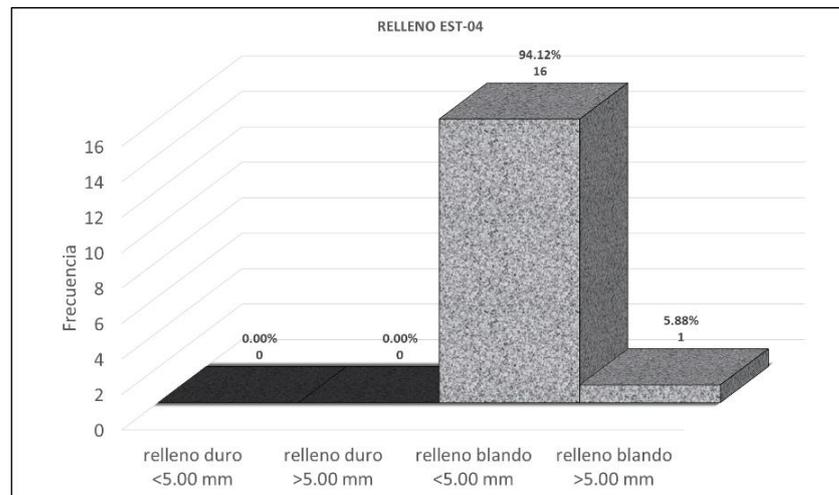


Nota: Elaboración propia.

Para la estación geomecánica EST-04 se definió como valor representativo de relleno “relleno blando <5.00 milímetros”

Figura 68

Histograma de frecuencia relleno EST-04.



Nota: Elaboración propia.

4.2.2.7. Presencia de agua en las discontinuidades

Para las estaciones geomecánicas del mapeo realizado in situ se pudo observar la no presencia de agua ni vegetación en las estaciones EST-04 y EST-03, sin embargo, cerca de la estación EST-02 se encuentra un ojo de agua y en la EST-01 se puede observar presencia de vegetación.

4.2.2.8. Meteorización

El macizo rocoso de la zona de estudio al ser un talud formado producto del uso de voladuras y constante explotación de material en la gran parte de su superficie se encuentra en estado altamente alterado ya que el fracturamiento de la roca dio paso al ingreso del agua y esto generó una meteorización del tipo física y química.

4.3. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO

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

El RQD se determinó en campo utilizando el criterio de Deere que relaciona la sumatoria de tramos con longitud mayor a 10 cm entre la dimensión total, como presenta la formula ya descrita en el marco teórico. Esta estimación se realizó en las 4 estaciones geomecánicas teniendo como resultado los siguientes valores correspondientes a cada estación.

Tabla 35

RQD de cada estación geomecánica

ESTACIÓN	RQD (horizontal y vertical)	RQD_{prom}
EST-01	24.00 y 31.50	27.75
EST-02	91.00 y 93.00	92.00
EST-03	71.50 y 87.00	79.25
EST-04	35.00 y 55.00	45.00

Nota: Elaboración propia.

4.3.2. Clasificación por el método índice GSI

El GSI fue obtenido mediante el uso de la carta de evaluación del índice de resistencia geológica propuesta por Marinós y Hoek (2000), para cada estación geomecánica, valores presentados en la siguiente:

Tabla 36

Valores de GSI obtenidos para cada estación geomecánica.

Estación	GSI
EST-01	29
EST-02	69
EST-03	56
EST-04	43

Nota: Elaboración propia.

4.3.3. Clasificación RMR Bieniawski

Para la clasificación geomecánica RMR se tomó en cuenta los valores levantados en el mapeo geomecánico en campo, y se utilizó las valoraciones representativas de cada estación geomecánica resumida como indica la siguiente tabla.

Tabla 37

RMR para cada estación.

ESTACIÓN	RMR	CLASE	DESCRIPCIÓN
EST-01	40	IV	mala calidad
EST-02	61	III	calidad regular
EST-03	55	III	calidad regular
EST-04	49	III	calidad regular

Nota: Elaboración propia.

4.4. VALORACIÓN GEOTÉCNICA

4.4.1. Criterio de resistencia generalizado de Hoek – Brown – Diederichs

(macizo rocoso)

Se llevó a cabo la evaluación del criterio de resistencia del macizo rocoso Quellorco con la finalidad de comprender el comportamiento estructural de sus taludes. Los valores de los parámetros asignados a los 10 taludes se determinaron considerando su proximidad y similitud con cada estación geomecánica. Además, se empleó el software RocData v.4.0 de Rocscience para este propósito, y los datos ingresados al programa están detallados en la siguiente tabla:

Tabla 38

Parámetros de resistencia de entrada para el cálculo de resistencia de cada talud que compone al macizo rocoso Quellorco.

Estación	Sección de talud	UCS (Mpa)	GSI	Mi	Ei (MPa)	D	Wunitario (MN/m ³)	Altura
EST-01	1	35.78	29	12	410000	0.7	0.0253	12
	2	35.78	29	12	410000	0.7	0.0253	31
EST-03	3	31.89	56	12	410000	1	0.0253	64
	4	31.89	56	12	410000	1	0.0253	90
	5	31.89	43	12	410000	1	0.0253	99
EST-04	6	31.89	43	12	410000	1	0.0253	99
	7	31.89	43	12	410000	1	0.0253	85
	8	31.89	43	12	410000	1	0.0253	56
EST-02	9	25.58	69	12	410000	0.7	0.0253	36
	10	25.58	69	12	410000	0.7	0.0253	30

Nota: Elaboración propia.

A continuación, se exhiben los datos relativos a la resistencia del macizo rocoso. Estos valores se utilizan en el análisis de estabilidad a través del método numérico, conforme a los segmentos mencionados anteriormente. Puede encontrarse información adicional en el ANEXO D, donde se muestran las representaciones gráficas del criterio de resistencia generalizado propuesto por Hoek & Brown. Estos gráficos proporcionan una visualización de los resultados derivados del cálculo de los ángulos de fricción y cohesión utilizando dicho criterio.

Tabla 39

Valores resultantes de los criterios de resistencia del macizo rocoso Quellorco.

