

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**“CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO Y SU
APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE SOSTENIMIENTO EN LABORES DE
DESARROLLO DE LA UNIDAD ECONÓMICA ADMINISTRATIVA
ANA MARÍA – LA RINCONADA”**

TESIS

PRESENTADA POR:

WILBERTH CHURA LOPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PROMOCIÓN 2006

PUNO - PERÚ

2016

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
TESIS

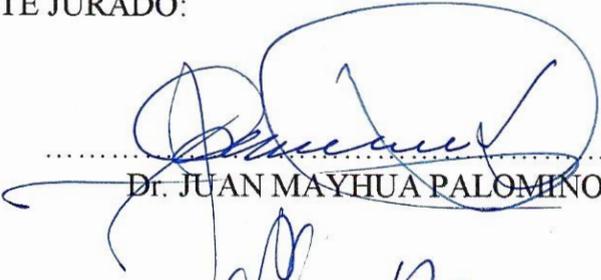
“CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO Y SU
APLICACIÓN EN EL DISEÑO DE SOSTENIMIENTO EN LABORES DE
DESARROLLO DE LA UNIDAD ECONÓMICA ADMINISTRATIVA
ANA MARÍA – LA RINCONADA”

PRESENTADA POR:
WILBERTH CHURA LOPE

A la Dirección de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de Minas de
la Universidad Nacional del Altiplano como requisito.

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO DE MINAS

APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO:

PRESIDENTE :

Dr. JUAN MAYHUA PALOMINO

PRIMER MIEMBRO :

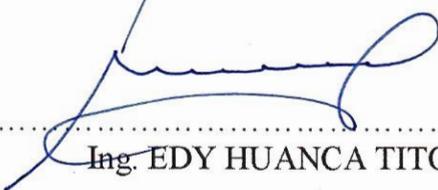
Ing. LUCIO RAÚL MAMANI BARRAZA

SEGUNDO MIEMBRO :

Ing. LUCIO QUEA GUTIÉRREZ

DIRECTOR DE TESIS :

M.Sc. Ing. MARIO CUENTAS ALVARADO

ASESOR DE TESIS :

Ing. EDY HUANCA TITO

ÁREA: Ingeniería de minas.

TEMA: Mecánica de rocas, geomecánica y geotécnica.

DEDICATORIA

La presente tesis, está dedicada con mucho cariño a mis padres Simón y Martina (Q.E.P.D.), por su incondicional apoyo que me brindaron durante el tiempo que estuve en las aulas universitarias.

Asimismo dedico a mis hermanos Fiorella y Jaime, por sus palabras de aliento permanente que me motivaron para plasmar el presente trabajo de investigación.

Dedico también la presente tesis a mi familia, mi esposa Rebeca y mis hijos Bel (Q.E.P.D.), Yoaho y Emi, quienes son la luz de mis días, la fuerza para superarme cada día, y el empuje necesario para seguir encaminándome al éxito en la actividad minera.

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradezco infinitamente a Dios, quien me protegió, me iluminó y me dio las fuerzas para superar todas las dificultades que se me presentaron, permitiéndome alcanzar una de las metas en mi vida.

Asimismo a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, por sus consejos y sabias enseñanzas que me impartieron dentro de las aulas Universitarias.

A la Empresa Especializada JB, por permitirme desarrollar el trabajo de investigación dentro de sus operaciones mineras, que me sirvieron en mi formación profesional y los retos que indirectamente me propusieron.

A mis amigos Aniceto, Edy, Marco, que como en una organización trabajamos en equipo para poder apoyarnos en todo momento y por los consejos que me dieron y las experiencias compartidas.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	16
ABSTRACT.....	17
INTRODUCCIÓN	18

CAPÍTULO I**PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

1.1	Descripción del problema	19
1.2	Formulación del problema	20
1.2.1	Interrogante general	20
1.2.2	Interrogantes específicas	20
1.3	Objetivos de la investigación	20
1.3.1	Objetivo general.....	20
1.3.2	Objetivos específicos	21
1.4	Justificación del problema	21
1.5	Limitaciones del estudio	22
1.6	Viabilidad del estudio	22

CAPÍTULO II**MARCO TEÓRICO**

2.1	Antecedentes de la investigación	23
2.2	Bases teóricas.....	27
2.2.1	Geología regional.....	27
2.2.1.1	Estratigrafía regional.....	28
2.2.1.2	Geología local	29
2.2.2	Propiedades físico-mecánico del macizo rocoso	33
2.2.2.1.	Porosidad.....	33
2.2.2.2.	Contenido de agua.....	34

2.2.2.3.	Peso volumétrico.....	34
2.2.2.4.	Alteración.....	35
2.2.2.5.	Alterabilidad	35
2.2.2.6.	Sensitividad.....	36
2.2.2.7.	Mineralogía.....	37
2.2.2.8.	Densidad	37
2.2.2.9	Deformación	38
2.2.2.10	Resistencia	38
2.2.2.10.1	Compresión uniaxial.	39
2.2.2.11	Permeabilidad o conductividad hidráulica.....	41
2.2.3	Caracterización del macizo rocoso	43
2.2.3.1	Orientación.....	43
2.2.3.2	Espaciamiento	44
2.2.3.3	Continuidad o persistencia.....	45
2.2.3.4	Rugosidad	46
2.2.3.5	Resistencia de las paredes.....	47
2.2.3.6	Abertura	48
2.2.3.7	Relleno	49
2.2.3.8	Filtraciones.....	51
2.2.3.9	Número y orientación de familias de discontinuidades	53
2.2.3.10	Tamaño de bloques y grado de fracturación	54
2.2.3.11	Grado de meteorización	54
2.2.4	Hidrología	55
2.2.4.1	Agua subterránea.....	55
2.2.4.2	Acuíferos.....	56
2.2.4.3	Alimentación y descarga.....	57
2.2.4.4	Flujo del agua subterránea	57
2.2.5	Clasificaciones geomecánicas.....	58
2.2.5.1	Designación de la calidad de rocas (RQD)	58

2.2.5.2	Valoración del macizo rocoso (RMR)	60
2.2.5.3	Índice (Q)	63
2.2.5.4	Índice de resistencia geológico (GSI)	65
2.2.6	Diseño de sostenimiento	68
2.2.6.1	Parámetro geomecánico	68
2.2.6.2	Parámetro operativo	69
2.2.6.3	Elementos de sostenimiento.....	70
2.2.6.3.1	Sostenimiento por refuerzo.....	71
2.2.6.3.2	Sostenimiento por soporte.....	71
2.3	Marco conceptual.....	72
2.3.1	Macizo rocoso	72
2.3.2	Caracterización.....	72
2.3.3	Discontinuidades.....	72
2.3.4	Sostenimiento.....	72
2.3.5	Clasificaciones geomecánicas.....	73
2.3.6	Dominios geotécnicos.....	73
2.3.7	Labores de desarrollo.....	73
2.4	Formulación de hipótesis	73
2.4.1	Hipótesis general.....	73
2.4.2	Hipótesis específicos.....	74

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1	Tipo y diseño de investigación	75
3.2	Población y muestra	75
3.2.1	Población.....	75
3.2.2	Muestra	75
3.3	Operacionalización de variables	76
3.3.1	Variables	76

3.3.2	Operación de variables.....	76
3.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	76
3.5	Ámbito de estudio	77
3.5.1	Ubicación y acceso.....	77

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1	Propiedades físico – mecánico del macizo rocoso.....	79
4.1.1	Porosidad.....	79
4.1.2	Contenido de agua.....	80
4.1.3	Densidad	81
4.1.4	Deformación	82
4.1.5	Resistencia	84
4.2	Caracterización del macizo rocoso	85
4.2.1	Caracterización geomecánica por estaciones	85
4.3	Clasificación geomecánica.....	94
4.3.1	Designación de la calidad de rocas (RQD)	94
4.3.2	Valoración del macizo rocoso (RMR)	97
4.3.3	Índice (Q).....	106
4.3.4	Índice de resistencia geológico (GSI)	110
4.4	Modelamiento estructural del macizo rocoso	112
4.5	Diseño de sostenimiento	115
4.5.1	Parámetro geomecánico	115
4.5.1.1	Calidad geomecánica de la zona inestable.....	115
4.5.1.2	Niveles de esfuerzos presentes en la zona de trabajo.....	118
4.5.1.3	Parámetros mecánicos del macizo rocoso.....	121
4.5.1.4	Análisis de factores de seguridad.....	122
4.5.2	Parámetro operativo	125
4.5.2.1	Tiempo de exposición del proyecto	125

4.5.2.2	Capacidad del proyecto	127
4.5.2.3	Dimensionamiento	127
4.5.2.4	Control de calidad de elementos de soporte	128
4.5.2.5	Evaluación costo beneficio	130
4.5.3	Elementos de sostenimiento.....	131
4.5.3.1	Sostenimiento por refuerzo	131
4.5.3.2	Diseño del sostenimiento por refuerzo.....	136
4.6	Discusión.....	143
4.7	Contrastación	152
CONCLUSIONES		154
RECOMENDACIONES.....		155
BIBLIOGRAFÍA		156
ANEXOS		160

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
1.	Determinación del peso volumétrico	35
2.	Tipos de flujo para obtener la sensibilidad de una muestra de roca	37
3.	Curvas de deformación	38
4.	Compresión uniaxial o simple.....	40
5.	Tipos de esfuerzos.....	41
6.	Pruebas de permeabilidad	42
7.	Orientación de discontinuidades	44
8.	Espaciado de discontinuidades.....	45
9.	Discontinuidades simples rellenadas	50
10.	Representación del número de familias mediante diagramas de bloques	54
11.	RQD	59
12.	Clasificación de pernos de sostenimiento por refuerzo	70
13.	Curva de deformación para roca pizarra y cuarcita tipo “C”	82
14.	Curva de deformación para roca pizarra en software Rocdata	83
15.	Curva de deformación para roca cuarcita en software Rocdata.....	83
17.	Calidad estructural del macizo rocoso en la estación N° 2.....	113
18.	Calidad estructural del macizo rocoso en la estación N° 3.....	113
19.	Calidad estructural del macizo rocoso en la estación N° 4.....	114
20.	Calidad estructural del macizo rocoso en la estación N° 5.....	114
21.	Calidad estructural del macizo rocoso en la estación N° 6.....	115
22.	Niveles de esfuerzo presentes en la estación N° 1	118
23.	Niveles de esfuerzo presentes en la estación N° 2	119
24.	Niveles de esfuerzo presentes en la estación N° 3	119
25.	Niveles de esfuerzo presentes en la estación N° 4	120
26.	Niveles de esfuerzo presentes en la estación N° 5	120
27.	Niveles de esfuerzo presentes en la estación N° 6	121
28.	Factores de seguridad presentes en la estación N° 1.....	122

29.	Factores de seguridad presentes en la estación N° 2.....	123
30.	Factores de seguridad presentes en la estación N° 3.....	123
31.	Factores de seguridad presentes en la estación N° 4.....	124
32.	Factores de seguridad presentes en la estación N° 5.....	124
33.	Factores de seguridad presentes en la estación N° 6.....	125
34.	Proyecto de preparación y desarrollo JB - I.....	126
35.	Proyecto de preparación y desarrollo JB - II.....	126
36.	Dimensionamiento transversal del proyecto de desarrollo JB	128
37.	Ensayo de pruebas de arranque	130
38.	Curva de desplazamiento vs tonelaje del perno helicoidal 19 mm de 6 p	133
39.	Diseño del sostenimiento en la estación N° 1	136
40.	Diseño del sostenimiento en la estación N° 2	137
41.	Diseño del sostenimiento en la estación N° 3	138
42.	Diseño del sostenimiento en la estación N° 4	139
43.	Diseño del sostenimiento en la estación N° 5	140
45.	Diseño del sostenimiento por el efecto cuña.....	142
46.	Dominio geotécnico de la estación N° 1	146
47.	Dominio geotécnico de la estación N° 2.....	147
48.	Dominio geotécnico de la estación N° 3.....	148
49.	Dominio geotécnico de la estación N° 4.....	149
50.	Dominio geotécnico de la estación N° 5.....	150
51.	Dominio geotécnico de la estación N° 6.....	151

ÍNDICE DE CUADROS

		Pág.
1.	Columna lito estratificada	32
2.	Uso de la roca de acuerdo con su alterabilidad	36
3.	Clasificación de las rocas de acuerdo con su resistencia a la compresión	40
4.	Descripción de la continuidad o persistencia	46
5.	Perfiles típicos de rugosidad	47
6.	Descripción de las aberturas	49
7.	Descripción de las filtraciones en discontinuidades	52
8.	Clasificación de macizos rocosos por el número de familias de discontinuidades	53
9.	Grado de meteorización del macizo rocoso	55
10.	Relación entre el valor del r_{qd} y la calidad de la roca	60
11.	Diferencia de valores entre RMR_{76} y RMR_{89}	62
12.	Parámetros y rango de valores para la clasificación geomecánica RMR_{89}	63
13.	Valor ESR con la categoría de la excavación	65
14.	Estimación del GSI basado en observaciones geológicas	68
15.	Operacionalización de variables	76
16.	Relación de densidad y porosidad	80
17.	Contenido de agua roca pizarra	80
18.	Contenido de agua roca cuarcita	81
19.	Densidad de la roca pizarra	81
20.	Densidad de la roca cuarcita	82
21.	Ensayo de resistencia a la compresión simple de la roca pizarra	84
22.	Ensayo de resistencia a la compresión simple de la roca cuarcita	85
23.	Clasificación de las rocas de acuerdo con su resistencia a la compresión	85
24.	Estación N° 1 de toma de datos en la ficha geomecánica	86
25.	Estación N° 2 de toma de datos en la ficha geomecánica	87
26.	Estación N° 3 de toma de datos en la ficha geomecánica	88
27.	Estación N° 4 de toma de datos en la ficha geomecánica	90

28.	Estación N° 5 de toma de datos en la ficha geomecánica.....	91
29.	Estación N° 6 de toma de datos en la ficha geomecánica.....	92
30.	RQD estación N° 1.....	95
31.	RQD estación N° 2.....	95
32.	RQD estación N° 3.....	95
33.	RQD estación N° 4.....	96
34.	RQD estación N° 5.....	96
35.	RQD estación N° 6.....	96
36.	RMR ₈₉ estación N° 1.....	98
37.	RMR ₈₉ estación N° 2.....	99
38.	RMR ₈₉ estación N° 3.....	101
39.	RMR ₈₉ estación N° 4.....	102
40.	RMR ₈₉ estación N° 5.....	103
41.	RMR ₈₉ estación N° 6.....	104
42.	Q estación N° 1	107
43.	Q estación N° 2	107
44.	Q estación N° 3	108
45.	Q estación N° 4	108
46.	Q estación N° 5	109
47.	Q estación N° 6	109
48.	GSI estación N° 1.....	111
49.	GSI estación N° 2.....	111
50.	GSI estación N° 3.....	111
51.	GSI estación N° 4.....	111
52.	GSI estación N° 5.....	112
53.	GSI estación N° 6.....	112
54.	Calidad geomecánica estación N° 1	116
55.	Calidad geomecánica estación N° 2.....	116
56.	Calidad geomecánica estación N° 3.....	116

57.	Calidad geomecánica estación N° 4.....	117
58.	Calidad geomecánica estación N° 5.....	117
59.	Calidad geomecánica estación N° 6.....	117
60.	Parámetros mecánicos - pizarra	121
61.	Parámetros mecánicos - cuarcita.....	122
62.	Propiedades físicas y mecánicas perno helicoidal	132
63.	Propiedades físicas placa de acero perforada.....	132
64.	Caracterización de la toca pizarra	143
65.	Caracterización de la toca cuarcita.....	144
66.	Sostenimiento por estación	151
67.	Contrastación	153

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Matriz de consistencia.....	161
2. Formato de registro en estaciones.....	162
3. Formato de mapeo geomecánico.....	163
4. Formato de registro con esclerómetro.....	164
5. Cuadro ponderación con esclerómetro.....	165
6. Cuadro de auto soporte de galería.....	166
7. Clasificación geomecánica RMR ₈₉	167
8. GSI basado en observaciones geológicas.....	168
9. Perfiles de rugosidad.....	169
10. Contacto de roca pizarra y cuarcita.....	170
11. Toma de muestras en laboratorio de mecánica de rocas.....	171
12. Prueba de muestra a la compresión simple.....	172
13. Resultado de muestras realizadas a la prueba de compresión simple.....	173
14. Toma de datos en campo con martillo Schmidt.....	174
15. Toma de datos en campo con brújula.....	175
16. Instrumentos geomecánicos.....	176
17. Brújula de contraste en la toma de datos.....	177
18. Descripción de rellenos.....	178
19. Espaciado de discontinuidades.....	179
20. Representación del número de familias mediante diagramas de bloques.....	180
21. Mapa de ubicación.....	181
22. Plano del proyecto – Plano representativo de los dominios geotécnicos.....	182

RESUMEN

El presente trabajo de tesis está desarrollado dentro del área de influencia directa de la Empresa JB, en la zona denominada Morro Pelado de la U.E.A., Ana María - La Rinconada. Ubicado en la Cordillera Oriental del Sur del Perú, en el departamento de Puno, provincia San Antonio de Putina, distrito de Ananea. Cuyas coordenadas U.T.M., 451806.40 E, 8383466.98 N, a una altitud de 4,850 metros sobre el nivel del mar.

Así mismo, cabe indicar que dicho estudio ha permitido evaluar el comportamiento físico-mecánico del macizo rocoso circundante al proyecto de la roca pizarra y cuarcita. Consecuentemente obtener directamente la calidad de la roca y su clasificación geomecánica, la cual, será un indicador importante para el diseño y aplicación del sostenimiento a utilizar.

La caracterización geomecánica del proyecto dio como resultado la calidad del macizo rocoso, según RMR₈₉, roca regular (III) a roca buena (II). Y como dominio geotécnico de las propiedades de las discontinuidades dio el tipo de falla por el efecto cuña. Por con siguiente, se aplicará el sostenimiento por refuerzo activo, categoría por adherencia con encapsulantes de resina y cemento, controlando los peligros por desprendimiento de rocas y elevando el factor de seguridad en el proyecto.

Palabras clave: Caracterización geomecánica, sostenimiento, macizo rocoso.

ABSTRACT

This thesis is developed within the area of influence of JB Company, in the area called Morro Pelado from U.E.A. Ana Maria – La Rinconada. Located in the Eastern Cordillera of Southern Peru, Puno department, San Antonio de Putina province, Ananea district, with U.T.M., coordinates 451806.40 E, 8383466.98 N, at an elevation of 4.850 meters above sea level.

Even mores, it should be noted that this study had allowed us to evaluate the physical and mechanical behavior of the rock mass surrounding the project slate and quartzite. And consequently directly obtaining the quality of the rock and the geomechanical classification, which will be an important indicator for designing and implementation the support type to be used.

RMR₈₉ geomechanical characterization of the project resulted in a rock mass quality from, regular rock (III) to good (II). And as a geotechnical domain of the properties of discontinuities gave the type of failure is the wedge effect. Thus it will be applied active reinforcing with cemented and resin cartridges, controlling the hazards caused by rock loosening and increasing the factor of safety of the project.

Keywords: Geomechanical characterization, support, rock mass.

INTRODUCCIÓN

En la Unidad Económica Administrativa Ana María, la descripción y caracterización física y mecánica del macizo rocoso es de gran importancia debido a la gran cantidad de excavaciones realizadas, por tal motivo es necesario realizar una serie de estudios utilizando métodos directos e indirectos y pruebas de laboratorio con el fin de conocer las características de la masa rocosa sobre el cual operan los contratistas por el método de cámaras y pilares. Tales estudios se complementan con estudios geológicos locales y regionales, en donde se considera sumamente importante los estudios a detalle de la caracterización geomecánica en aspectos de tipo estructural como fallas, pliegues, alteraciones. Considerando los esfuerzos generados alrededor de las excavaciones subterráneas, es difícil la medición de la intensidad de los mismos; sin embargo, es muy importante determinar esos valores para dimensionar adecuadamente las labores subterráneas y diseñar los elementos de sostenimiento adecuado a la capacidad de presión de la roca.

Si bien es cierto que en la explotación subterránea, los accidentes son en un mayor número graves y mortales, estos índices nos indican que se tiene que tener mayor atención a la caracterización del macizo rocoso en función de una serie de parámetros a los que se les asigna un valor, que por medio del mismo se llega a calcular un índice característico de la roca, que permite describir numéricamente la calidad de la misma, ejecutando así los trabajos de sostenimiento por soporte activo y refuerzo pasivo en las labores mineras de galerías de acceso, cortadas, chimeneas, tajeos y subniveles con el fin de reducir los riesgos directos a la salud de los colaboradores y también los daños a los equipos y al proceso productivo que generan pérdidas económicas considerables en la Empresa Especializada JB, con el presente trabajo de investigación se propone dar una solución a estos problemas, teniendo los recursos disponibles de sostenimiento dando un uso adecuado, eficiente y satisfactorio.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

Al no realizar un trabajo de descripción y clasificación geomecánica del macizo rocoso en sus proyectos mineros de la U.E.A. Ana María - La Rinconada y por desconocimiento del mismo se realizan operaciones mineras sin ningún control geomecánico, generando como consecuencia desarrollos mineros como túneles, tajeos, cortadas, cruceros, chimeneas, entre otros, completamente inestables ocasionando así accidentes a los equipos utilizados, y al personal colaborador que finalmente es un recurso no recuperable. El personal colaborador que trabaja en la minería de pequeña escala desconoce sobre la caracterización geomecánica y diseño de sostenimiento en el cual operan sus minas esto induce a realizar trabajos inseguros, esto está reflejado en las estadísticas nacionales del Ministerio de Energía y Minas, que nos indica que un 30 % de los accidentes mortales es por desprendimiento de rocas, por el cual el presente proyecto está dirigido a dar a conocer al personal colaborador que opera en la Empresa Especializada JB de la zona denominado Morro Pelado, la caracterización geomecánica

del macizo rocoso y su aplicación en el diseño de sostenimiento de esta forma el personal pueda realizar sus operaciones mineras seguras y estables.

1.2 Formulación del problema

De la formulación del problema se plantea las siguientes interrogantes:

1.2.1 Interrogante general

¿Qué importancia tiene la caracterización geomecánica del macizo rocoso para el diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la U.E.A. Ana María – La Rinconada?

1.2.2 Interrogantes específicas

¿Cuáles son los parámetros geomecánicos a considerar dentro de la caracterización geo mecánica en la U.E.A. Ana María – La Rinconada?

¿Cuál será el diseño de sostenimiento para las labores de desarrollo en la U.E.A. Ana María – La Rinconada?

1.3 Objetivos de la investigación

El presente trabajo tiene como propósito determinar la caracterización geomecánica y diseñar el sostenimiento en labores de desarrollo, con el cual se alcanzaran los objetivos:

1.3.1 Objetivo general

Analizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso para la aplicación en el diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la U.E.A., Ana María – La Rinconada.

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar los parámetros geomecánicos para la caracterización del macizo rocoso en la U.E.A., Ana María – La Rinconada.

Determinar el diseño de sostenimiento para las labores de desarrollo en la U.E.A., Ana María - La Rinconada.

1.4 Justificación del problema

Las operaciones mineras que se realizan en la U.E.A., Ana María - La Rinconada, son a pequeña escala y en gran número por la cantidad de contratistas que laboran, y la actividad que se realiza es de gran rentabilidad por las leyes altas del contenido metálico que existe en la mineralización del yacimiento, esto influye a que el personal colaborador que labora, realice el trabajo de extracción de manera incontrolada, dejando de lado el conocimiento geomecánico del macizo rocoso, de ahí conocer al detalle la caracterización geomecánica del macizo, para evitar el mal direccionamiento, sobredimensionamiento de sus desarrollos mineros y plantear un diseño de sostenimiento adecuado.

La caracterización de la zona de estudio en muchos casos está asociada a determinar zonas que presentan alteración que tienen impacto sobre la resistencia del macizo rocoso circundante, su estabilidad y auto sostenimiento esto además influenciado por las precipitaciones fluviales, infiltración a aguas subterráneas, mínimos 0.2 mm y máximos 17.3 en épocas de lluvia, que existe en la zona cuyos datos obtenidos en meteorología e hidrología de (SENAMHI, 2014), el cual altera así sus operaciones mineras en el desarrollo de, túneles, tajeos, cortadas, cruceros, chimeneas, que finalmente converge en accidentes de equipos y del personal colaborador, incrementando los costos operacionales.

En ese sentido, se ha orientado el desarrollo del presente proyecto “Caracterización geomecánica del macizo rocoso y su aplicación en el diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la Unidad Económica Administrativa - Ana María - La Rinconada”, documento de investigación que permitirá conocer el resultado de un buen diseño de sostenimiento en relación a la caracterización del macizo y así mismo servirá como guía práctica para los profesionales del rubro minero que laboren en la zona de estudio.

1.5 Limitaciones del estudio

El presente trabajo de investigación será realizado en la Empresa Especializada JB en la zona denominada Morro Pelado de la U.E.A., Ana María - La Rinconada, ubicado en la Cordillera Oriental del Sur del Perú, en el departamento de Puno, provincia San Antonio de Putina, distrito de Ananea, cuyas coordenadas U.T.M., 451 806.40 E, 8 383 466.98 N, a una altitud de 4,850 metros sobre el nivel del mar.

1.6 Viabilidad del estudio

El trabajo de investigación es viable por la financiación económica por parte de la Empresa Especializada JB en la cual se desarrollara, contando así con el apoyo de materiales, equipos y personal tanto en campo como en oficinas para la realización del estudio, así mismo es viable porque la investigación será de conocimiento para el personal colaborador, y de esa forma podrán realizar sus trabajos operacionales de forma segura y confiable, lo cual será reflejado en la reducción de sus índices de accidentes y la rentabilidad de sus operaciones mineras.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

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

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

Maday C. P. (2001), resumen tesis doctoral “Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país”, departamento de Geología, Instituto Superior Minero Metalúrgico, en cuyas conclusiones indica:

- * Los resultados del estudio del agrietamiento de los macizos rocosos muestran que un gran porcentaje de ellos se presentan agrietados, lo que se relaciona a las formas preponderantes en que se manifiesta la pérdida de su estabilidad y el mecanismo de actuación de la presión.
- * Como resultado de la evaluación de la estabilidad de los macizos rocosos según su calidad y estabilidad se obtiene que predominan los macizos de calidad regular, aunque en diferentes sectores y obras se presentan macizos en mal estado, lo que es condicionado además de los problemas estructurales, por el deterioro que ellos han sufrido por efectos del agua, la erosión y la atmósfera subterránea.
- * Se obtienen un grupo de criterios geomecánicos – estructurales que pueden ser aplicados para el diseño de excavaciones y obras subterráneas, fundamentando su empleo.

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

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

Azuarte D. (2004), tesis de grado “Caracterización geológica y geomecánica de los macizos rocosos de la sección Guatire – Caucagua de la autopista Rómulo Betancourt, estado Miranda” presentado a la Universidad Central de Venezuela, en cuyas conclusiones indica:

- * Todas estas clasificaciones son congruentes entre sí sobre el tipo de macizo que se ha caracterizado, evitándose incongruencias y variedad de criterios al momento de clasificarlos por uno u otro sistema.
- * Es importante para cualquier metodología que implique el uso de GSI como parámetro numérico de información geológica, una buena descripción en campo de las características de las discontinuidades, como rugosidad, meteorización, abertura y rellenos presentes.
- * En cuanto al conocimiento de los parámetros de resistencia al corte de una roca, se concluye que en caso de aplicar una metodología numérica, corroborar los resultados con la ayuda de ensayos de campo y laboratorio, como el tilt test, determinación de coeficiente de rugosidad JRC, y el ensayo de corte directo, determinando así la resistencia al corte pico y residual.

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

- * En general, las clasificaciones geomecánicas con mejores resultados de aplicación son las de Bieniawski (RMR básico), Romana (SMR) y el índice de resistencia geológica (GSI) basado en el estado de fracturamiento y calidad de las discontinuidades. Se clasifica al macizo rocoso de la cantera “Las Victorias” de calidad Media y comportamiento Elasto-Frágil.

- * La clasificación de Barton (Q), presentó resultados que eran incompatibles con las observaciones de campo, respecto a la Andesita que conforma el macizo rocoso. En primer lugar el espaciado de las discontinuidades no se considera directamente del índice Q, aunque es considerado en el RQD. En segundo lugar la resistencia de la roca intacta y grado de meteorización no se tienen en cuenta directamente en la clasificación, además no se tiene en cuenta la orientación de las discontinuidades con respecto al talud de la cantera.

Sumiri, P. (2013), Tesis “Aplicación de geomecánica en prevención de caída de rocas en corte y relleno ascendente Unidad Económica Administrativa Poracota CIA de minas Buenaventura” presentado a la escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano, en cuya conclusión indica:

- * Las características estructurales del macizo rocoso tienen bastante incidencia en el tiempo de auto soporte y el tipo de soporte que requiere la excavación subterránea ya sea en avance o en explotación, los resultados son satisfactorios con la asignación de colores a una calidad de roca divididos en A, B, C, D respectivamente esto implica un fácil entendimiento y manejo de la cartilla geomecánica para aplicar el soporte activo o pasivo

Givera, L. (2013), Tesis “Aplicación de geomecánica en la construcción de chimeneas Raise Borer en la mina San Rafael” presentado a la escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano, en cuya conclusión indica:

- * El uso de la ciencia relacionada al material rocoso que comprende la geología y geomecánica (modelo geológico, modelo estructural del macizo rocoso, modelo hidrológico y el modelo geotécnico), jugaron un rol importante desde la concepción del proyecto, ejecución, desgaste, acondicionamiento, de la

chimenea como “ore pass”, cuya evaluación es positivo en la medida que se tomó todas las precauciones referente a la ingeniería del macizo rocoso.

MINEM (2014), Anuario “Resumen de índice de frecuencia, severidad sobre accidentes de trabajo – Corporación Minera Ananea S.A.” presentado en la web institucional del Ministerio de Energía y Minas del Perú, en cuya mención se indica.

- * En el resumen anual de estadísticas que realiza el Ministerio de Energía y Minas, claramente se indica los índices acumulados de frecuencia y severidad de C.M.A.S.A., como se da a conocer en lo siguiente:

Acumulado a Octubre del 2014

Índice de Frecuencia : 6.505

Índice de Severidad : 266.691

- * Estos índices notoriamente da a conocer el buen rol que se realiza en la gestión de la seguridad, reduciendo significativamente los accidentes dentro de Corporación Minera Ananea S.A.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Geología regional

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

2.2.1.1 Estratigrafía regional

Paleozoico inferior

Se tiene la formación Sandía (Os-s) de edad Ordovícico Superior constituido por pizarras negras, cuarcitas y filitas. Con un espesor de 2000 metros aproximadamente. Formación Ananea (SD-a) de edad Silúrico – Devónico el cual está constituido por pizarras y cuarcita, con una potencia de 500 metros descrito por, (Antenor, 1996).

Paleozoico superior

Grupo Ambo constituido por conglomerados, arenisca con estratificación oblicua, areniscas sub arcosas y lutitas negras, su espesor alcanza 2000 metros; Grupo Tarma conformado por areniscas cuarzosas y sub arcosas finas se le asigna 700 metros de espesor, ambos grupos pertenecen al (Carbonífero inferior - superior respectivamente); grupo Copacabana constituido de calizas bioclásticas intercaladas con arenisca con un espesor de 700 metros (Pérmico - inferior).

Cretácico medio

Grupo Cotacucho (Km-c) constituido de areniscas cuarzosas sub arcosas con grano medio y conglomerados, tiene un espesor de 500 metros. Cretácico Superior, formación Vilquechico (Ks-v) constituido de areniscas de grano fino a medio y lutitas verdes, con un espesor de 550 metros.

Cenozoico

Formación Muñani (Ti-m) constituido de lutitas rojas, conglomerados y areniscas, con un espesor de 720 metros cuyo afloramiento resaltante se encuentra en la

misma localidad de Muñani. Volcánico Macusani (Ts-m) constituido de Ignimbritas, pórfidos dacíticos, espesor de 30 metros.

Cuaternario

Depósitos fluvioglaciares y aluviales (Q-fg Q- al) constituido de limos, arcillas, arenas, material detrítico heterogéneo.

Intrusivo

En la zona el intrusivo pegmático constituido de cuarzo lechoso, en forma de dique, con espesores que oscilan de 1, 2 y 4 metros y lenticular de 2, 5, 10, 15 metros, los cuales afloran en superficie a los que se les adjudica los generadores de la mineralización de los mantos y vetas.

2.2.1.2 Geología local

En la U.E.A., Ana María - La Rinconada, se encuentran las formaciones Sandia y Ananea, ambas fueron definidas inicialmente por (Velásquez, 2010). La Formación Sandia cubre gran parte de Cordillera Oriental, el contacto estratificado de la Formación Ananea es anormal a través de un sobre escurrimiento, sus características patológicas de la Formación Sandia fueron descritas en el valle de Sandia-Cuyo Cuyo (Ordovícico medio). La Formación Ananea fue asignada al Silúrico-Devoniano, ver Cuadro 1. La información infra yacente están relacionados a un fallamiento inverso el cual muestra a la Formación Sandia cabalgando a la Formación Ananea. El Cuaternario está representado por depósitos glaciares. (Antenor, 1996).

CUADRO 1

Columna lito estratificada

EDAD m.a.	EON	ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	POT. (m)	LITOLÓGICA	DESCRIPCIÓN
Hoy	FANEROZOICO	CUATERNARIO		HOLOCENO	Depósitos fluvio-glaciares y aluviales Q – fg Q – al	50		Limos, arcillas, arenas, material detrítico heterogéneo
0.005				PLEISTOCENO		120		
2.5		CENOZOICO	NEOGENO	PLIOCENO	Volcánicos Macusani Ts – m	30		Ignimbritos, pórfidos, dacíticos
07								
38								
65								
141		MESOZOICO	CRETASICO	SUPERIOR	Formación Vilquechico Ks – v	550		Lutitas Verdes
				MEDIO	Grupo Cotacuchu Km – c	500		Areniscas cuarzosas sub arcasicos con grano medio. conglomerados
230		PALEOZOICO	PERMICO	INFERIOR	Grupo Copacabana Pi – c	700		Calizas biocásticas finos intercalados con areniscos
280								
347	CARBONIFERO		PENNSYLVANIA-NO	Grupo Tarma Cs – f	700		Areniscas cuarzosas de grano fino a medio con tonalidad verdoso	
			MISISIPIANO	Grupo Ambo Ci – a	2000		Lutitas negras areniscas de grano fino y medio. Conglomerados y areniscas gruesas	
395	DEVONICO	Formación Ananea SD – a	500		Pizarras negras, y cuarcita.			
435	SILURICO							
435	ORDOVISICO	SUPERIOR	Formación Sandia Os – s	2000		Pizarras negras con interrelación de cuarcita y filitas.		

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

Pizarra. La pizarra es una roca foliada de grano muy fino (menos de 0.5 milímetros) compuesta por pequeños cristales de micas demasiado pequeños para ser visibles. Por tanto, en general el aspecto de la pizarra no es brillante y es muy parecido al de la lutita. Una característica destacada de la pizarra es su tendencia a romperse en láminas planas.

La pizarra se origina casi siempre por el metamorfismo en grado bajo de lutitas y pelitas, el color de la pizarra depende de sus constituyentes minerales. Las pizarras negras (carbonaceas) contienen materia orgánica, las pizarras rojas deben su color al óxido de hierro y las verdes contienen normalmente clorita.

Filita. La filita representa una gradación en el grado de metamorfismo entre la pizarra y el esquisto, sus minerales planares son más grandes que los de la pizarra, pero no lo bastante como para ser fácilmente identificables a simple vista, aunque la filita parece similar a la pizarra, puede distinguirse con facilidad por su brillo satinado y su superficie ondulada.

La filita, normalmente, muestra pizarrosidad y está compuesta fundamentalmente por cristales muy finos de moscovita, clorita o ambas.

Esquisto. Son rocas metamórficas de grano medio a grueso en las que predominan los minerales planares. Habitualmente, la mica moscovita y biotita, que exhiben un alineamiento planar que da a la roca su textura foliada. Además, los esquistos contienen cantidades menores de otros minerales, a menudo cuarzo y feldespatos.

Hay esquistos formados principalmente de minerales oscuros (anfíboles). Como las pizarras, el protolito de muchos esquistos es la lutita.

Cuarcita. Es una roca muy dura formada a partir de arenisca rica en cuarzo. Bajo las condiciones de metamorfismo de grado moderado a elevado, los granos de cuarzo de la arenisca se funden como briznas de vidrio. La recristalización es tan completa cuando se rompe, la cuarcita escinde a través de los granos de cuarzo originales, en lugar de hacerlo a lo largo de sus límites.

En algunos casos se conservan estructuras sedimentarias del tipo de la estratificación cruzada y dan a la roca un aspecto bandeado, la cuarcita pura es blanca, pero los óxidos de hierro pueden producir tintes rojizos o rosados, mientras que los granos de minerales oscuros pueden colorearla de gris.

Cuaternario (Q). Los depósitos cuaternarios, están representados por materiales glaciares, fluviales. La litología consta de clastos angulosos y redondeados de pizarras, cuarcitas y cuarzo, el material fino constituido por limos y arcillas. (Velásquez, 2010).

Formación Sandia

Ordovícico – Superior, en la zona de estudio aflora ampliamente una secuencia de pizarras negras, cuarcita y filita. (Velásquez, 2010).

Datos de la formación Sandia.

Espesor	= +/- 2000 metros.
Rumbo	= NW – SE.
Tamaño de grano	= Medio a fino.
Color	= Gris oscuro a negro.
Variedad de roca	= Pizarra negra, intercalación de cuarcita y filitas.

Formación Ananea

Silúrico – Devónico En la U.E.A., Ana María, aflora en contacto (sobre escurrimiento) con la Formación Sandia, una secuencia de pizarras negras y cuarcitas. (Velásquez, 2010).