Talud	m_b	s	a	$\sigma_{3m\acute{a}x}$ (MPa)	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	σ_{cm} (MPa)	E_M (MPa)	C_M	ϕ_M
1	0.243	$3.4e^{-5}$	0.524	0.2595	-0.0050	0.163	2.045	14188.96	0.076	41.92
2	0.243	$3.4e^{-5}$	0.524	0.6156	-0.0050	0.163	2.045	14188.96	0.135	34.95
3	0.518	0.0007	0.504	1.2344	-0.0402	0.793	3.055	39142.04	0.333	35.98
4	0.518	0.0007	0.504	1.7404	-0.0402	0.793	3.055	39142.04	0.400	33.42
5	0.205	0.0001	0.509	1.7530	-0.0117	0.253	1.828	18799.73	0.273	25.26
6	0.205	0.0001	0.509	1.7530	-0.0117	0.253	1.828	18799.73	0.273	25.26
7	0.205	0.0001	0.509	1.5259	-0.0117	0.253	1.828	18799.73	0.250	26.31
8	0.205	0.0001	0.509	0.5915	-0.0117	0.253	1.828	18799.73	0.138	33.89
9	2.185	0.0112	0.501	0.7694	-0.1310	2.688	5.373	132378.82	0.500	49.35
10	2.185	0.0112	0.501	0.6517	-0.1310	2.688	5.373	132378.82	0.473	50.47

Nota: Elaboración propia.

4.4.2. Criterio de resistencia de Barton – Bandis Y Mohr Coulomb

(estructuras)

Se presenta en la Tabla siguiente un resumen de los valores de resistencia obtenidos para aplicar el criterio de resistencia de Barton-Bandis, así como la linealización del ajuste del Mohr-Coulomb correspondiente a cada sección de talud analizada.

Tabla 40

Valores resultantes de los criterios de resistencia de las fracturas del macizo rocoso Quellorco.

Estación	Talud	Fam	JRC	JCS (MPa)	ϕ_r (°)	$sig_n máx$	C_j	ϕ_j (°)
Est-01	1	1	7	33.64	40.91	0.5471	0.032	52.72
		2	4	33.64	40.91	0.5063	0.012	47.87
		3	6	33.64	40.91	0.5323	0.023	51.16
	2	1	7	33.64	40.91	1.2389	0.049	48.97
		2	4	33.64	40.91	1.1867	0.027	46.39
		3	6	33.64	40.91	1.2389	0.049	48.97
Est-03	3	1	8	30.99	41.83	2.4755	0.145	49.79
		2	7	30.99	41.83	2.4237	0.115	48.91
		3	5	30.99	41.83	2.3306	0.069	47.02
	4	1	8	30.99	41.83	3.3423	0.186	48.76
		2	7	30.99	41.83	3.2777	0.149	48.00
		3	5	30.99	41.83	3.1606	0.092	46.36
Est-04	5	1	9	31.96	41.83	3.7130	0.247	49.26
		2	11	31.96	41.83	3.8803	0.377	50.40
		3	7	31.96	41.83	3.5693	0.161	47.84
	6	1	9	31.96	41.83	3.7130	0.247	49.26
		2	11	31.96	41.83	3.8803	0.377	50.40
		3	7	31.96	41.83	3.5693	0.161	47.84
Est-02	7	1	9	31.96	41.83	3.2491	0.223	49.77
		2	11	31.96	41.83	3.4022	0.345	50.98
		3	7	31.96	41.83	3.1186	0.143	48.225
	8	1	9	31.96	41.83	2.2550	0.168	51.15
		2	11	31.96	41.83	2.3747	0.272	52.56
		3	7	31.96	41.83	2.1552	0.104	49.36
Est-02	9	1	11	24.98	38.73	1.5476	0.151	50.51
		2	10	24.98	38.73	1.5082	0.120	49.72
		3	11	24.98	38.73	1.5476	0.151	50.51
	10	4	8.5	24.98	38.73	1.4553	0.086	48.35
		1	11	24.98	38.73	1.3224	0.136	51.20
		2	10	24.98	38.73	1.2871	0.107	50.38
		3	11	24.98	38.73	1.3224	0.136	51.20
		4	8.5	24.98	38.73	1.2400	0.075	48.93

Nota: Elaboración propia.

4.4.3. Criterio de resistencia por anisotropía generalizada

El criterio de anisotropía generalizada requiere los valores de entrada previamente expuesta, además de, la resistencia direccional de las familias de fracturamientos asignadas a cada talud. Como se muestra a continuación:

Tabla 41

Resistencia direccional del macizo rocoso respecto a las familias de discontinuidades que lo componen.

Estación	Talud	Angulo inicio	Angulo final	Material	Resistencia Direccional
EST-01	1 y 2	-90	-81	Fam. 3	
		-81	55	Macizo Rocoso	
		55	65	Fam. 1	
		65	81	Macizo Rocoso	
		81	90	Fam. 2	
EST-03	3 y 4	-90	23	Macizo Rocoso	
		23	33	Fam. 3	
		33	51	Macizo Rocoso	
		51	61	Fam. 1	
		61	72	Macizo Rocoso	
		72	82	Fam. 2	
EST-04	5,6,7 y 8	-90	-82	Macizo Rocoso	
		-82	-72	Fam. 3	
		-72	36	Macizo Rocoso	
		36	46	Fam. 1	
		46	78	Macizo Rocoso	
		78	88	Fam. 2	
EST-02	9 y 10	-90	11	Macizo Rocoso	
		11	21	Fam. 1	
		21	75	Macizo Rocoso	
		75	85	Fam. 2	
		85	90	Fam. 4	

Nota: Elaboración propia.

4.5. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

4.5.1. Análisis de estabilidad por el método empírico

4.5.1.1. Índice smr (slope mass rating)

Tabla 42

Valores de entrada para el análisis de estabilidad por el método SMR:

Estación	Talud	Fam	Dir. Buz (°)	Buz. (°)	Dir. Buz. Talud (°)	Buz. Talud (°)	RMR	Método de excavación
Est-01	1	1	199	60	180	43	40	Voladura deficiente
		2	156	86				
		3	74	86				
	2	1	199	60	130	43		Voladura deficiente
		2	156	86				
		3	74	86				
Est-03	3	1	139	56	96	33	55	Voladura deficiente
		2	7	77				
		3	31	28				
	4	1	139	56	89	33		Voladura deficiente
		2	7	77				
		3	31	28				
Est-04	5	1	61	41	82	34	49	Voladura deficiente
		2	146	83				
		3	238	77				
	6	1	61	41	78	33		Voladura deficiente
		2	146	83				
		3	238	77				
Est-02	7	1	61	41	75	30	61	Voladura deficiente
		2	146	83				
		3	238	77				
	8	1	61	41	50	28		Voladura deficiente
		2	146	83				
		3	238	77				
Est-02	9	1	89	16	23	29	61	Voladura deficiente
		2	299	80				
		3	3	80				
	10	4	42	86	11	27		Voladura deficiente
		1	89	16				
		2	299	80				
		3	3	80				
		4	42	86				

Nota: Elaboración propia.

Esta tabla muestra el resumido de los valores definidos por el método de análisis de sostenibilidad SMR propuesto por Romana (1993).

Tabla 43

Resultado del análisis de sostenibilidad por el método SMR.

Est.	Tal.	Fam	Modo de rotura	SMR	Clase	Condición	Fallas	
Est-01	1	1	Cuña/planar	32	IV	Inestable	Grandes cuñas o planar	
		2	Cuña/planar	32	IV	Inestable	Grandes cuñas o planar	
		3	Vuelco	28	IV	Inestable	Grandes cuñas o planar	
		1	Cuña/planar	32	IV	Inestable	Grandes cuñas o planar	
		2	2	Cuña/planar	32	IV	Inestable	Grandes cuñas o planar
Est-03	3	3	Cuña/planar	32	IV	Inestable	Grandes cuñas o planar	
		1	Cuña/planar	47	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas cuñas	
		2	Cuña/planar	47	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas cuñas	
		3	Cuña/planar	44	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas cuñas	
		1	Planar/Cuña	47	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas cuñas	
		4	2	Planar/Cuña	47	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas cuñas
		3	Planar/Cuña	44	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas cuñas	
Est-04	6	1	Planar/Cuña	39	IV	Inestable	Grandes cuñas o planar	
		2	Planar/Cuña	41	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas cuñas	
		3	Vuelco	39	IV	Inestable	Planar o grandes cuñas	
		1	Planar/Cuña	37	IV	Inestable	Grandes cuñas o planar	
		2	Planar/Cuña	41	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas juntas	
		3	Vuelco	39	IV	Inestable	Planar o grandes cuñas	
		1	Planar/Cuña	41	III	Parcialmente estable	Planar o grandes cuñas	
		2	Planar/Cuña	41	III	Parcialmente estable	Grandes cuñas o planar	
		3	Vuelco	41	III	Parcialmente estable	Grandes cuñas o planar	
		1	Cuña/planar	41	III	Parcialmente estable	Grandes cuñas o planar	
8	2	Vuelco	40	IV	Inestable	Muchas cuñas o algunas juntas		
		3	Vuelco	41	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas juntas	

Est.	Talud	Fam	Modo de rotura	SMR	Clase	Condición	Fallas
Est-02	9	1	Planar/Cuña	52	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas juntas
		2	Planar/Cuña	53	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas juntas
		3	Planar/Cuña	53	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas juntas
		4	Planar/Cuña	53	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas juntas
	10	1	Planar/Cuña	52	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas juntas
		2	Planar/Cuña	53	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas juntas
		3	Planar/Cuña	53	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas juntas
		4	Planar/Cuña	53	III	Parcialmente estable	Muchas cuñas o algunas juntas

Nota: Elaboración propia.

4.5.2. Análisis de estabilidad mediante el método estereográfico o cinemático

La importancia del análisis de estabilidad a través del enfoque estereográfico o cinemático radica en su contribución sustancial a la detección de posibles mecanismos de falla en un talud y los consiguientes desplazamientos de bloques originados por las discontinuidades. Aunque este método no posibilita la determinación directa del factor de seguridad del talud, simplifica la identificación del mecanismo de falla. En este estudio, se utilizó el software Dips v.6.0 para llevar a cabo dicho análisis.

Tabla 44

Valores de entrada para el análisis cinemático.

Estación	Talud	Fam	Dir. Buz (°)	Buz. (°)	Dir. Buz. Talud (°)	Buz. Talud (°)	Altura del talud (m)	Angulo de fricción (°)
Est-01	1	1	199	60	180	43	12	40.91
		2	156	86				
		3	74	86				
Est-01	2	1	199	60	130	43	31	40.91
		2	156	86				
		3	74	86				
Est-03	3	1	139	56	96	33	64	41.83
		2	7	77				
		3	31	28				
Est-03	4	1	139	56	89	33	90	41.83
		2	7	77				
		3	31	28				
Est-03	5	1	61	41	82	34	99	41.83
		2	146	83				
		3	238	77				
Est-04	6	1	61	41	78	33	99	41.83
		2	146	83				
		3	238	77				
Est-04	7	1	61	41	75	30	85	41.83
		2	146	83				
		3	238	77				
Est-04	8	1	61	41	50	28	56	41.83
		2	146	83				
		3	238	77				
Est-02	9	1	89	16	23	29	36	38.73
		2	299	80				
		3	3	80				
Est-02	10	4	42	86	11	27	30	38.73
		1	89	16				
		2	299	80				
		3	3	80				
		4	42	86				

Nota: Elaboración propia.

4.5.2.1. Rotura planar

Se llevó a cabo el análisis estereográfico con el software Dips 6.0 en las 10 secciones presentadas del cerro Quellorco para identificar un posible mecanismo de falla planar. Este análisis proporcionó la probabilidad de rotura planar en cada una de las familias que conforman

el macizo rocoso de cada sección. A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 45

Resultado de probabilidad de falla por mecanismo de rotura planar.

Talud	Familia crítica	Porcentaje
1	Total	2.48%
	Familia 1	2.82%
2	Total	0.00%

Nota: Elaboración propia

El análisis estereográfico del tipo de falla planar se muestra en el ANEXO E, en este se presenta el análisis estereográfico presentado en la **Tabla 45**. De este análisis se tiene que hay probabilidad de falla mínima en el talud uno en la familia 1.

4.5.2.2. Rotura por cuña

Con el objetivo de identificar un posible mecanismo de falla planar en los taludes del cerro Quellorco, se llevó a cabo el análisis estereográfico utilizando el software Dips 6.0 en las 10 secciones proporcionadas. Este análisis permitió obtener la probabilidad de rotura por cuña en cada una de las familias que integran el macizo rocoso de cada sección. A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 46

Resultado de probabilidad de falla por mecanismo de falla por cuña.

Talud	Familia crítica	Porcentaje
1	Total	0.52%
2	Total	0.51%

Nota: Elaboración propia.

El análisis estereográfico del tipo de falla por cuña se muestra en el ANEXO E, en este se presenta el análisis estereográfico presentado en la **Tabla 46**. De este análisis, hay probabilidad de falla mínima en 1 y 2.

4.5.2.3. Rotura por vuelco flexural

Al igual que los otros mecanismos de rotura, también se analizaron las 10 secciones del talud por falla por vuelco flexural obteniendo porcentajes de probabilidad nula en cada sección.

4.5.2.4. Rotura por vuelco directo y oblicuo

El estudio estereográfico de falla por vuelco directo se ejecutó en las 10 secciones estudiadas del talud, dando como resultado probabilidades de rotura en cada familia de discontinuidad, como muestra la **Tabla 47**.