Datos de la Formación Ananea.

Espesor	= +/- 500 metros.
Rumbo	= NW - SE.
Tamaño de grano	= Medio a fino.
Color	= Gris oscuro a negro.
Variedad de roca	= Pizarra negra y cuarcita.

La textura es variable debido a que la sedimentación ha sido en cuencas intercontinentales. El término formación Sandia y Ananea, fue dado por el geólogo David Velásquez Condori, asignándole una edad Siluro- Devoniano. (Velásquez, 2010)

2.2.2 Propiedades físico-mecánico del macizo rocoso

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

2.2.2.1. Porosidad

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

$$n (\%) = \left(\frac{V_v}{V_m} \right) \times 100$$

Dónde:

$n (\%)$: Porosidad expresada en porcentaje

V_v : Volumen de vacíos

V_m : Volumen de la muestra

Tipos de porosidad:

Absoluta

De fisuración

2.2.2.2. Contenido de agua

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

2.2.2.3. Peso volumétrico

Es la relación entre el peso de la muestra y el volumen de la muestra. El peso y volumen de la muestra se realiza pesándola en el aire y luego pesándola sumergida en mercurio, observar Figura 1.

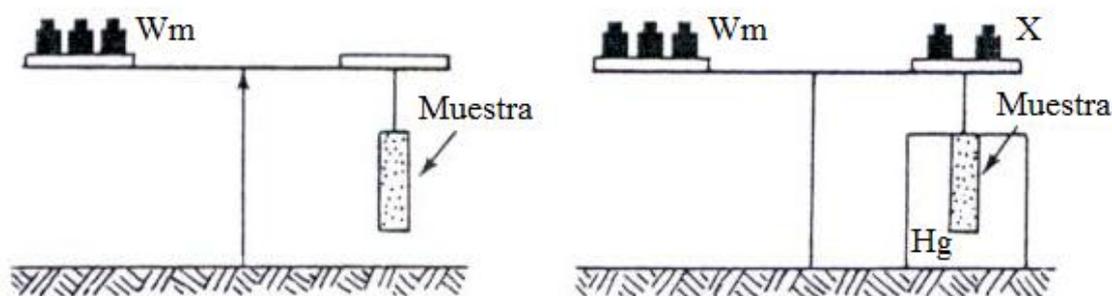


Figura 1. Determinación del peso volumétrico

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

2.2.2.4. Alteración

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

2.2.2.5. Alterabilidad

Es la capacidad de una roca para alterarse en el futuro, representado en el Cuadro 2.

Factores condicionantes:

Composición mineralógica

Fisuras de la roca

Agentes agresivos

Tratamiento mecánico a que se somete

CUADRO 2

Uso de la roca de acuerdo con su alterabilidad

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

Fuente: Blanco, R. (2005). Características físico y mecánico estructurales del macizo rocoso. Proyecto

CYTED XIII, Córdoba, Argentina.

2.2.2.6. Sensitividad

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

Para medir dichas variaciones de permeabilidad se realiza una prueba que consiste en utilizar una probeta cilíndrica de roca con una perforación central la cual se somete a dos tipos de flujo, observar Figura 2.

Flujo convergente

Flujo divergente

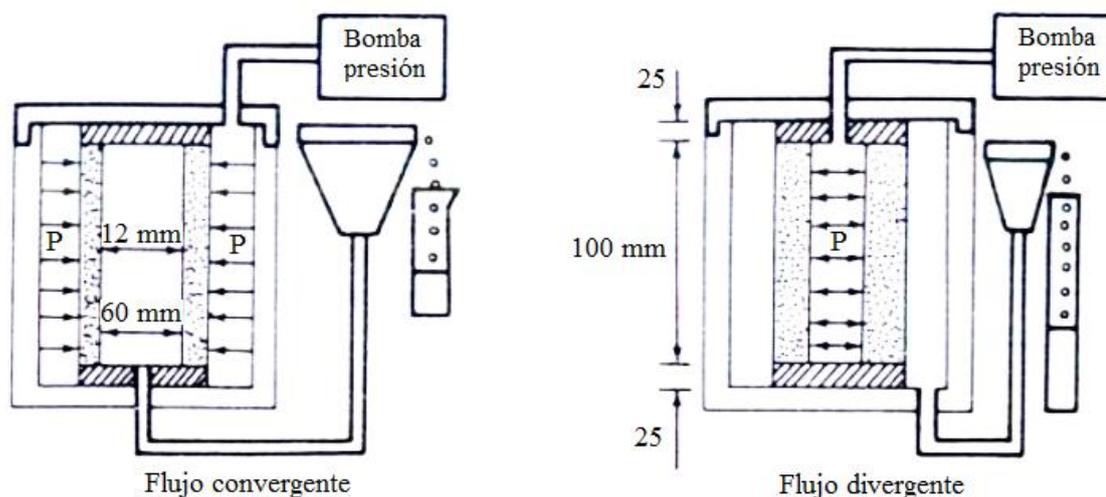


Figura 2. Tipos de flujo para obtener la sensibilidad de una muestra de roca

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

2.2.2.7. Mineralogía

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

Dentro de la mineralogía existen dos líneas de trabajo.

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

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

2.2.2.8. Densidad

Blanco, (2005). Es la masa por unidad de volumen $\rho = \frac{m}{v}$

Dónde:

m: Masa del material

v: Volumen del material

2.2.2.9 Deformación

Cuando se somete una muestra de roca a una carga esta tiende a cambiar de forma, de volumen o bien las dos cosas simultáneamente. Durante el período de aplicación del esfuerzo, este y la deformación son inseparables, por lo que se acostumbra a estudiar a la deformación mediante gráficas conocidas como Esfuerzo-Deformación, tal como se observa en la Figura 3.

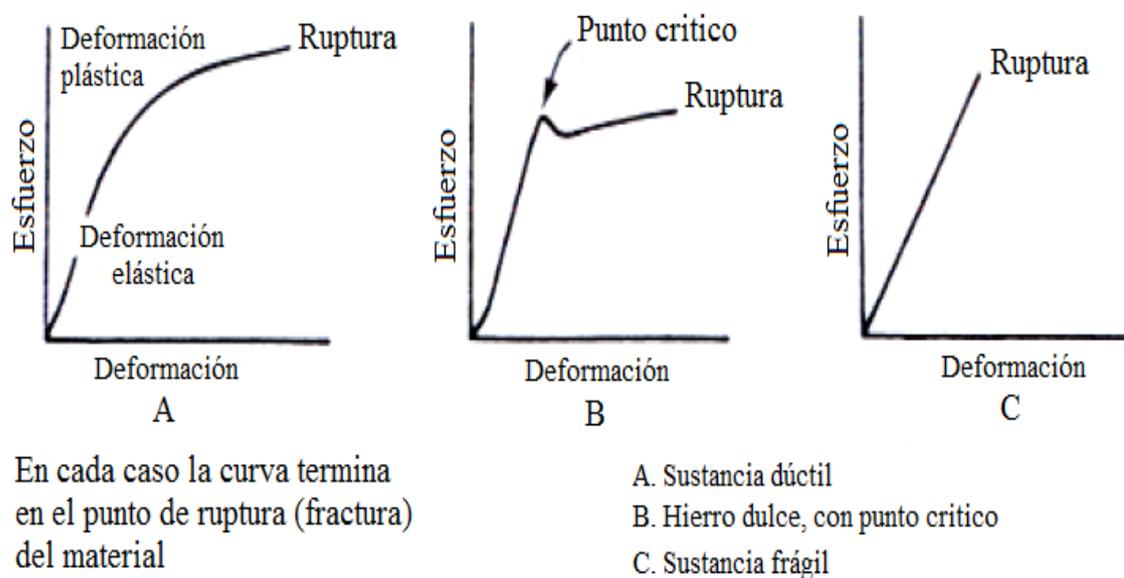


Figura 3. Curvas de deformación

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

2.2.2.10 Resistencia

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

Compresión.- Que tiende a disminuir el volumen del material.

Uniaxial: resistencia a la compresión simple.

Las propiedades mecánicas de las rocas se las puede determinar tanto en laboratorio, en el campo y en el sitio mismo de la obra o proyecto, descripción en el Cuadro 3.

CUADRO 3

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

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

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

2.2.2.10.1 Compresión uniaxial.

Resistencia a la compresión simple, consiste en aplicar a los especímenes de roca cargas axiales sin confinamiento, observar Figura 4 y 5. (González, 2002). Los especímenes son generalmente cilíndricos de 2.5 a 7.5 cm de diámetro y altura igual a dos veces el diámetro, que está definido por:

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

Dónde:

σ_c = resistencia a la compresión.

F = fuerza aplicada hasta la rotura

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

Donde

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

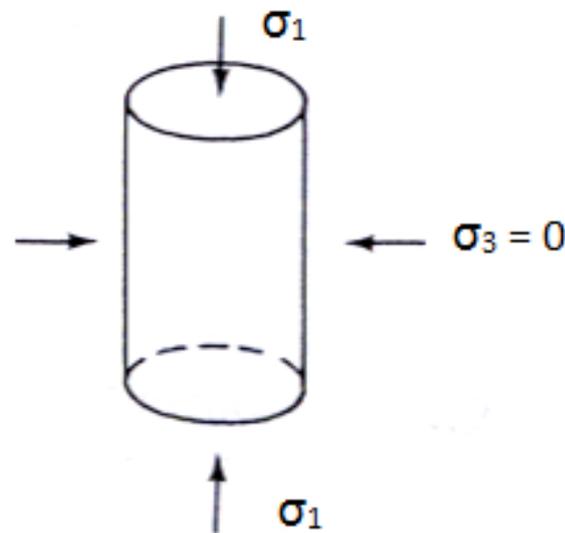


Figura 4. Compresión uniaxial o simple

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

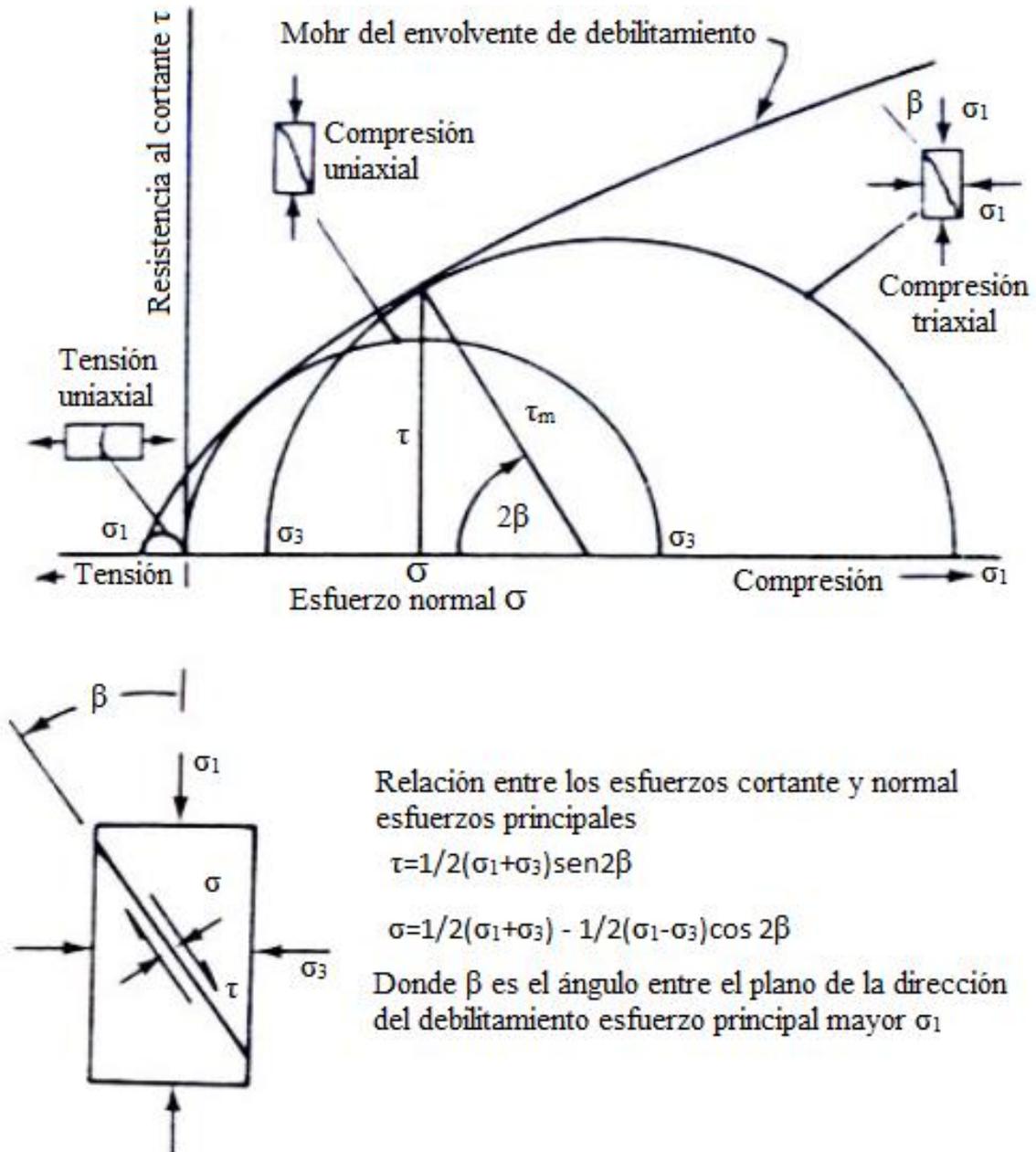


Figura 5. Tipos de esfuerzos

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

2.2.2.11 Permeabilidad o conductividad hidráulica

Es la propiedad de algunos materiales de permitir el paso de fluidos a través de ellos. Una roca es permeable cuando permite el paso de una cantidad medible de fluido

en un espacio de tiempo finito, observar Figura 6. Equivale a una velocidad en m/día o cm/s.

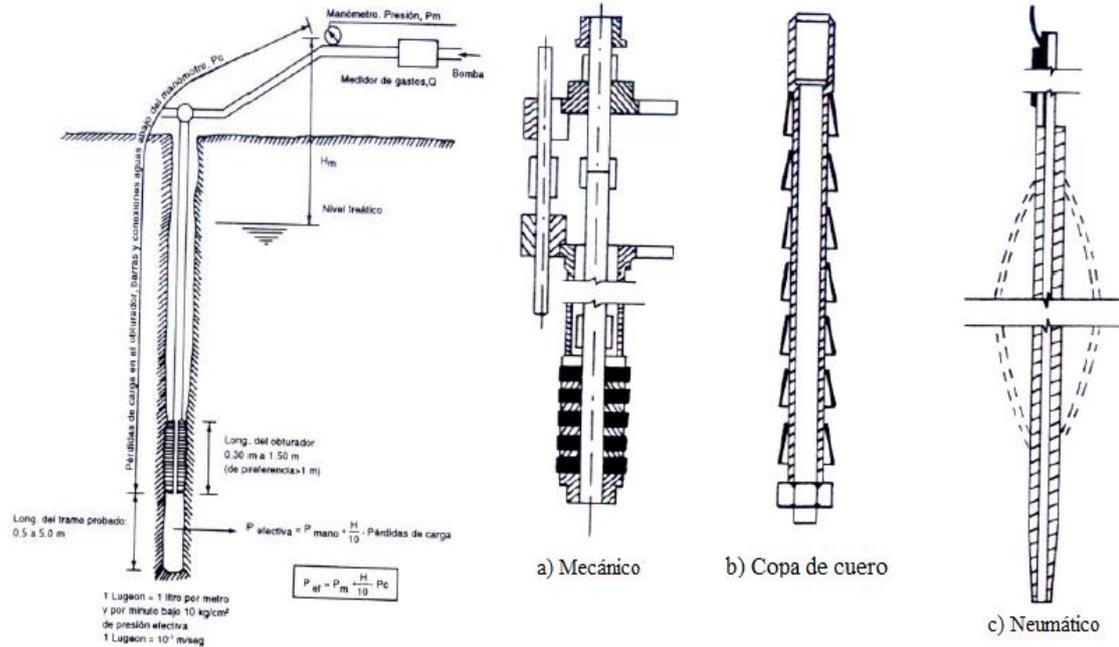


Figura 6. Pruebas de permeabilidad.

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

Ley de Darcy: $Q = k \cdot A \cdot h/l = k \cdot A \cdot i$

Q: Caudal.

A: Sección.

h: Diferencia de altura.

l: Recorrido del agua.

h/l: Gradiente hidráulico.

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

Factores que influyen en la permeabilidad:

Temperatura

Existencia de cavidades

Estratificación y estructura

2.2.3 Caracterización del macizo rocoso

Dentro de la caracterización del macizo rocoso algunos de estos parámetros, como la rugosidad, resistencia de las paredes, apertura y relleno, determinan el comportamiento mecánico y la resistencia al corte de las discontinuidades. (Ferrer, M. et al., 1999).

2.2.3.1 Orientación

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

La orientación de una discontinuidad en el espacio queda definida por su dirección de buzamiento (dirección de la línea de máxima pendiente del plano de discontinuidad respecto al norte) y por su buzamiento (inclinación respecto a la horizontal de dicha línea). Observar Figura 7. Su medida se realiza mediante la brújula con clinómetro o con el diaclasi metro.

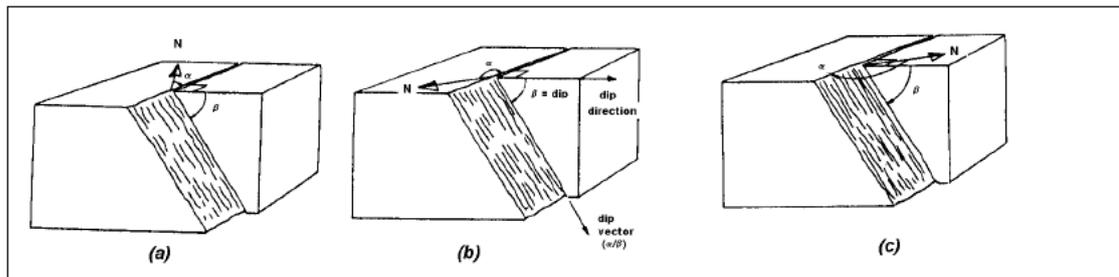


Figura 7. Orientación de discontinuidades

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

2.2.3.2 Espaciamiento

El espaciado entre los planos de discontinuidad condiciona el tamaño de los bloques del macizo rocoso y por tanto, (Ferrer, M. et al., 1999). Define el papel que ésta tendrá en el comportamiento mecánico del macizo, y su importancia con respecto a la influencia de las discontinuidades. En macizos rocosos con espaciados grandes, de varios metros, en los procesos de deformación y rotura prevalecerán las propiedades del macizo rocoso o de los planos de discontinuidad según la escala de trabajo considerada y la situación de la obra de ingeniería con respecto a las discontinuidades; si los espaciados son menores, de varios decímetros a 1 o 2 metros, el comportamiento del macizo lo determinarán los planos de debilidad; por último, si el espaciado es muy pequeño el macizo estará muy fracturado y presentará un comportamiento «isótropo», controlado por las propiedades del conjunto de bloques más o menos uniformes.

El espaciado se define como la distancia entre dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en la dirección perpendicular a dichos planos. Normalmente este valor se refiere al espaciado medio o modal de los valores medidos para las discontinuidades de una misma familia, tal como se observa en la Figura 8.

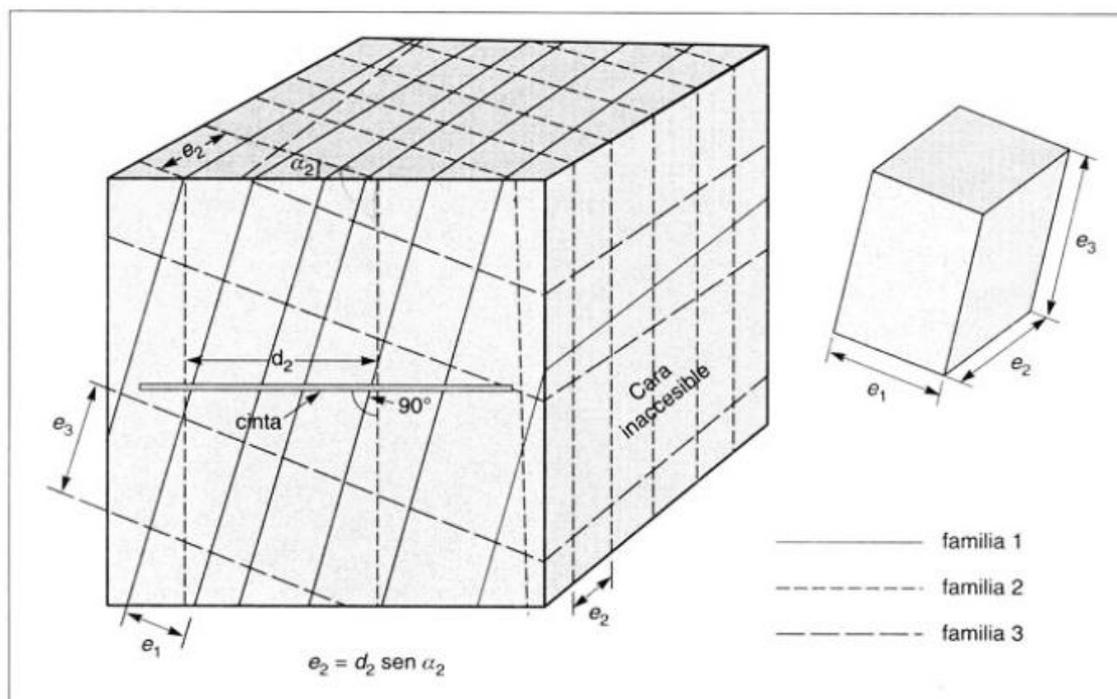


Figura 8. Espaciado de discontinuidades

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

2.2.3.3 Continuidad o persistencia

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

La medida de la continuidad se realiza con una cinta métrica. (Ferrer, M. et al., 1999). Si el afloramiento permite la observación tridimensional de los planos de discontinuidad, deberán medirse las longitudes a lo largo de la dirección y del buzamiento, ver Cuadro 4. Las discontinuidades pueden o no terminar contra otra discontinuidad, debiendo indicarse en la descripción. Es importante destacar las familias

más continuas, ya que por lo general serán éstas las que condicionen principalmente los planos de rotura del macizo rocoso.

CUADRO 4

Descripción de la continuidad o persistencia

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

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

2.2.3.4 Rugosidad

La descripción y medida de la rugosidad tiene como principal finalidad la evaluación de la resistencia al corte de los planos, τ , que para discontinuidades sin cohesión puede ser estimada a partir de datos de campo y de expresiones empíricas. La rugosidad aumenta la resistencia al corte, que decrece con el aumento de la abertura y, por lo general, con el espesor de relleno.

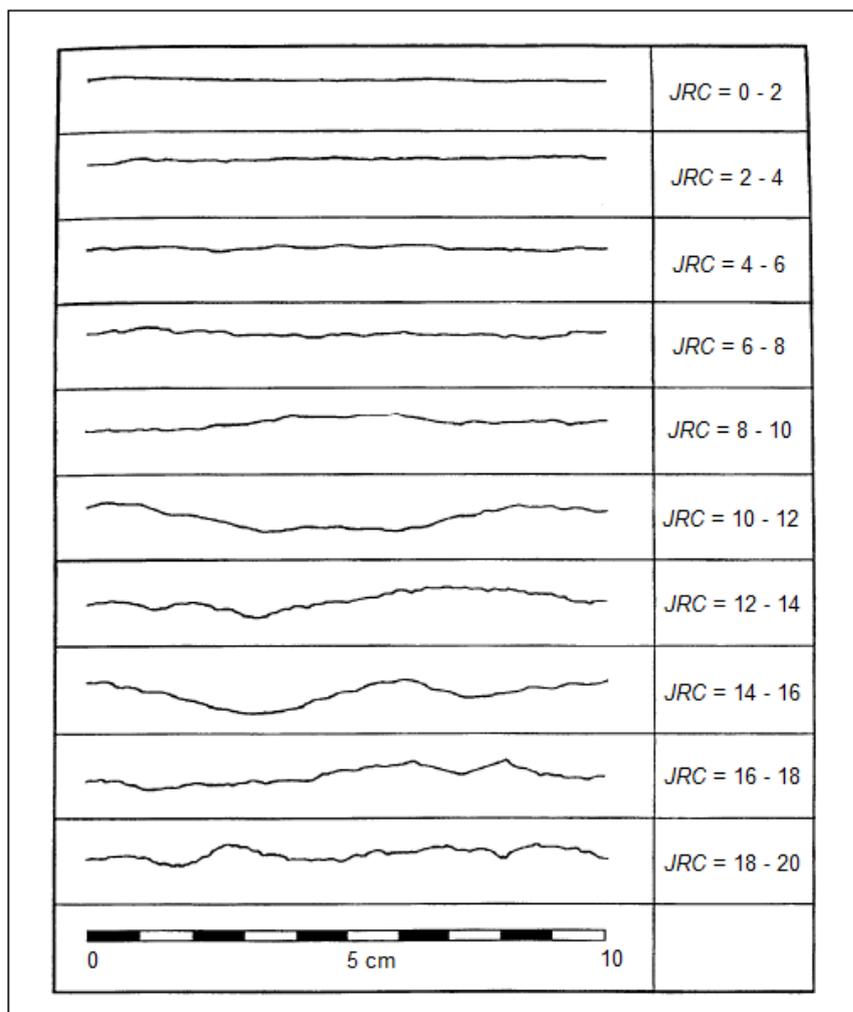
El término rugosidad se emplea en sentido amplio para hacer referencia tanto a la ondulación de las superficies de discontinuidad, observar Cuadro 5. Como a las irregularidades o rugosidades a pequeña escala de los planos, definidas en ocasiones como de 1ª y 2ª orden respectivamente. (Ferrer, M. et al., 1999). La descripción de la rugosidad requiere, pues, dos escalas de observación.

Escala decimétrica y métrica para la ondulación de las superficies: superficies planas, onduladas o escalonadas.

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

CUADRO 5

Perfiles típicos de rugosidad



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

2.2.3.5 Resistencia de las paredes

La resistencia de la pared de una discontinuidad influye en su resistencia al corte y en su deformabilidad. (Ferrer, M. et al., 1999). Depende del tipo de macizo rocoso, del grado de alteración y de la existencia o no de relleno. En discontinuidades sanas y limpias, la resistencia sería la misma del macizo rocoso, pero generalmente es menor

debido a la meteorización de las paredes, los procesos de alteración afectan en mayor grado a los planos de discontinuidad que al macizo rocoso. Por este motivo, junto a la medida de la resistencia de las paredes de la discontinuidad debe ser estimado el grado de meteorización del macizo rocoso.

La resistencia puede estimarse en campo con el martillo Schmidt, aplicándolo directamente sobre la discontinuidad, para medir la resistencia del macizo, o a partir de los índices de campo en general, la resistencia de la pared rocosa estará comprendida entre los grados R_0 a R_6 .

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

2.2.3.6 Abertura

La abertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno, descrita en el Cuadro 6. Este parámetro puede ser muy variable en diferentes zonas de un mismo macizo rocoso, mientras que en superficie la abertura puede ser alta, ésta se reduce con la profundidad, pudiendo llegar a cerrarse. (Ferrer, M. et al., 1999). La influencia de la abertura en la resistencia al corte de la discontinuidad es importante incluso en discontinuidades muy cerradas, al modificar las tensiones efectivas que actúan sobre las paredes. Los procesos de desplazamiento en la discontinuidad o de disolución pueden dar lugar a aberturas importantes.

Su medida se realiza directamente con una regla graduada en milímetros. Cuando la separación es muy pequeña se puede emplear un calibre que se introduce en

la abertura. Debe indicarse si la abertura de una discontinuidad presenta variaciones, realizándose medidas a lo largo al menos de 3 m. La descripción se realiza según la terminología. Las medidas han de realizarse para cada familia de discontinuidades, adoptando los valores medias más representativos de cada una de ellas.

CUADRO 6

Descripción de las aberturas

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

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

2.2.3.7 Relleno

Las discontinuidades pueden aparecer rellenas de un material de naturaleza distinta a la roca de las paredes. Existe gran variedad de materiales de relleno con propiedades físicas y mecánicas muy variables, observar Figura 9. La presencia de relleno gobierna el comportamiento de la discontinuidad, por lo que deben ser reconocidos y descritos todos los aspectos referentes a sus propiedades y estado. (Ferrer, M. et al., 1999). Debe tenerse en cuenta que si se trata de materiales blandos o alterados, éstos pueden sufrir variaciones importantes en sus propiedades resistentes a

corto plazo si cambia su contenido en humedad o si tiene lugar algún movimiento a lo largo de las juntas.

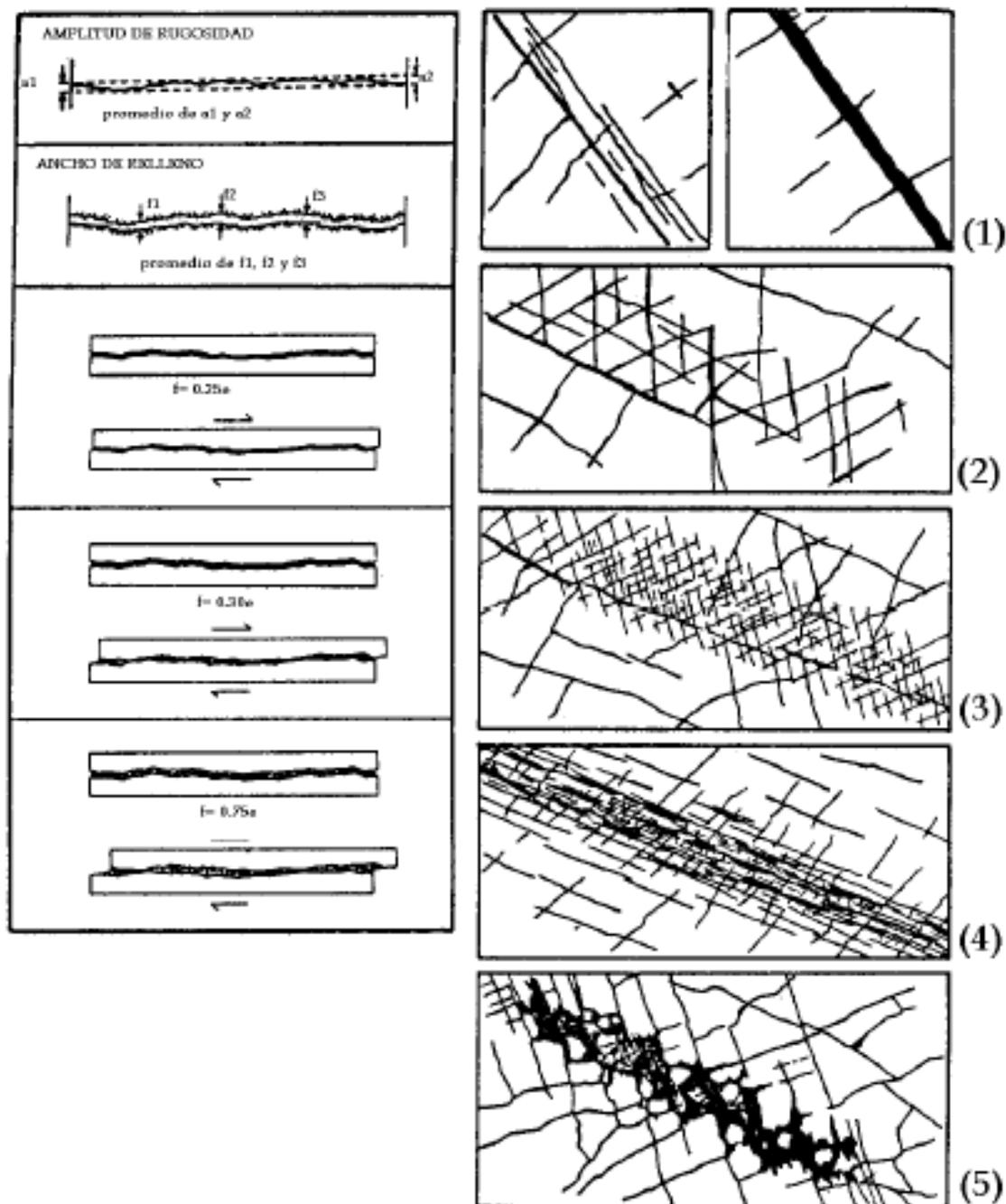


Figura 9. Discontinuidades simples rellenadas

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

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

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

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

La resistencia se puede estimar mediante los Índices de campo (si el relleno es blando corresponderá a los grados S_1 a S_6), o mediante la utilización del esclerómetro o martillo de Schmidt.

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

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

2.2.3.8 Filtraciones

El agua en el interior de un macizo rocoso procede generalmente del flujo que circula por las discontinuidades (permeabilidad secundaria), aunque en ciertas rocas permeables las filtraciones a través del macizo rocoso (permeabilidad primaria) pueden ser también importantes. (Ferrer, M. et al., 1999). Las observaciones respecto a las filtraciones en discontinuidades, tanto si se presentan rellenas como si aparecen limpias, pueden seguir las descripciones en el Cuadro 7.

CUADRO 7

Descripción de las filtraciones en discontinuidades

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

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

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

Número y orientación de las familias de discontinuidades.

Tamaño de bloque e intensidad de fracturación.

Grado de meteorización.

2.2.3.9 Número y orientación de familias de discontinuidades

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

La intensidad o grado de fracturación y el tamaño de los bloques del macizo rocoso vienen dados por el número de familias de discontinuidades, ver Cuadro 8 y por el espaciado de cada familia. Cada una de las familias queda caracterizada por su orientación en el espacio y por las propiedades y características de los planos.

CUADRO 8

Clasificación de macizos rocosos por el número de familias de discontinuidades

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

Fuente. ISRM (1981). Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. ISRM

Suggested methods. Ed. E.T. Brown. Pergamon Press.

2.2.3.10 Tamaño de bloques y grado de fracturación

El tamaño de los bloques que forman el macizo rocoso condiciona de forma definitiva su comportamiento y sus propiedades resistentes y deformacionales. (ISRM, 1981). La dimensión y la forma de los bloques están definidas por el número de familias de discontinuidades, su orientación, su espaciado y su continuidad. La descripción del tamaño de bloque se puede realizar de las siguientes formas, observar Figura 10:

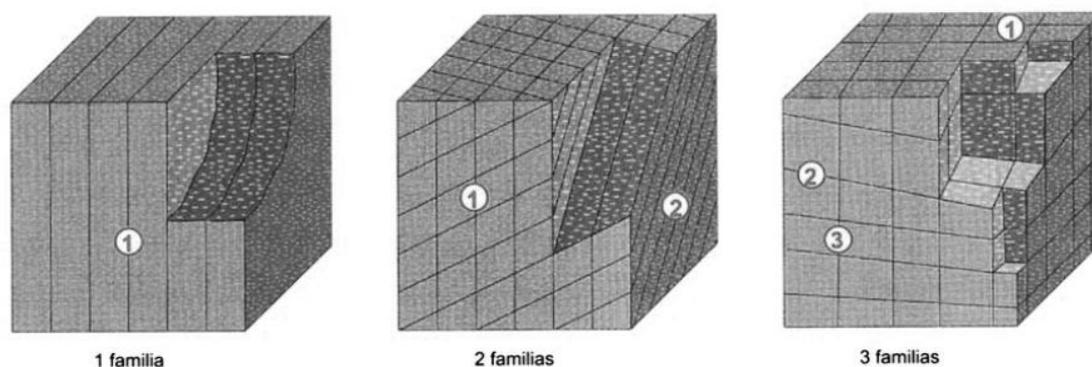


Figura 10. Representación del número de familias mediante diagramas de bloques

Fuente: ISRM (1981). Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. ISRM

Suggested methods. Ed. E.T. Brown. Pergamon Press.

2.2.3.11 Grado de meteorización

La evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso se realiza por observación directa del afloramiento y comparación con los índices estándares, descripción en el Cuadro 9. En ocasiones puede ser necesario fragmentar un trozo de roca para observar la meteorización del macizo rocoso. (ISRM, 1981).

CUADRO 9

Grado de meteorización del macizo rocoso

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

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

2.2.4 Hidrología

2.2.4.1 Agua subterránea

En la extracción minera subterránea es indudable que cada año se extraen muchos miles de millones de productos minerales y para ello, tienen que extraerse grandes cantidades de agua para obtener estos resultados; agua que de no ser extraída haría imposible el trabajo en la mina. (Wendor, 1980).

Las fallas naturales o las grietas producidas por las explotaciones rompen la continuidad de los mantos impermeables y son el camino de entrada de las aguas, pero

el agua más corriente en las minas profundas procede de niveles acuíferos subterráneos, aunque excepcionalmente pueda una grieta dar entrada a aguas superficiales directamente. La mayoría de las rocas son impermeables y las grietas que en ellas se produzcan suelen impermeabilizarse pronto. Naturalmente las rocas porosas son un peligro.

2.2.4.2 Acuíferos

Las formaciones que contienen y transmiten agua del subsuelo reciben el nombre de acuíferos. Los tipos principales son 2: no confinados y confinados.

Acuíferos no confinados: El flujo es libre como en los canales; la línea de energía es siempre descendente en el sentido del flujo; el nivel freático sigue más o menos las mismas variaciones de la superficie. (Wendor, 1980). El espesor alcanza valores que varían desde unos cuantos metros hasta cientos de metros. Los acuíferos no confinados son como verdaderos lagos subterráneos en material poroso; como no hay restricción en la parte superior el nivel freático es libre de subir y bajar. Muchas veces estos acuíferos alimentan corrientes superficiales y lagos.

Acuíferos confinados: Son acuíferos comprendidos entre dos estratos impermeables el flujo es a presión, como en las tuberías; en vez de un nivel freático se tiene ahora un nivel piezométrico. La línea de energía, como en el caso de los acuíferos no confinados, se confunde prácticamente con el nivel piezométrico debido a que la altura de velocidad del agua es muy pequeña.