Tabla 47

Resultado de probabilidad de falla por mecanismo de rotura por vuelco directo.

Talud	Familia crítica	Porcentaje
1	Vuelco directo (intersección)	0.12%
	Vuelco oblicuo (intersección)	0.38%
	Vuelco por base plana (todos)	7.00%
	Vuelco por base plana (Fam. 1)	7.95%
2	Vuelco directo (intersección)	0.00%
	Vuelco oblicuo (intersección)	8.04%
	Vuelco por base plana (todos)	4.52%
	Vuelco por base plana (Fam. 1)	5.13%
3	Vuelco directo (intersección)	0.36%
	Vuelco oblicuo (intersección)	4.31%
	Vuelco por base plana (todos)	25.54%
	Vuelco por base plana (Fam. 1)	21.44%
4	Vuelco por base plana (Fam. 3)	55.70%
	Vuelco directo (intersección)	0.00%
	Vuelco oblicuo (intersección)	4.61%
	Vuelco por base plana (todos)	25.54%
4	Vuelco por base plana (Fam. 1)	21.44%
	Vuelco por base plana (Fam. 3)	55.70%



Talud	Familia crítica	Porcentaje
5	Vuelco directo (intersección)	1.16%
	Vuelco oblicuo (intersección)	6.12%
	Vuelco por base plana (todos)	19.34%
	Vuelco por base plana (Fam. 1)	33.55%
6	Vuelco directo (intersección)	1.30%
	Vuelco oblicuo (intersección)	6.26%
	Vuelco por base plana (todos)	19.35%
	Vuelco por base plana (Fam. 1)	33.55%
7	Vuelco directo (intersección)	1.30%
	Vuelco oblicuo (intersección)	6.46%
	Vuelco por base plana (todos)	19.34%
	Vuelco por base plana (Fam. 1)	33.55%
8	Vuelco directo (intersección)	3.12%
	Vuelco oblicuo (intersección)	5.17%
	Vuelco por base plana (todos)	17.14%
	Vuelco por base plana (Fam. 1)	33.55%
9	Vuelco directo (intersección)	2.53%
	Vuelco oblicuo (intersección)	6.41%
	Vuelco por base plana (todos)	13.31%
	Vuelco por base plana (Fam. 1)	28.18%
10	Vuelco directo (intersección)	0.03%
	Vuelco oblicuo (intersección)	6.04%
	Vuelco por base plana (todos)	26.01%
	Vuelco por base plana (Fam. 1)	75.62%

Nota: Elaboración propia.

El análisis estereográfico del tipo de falla por vuelco oblicuo y directo se muestra en el ANEXO E, en este se presenta análisis estereográfico presentado en la **Tabla 47**. De este análisis se tiene que hay probabilidad de falla considerable, mayor a 50% en los taludes 3 y 4, específicamente en la familia 3, sin embargo, estos valores se desestiman, para justificar un análisis por MEL, ya que la persistencia de esta familia es menor a 0.9 metros y no generaría el desprendimiento de un bloque de considerable tamaño respecto a la altura de estos taludes.

4.5.3. Análisis de estabilidad mediante el método equilibrio límite (MEL)

El MEL se emplea comúnmente en la evaluación de la sostenibilidad de taludes en formaciones rocosas controladas estructuralmente. Este procedimiento da como producto el cálculo de los FS correspondientes para cada talud.

Previamente se realizó el análisis estereográfico en el que se obtuvo las probabilidades de falla en cada tipo de rotura local, teniendo valores mínimos de falla planar, vuelco flexural, y cuña, en el análisis del tipo de falla por vuelco oblicua y directa se tuvo valores superiores al 50% en los taludes 3 y 4, donde se analizara su estabilidad por equilibrio límite para el tipo de rotura circular, por ser un talud de gran altura donde se considera que su estabilidad es controlada por la falla global.

4.5.3.1. Rotura circular

El análisis por rotura circular se realizó a las 10 secciones del talud utilizando el método de dovelas por Janbu, obteniendo como resultado valores del FS para cada tramo, se usó el programa computacional Slide 6.0 y el criterio de Anisotropía Generalizada teniendo en cuenta la resistencia direccional que entrega cada familia de discontinuidad, las superficies de rotura y FS se encuentran en el ANEXO F.

Tabla 48

Valores del FS para cada sección del talud por el MEL para falla circular.

Talud	Sin nivel freático		Con nivel freático		Condición
	FS (Estático)	FS (Pseudo estático)	FS (Estático)	FS (Pseudo estático)	
1	2.340	1.944	2.211	1.804	Estable
2	1.533	1.255	1.523	1.248	Inestable
3	2.613	2.125	2.096	1.663	Estable
4	2.386	1.940	1.888	1.535	Estable
5	1.667	1.343	1.390	1.109	Inestable
6	1.787	1.423	1.496	1.169	Inestable
7	1.979	1.565	1.551	1.210	Inestable
8	2.274	1.793	1.871	1.457	Inestable
9	5.953	4.692	4.777	3.864	Estable
10	7.568	5.952	6.495	5.068	Estable

Nota: Elaboración propia

Del estudio de sostenibilidad para la falla circular por el MEL se obtuvo valores del FS menores a 1.5 en los taludes 2, 5, 6, 7 y 8, resultando factores entre el rango de 1.0 y 1.5 para condiciones de saturación al 75% y coeficiente de carga sísmica horizontal 0.12. De igual manera los factores de seguridad para los taludes 2, 5 y 6 son menores a 1.5 para la condición de talud seca y pseudoestática con coeficiente de carga sísmica horizontal de 0.12.

4.5.4. Análisis de estabilidad mediante método numérico

4.5.4.1. Método de elementos finitos (MEF)

Para el estudio de sostenibilidad por el MEF se utilizaron los datos entrada de la tabla 38 con la herramienta Phase2 y para el análisis pseudoestático se utilizó el valor de coeficiente de carga sísmica horizontal de 0.12 para la zona 3 donde se ubica el proyecto, las superficies de falla y factores de seguridad se encuentran en el ANEXO G.

Tabla 49

Valores del FS para cada sección del talud por el MEF para falla circular.