(Wendor, 1980). Los acuíferos confinados presentan las ventajas de conducir el agua a grandes distancias y entregar el agua por encima del nivel del acuífero, y las desventajas de tener áreas de recarga relativamente pequeñas, rendir menos agua y provocar asentamientos del terreno en los lugares de extracción pozos de bombeo.

2.2.4.3 Alimentación y descarga

Alimentación.

El agua de las cordilleras de los andes se alimenta de las lluvias y nevadas, ya sea directamente o indirectamente. El agua de lluvia sufre primero intercepción debido a la vegetación y almacenamiento en las depresiones del terreno y en la zona vadosa. Del resto, una parte sufre escorrentía y otra llega eventualmente a la zona de agua subterránea, quiere decir que sólo las lluvias prolongadas de fuerte magnitud alimentan el agua del subsuelo. (Wendor, 1980).

La alimentación o recarga natural del agua del subsuelo es un proceso irregular e intermitente, en que intervienen la geología y el perfil del terreno.

Descarga.

El agua del subsuelo en exceso de la capacidad del acuífero se descarga de dos maneras: por evapotranspiración, cuando el cordón capilar llega a los sistemas radiculares de la vegetación y por salida superficial, si el nivel freático intersecta la superficie del terreno. (Wendor, 1980).

2.2.4.4 Flujo del agua subterránea

Porosidad y rendimiento específico.- Son dos propiedades importantes de los acuíferos.

Porosidad: Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de la muestra, mide la capacidad de una formación para contener agua la cual se expresa en porcentaje. (Blanco, 2005).

Rendimiento específico: Es el volumen de agua, expresado como un porcentaje del volumen total del acuífero, que drenará libremente o por gravedad del acuífero. Es siempre menor que la porosidad porque una parte del agua es retenida por fuerzas capilares y moleculares. (Wendor, 1980).

2.2.5 Clasificaciones geomecánicas

Las clasificaciones geomecánicas tienen como objetivo el de proporcionar una evaluación geomecánica del macizo rocoso que se estudia a partir de ensayos simples, y observaciones de campo.

2.2.5.1 Designación de la calidad de rocas (RQD)

La Designación de la calidad de Rocas (Rock Quality Designation) fue desarrollado por Deere et al. (1967), para estimar cuantitativamente la calidad del macizo rocoso, ver Cuadro 10, basándose en la recuperación de un testigo. Depende indirectamente del número de fracturas y del grado de alteración del macizo.

CUADRO 10

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

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

Fuente: Deere, D.U. and Deere, D.W. 1988. The rock quality designation (RQD) index in practice. In

Rock classification systems for engineering purposes, (ed. L. Kirkaldie), ASTM Special

Publication 984, 91-101. Philadelphia: Am. Soc. Test. Mat.

El diámetro del testigo tiene que ser igual o superior a 57.4 mm, y tiene que ser perforado con un doble tubo de extracción de testigo. El RQD es el porcentaje de

fragmentos de longitud superior a 10 cm, sobre la longitud total del testigo, observar

Figura 11.

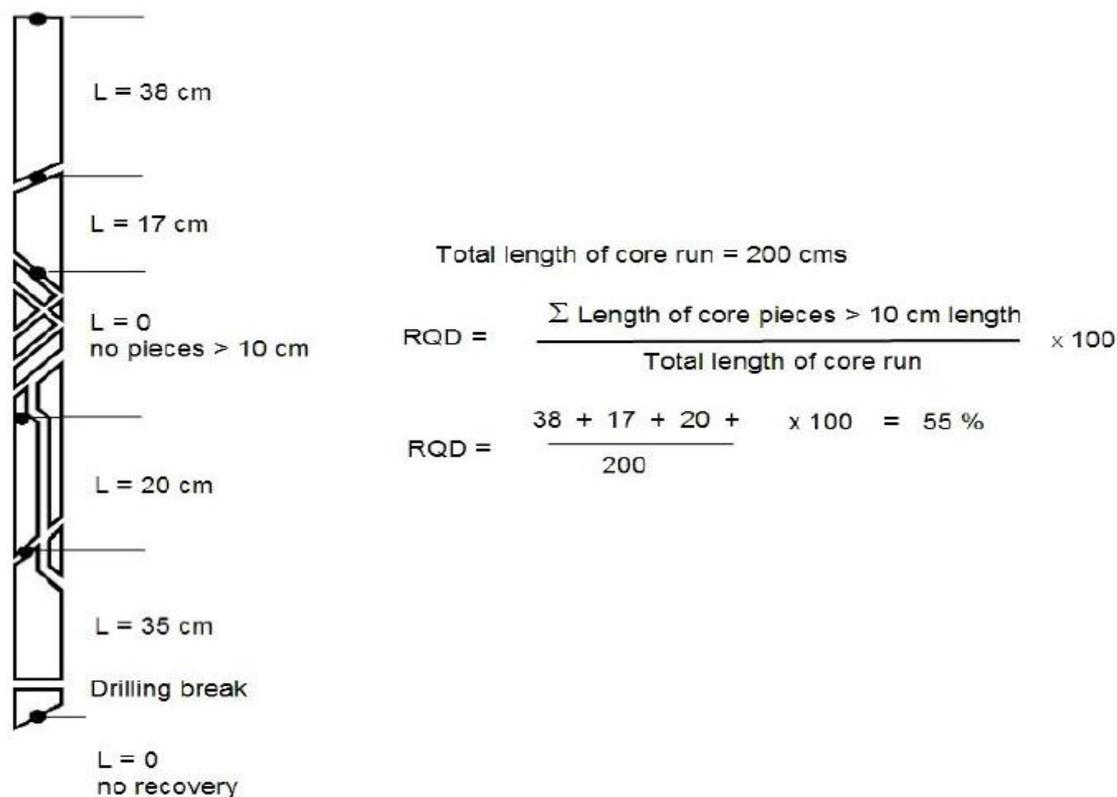


Figura 11. RQD

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

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

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

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

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

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

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

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

Donde λ es el número de juntas por metro lineal.

2.2.5.2 Valoración del macizo rocoso (RMR)

La valoración del macizo rocoso (Rock Mass Rating), introducido por Bieniawski (1976), es posiblemente la clasificación geomecánica más usada, inicialmente pensado para valorar la estabilidad y los soportes requeridos en túneles, ha resultado ser apto también para la valoración de la estabilidad en taludes. El RMR permite la obtención de la cohesión y ángulo de fricción, parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb. En las siguientes ecuaciones se muestran las relaciones entre RMR y los parámetros resistentes.

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

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

Donde c es la cohesión y ϕ es el ángulo de fricción.

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

(1) Resistencia del material intacto que se obtiene mediante ensayo de carga puntual o compresión simple

(2) RQD

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

(4) Condición de las discontinuidades, que incluye:

i. Longitud de la discontinuidad

ii. Abertura

iii. Rugosidad

iv. Relleno

v. Alteración

(5) Presencia de agua subterránea

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

$$RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

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

Hay que tener en cuenta que existen dos versiones para la obtención del RMR, el RMR₇₆, del año 1976, y el RMR₈₉, del año 1989. Cuadro 11. La diferencia reside en los valores que se le asignan a los parámetros de presencia de agua subterránea, condición de las discontinuidades y RQD conjuntamente con el espaciado de las discontinuidades. Se muestra la diferencia entre valores que se le dan a los parámetros según el criterio, observe Cuadro 12.

CUADRO 11

Diferencia de valores entre RMR₇₆ Y RMR₈₉

PARÁMETRO	RMR₇₆	RMR₈₉
RQD y Espaciado de las discontinuidades	8 – 50	8 – 40
Condición de las discontinuidades	0 – 25	0 – 30
Presencia de agua subterránea	0 – 10	0 – 15

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

CUADRO 12

Parámetros y rango de valores para la clasificación geomecánica RMR₈₉

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

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

2.2.5.3 Índice (Q)

Desarrollado por el NGI (Instituto Geotécnico Noruego), basado en un gran número de casos históricos en Escandinavia. (Barton, et al 1974). Propuso un Índice de Calidad de Túneles (Q) para la determinación de las características del macizo rocoso y

los requerimientos de soporte del túnel. El valor numérico del índice Q varía en una escala logarítmica de 0,001 a un máximo de 1000.

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

Dónde:

RQD : Designación de la calidad de la roca

J_n : Número de familias de discontinuidades

J_r : Numero de rugosidad de las discontinuidades

J_a : Numero de alteración de las discontinuidades

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

SRF : factor de reducción por tensiones.

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

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

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

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

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

$$De = \frac{Abertura.Excavacion(diametro.o.altura.en.(m.))}{Ratio.de.soporte.de.excavacion.ESR}$$

El valor de ESR se relaciona con el uso previsto de la excavación y para el grado de seguridad que se exige del sistema de soporte instalado para mantener la estabilidad de la excavación. Barton et al (1974) sugiere lo siguiente en el Cuadro 13.

CUADRO 13

Valor ESR con la categoría de la excavación

Excavation category	ESR
A Temporary mine openings.	3-5
B Permanent mine openings, water tunnels for hydro power (excluding high pressure penstocks), pilot tunnels, drifts and headings for large excavations.	1.6
C Storage rooms, water treatment plants, minor road and railway tunnels, surge chambers, access tunnels.	1.3
D Power stations, major road and railway tunnels, civil defence chambers, portal intersections.	1.0
E Underground nuclear power stations, railway stations, sports and public facilities, factories.	0.8

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

2.2.5.4 Índice de resistencia geológico (GSI)

Con la aparición del criterio de rotura de Hoek & Brown el uso del RMR ya no es adecuado, sobre todo para el caso de rocas débiles, y se introduce de esta forma el GSI (Hoek, et al. 1995)

El GSI es un sistema para la estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo, ver Cuadro 14.

CUADRO 14

Estimación del GSI basado en observaciones geológicas

(GSI) MODIFICADO		CONDICIÓN SUPERFICIAL				
<p>De los códigos de letra definidos que describen la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades, seleccione el cuadro apropiado es esta tabla. Estime el valor típico del Índice Geológico de Resistencia GSI, de los contornos que muestra la tabla. No trate de obtener un mayor grado de precisión. Indicar un rango de valores para GSI, por ejemplo de 36 a 42, es más realista que indicar un único valor por ejemplo 38.</p>		<p>MUY BUENA (extremadamente resistente, fresca) superficie de las discontinuidades muy rugosas e inalteradas, cerradas, (Rc > 250 MPa) (se astilla con golpes de picota)</p> <p>BUENA (muy resistente, levemente alterada) discontinuidades rugosas, lev. alterada, manchas de oxidación, lig. abierta. (Rc 100 a 250 MPa) (se rompe con varios golpes de picota)</p> <p>REGULAR (resistente, levemente alterada) discontinuidades lisas, moderadamente alterada, ligeramente abierta. (Rc 50 a 100 MPa) (se rompe con uno o dos golpes de picota)</p> <p>POBRE (moderadamente resist. moderam. alter.) superficie pulida o con estrías, muy alterada, relleno compacto o con fragmentos de roca. (Rc 25 a 50 MPa), (se indenta superficialmente)</p> <p>MUY POBRE (blanda, muy alterada) Superficie pulida y estriada, muy abierta, con relleno de arcillas blandas. (Rc < 25 MPa) (se disgrega o indenta superficialmente)</p>				
ESTRUCTURA						
	<p>LEVEMENTE FRACTURADA Tres a menos sistemas de discontinuidades muy espaciadas entre sí (RQD 75 - 90%) (2 a 6 fractura por metro) (RQD = 115 - 3.3 Jn)</p>	95				
	<p>MODERADAMENTE FRACTURADA Muy bien trabada, no disturbada, bloques cúbicos formados por tres sistemas de discontinuidades ortogonales. (RQD 50 - 75%) (6 a 12 fracturas por metro)</p>	90	85			
	<p>MUY FRACTURADA Moderadamente trabada, parcialmente disturbada, bloques angulosos formados por cuatro o más sistemas de discontinuidades. (RQD 25 - 50%) (12 a 20 fracturas por metro)</p>	80	75	70		
	<p>INTENSAMENTE FRACTURADA Plegamiento y fallamiento con muchas discontinuidades interceptadas formando bloques angulosos o irregulares. (RQD 0 -25%) (Más de 20 fracturas por metro)</p>		65	60	55	
	<p>TRITURADA O BRECHADA Ligeramente trabada, masa rocosa extremadamente rota con una mezcla de fragmentos fácilmente disgregables, angulosos y redondeados. (Sin RQD)</p>		50	45	40	35
			30	25	20	15
				10	5	

Fuente: Hoek E. 1994. Strength of rock and rock masses. ISRM News Journal, 2(2).

Las observaciones se basan en la apariencia del macizo a nivel de estructura y a nivel de condición de la superficie. A nivel de estructura se tiene en cuenta el nivel de alteración que sufren las rocas, la unión que existe entre ellas, que viene dada por las formas y aristas que presentan, así como de su cohesión. Para las condiciones de la superficie, se tiene en cuenta si ésta está alterada, si ha sufrido erosión o qué tipo de textura presenta, y el tipo de recubrimiento existente.

Una vez realizadas las observaciones se escoge en la tabla la situación que más se acerca a la realidad del macizo a estudio, obteniendo de esta forma, el valor del GSI., los valores del GSI varían desde 1 hasta 100. Los valores cercanos al 1 corresponden a las situaciones del macizo rocoso de menor calidad, es decir con la superficie muy erosionada, con arcilla blanda en las juntas, y con una estructura poco resistente debido a las formas redondas, y a la gran cantidad de fragmentación que sufre el macizo. Por el contrario, valores de GSI cercanos a 100, implican macizos de gran calidad, ya que significa una estructura marcada por una pequeña fragmentación en la que abundan las formas prismáticas y superficies rugosas sin erosión.

Las relaciones existentes entre GSI y RMR, dependiendo del RMR utilizado, se detallan a continuación:

Para el caso de RMR_{76}

$$RMR_{76} > 18 \rightarrow GSI = RMR$$

$$RMR_{76} < 18 \rightarrow \text{No se puede utilizar el } RMR_{76} \text{ para la obtención del GSI}$$

Para el caso de RMR_{89}

$$RMR_{89} > 23 \rightarrow GSI = RMR_{89} - 5$$

$RMR_{89} < 23 \rightarrow$ No se puede utilizar el RMR_{89} para la obtención del GSI

Hoek recomienda hacer siempre referencia a un rango numérico y nunca a un solo valor del GSI y también sugiere la posibilidad, a falta de una apreciación directa en campo y solo para macizos rocosos caracterizados por un $GSI > 25$, de estimar este a partir del RMR de

Bieniawski, depurándolo del factor orientación de las discontinuidades y asignando 10 al factor agua. Russo (1998), propone estimar el GSI también a partir del índice Q de Barton, depurándolo del factor de tensión (*SRF*) y asignando 1 al parámetro agua (*J_w*), obteniendo luego, de acuerdo con la preexistente correlación entre Q y RMR:

$$GSI = 9 \lg Q' + 44.$$

2.2.6 Diseño de sostenimiento

La importancia de la interacción en el diseño de sostenimiento dependerá de los parámetros geomecánicos y operativos, siendo el pilar clave para una adecuada recomendación de sostenimiento. Esto con el objetivo de brindar un adecuado control de inestabilidad, la iteración conjunta, también es vital para seleccionar en forma óptima la alternativa de sostenimiento, salvaguardando los intereses de seguridad, productividad y de costos en el proyecto subterráneo. (Flores, 2013).

2.2.6.1 Parámetro geomecánico

La evaluación geomecánica de las labores, corresponde a un principio fundamental en la elección correcta de la técnica de sostenimiento. (Flores, 2013). La importancia del estudio del parámetro geomecánico, deberá considerar los siguientes parámetros básicos de estudio:

- * Calidad geomecánica de la zona inestable.
- * Análisis de la estabilidad estructuralmente controlada.
- * Niveles de esfuerzos presentes en la zona de trabajo.
- * Parámetros mecánicos del macizo rocoso
- * Análisis de factores de seguridad, simulaciones

2.2.6.2 Parámetro operativo

Flores (2013). Durante la evaluación de la labor minera, son analizados, por lo general, solo los factores geomecánicos para la selección de la alternativa de sostenimiento, sin considerar muchas veces los factores operativos. Es importante que los supervisores responsables de las recomendaciones de sostenimiento conozcan, no sólo las características geomecánicas de la labor, sino que deben asociar la operatividad minera. Dentro de los parámetros operativos de estudio, se tienen:

- * Tiempo de exposición.
- * Capacidad de carga.
- * Control de calidad de elementos de soporte
- * Análisis de factor de seguridad
- * Dimensionamiento.
- * Evaluación costo beneficio.

Los parámetros operativos básicos expuestos, no tienen un carácter absoluto, pudiendo adicionar más factores conforme a las características del proyecto subterráneo. De la misma forma este punto es aplicable para los factores geomecánicos.

2.2.6.3 Elementos de sostenimiento

Flores (2013). Conforme a la funcionalidad de soporte para el control de las inestabilidades del macizo rocoso, los elementos de sostenimiento son clasificados en dos categorías de soporte, ver Figura 12.

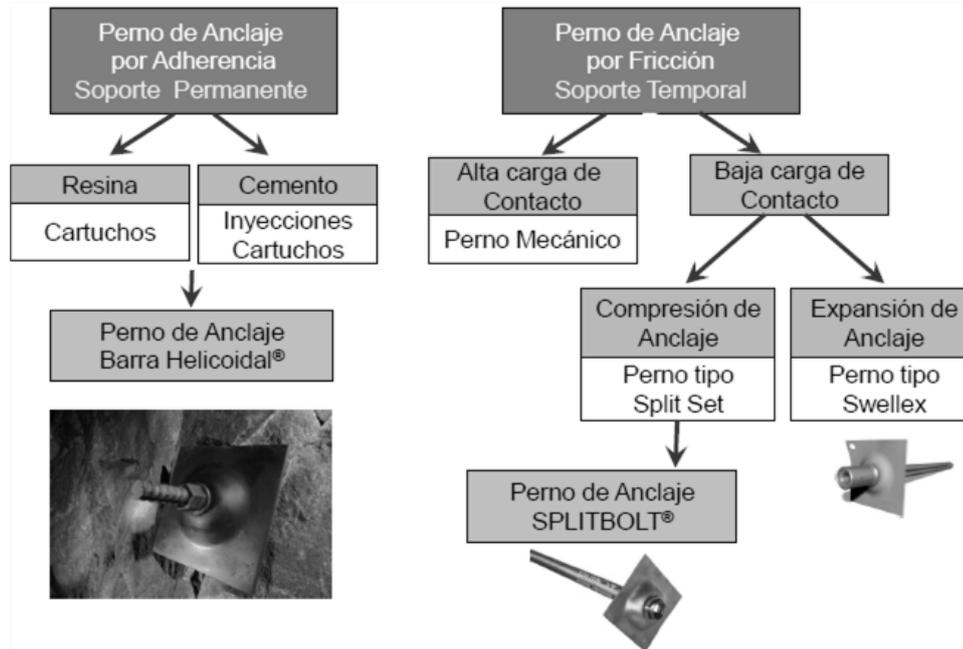


Figura 12. Clasificación de pernos de sostenimiento por refuerzo

Fuente: Flores, M. (2013). Diseño del soporte y reforzamiento del macizo rocoso. Rock Info consultoría en geomecánica minera.

* Sostenimiento por Refuerzo

* Sostenimiento por Soporte

Dicha clasificación se basa en la aplicabilidad de los elementos de sostenimiento con relación a su disposición en el macizo rocoso. Conforme a ello los elementos podrán ser aplicados como soporte interno, sostenimiento por refuerzo y como soporte externo (sostenimiento por soporte). La aplicabilidad de cada alternativa de soporte, obedecerá a la complejidad de la inestabilidad del macizo rocoso a sostener, características geomecánicas y a la disponibilidad operativa.

2.2.6.3.1 Sostenimiento por refuerzo.

Como lo indicáremos, la aplicabilidad de esta categoría de sostenimiento, corresponde a elementos de soporte dispuestos dentro del macizo rocoso. (Flores, 2013). Siendo sus exponentes los pernos de anclaje (bolt) y los cables de acero (cable bolting). Dentro de este esquema conforme al mecanismo de anclaje dentro del macizo rocoso; los pernos son clasificados en dos tipos de anclajes:

Los Anclajes por Adherencia. Son elementos que necesitan de una matriz para fijarse en el macizo rocoso. Dicha matriz es constituida por encapsulantes, los cuales tendrán que fusionarse con la barra de acero, alma del anclaje, a fin de constituir el anclaje. Ejemplo la Barra Helicoidal.

Los Anclajes por Fricción. No necesitan de una matriz cementante para fijarse en el taladro, generando presiones radiales a lo largo del anclaje instalado. Ejemplo los Split Set y Swellex.

2.2.6.3.2 Sostenimiento por soporte.

Flores (2013). Esta categoría de sostenimiento, corresponde a elementos de soporte dispuestos por fuera del macizo rocoso; teniendo como exponentes de este tipo de soporte:

- * Concreto lanzado (Shotcrete)
- * Arcos de acero (Cerchas y cimbras)
- * Los cuadros de sostenimiento (Madera)
- * Los wood pack (Pilares de madera)
- * Las mallas de aceros (Electro soldadas, de torsión y gallinero)

* Los straps (Cintas metálicas)

Se debe tener en consideración que muchos de los elementos de sostenimiento por Soporte se ven conjugados con los elementos de sostenimiento por Refuerzo, constituyéndose en un sistema de sostenimiento.

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Macizo rocoso

Conjunto de matriz rocosa y discontinuidades. Presenta carácter heterogéneo, comportamiento discontinuo y normalmente anisótropo, consecuencia de la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad, que condicionan su comportamiento geomecánico e hidráulico. (Apshana, Y. et al. 2011).

2.3.2 Caracterización

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

2.3.3 Discontinuidades

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

2.3.4 Sostenimiento

El término “sostenimiento” es usado para cubrir los diversos aspectos relacionados con el macizo rocoso en esencial es para minimizar las inestabilidades de la roca alrededor de las aberturas mineras con diferentes elementos utilizados. (SNMPE, 2004).

2.3.5 Clasificaciones geomecánicas

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

2.3.6 Dominios geotécnicos

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

2.3.7 Labores de desarrollo

Las labores mineras de desarrollo son excavaciones horizontales o poco inclinadas en roca estéril que permite accesar y explotar un yacimiento mineralizado, el ancho de la excavación dependerá del tipo de método a explotar y de los equipos a utilizar en el proceso. (Chura, W. Aporte personal).

2.4 Formulación de hipótesis

2.4.1 Hipótesis general

La caracterización geomecánica nos permitirá identificar zonas y dominios geotécnicos del macizo rocoso y lo que nos permitirá un diseño de sostenimiento para las labores de desarrollo.

2.4.2 Hipótesis específicos

Los parámetros geomecánicos a considerar dentro de la caracterización serán las propiedades de las discontinuidades y las propiedades del macizo rocoso el cual dará a conocer las zonas y dominios geotécnicos.

El diseño de sostenimiento para las labores de desarrollo dependerá del dominio geotécnico influyente en la inestabilidad del macizo rocoso.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo y diseño de investigación

El presente proyecto de investigación identificado como caracterización del macizo rocoso y diseño de sostenimiento, será siendo aplicada a una investigación del tipo descriptivo, que se caracteriza por describir las características a tomar en cuenta en su aplicación.

3.2 Población y muestra

3.2.1 Población

La población de estudio se considerara a la U.E.A., Ana María - La Rinconada.

3.2.2 Muestra

Como muestra se tomara la labor de desarrollo denominado proyecto “Cobra” con una longitud de 750 metros, con una sección de 3 x 3 metros perteneciente a la Empresa Especializada JB de la U.E.A., Ana María – La Rinconada.

3.3 Operacionalización de variables

3.3.1 Variables

Variable independiente: Caracterización geomecánica del macizo rocoso en la U.E.A., Ana María – La Rinconada, observar Cuadro 15.

Variable dependiente: Diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la U.E.A., Ana María – La Rinconada, observar Cuadro 15.

3.3.2 Operación de variables

CUADRO 15

Operacionalización de variables

Variable(s)	Dimensión(es)	Indicador(es)	Categoría(s)	Índice(s)	Instrumento(s)
V.I.	Caracterización	Calidad del macizo rocoso	Zonas y dominios geotécnicos	RQD RMR Q	Esclerómetro, brújula, distancio metro, picca.
V.D.	Sostenimiento	Tipo de roca	Sostenimiento por refuerzo o soporte	Factor de seguridad	Tablas y ábacos

Fuente: Elaboración propia del tesista.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos para la recolección de datos, que se realizara en la caracterización geomecánica del macizo rocoso y correlación, son los siguientes:

01 Brújula marca Brunton.

01 Distancio metro marca Leika.

01 Esclerómetro marca Proeti.

01 Flexo metro milimétrico marca Tools.

01 Picsa.

01 Wincha de 50 m.

Equipos de utilería para registrar los datos tomados en campo.

Tableros acrílico A4.

Formatos de registro.

Planos topo Figuras.

Ábacos y tablas.

Libretas de campo.

* Los formatos de registro se considera dentro de los Anexos 2 y 3.

Preparación de muestras para ensayos y equipos de ensayo de rocas.

Sonda saca testigos.

Cortadora de disco diamantino.

Balanza electrónica con precisión a 0.01 g.

Equipo de compresión uniaxial.

3.5 Ámbito de estudio

3.5.1 Ubicación y acceso

La U.E.A., Ana María – La Rinconada, se ubica en el Sur de Perú a unos 70 km al N del Lago Titicaca en la vertiente SW de la Cordillera Oriental (Sandia-Ananea) entre 4800 y 5200 m.s.n.m., al pie de los heleros del Macizo de Ananea, en la circunscripción político administrativa, de los centros poblados de La Rinconada y

Lunar de Oro, en el distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno, (Antenor, 1996). En las siguientes coordenadas, observar el Anexo 21.

UTM:

N : 8 383 230.269

E : 451 924.491

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Propiedades físico – mecánico del macizo rocoso

4.1.1 Porosidad

La pizarra es una roca metamórfica homogénea formada por la compactación de arcillas, La pizarra es una roca densa, de grano fino, formada a partir de rocas sedimentarias arcillosas y, en algunas ocasiones, de rocas ígneas. La principal característica de la pizarra es su división en finas láminas o capas (pizarrosidad). Los minerales que la forman son principalmente cuarzo y moscovita, suele ser de color negro azulado o negro grisáceo, pero existen variedades y otros tonos. Es altamente impermeable, ver Cuadro 16.

La cuarcita es una roca metamórfica dura con alto contenido de cuarzo. En composición la mayoría de las cuarcitas llegan a ser más de 90 % de cuarzo y algunas incluso 99 %, las cuarcita se forma por re cristalización a altas temperaturas y presión, carece de foliación y tiene una meteorización lenta. (Blanco, 2005).

CUADRO 16

Relación de densidad y porosidad

Tipo de roca	Densidad (kg/m³)	Porosidad (%)
Pizarra	2600 - 2700	0.1 - 0.5
Cuarcita	2650 - 2750	0.1 - 0.5

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

4.1.2 Contenido de agua

Pizarra y cuarcita, el contenido de agua que presentan las rocas en mención está muy ligado a la porosidad que presentan, como se observa en los Cuadros 17 y 18, debido a su alta impermeabilidad las rocas metamórficas indicadas se asemejan debido a su composición mineralógica y al tipo de grano que presentan en su estructura, pruebas realizadas en laboratorio indican el contenido de agua mostradas en los siguientes cuadros. (Blanco, 2005).

CUADRO 17

Contenido de agua roca pizarra

	Muestra-001	Muestra-002	Muestra-003
Peso tara (g)	47.60	48.60	47.00
Peso muestra húmeda + tara (g)	131.20	115.00	124.30
Peso muestra seca + tara (g)	131.17	114.94	124.18
Peso agua (g)	0.03	0.06	0.12
Peso muestra húmeda (g)	83.60	66.40	77.30
Peso muestra seca (g)	83.57	66.34	77.18
W (%)	0.04	0.09	0.16
Promedio	0.09		

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. (2015). Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

CUADRO 18

Contenido de agua roca cuarcita

	Muestra-001	Muestra-002	Muestra-003
Peso tara (g)	45.00	47.10	47.50
Peso muestra húmeda + tara (g)	73.00	84.16	110.80
Peso muestra seca + tara (g)	72.96	84.13	110.79
Peso agua (g)	0.04	0.03	0.01
Peso muestra húmeda (g)	28.00	37.06	63.30
Peso muestra seca (g)	27.96	37.03	63.29
W (%)	0.14	0.08	0.02
Promedio	0.08		

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. (2015). Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

4.1.3 Densidad

La roca pizarra y cuarcita presenta una densidad promedio, como se muestra en el Cuadro 16, pruebas realizadas en laboratorio en gamma natural y asumiendo el contenido de agua en campo (in situ) de los núcleos, se muestran en los siguientes Cuadros 19 y 20. (Blanco, 2005).

CUADRO 19

Densidad de la roca pizarra

	Peso (g)	Volumen (cm ³)	In situ w (%)	Densidad
Muestra-001	442.37	139.64	0.20	2.64
Muestra-002	438.91	138.55	0.20	2.64
Muestra-003	438.40	138.39	0.20	2.64

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. (2015). Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

CUADRO 20

Densidad de la roca cuarcita

	Peso (g)	Volumen (cm³)	In situ w (%)	Densidad
Muestra-001	442.87	139.80	0.15	2.75
Muestra-002	439.90	138.86	0.15	2.75
Muestra-003	443.13	139.88	0.15	2.75

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. (2015). Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

4.1.4 Deformación

La deformación de la roca pizarra y cuarcita, cuando se somete los núcleos de roca a una carga en ambos casos estas tiende a una ruptura, por lo que al estudiar su deformación mediante gráficas conocidas como Esfuerzo-Deformación, da del tipo “C” tal como se muestra en las Figuras 13, 14 y 15. (González, 2002).

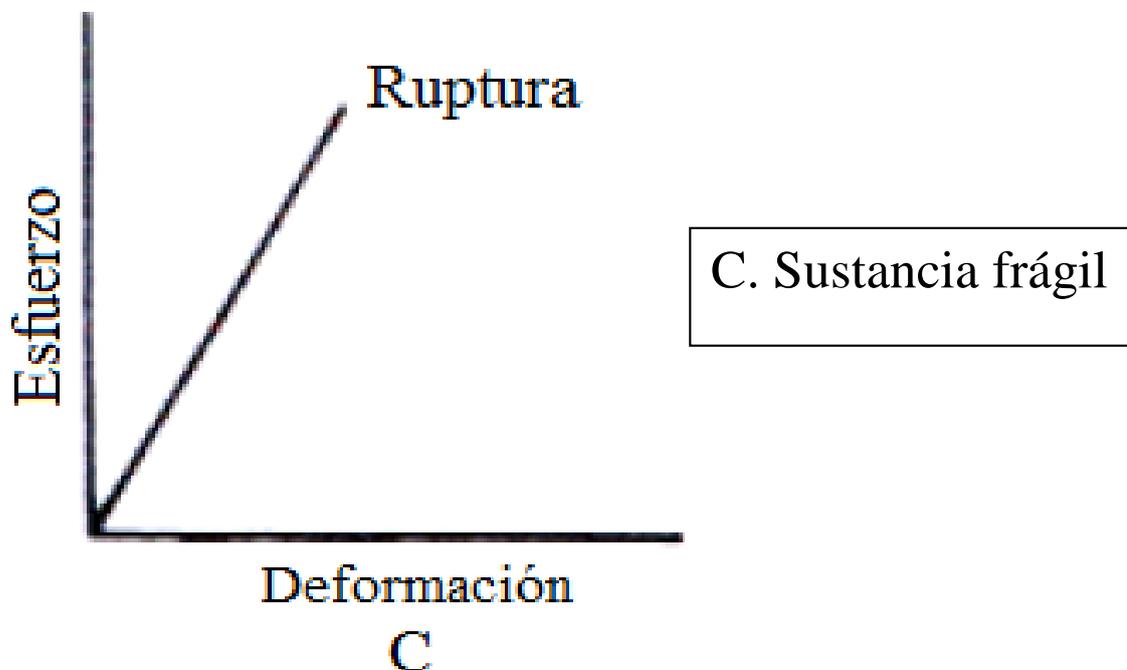


Figura 13. Curva de deformación para roca pizarra y cuarcita tipo “C”

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

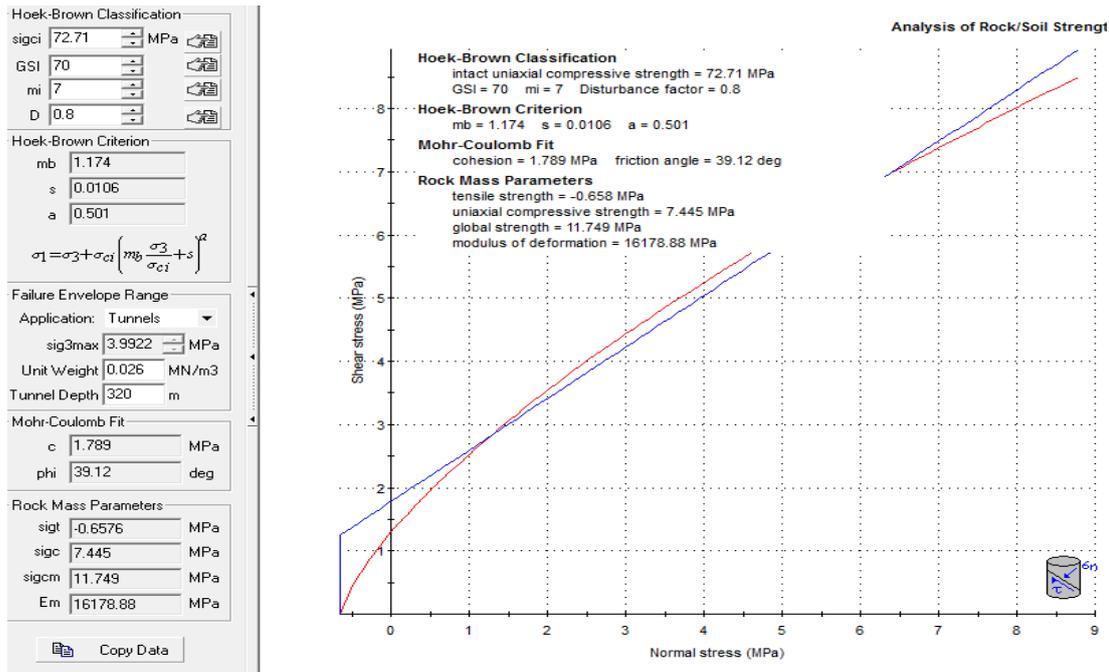


Figura 14. Curva de deformación para roca pizarra en software Rocdata

Fuente: Elaboración propia de tesista.

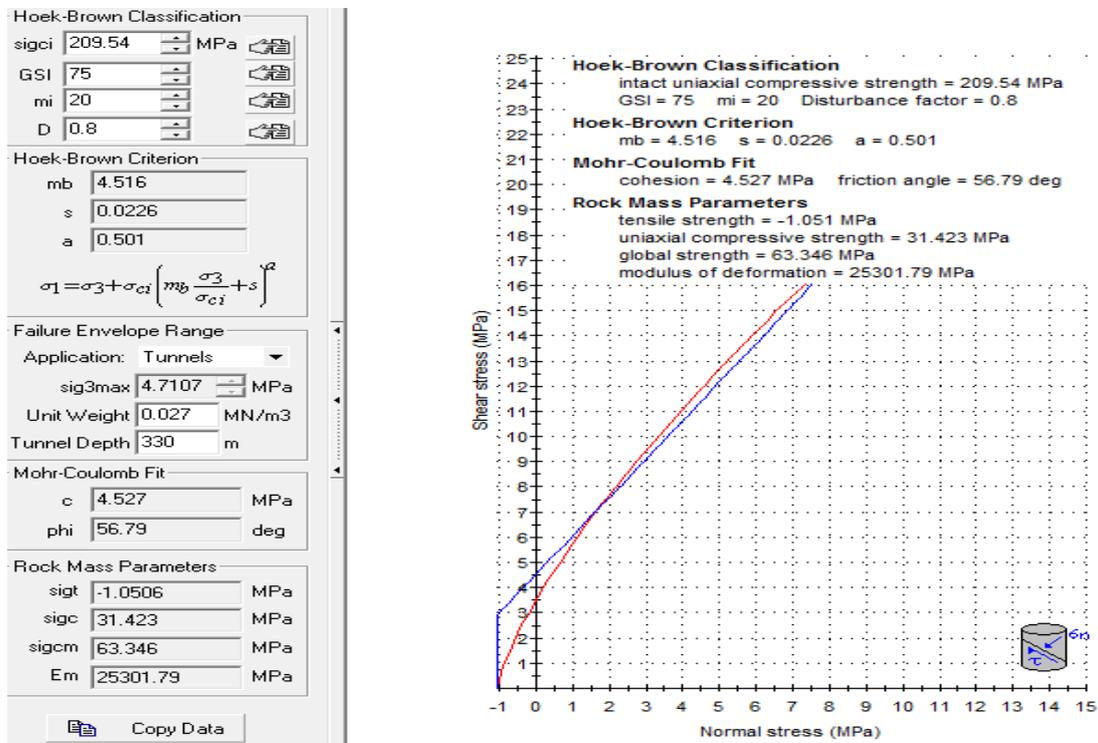


Figura 15. Curva de deformación para roca cuarcita en software Rocdata

Fuente: Elaboración propia de tesista.

4.1.5 Resistencia

Es el esfuerzo máximo que puede soportar una roca sin romperse, esta propiedad mecánica de la roca se puede determinar tanto en laboratorio y en el sitio mismo del proyecto. (González, 2002).

Resistencia a la compresión simple de los núcleos de pizarra y cuarcita, muestran los datos en los Cuadros 21, 22 y 23, que están definidos por:

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

Dónde:

σ_c = Resistencia a la compresión.