Talud	Sin nivel freático		Con nivel freático		Condición
	FS (Estático)	FS (Pseudo estático)	FS (Estático)	FS (Pseudo estático)	
1	2.40	2.00	2.54	2.02	Estable
2	1.40	0.80	1.40	0.70	Inestable
3	2.75	2.22	2.28	1.87	Estable
4	2.42	1.96	2.07	1.59	Estable
5	1.69	1.37	1.40	1.13	Inestable
6	1.82	1.46	1.49	1.19	Inestable
7	2.03	1.60	1.61	1.25	Inestable
8	2.04	1.81	1.89	1.49	Inestable
9	7.25	5.74	6.43	5.04	Estable
10	7.94	6.29	6.75	5.25	Estable

Nota: Elaboración propia

El estudio por el MEF tuvo valores algo dispersos a los calculados mediante equilibrio limite, teniendo así, FS con valores inferiores a 1.5 en las secciones 2,5,6,7 y 8 para condiciones de saturación al 75% y pseudoestáticas. Así también, para la condición del talud seca y pseudoestática, resultaron valores del FS, inferiores a 1.5 en las secciones 2,5 y 6.

4.5.5. Análisis de estabilidad mediante método probabilístico

Para el análisis de estabilidad probabilístico se usó el método de simulación de Montecarlo en las superficies de falla definidas por el análisis determinístico previamente realizado, las superficies de falla e histogramas de los factores de seguridad se encuentran en el ANEXO I.

Tabla 50

Valores del FS para cada sección del talud por el método probabilístico para falla circular.

Talud	Sin nivel freático				Con nivel freático				Condición
	FS (Estático)		FS (Pseudo estático)		FS (Estático)		FS (Pseudo estático)		
1	2.339	0.000%	1.947	0.000%	2.172	0.000%	1.791	0.000%	Estable
2	1.533	0.000%	1.255	0.000%	1.524	0.000%	1.250	0.000%	Inestable
3	2.700	0.000%	2.111	0.000%	2.159	0.000%	1.714	0.000%	Estable
4	2.375	0.000%	1.931	0.000%	1.863	0.000%	1.482	0.300%	Estable
5	1.654	0.000%	1.336	5.700%	1.296	11.900%	1.029	40.400%	Inestable
6	1.787	0.700%	1.425	7.600%	1.391	8.100%	1.092	31.300%	Inestable
7	1.979	0.000%	1.565	3.700%	1.507	3.400%	1.169	19.000%	Inestable
8	2.275	0.000%	1.788	0.600%	1.877	0.300%	1.461	5.900%	Inestable
9	6.021	0.000%	4.690	0.000%	4.951	0.000%	3.777	0.000%	Estable
10	6.551	0.000%	5.096	0.000%	5.635	0.000%	4.268	0.000%	Estable

Nota: Elaboración propia

En el estudio de sostenibilidad probabilístico resultaron probabilidades de falla mayores a 10% en los taludes 5, 6 y 7, para la condición pseudoestática y de saturación al 75%. De igual manera en el talud 8 se obtuvo probabilidad de falla mayores al 5% para la condición pseudoestática y de saturación al 75%.

4.6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ANALISIS

Del estudio de sostenibilidad por los MEL, MEF y probabilísticos en condiciones seca – estática y seca - pseudoestática se encontró gran similitud en los valores obtenidos, como muestra el siguiente cuadro.

Tabla 51

Cuadro comparativo de los valores obtenidos de cada análisis - seco.

Talud	Métodos De Análisis - Seco					
	Equilibrio Limite		Elementos Finitos		Probabilísticos	
	Estático	Pseudoest.	Estático	Pseudoest.	Estático	Pseudoest.
1	2.340	1.944	2.339	1.947	2.339	1.947
2	1.533	1.255	1.400	0.800	1.533	1.255
3	2.613	2.125	2.700	2.111	2.700	2.111
4	2.386	1.940	2.375	1.931	2.375	1.931
5	1.667	1.343	1.654	1.336	1.654	1.336
6	1.787	1.423	1.787	1.425	1.787	1.425
7	1.979	1.565	1.979	1.565	1.979	1.565
8	2.274	1.793	2.275	1.788	2.275	1.788
9	5.953	4.692	6.021	4.690	6.021	4.690
10	7.568	5.952	6.551	5.096	6.551	5.096

Nota: Elaboración propia

Del estudio de sostenibilidad por los MEL, MEF y probabilísticos en condiciones saturada – estática y saturada - pseudoestática se encontró gran similitud en los valores obtenidos, como muestra el siguiente cuadro.

Tabla 52

Cuadro comparativo de los valores obtenidos de cada análisis - saturado.

Talud	Métodos De Análisis - Saturada					
	Equilibrio Limite		Elementos Finitos		Probabilísticos	
	Estático	Pseudoest.	Estático	Pseudoest.	Estático	Pseudoest.
1	2.211	1.804	2.54	2.02	2.172	1.791
2	1.523	1.248	1.40	0.70	1.524	1.250
3	2.096	1.663	2.28	1.87	2.159	1.714
4	1.888	1.535	2.07	1.59	1.863	1.482
5	1.390	1.109	1.40	1.13	1.296	1.029
6	1.496	1.169	1.49	1.19	1.391	1.092
7	1.551	1.210	1.61	1.25	1.507	1.169
8	1.871	1.457	1.89	1.49	1.877	1.461
9	4.777	3.864	6.43	5.04	4.951	3.777
10	6.495	5.068	6.75	5.25	5.635	4.268



4.7. PROPUESTA DEL SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN

En capítulos anteriores se mencionan diferentes métodos de estabilización de taludes entre ellos están la variación de la geometría del talud, implementación de elementos de contención, implementación de refuerzos y obras de drenaje. En este caso en particular se utilizarán todos los métodos mencionados aplicando cada uno de ellos sujeto a las condiciones de cada talud previamente analizados.

4.7.1. Modificación de la geometría

En el marco teórico se describe este método de estabilización, mencionando soluciones a la inestabilidad como reducir peso en la cabecera e incrementar el peso en el pie del talud, realizar bancos o reducir la pendiente.

Los taludes críticos, mencionados y descritos anteriormente en el análisis, tienen pendientes muy pronunciadas y en su superficie la roca está tan meteorizada que imposibilita el acceso de maquinaria para poder reducir la pendiente o perfilar bancos

Sin embargo, en la cabecera del talud existe un acceso para el ingreso de maquinaria, resultando viable la propuesta de descabezar el talud para restar carga a la superficie de falla en las secciones 5,6 y 7.

En el caso de la sección 2 se perfilará 4 bancos en el talud ya que es una sección de poca altura con respecto a las demás secciones y es accesible para equipos de maquinaria.

4.7.2. Construcción de elementos de contención

La construcción de estos aminorará la carga generada por el empuje del talud, en el caso de este macizo se requiere restar peso en la cabeza del talud e incorporar material en la base para minorar los esfuerzos de falla. Por lo que se plantea la construcción de gaviones en la base de los taludes 5,6,7 y 8 apoyando la contención del material que será adicionado para conservar la estabilidad.

4.7.3. Sistema de drenaje

En el estudio de sostenibilidad una de las condicionales que acrecentó la probabilidad de falla en todos los taludes fue la saturación del macizo rocoso, por lo que para la propuesta de estabilización se realizó un mapa de pendientes (ANEXO I) del cual se obtuvo la información para diseñar y distribuir la red de drenaje superficial en el macizo rocoso.

4.7.4. Análisis de estabilidad para el sistema de estabilización.

El siguiente cuadro muestra los valores del FS y probabilidades resultantes del análisis probabilístico en las secciones que presentaban inestabilidad, teniendo como resultados factores mayores a 1.4 y probabilidades de falla menores a 10%.

Tabla 53

Análisis de estabilidad para el sistema de estabilización

Talud	Equilibrio Limite - Probabilístico								Elementos Finitos				H
	Seco				Saturado				Seco		Saturado		
	Estático	Prob.	Pseudo estático	Prob.	Estático	Prob.	Pseudo estático	Prob.	Estático	Prob.	Pseudo estático	Prob.	
2	2.280	0.00%	1.851	0.00%	2.214	0.00%	1.804	0.00%	2.29	1.82	2.00	1.69	31
5	1.816	0.50%	1.467	6.00%	1.773	0.90%	1.418	8.20%	1.83	1.47	1.82	1.46	88
6	1.920	0.30%	1.526	4.80%	1.841	0.60%	1.459	6.50%	1.94	1.54	1.94	1.54	88
7	2.173	0.00%	1.703	1.40%	2.028	0.00%	1.578	3.50%	2.28	1.79	2.16	1.67	75
8	2.393	0.00%	1.892	0.30%	2.254	0.00%	1.750	0.90%	2.42	1.89	2.42	1.89	58

Nota: Elaboración propia



4.8. VALIDACIÓN DE HIPOTESIS

4.8.1. HIPÓTESIS GENERAL

Los valores del Factor de Seguridad resueltos por los MEL, MEF y Métodos probabilísticos oscilan entre los valores de 0.7 a 1.5.

Hipótesis Nula.

$$H_0: u_1 \neq u_2$$

Los valores del Factor de Seguridad resueltos por los MEL, MEF y métodos probabilísticos oscilan entre los valores de 0.7 a 1.5.

Hipótesis Alternativa

$$H_1: u_1 = u_2$$

Los valores del Factor de Seguridad resueltos por los MEL, MEF, probabilísticos oscilan entre los valores de 0.7 a 1.5.

Nivel de significancia

Para el proyecto de investigación se tomó un riesgo de $\alpha = 5\% = 0.05$ (o un nivel de confianza de 95%) y de acuerdo a la tabla de la distribución T-STUDEN, utilizamos $\alpha/2$, para dejar el mismo espacio correspondiente a la región de rechazo de ambas colas, y se obtiene mediante la fórmula:

$$t\left(\frac{\alpha}{2}, n - 1\right) = t\left(\frac{0.05}{2}, 4 - 2\right) = t(0.025, 2)$$

$$t = +4.30 \text{ y } t = -4.30$$

Regla de Decisión

Por lo que se plantea:

Rechazar $H_1 : u_1 = u_2$

No se rechaza $H_0 : u_1 \neq u_2$

Calculo estadístico de Prueba T-STUDENT con n_1+n_2-2 grados de libertad.

Mediante la siguiente fórmula se calcula el t_p :

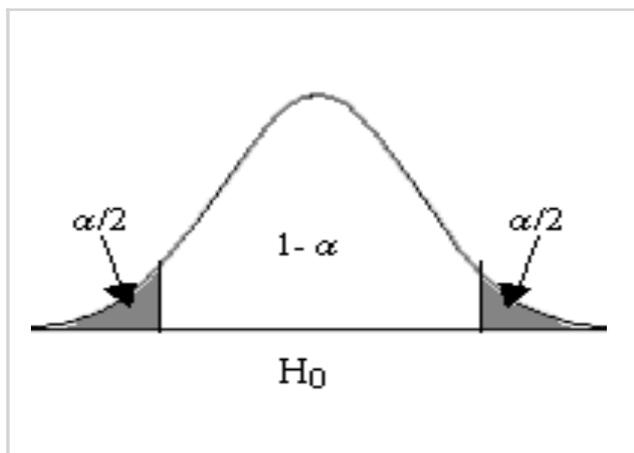
$$t_p = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2}{n}}}$$

Remplazando los datos:

$$t_p = 1.12$$

Figura 69

Prueba de hipótesis general.



Conclusión

Puesto que: $t_p = 1.12$ y se encuentra en la zona de aceptación, por lo tanto, descartamos H_1 y aceptamos la Hipótesis Nula H_0 , ya que:

$$-4.782 < 1.12 < 4.782$$

Se concluye que los valores del Factor de Seguridad resueltos por los MEL, MEF si influyen directamente en los Métodos probabilísticos oscilan entre los valores de 0.7 a 1.5.

4.8.2. HIPÓTESIS ESPECIFICA

El método de estabilización que se adapta al macizo rocoso es la construcción de bancos o la implementación de geomallas.

Nivel de significancia

Hipótesis Nula

$$H_0 : u_1 \neq u_2$$

El método de estabilización que No se adapta al macizo rocoso es la construcción de bancos.

Hipótesis específica

$$H_1 : u_1 = u_2$$

El método de estabilización que Si se adapta al macizo rocoso es la construcción de bancos o la implementación de geomallas.

Para el proyecto de investigación se tomó un riesgo de $\alpha = 5\% = 0.05$ (o un nivel de confianza de 95%) y de acuerdo a la tabla de la distribución T-STUDEN, utilizamos $\alpha/2$, para dejar el mismo espacio correspondiente a la región de rechazo de ambas colas, y se obtiene mediante la fórmula:

$$t \left(\frac{\alpha}{2}, n - 1 \right) = t \left(\frac{0.05}{2}, 5 - 2 \right) = t (0.025, 3)$$

$$t = +3.18 \text{ y } t = -3.18$$

Regla de Decisión

Por lo que se plantea:

Rechazar $H_1 : u_1 = u_2$

No se rechaza $H_0 : u_1 \neq u_2$

Calculo estadístico de Prueba T-STUDENT con n_1+n_2-2 grados de libertad.