F = Fuerza aplicada hasta la rotura

A = Sección inicial de la muestra normal a la dirección de la fuerza.

CUADRO 21

Ensayo de resistencia a la compresión simple de la roca pizarra

ID	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Relación L/D	Carga (kg-f)	UCS (MPa)	Tipo Rotura
SF-1-1	4.46	8.94	15.62	2.0	7800	48.96	Fractura
SF-1-2	4.45	8.91	15.55	2.0	14770	93.13	Matriz
SF-1-3	4.45	8.90	15.55	2.0	12060	76.04	Matriz

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. (2015). Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

CUADRO 22

Ensayo de resistencia a la compresión simple de la roca cuarcita

ID	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Relación L/D	Carga (kg-f)	UCS (MPa)	Tipo Rotura
SF-2-1	4.46	8.95	15.62	2.0	43050	270.23	Matriz
SF-2-2	4.45	8.93	15.55	2.0	16710	105.36	Fractura
SF-2-3	4.47	8.91	15.69	2.0	40490	253.03	Matriz

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. (2015). Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

CUADRO 23

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

RESISTENCIA EN MPa	CONDICIÓN	DESCRIPCIÓN
80 a 160	Resistencia alta	Ígneas competentes, metamórficas; y algunas areniscas de grano fino (pizarra)
160 a 320	Resistencia muy alta	Cuarcitas ; rocas ígneas densas de grano fino

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

4.2 Caracterización del macizo rocoso

Dentro de la caracterización del macizo rocoso algunos de estos parámetros, como la rugosidad, espaciado, continuidad, meteorización de juntas, apertura, presencia de agua y relleno, determinan el comportamiento mecánico y la resistencia al corte de las discontinuidades, todos estos parámetros son tomados en campo por estaciones, mostrados en los siguientes cuadros. (Ferrer, M. et al., 1999).

4.2.1 Caracterización geomecánica por estaciones

Se realizara la toma de datos en el proyecto por estaciones detalladas en las fichas geomecánicas, como se detalla en los Cuadros 24, 25, 26, 27, 28 y 29.

CUADRO 24

Estación N° 1 de toma de datos en la ficha geomecánica

ESTACIÓN GEOMECAÁNICA										
Litología:	Pizarra	Formación:	Sandia	Fecha:	01/09/2015					
Coordenadas:	X: 451 900			Y: 8 383 394			Z: 4 842			
Dirección de labor: 85°										
MEDIDAS	LECTURAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de plano	J	J	J	E	J	J	J			
Dip. Buz. (DIP-DIR)	172	60	106	170	153	75	98			
Buzamiento (DIP)	77	28	36	3	81	61	40			
ESPACIADO										
> 2000 mm					X	X				
600 – 2000 mm		X					X			
200 – 600 mm	X		X	X						
60 – 200 mm										
< 60 mm										
CONTINUIDAD										
< 1 m	X	X	X		X	X	X			
1 – 3 m				X						
3 – 10 m										
10 – 20 m										
> 20 m										
APERTURA										
Nada			X	X		X	X			
< 0.1 mm	X	X			X					
0.1 – 1.0 mm										
1 – 5 mm										
> 5 mm										
RUGOSIDAD										
Ondulación	LR	S	LR	LR	LR	LR	LR			
JRC	4-6	3	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6			
METOR. JUNTAS										
Grado	II	II	II	II	II	II	II			
AGUA										
Seco										
Lig. Húmedo										
Húmedo	X	X	X	X	X	X	X			
Goteando										
Fluyendo										
RELLENO										
Naturaleza	OX	OX	OX	OX	OX	OX	OX			
Espesor mm	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1			

MARTILLO SCHMIDT						MEDIA
MATRIZ						
JUNTAS	22	32	36	30	32	31
	30	34	34	32	30	
JCS MPa						22
DATOS PARA RQD						
Fracturas / metro	λ				11	
Juntas / m ³	J _v					
Ensayo Tilt-Test	ϕ Básico					

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geo mecánica aplicado a la minería, Escuela de post grado

Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

CUADRO 25

Estación N° 2 de toma de datos en la ficha geomecánica

ESTACIÓN GEOMECAÁNICA										
Litología:	Pizarra	Formación:	Sandia	Fecha:	03/09/2015					
Coordenadas:	X: 452 060			Y: 8 383 413			Z: 4 845			
Dirección de labor: 68°										
MEDIDAS	LECTURAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de plano	J	J	J	J	J	E	J			
Dip. Buz. (DIP-DIR)	189	191	192	188	82	140	109			
Buzamiento (DIP)	83	90	90	84	32	10	33			
ESPACIADO										
> 2000 mm							X			
600 – 2000 mm					X					
200 – 600 mm	X	X	X	X		X				
60 – 200 mm										
< 60 mm										
CONTINUIDAD										
< 1 m				X			X			
1 – 3 m	X	X	X							
3 – 10 m					X	X				
10 – 20 m										
> 20 m										
APERTURA										
Nada		X		X	X	X	X			
< 0.1 mm	X									
0.1 – 1.0 mm			X							
1 – 5 mm										
> 5 mm										
RUGOSIDAD										

Ondulación	LR									
JRC	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6			
METOR. JUNTAS										
Grado	I	I	I	I	I	I	I			
AGUA										
Seco	X	X	X	X	X	X	X			
Lig. Húmedo										
Húmedo										
Goteando										
Fluyendo										
RELLENO										
Naturaleza	AR	-	AR	-	-	-	-			
Espesor mm	0-1	-	0-1	-	-	-	-			

MARTILLO SCHMIDT						MEDIA
MATRIZ						
JUNTAS	42	30	32	38	30	36
	36	38	32	38	40	
JCS MPa						29
DATOS PARA RQD						
Fracturas / metro	λ				4	
Juntas / m ³	J _v					
Ensayo Tilt-Test	ϕ Básico					

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geo mecánica aplicado a la minería, Escuela de post grado

Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

CUADRO 26

Estación N° 3 de toma de datos en la ficha geomecánica

ESTACIÓN GEOMECAÁNICA										
Litología:	Pizarra	Formación:	Sandia	Fecha:	05/09/2015					
Coordenadas:	X: 452 258			Y: 8 383 447			Z: 4 847			
Dirección de labor: 92°										
MEDIDAS	LECTURAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de plano	E	J	J							
Dip. Buz. (DIP-DIR)	93	331	129							
Buzamiento (DIP)	4	90	64							
ESPACIADO										
> 2000 mm										
600 – 2000 mm		X								
200 – 600 mm										

60 – 200 mm	X		X						
< 60 mm									
CONTINUIDAD									
< 1 m									
1 – 3 m		X	X						
3 – 10 m	X								
10 – 20 m									
> 20 m									
APERTURA									
Nada									
< 0.1 mm	X								
0.1 – 1.0 mm			X						
1 – 5 mm		X							
> 5 mm									
RUGOSIDAD									
Ondulación	S	LR	LR						
JRC	2-4	6-8	8-10						
METOR. JUNTAS									
Grado	II	II	II						
AGUA									
Seco									
Lig. Húmedo	X	X	X						
Húmedo									
Goteando									
Fluyendo									
RELLENO									
Naturaleza	AR	AR	AR						
Espesor mm	0-1	0-1	0-1						

MARTILLO SCHMIDT						MEDIA
MATRIZ						
JUNTAS	39	30	40	37	43	38
	37	24	46	45	38	
JCS MPa						32
DATOS PARA RQD						
Fracturas / metro	λ				9	
Juntas / m³	Jv					
Ensayo Tilt-Test	ϕ Básico					

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geo mecánica aplicado a la minería, Escuela de post grado

Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

CUADRO 27

Estación N° 4 de toma de datos en la ficha geomecánica

ESTACIÓN GEOMECÁNICA										
Litología:	Pizarra	Formación:	Sandía	Fecha:	08/09/2015					
Coordenadas:	X: 452 461			Y: 8 383 450			Z: 4 848			
Dirección de labor: 86°										
MEDIDAS	LECTURAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de plano	J	J	J	J	J	J	E	E	E	E
Dip. Buz. (DIP-DIR)	186	104	105	144	108	210	145	155	200	182
Buzamiento (DIP)	84	89	85	81	89	88	10	5	0	3
ESPACIADO										
> 2000 mm										
600 – 2000 mm		X		X		X	X			
200 – 600 mm	X		X		X			X	X	X
60 – 200 mm										
< 60 mm										
CONTINUIDAD										
< 1 m		X	X				X	X	X	X
1 – 3 m	X			X	X	X				
3 – 10 m										
10 – 20 m										
> 20 m										
APERTURA										
Nada	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
< 0.1 mm										
0.1 – 1.0 mm										
1 – 5 mm										
> 5 mm										
RUGOSIDAD										
Ondulación	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR	LR
JRC	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6
METOR. JUNTAS										
Grado	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
AGUA										
Seco										
Lig. Húmedo	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Húmedo										
Goteando										
Fluyendo										
RELLENO										
Naturaleza	OX	OX	OX	OX	OX	OX	OX	OX	OX	OX
Espesor mm	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1	0-1

MARTILLO SCHMIDT						MEDIA
MATRIZ						
JUNTAS	42	28	34	36	42	36
	34	40	36	38	34	
JCS MPa						29
DATOS PARA RQD						
Fracturas / metro	λ					4
Juntas / m ³	J _v					
Ensayo Tilt-Test	ϕ Básico					

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geo mecánica aplicado a la minería, Escuela de post grado

Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

CUADRO 28

Estación N° 5 de toma de datos en la ficha geomecánica

ESTACIÓN GEOMECAÁNICA										
Litología:	Pizarra	Formación:	Sandia	Fecha:	10/09/2015					
Coordenadas:	X: 452 497			Y: 8 383 337			Z: 4 841			
Dirección de labor: 148°										
MEDIDAS	LECTURAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de plano	E	E	J	J	J					
Dip. Buz. (DIP-DIR)	165	150	100	180	85					
Buzamiento (DIP)	20	18	68	74	80					
ESPACIADO										
> 2000 mm										
600 – 2000 mm		X	X	X	X					
200 – 600 mm										
60 – 200 mm	X									
< 60 mm										
CONTINUIDAD										
< 1 m										
1 – 3 m			X	X	X					
3 – 10 m										
10 – 20 m	X	X								
> 20 m										
APERTURA										
Nada		X	X							
< 0.1 mm										
0.1 – 1.0 mm				X	X					
1 – 5 mm	X									
> 5 mm										
RUGOSIDAD										
Ondulación	O	O	S	LR	LR					
JRC	6-8	4-6	2	3	3					

METOR. JUNTAS										
Grado	IV-VI	I	I	I	II					
AGUA										
Seco		X								
Lig. Húmedo										
Húmedo			X	X	X					
Goteando	X									
Fluyendo										
RELLENO										
Naturaleza	OX			OX	OX					
Espesor mm	1			0-1	0-1					

MARTILLO SCHMIDT						MEDIA
MATRIZ						
JUNTAS	50	42	45	42	45	45
	46	44	47	40	45	
JCS MPa						43
DATOS PARA RQD						
Fracturas / metro		λ			4	
Juntas / m ³		Jv				
Ensayo Tilt-Test		ϕ Básico				

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geo mecánica aplicado a la minería, Escuela de post grado

Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

CUADRO 29

Estación N° 6 de toma de datos en la ficha geomecánica

ESTACIÓN GEOMECAÁNICA										
Litología:	Cuarcita	Formación:	Sandia	Fecha:	12/09/2015					
Coordenadas:	X: 452 612			Y: 8 383 304			Z: 4 836			
Dirección de labor: 89°										
MEDIDAS	LECTURAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de plano	J	J	J	J	J	J	E	E	E	E
Dip. Buz. (DIP-DIR)	91	83	84	76	85	81	176	354	358	187
Buzamiento (DIP)	84	85	86	68	76	82	38	41	44	35
ESPACIADO										
> 2000 mm		X								
600 – 2000 mm	X		X	X					X	X
200 – 600 mm					X		X			
60 – 200 mm										
< 60 mm						X		X		

CONTINUIDAD										
< 1 m				X	X	X	X	X	X	
1 – 3 m	X	X	X							X
3 – 10 m										
10 – 20 m										
> 20 m										
APERTURA										
Nada			X	X	X	X	X	X	X	X
< 0.1 mm		X								
0.1 – 1.0 mm	X									
1 – 5 mm										
> 5 mm										
RUGOSIDAD										
Ondulación	LR									
JRC	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	4-6	6-8	6-8	6-8	6-8
METOR. JUNTAS										
Grado	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
AGUA										
Seco	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Lig. Húmedo										
Húmedo										
Goteando										
Fluyendo										
RELLENO										
Naturaleza	AR	AR	-	-	-	-	-	-	-	-
Espesor mm	0-1	0-1	-	-	-	-	-	-	-	-

MARTILLO SCHMIDT						MEDIA
MATRIZ						
JUNTAS	50	47	40	54	45	
	49	51	35	36	45	45
JCS MPa						43
DATOS PARA RQD						
Fracturas / metro	λ				2	
Juntas / m³	Jv					
Ensayo Tilt-Test	ϕ Básico					

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geo mecánica aplicado a la minería, Escuela de post grado

Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

4.3 Clasificación geomecánica

La clasificación geomecánica tienen como objetivo el de proporcionar una evaluación geomecánica del macizo rocoso que se estudia a partir de ensayos simples y observaciones de campo, hay diferentes tipos de clasificaciones las cuales tomaremos en cuenta será: RQD, RMR y Q, adicionalmente se tomara en consideración el GSI, como un sistema para la estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo.

4.3.1 Designación de la calidad de rocas (RQD)

La Designación de la calidad de Rocas (Rock Quality Designation) fue desarrollado por Deere et al. (1967), para estimar cuantitativamente la cualidad del macizo rocoso basándose en la recuperación de un testigo. En el caso del presente estudio no se disponen de sondeos, una alternativa para el cálculo del RQD es a partir de la siguiente ecuación, cuyos resultados se muestran en los Cuadros 30, 31, 32, 33, 34 y 35.

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

Donde λ es el número de juntas por metro lineal.

CUADRO 30

RQD estación N° 1

ESTACIÓN GEOMECÁNICA					
Litología:	Pizarra	Formación:	Sandia	Fecha:	01/09/2015
Coordenadas:	X: 451 900		Y: 8 383 394		Z: 4 842
Dirección de labor: 85°					
RQD					
Fracturas / metro	λ			11	
RQD	%			70	
Calidad de roca	50 - 75			Regular	

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geo mecánica aplicado a la minería, Escuela de post grado

Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

CUADRO 31

RQD estación N° 2

ESTACIÓN GEOMECÁNICA					
Litología:	Pizarra	Formación:	Sandia	Fecha:	03/09/2015
Coordenadas:	X: 452 060		Y: 8 383 413		Z: 4 845
Dirección de labor: 68°					
RQD					
Fracturas / metro	λ			4	
RQD	%			94	
Calidad de roca	90 - 100			Excelente	

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geo mecánica aplicado a la minería, Escuela de post grado

Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

CUADRO 32

RQD estación N° 3

ESTACIÓN GEOMECÁNICA					
Litología:	Pizarra	Formación:	Sandia	Fecha:	05/09/2015
Coordenadas:	X: 452 258		Y: 8 383 447		Z: 4 847
Dirección de labor: 92°					
RQD					
Fracturas / metro	λ			9	
RQD	%			77	
Calidad de roca	75 - 90			Buena	

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geo mecánica aplicado a la minería, Escuela de post grado

Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

CUADRO 33

RQD estación N° 4

ESTACIÓN GEOMECÁNICA					
Litología:	Pizarra	Formación:	Sandía	Fecha:	08/09/2015
Coordenadas:	X: 452 461		Y: 8 383 450		Z: 4 848
Dirección de labor: 86°					
RQD					
Fracturas / metro	λ		4		
RQD	%		94		
Calidad de roca	90 - 100		Excelente		

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geo mecánica aplicado a la minería, Escuela de post grado

Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

CUADRO 34

RQD estación N° 5

ESTACIÓN GEOMECÁNICA					
Litología:	Pizarra	Formación:	Sandía	Fecha:	10/09/2015
Coordenadas:	X: 452 497		Y: 8 383 337		Z: 4 841
Dirección de labor: 148°					
RQD					
Fracturas / metro	λ		4		
RQD	%		94		
Calidad de roca	90 - 100		Excelente		

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geo mecánica aplicado a la minería, Escuela de post grado

Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

CUADRO 35

RQD estación N° 6

ESTACIÓN GEOMECÁNICA					
Litología:	Cuarcita	Formación:	Sandía	Fecha:	12/09/2015
Coordenadas:	X: 452 612		Y: 8 383 304		Z: 4 836
Dirección de labor: 89°					
RQD					
Fracturas / metro	λ		2		
RQD	%		98		
Calidad de roca	90 - 100		Excelente		

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geo mecánica aplicado a la minería, Escuela de post grado

Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

4.3.2 Valoración del macizo rocoso (RMR)

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

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

(1) Resistencia del material intacto que se obtiene mediante ensayo de carga puntual o compresión simple

(2) RQD

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

(4) Condición de las discontinuidades, que incluye:

i. Longitud de la discontinuidad

ii. Abertura

iii. Rugosidad

iv. Relleno

v. Alteración

(5) Presencia de agua subterránea

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

$$RMR = (1) + (2) + (3) + (4) + (5)$$

Una vez obtenido el RMR para el macizo, como se detalla en los Cuadros 36, 37, 38, 39, 40 y 41., se pueden obtener los parámetros resistentes, cohesión y el ángulo de fricción, parámetros resistentes del criterio de Mohr-Coulomb. En las siguientes ecuaciones se muestran las relaciones entre RMR y los parámetros resistentes.

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

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

Donde c es la cohesión y ϕ es el ángulo de fricción.