Mediante la siguiente fórmula se calcula el t_p :

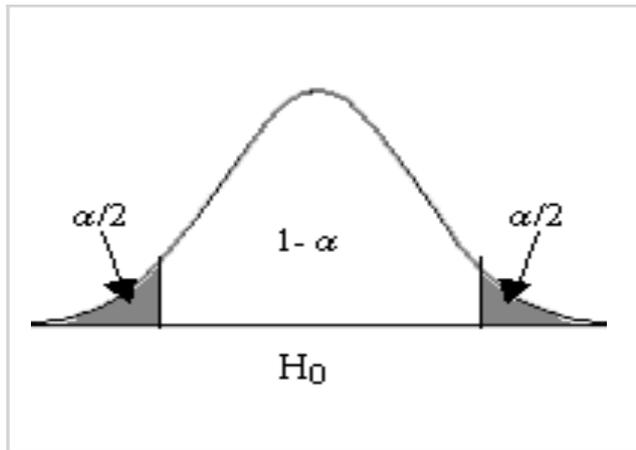
$$t_p = \frac{u_1 - u_2}{\sqrt{\frac{\delta_1^2 + \delta_2^2}{n}}}$$

Remplazando los datos:

$$t\rho = 6.07$$

Figura 70

Prueba de hipótesis específica



Conclusión

Puesto que: $t\rho = 6.07$ y se encuentra en la zona de rechazo, por lo tanto, descartamos H_0 y aceptamos la Hipótesis alterna H_1 , ya que:

$$6.07 > 3.17$$

Se concluye que el método de estabilización que si se adapta al macizo rocoso es la construcción de bancos.



V.CONCLUSIONES

- Los valores de estabilidad del talud analizado mediante el MEL resulto en taludes inestables según el FS menor a 1.5, en las secciones 2, 5, 6, 7 y 8 para condiciones de análisis saturado – pseudoestatico, considerando una saturación del 75% y carga sísmica horizontal de 0.12. En el caso del análisis por MEF los valores del FS fueron muy similares a los presentados por el análisis de MEL. En los resultados del análisis probabilístico se obtuvieron los mismos valores del análisis por MEL, en este apartado se le dio más importancia a la probabilidad de ocurrencia que al FS, teniendo así, como taludes inestables, las secciones del talud 5, 6 y 7.
- De acuerdo al análisis previamente presentado, se planteó como una de las soluciones a su estabilidad la modificación de su geometría, realizando un descabezamiento del talud de 10 metros y un incremento de material en el pise del talud, además, la construcción de cunetas de coronación que ayudaran a mantener un nivel freático bajo, el análisis de estabilidad, implementando estas acciones, refleja valores mayores a 1.5 en las condiciones más conservadoras.



VI. RECOMENDACIONES

- Para complementar el análisis de estabilidad se recomienda realizar un estudio hidrogeológico o un análisis probabilístico que considere como variables a los valores de saturación en el macizo y tener un mejor panorama de su influencia en la estabilidad de cada sección.
- Se sugiere evitar la construcción de viviendas sobre la cabecera del talud puesto que la carga de la construcción podría afectar la estabilidad.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTMD2983. (s.f.). *METODO DE ENSAYO ESTANDAR PARA LA RESISTENCIA DE COMPRESION NO CONFINADA.*

Ayala, C., & Andreu, F. (1986). *MANUAL DE TALUDES.*

Barton , N., & Choubey, V. (1977). *The shear strength of rock joints in theory and practice.* Rock Mechanics.

doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/BF01261801>

Barton, Lien, & Lunde. (1974). *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support* (Vol. 6). Canada: Rock Mechanics.

Barton, N. (2004). *Pre-grouting effect for tunnels in rock.* Madrid: Jornada Técnica: Tratamientos de túneles en roca.

Bielza Feliú, A. (1999). *Manual de técnicas de tratamiento del terreno.* Madrid: Ed. Carlos López .

Bieniawski. (2003). *Comunicación durante el coloquio. New tendencies in rock mass characterization. Jornada técnica sobre “Aspectos relevantes en la caracterización del terreno”.* Madrid.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications.* New York: Pennsylvania State University.

Brown, E. (1981). *Rock Characterization, Testing And Monitoring.* ISRM.

Calavera , R. (2001). *Muros de contención y muros de sótano.* Madrid: INTEMAC.



- Call, R. D. (1999). *Monitoring Pit Slope Behavior - Sme Mine Engineering Handbook*.
New York: AIME.
- Callot, P., Victor, C., & Francis, O. (2006). *PROGRE*. Peru.
- Chaulya, S. K., & Prasad, G. M. (2016). *Sensing and Monitoring Technologies for Mines and Hazardous Areas TS*. Citavi: RIS M4.
- Coates, D. F. (1973). *Fundamentos de Mecánica de Rocas*. Madrid: Blume.
- Deere, D. U., & Miller, R. P. (1968). "Engineering properties of rocks", *Cap I de "Rock Mech in Eng. Práctica"*. New York: Stagg Zienkiewicz, Jhon Wiley, Sons.
- Delgado, M. J. (2015). *Mecánica de Rocas*. Universidade Da Coruña.
- E, H., & E, H. (2008). *PRACTICAL ROCK ENGINEERING*.
- E, H., & M. S., D. (2006). *Empirical estimation of rock mass modulus* (Vol. 43).
International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>
- España, I. G. (2006). *Manual de Ingeniería Taludes 2da Reimpresión*. España: IGME.
- Gonzales De Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Education.
- Gundewar, C. S. (2014). *Application of Rock Mechanics in Surface and Underground Mining*. Indian: Indian Bureau of Mines.
- Gundewar, G. S. (2014). *Application Of Rock Mechanics In Surface And Underground Mining*. Magpur: Indian Bureau of Mines.
- Harr, M. (1987). *Reliability-Based Design In Civil Engineering*. New York: McGraw-Hill.



- Hoek & Karzulovic. (2000). *Rock Mass Properties For Surface Mines - Slope Stability in Surface Mining*.
- Hoek, & Brown et al. (1980). *Empirical strength criterion*. *Journal of Geotechnical Engineering Div. ASCE*.
- Hoek, E., & Brown et al. (1980). *Empirical strength criterion*. *Journal of Geotechnical Engineering Div.*
- Hoek, E., & Diederichs, M. (2006). *Empirical estimation of rock mass modulus*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>
- Hoek, E., Carranza, C., & Corkum, B. (2002). *Rocscience*.
- Hudson, J. A. (1989). *Rock Mechanics Principles in Engineering Practice*. Londres: CIRIA.
- INGEMMET. (2020). *EVALACION DE PELIGROS GEOLOGICOS Y GEOHIDROLÓGICOS EN LOS SECTORES DE MALVADO Y MANDAHUAZ*.
- Instituto Geologico Minero de España. (2006). *Manual de Ingenieria Taludes 2da Reimpresión*. Madrid: IGME.
- ISMR. (1977). *The description of rock masses for engineering purposes: Report by the Geological Societu Engineering Group working Party*. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* .
- ISRM. (2015). *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. In *The ISRM Suggested Methods for Rock*



Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. . doi:
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-07713-0>

Jimenez Salas, J. A., & et al. (1975). *Geotecnia y Cimentaciones*. Madrid: Rueda.

Jorda, L., Tomas, R., Arlandi, R., & Abellan, A. (2016). *MANUAL DE ESTACIONES GEOMECHANICAS*.

Karzulovik, A. (2006). *Fundamentals of Geomechanics (in Spanish), lecture notes*.
Universidad de los Andes.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.

Marinos, P., & Hoek, E. (2000). *A geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. Technomic Publishing Co.

Mohammadi, M., & HOSSAINI, M. (2017). *Modification or fock mass rating system: Interbedding of strong and weak rock layers*. (Vol. 9). Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.06.002>

P, C., C, V., O, F., & S, T. (2006). *PROGRESOS EN EL ESTUDIO DE LA FORMACION AYABACAS*. XIII Congreso Peruano de Geologia.

Palmstrom, A. (1982). *The Volumetric Joint Count - A Useful Measure Of The Degree Of Rock Mass Jointing*. New Delhi: Proc. 4th Congress Int. Association of Engineering Geology.

Pande , G. N., Beer, G., & Wiilliams, J. R. (1990). *"Numerical Methods in Rock Mechanics"*. New York: John Wiley & Sons, Ltd. .

Park, H. J., Lee, J. H., Kim, K. M., & Um, J. G. (2016). *Assessment of rock slope stability using GIS-based probabilistic kinematic analysis*. . Engineering Geology.



- Prest, S., & Hudson, J. (1976). *Discontinuity Spacings in Rock*. Int. J. Mech. Min.
- Priest, S. D. (1985). *Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics*(Unwin Hyma). London.
- Ramirez, P., & Alejano, L. (2004). *Mecanica de Rocas - Fundamentos e Ingenieria de Taludes*. Journal of Chemical Information and Modeling .
doi:<https://www.researchgate.net/>
- Ramirez, P., De la cuadra Irizar, L., Lain Huerta, R., & Grijalbo Obeso, E. (1970). *Mecánica de rocas aplicada a la mineria subterranea*.
- Read, J., & Stacey, P. (2017). *Open pit slope desing*. In Rock Mechanics and Engineering Volume 3: Analysis, Modeling and Desing. doi:<https://doi.org/10.1201/b20402>
- Read, J., & Stancey, P. (2009). *Guidelines For Open Pit Slope Design - Ira*. Australia: CSIRO Publishing.
- RNE. (2018). *Norma E 020 Suelos y Taludes*. Perú.
- Rodriguez Mejia, R., Sanchez Chimpay, E., Choquehuanca Condori, S., Fabián Quispe, C., & Del Castillo Herrera , B. (2015). *Revision estratigráfica del Grupo Puno (Eoceno) en el limite del Altiplano y la Cordillera Occidental (Acora-Puno), y división de cuencas sedimentarias*. Instituto Geológico, Minero y Metalurgico-INGEMMET.
- Rodriguez, R., Sanchez, E., Choquehuanca, S., Fabian, C., & Castillo, B. (2020). *Geologia de los cuadrángulos de Puno (hojas 32v1, 32v2, 32v3, 32v4,) y acora (hojas 32x1, 32x2, 32x3 y 32x4)INGEMMET, Boletin. Serie L: Actualización Carta Geológica Nacional(Escala 1:50000). 2, 109 p., 8 mapas*.



- Romana , M., Tomás , R., & Serón , J. (2015). *Slope Mass Rating (SMR) geomechanics classification: Thirty years review*. 12th ISRM International Congress of Rock Mechanics, 2015-MAY(November), 1-10.
- Romana, M. (1985). *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. Mexico (pp. 49 - 53): In Proceedings of the international symposium on role of rock mechanics, Zacatecas.
- Sepúlveda. (2011). *Comportamiento sísmico de taludes de roca. Aplicación del Método de Newmark*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Suarez, L. (2014). *DESCRIPCIÓN DEL MACIZO ROCOSO*.
- Uriel, S. (1991). *Corrección de taludes en roca. Curso sobre Estabilidad de Taludes*. Madrid: CEDEX.
- Vardon, P. J., Wang, B., & Hicks, M. A. (2017). *Slope failure simulations with MPM*. Journal of Hydrodynamics. doi:[https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(16\)60755-2](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60755-2)
- Vargas, J. M., & Olgun, C. G. (2015). *Seismic Pseudo-Static Slope Stability Analysis: A Critical Review*. Computers and Geotechnics.
- Wyllie, D., & Mah, C. (2005). *Rock Slope Engineering Civil and Mining*. Canada.
- Zienkiewicz, O. C. (1968). *"The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics"*. London: McGraw-Hill Pub.



ANEXOS

ANEXO A: Mapeo por ventanas para RMR

ANEXO B: Ensayo de compresión uniaxial

ANEXO C: Ensayo de tilt test

ANEXO D: Criterio de resistencia del macizo rocoso

ANEXO E: Análisis estereográfico

ANEXO F: Modelo de estabilidad por método de equilibrio límite

ANEXO G: Modelo de estabilidad por método de elementos finitos

ANEXO H: Modelo de estabilidad por método probabilístico

ANEXO I: Plano de pendientes y propuesta de estabilización

ANEXO J: Plano geomecánico

ANEXO K: Plano topográfico

ANEXO L: Plano geológico

ANEXO M: Panel fotográfico



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo MARCELO JOSE CUENTAS MERCADO,
Identificado con DNI 71441853 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERIA CIVIL

Informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN EL MACIZO ROCOSO
QUELLORCO MEDIANTE EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS, EQUILIBRIO
LIMITE, PROBABILÍSTICO Y PROPUESTA DE ESTABILIZACIÓN-PORRO 2023"

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 29 de enero del 2024

FIRMA



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo MARCELO JOSE CUENTAS MERCADO,
Identificado con DNI 71441853 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERIA CIVIL

Informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

"ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN EL MARIZO ROSO
QUELLARCO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, EQUILIBRIO
LÍMITE, PROBABILÍSTICO Y PROPUESTA DE ESTABILIZACIÓN - PUNO, 2023"

Para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y convexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 29 de enero del 2024



FIRMA



Huella