CUADRO 36

RMR₈₉ estación N° 1

Parámetros		Rango de valores							Σ	
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa				4
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa	
	Valor	15	12	7	4	2	1	0		
2	RQD	90-	75-90%	50-75%	25-50%	25%			13	
	Valor	20	17	13	8	3				
3	Espaciado de las discontinuidades	> 2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	6-20 cm	< 6 cm			10	
	Valor	20	15	10	8	5				
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m			20
		Valor	6	4	2	1	0			
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1-1.0	1-5 mm	> 5 mm			
	Valor	6	5	3	1	0				
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave				
	Valor	6	5	3	1	0				
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm				
Valor	6	4	2	2	0					

		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta	
		Valor	6	5	3	1	0	
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5	7
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo	
		Valor	15	10	7	4	0	
SUB TOTAL								54
Dirección y buzamiento			Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable	Σ
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12	-5	
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60		
TOTAL								49
CLASE		I	II	III	IV	V		
Calidad		Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala		
RMR		81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	0 - 20		
Cohesión MPa		0.24						
Angulo de fricción		29.5°						
RMR estación		49 - III						

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

CUADRO 37

RMR₈₉ estación N° 2

Parámetros		Rango de valores							Σ	
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa				4
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa	
	Valor	15	12	7	4	2	1	0		
2	RQD	90-	75-90%	50-75%	25-50%	25%			20	
	Valor	20	17	13	8	3				
3	Espaciado de las discontinuidades	> 2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	6-20 cm	< 6 cm			10	
	Valor	20	15	10	8	5				
4	las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m			25
		Valor	6	4	2	1	0			
	Abertura	Nada	< 0.1	0.1-1.0	1-5 mm	> 5 mm				

	Valor	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
	Valor	6	5	3	1	0		
	Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm		
	Valor	6	4	2	2	0		
	Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
	Valor	6	5	3	1	0		
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5	15
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo	
		Valor	15	10	7	4	0	
SUB TOTAL							74	
Dirección y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable	Σ	
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12	0	
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60		
TOTAL								
CLASE	I	II	III	IV	V			
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala			
RMR	81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	0 - 20			
Cohesión MPa	0.37							
Angulo de fricción	42°							
RMR estación	74 - II							

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

CUADRO 38

RMR₈₉ estación N° 3

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

SUB TOTAL							54
Dirección y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable	Σ
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12	0
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25	
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60	
TOTAL							
CLASE	I	II	III	IV	V		
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala		
RMR	81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	0 - 20		
Cohesión MPa	0.27						
Angulo de fricción	32°						
RMR estación	54 - III						

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

CUADRO 39

RMR₈₉ estación N° 4

Parámetros		Rango de valores							Σ	
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa				4
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa	
	Valor	15	12	7	4	2	1	0		
2	RQD	90-	75-90%	50-75%	25-50%	25%			20	
	Valor	20	17	13	8	3				
3	Espaciado de las discontinuidades	> 2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	6-20 cm	< 6 cm			10	
	Valor	20	15	10	8	5				
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m			26
		Valor	6	4	2	1	0			
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1-1.0	1-5 mm	> 5 mm			
		Valor	6	5	3	1	0			
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave			
		Valor	6	5	3	1	0			
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5	Relleno duro > 5	Relleno blando < 5	Relleno blando > 5 mm			
		Valor	6	4	2	2	0			
Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta					
Valor	6	5	3	1	0					

5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5	10
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo	
	Valor	15	10	7	4	0		
SUB TOTAL								70
Dirección y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable	Σ	
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12	-2	
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60		
TOTAL								68
CLASE		I	II	III	IV	V		
Calidad		Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala		
RMR		81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	0 - 20		
Cohesión MPa		0.34						
Angulo de fricción		39°						
RMR estación		68 - II						

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

CUADRO 40

RMR₈₉ estación N° 5

Parámetros		Rango de valores							Σ	
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa				4
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa	
	Valor	15	12	7	4	2	1	0		
2	RQD	90-	75-90%	50-75%	25-50%	25%			20	
	Valor	20	17	13	8	3				
3	Espaciado de las discontinuidades	> 2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	6-20 cm	< 6 cm			15	
	Valor	20	15	10	8	5				
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m			13
		Valor	6	4	2	1	0			
	Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1-1.0 mm	1-5 mm	> 5 mm				
	Valor	6	5	3	1	0				

		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligera mente rugosa	Ondulada	Suave	
		Valor	6	5	3	1	0	
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm	
		Valor	6	4	2	2	0	
		Alteración	Inalterada	Ligera mente alterada	Moderada mente alterada	Muy alterada	Descompuesta	
		Valor	6	5	3	1	0	
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5	7
		Condiciones generales	Completa mente secas	Ligera mente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo	
		Valor	15	10	7	4	0	
SUB TOTAL								59
Dirección y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable	Σ	
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12	-2	
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60		
TOTAL								
CLASE		I	II	III	IV	V		
Calidad		Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala		
RMR		81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	0 - 20		
Cohesión MPa		0.28						
Angulo de fricción		33.5°						
RMR estación		57 - III						

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

CUADRO 41

RMR₈₉ estación N° 6

Parámetros		Rango de valores							Σ	
1	Resistencia de la roca intacta	Ensayo carga puntual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa				4
		Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa	
		Valor	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD	90-	75-90%	50-75%	25-50%	25%			20	
	Valor	20	17	13	8	3				

3	Espaciado de las discontinuidades	> 2 m	0.6-2 m	0.2-0.6 m	6-20 cm	< 6 cm	15	
	Valor	20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m	27
		Valor	6	4	2	1	0	
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1-1.0	1-5 mm	> 5 mm	
		Valor	6	5	3	1	0	
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave	
		Valor	6	5	3	1	0	
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5 mm	Relleno duro > 5 mm	Relleno blando < 5 mm	Relleno blando > 5 mm	
		Valor	6	4	2	2	0	
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta	
		Valor	6	5	3	1	0	
5	Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua / Pprinc	0	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5	15
		Condiciones generales	Completamente secas	Ligeramente húmedas	Húmedas	Goteando	Agua fluyendo	
		Valor	15	10	7	4	0	
SUB TOTAL							81	
Dirección y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Medio	Desfavorable	Muy desfavorable	Σ	
Valoración para	Túneles	0	-2	-5	-10	-12	-12	
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60		
TOTAL							69	
CLASE	I	II	III	IV	V			
Calidad	Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala			
RMR	81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	0 - 20			
Cohesión MPa	0.34							
Angulo de fricción	39.5°							
RMR estación	69 - II							

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

4.3.3 Índice (Q)

Desarrollado por el NGI (Instituto Geotécnico Noruego), basado en un gran número de casos históricos en Escandinavia. (Barton, et al 1974). Propuso un Índice de Calidad de Túneles (Q) para la determinación de las características del macizo rocoso y los requerimientos de soporte del túnel. El valor numérico del índice Q varía en una escala logarítmica de 0,001 a un máximo de 1000, como se muestra en los Cuadros 42, 43, 44, 45, 46 y 47.

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

Dónde:

RQD : Designación de la calidad de la roca

J_n : Número de familias de discontinuidades

J_r : Numero de rugosidad de las discontinuidades

J_a : Numero de alteración de las discontinuidades

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

SRF : Factor de reducción por tensiones.

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

CUADRO 42

Q estación N° 1

ESTACIÓN GEOMECAÁNICA								
Familia	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Q Est.
1	70	6	1.5	2	1	2.5	3.5	4.67
2	70	6	1.5	2	1	2.5	3.5	
3	70	3	1.5	2	1	2.5	7	
CLASIFICACIÓN FINAL Q								
Calidad				Valoración		Estación Q		
Excepcionalmente malo				< 0.01		<p style="text-align: center;">4.67</p> <p style="text-align: center;">Medio 4 - 10</p>		
Extremadamente malo				0.01 – 0.1				
Muy malo				0.1 – 1				
Malo				1 – 4				
Medio				4 – 10				
Bueno				10 – 40				
Muy bueno				40 – 100				
Extremadamente bueno				100 – 400				
Excepcionalmente bueno				> 400				

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 43

Q estación N° 2

ESTACIÓN GEOMECAÁNICA								
Familia	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Q Est.
1	94	6	1.5	1	1	1	23.5	31.33
2	94	6	1.5	1	1	1	23.5	
3	94	3	1.5	1	1	1	47	
CLASIFICACIÓN FINAL Q								
Calidad				Valoración		Estación Q		
Excepcionalmente malo				< 0.01		<p style="text-align: center;">31.33</p> <p style="text-align: center;">Bueno 10 - 40</p>		
Extremadamente malo				0.01 – 0.1				
Muy malo				0.1 – 1				
Malo				1 – 4				
Medio				4 – 10				
Bueno				10 – 40				
Muy bueno				40 – 100				
Extremadamente bueno				100 – 400				
Excepcionalmente bueno				> 400				

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 44

Q estación N° 3

ESTACIÓN GEOMECAÁNICA								
Familia	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Q Est.
1	77	3	1	3	1	2	4.28	4.28
2	77	3	1	3	1	2	4.28	
3	77	3	1	3	1	2	4.28	
CLASIFICACIÓN FINAL Q								
Calidad					Valoración		Estación Q	
Excepcionalmente malo					< 0.01		4.28 Medio 4 - 10	
Extremadamente malo					0.01 – 0.1			
Muy malo					0.1 – 1			
Malo					1 – 4			
Medio					4 – 10			
Bueno					10 – 40			
Muy bueno					40 – 100			
Extremadamente bueno					100 – 400			
Excepcionalmente bueno					> 400			

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 45

Q estación N° 4

ESTACIÓN GEOMECAÁNICA								
Familia	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Q Est.
1	94	6	1.5	1	1	2	11.75	10.44
2	94	6	1.5	1	1	2	11.75	
3	94	9	1.5	1	1	2	7.83	
CLASIFICACIÓN FINAL Q								
Calidad					Valoración		Estación Q	
Excepcionalmente malo					< 0.01		10.44 Bueno 10 - 40	
Extremadamente malo					0.01 – 0.1			
Muy malo					0.1 – 1			
Malo					1 – 4			
Medio					4 – 10			
Bueno					10 – 40			
Muy bueno					40 – 100			
Extremadamente bueno					100 – 400			
Excepcionalmente bueno					> 400			

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 46

Q estación N° 5

ESTACIÓN GEOMECAÁNICA								
Familia	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Q Est.
1	94	6	3	1	1	2	23.5	18.28
2	94	6	2	2	1	2	7.83	
3	94	3	1.5	1	1	2	23.5	
CLASIFICACIÓN FINAL Q								
Calidad					Valoración		Estación Q	
Excepcionalmente malo					< 0.01		18.28 Bueno 10 - 40	
Extremadamente malo					0.01 – 0.1			
Muy malo					0.1 – 1			
Malo					1 – 4			
Medio					4 – 10			
Bueno					10 – 40			
Muy bueno					40 – 100			
Extremadamente bueno					100 – 400			
Excepcionalmente bueno					> 400			

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 47

Q estación N° 6

ESTACIÓN GEOMECAÁNICA								
Familia	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Q Est.
1	98	2	1.5	0.75	1	2	49	40.83
2	98	4	1.5	0.75	1	2	24.5	
3	98	2	1.5	0.75	1	2	49	
CLASIFICACIÓN FINAL Q								
Calidad					Valoración		Estación Q	
Excepcionalmente malo					< 0.01		40.83 Muy Bueno 40 - 100	
Extremadamente malo					0.01 – 0.1			
Muy malo					0.1 – 1			
Malo					1 – 4			
Medio					4 – 10			
Bueno					10 – 40			
Muy bueno					40 – 100			
Extremadamente bueno					100 – 400			
Excepcionalmente bueno					> 400			

Fuente: Elaboración propia del tesista.

4.3.4 Índice de resistencia geológico (GSI)

Con la aparición del criterio de rotura de Hoek & Brown el uso del RMR ya no es adecuado, sobre todo para el caso de rocas débiles, y se introduce de esta forma el GSI (Hoek, et al. 1995)

El GSI es un sistema para la estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo, y cabe recalcar que el GSI no es una clasificación geomecánica.

Las relaciones existentes entre GSI y RMR, dependiendo del RMR utilizado, se detallan a continuación:

Para el caso de RMR_{76}

$$RMR_{76} > 18 \rightarrow GSI = RMR$$

$$RMR_{76} < 18 \rightarrow \text{No se puede utilizar el } RMR_{76} \text{ para la obtención del GSI}$$

Para el caso de RMR_{89}

$$RMR_{89} > 23 \rightarrow GSI = RMR_{89} - 5$$

$$RMR_{89} < 23 \rightarrow \text{No se puede utilizar el } RMR_{89} \text{ para la obtención del GSI}$$

Hoek recomienda hacer siempre referencia a un rango numérico y nunca a un solo valor del GSI y también sugiere la posibilidad a falta de una apreciación directa en campo y solo para macizos rocosos caracterizados por un $GSI > 25$, como se muestran los resultados obtenidos en los Cuadros 48, 49, 50, 51, 52 y 53., de estimar este a partir del RMR de Bieniawski, depurándolo del factor orientación de las discontinuidades y asignando 10 al factor agua. Russo (1998), propone estimar el GSI también a partir del

índice Q de Barton, depurándolo del factor de tensión (SRF) y asignando 1 al parámetro agua (J_w), obteniendo luego, de acuerdo con la preexistente correlación entre Q y RMR:

$$GSI = 9 \lg Q' + 44.$$

CUADRO 48

GSI estación N° 1

ESTACIÓN GEOMECÁNICA		
DATA	RMR ₈₉ > 23	9 lg Q' + 44
	49	4.67
GSI	44	50

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 49

GSI estación N° 2

ESTACIÓN GEOMECÁNICA		
DATA	RMR ₈₉ > 23	9 lg Q' + 44
	74	31.33
GSI	69	57

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 50

GSI estación N° 3

ESTACIÓN GEOMECÁNICA		
DATA	RMR ₈₉ > 23	9 lg Q' + 44
	54	4.28
GSI	49	50

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 51

GSI estación N° 4

ESTACIÓN GEOMECÁNICA		
DATA	RMR ₈₉ > 23	9 lg Q' + 44
	68	10.44
GSI	63	53

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 52

GSI estación N° 5

ESTACIÓN GEOMECAÍNICA		
DATA	RMR ₈₉ > 23	9 lg Q' + 44
	57	18.28
GSI	52	55

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 53

GSI estación N° 6

ESTACIÓN GEOMECAÍNICA		
DATA	RMR ₈₉ > 23	9 lg Q' + 44
	69	40.83
GSI	64	59

Fuente: Elaboración propia del tesista.

4.4 Modelamiento estructural del macizo rocoso

El modelamiento estructural será dado en cada estación del mapeo geomecánico del proyecto de investigación, indicando todas las características estructurales del macizo rocoso cuantificados y gráficamente representados en las Figuras 16, 17, 18, 19, 20 y 21., generando así un conocimiento general y vista panorámica de la calidad de la roca y niveles de esfuerzos presentes dentro de la caracterización del macizo rocoso, que posteriormente se realizara el diseño de sostenimiento con los ábacos pertinentes.

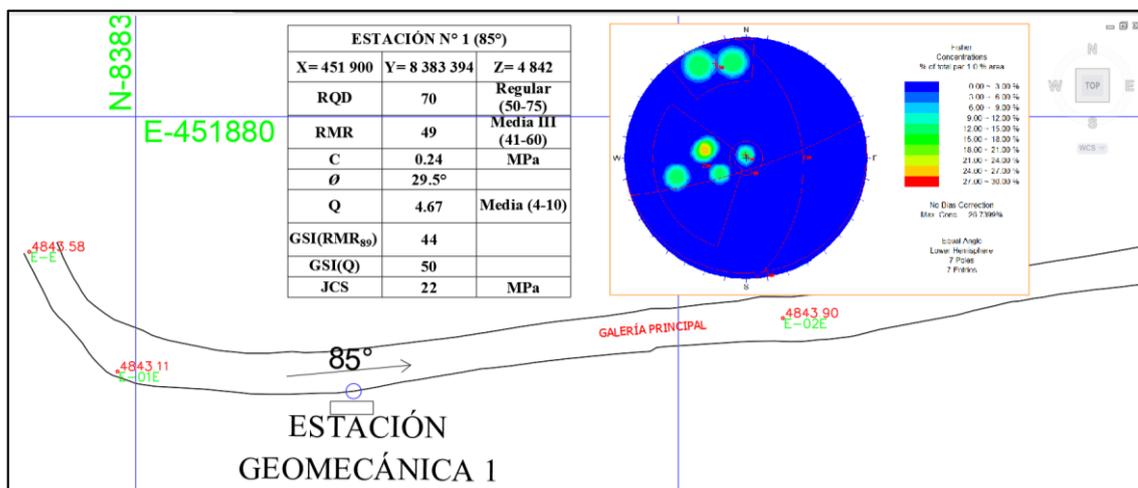


Figura 16. Calidad estructural del macizo rocoso en la estación N° 1

Fuente: Elaboración propia de tesista.

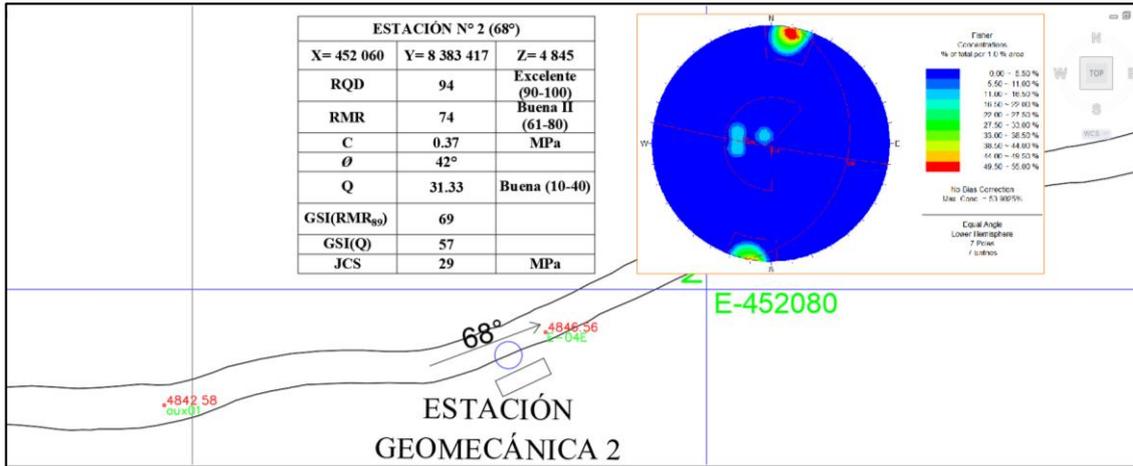


Figura 17. Calidad estructural del macizo rocoso en la estación N° 2

Fuente: Elaboración propia de tesista.

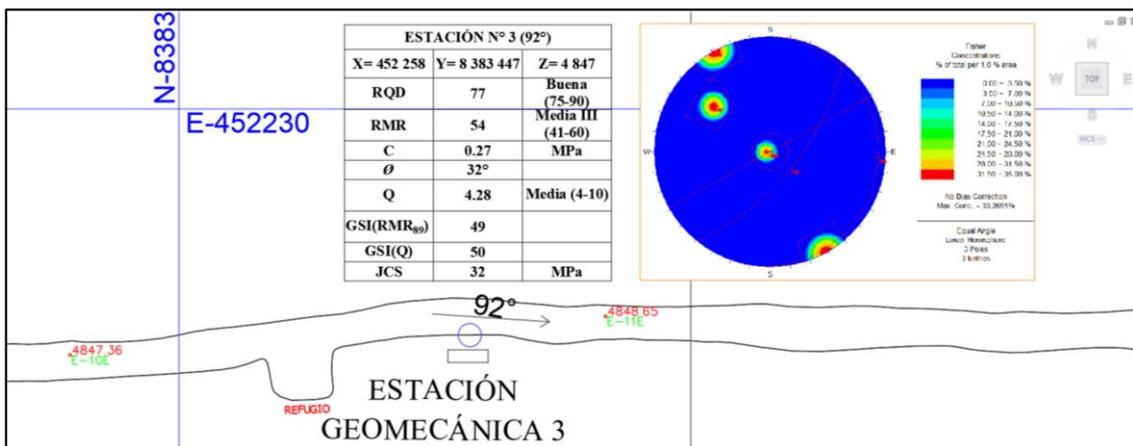


Figura 18. Calidad estructural del macizo rocoso en la estación N° 3

Fuente: Elaboración propia de tesista.

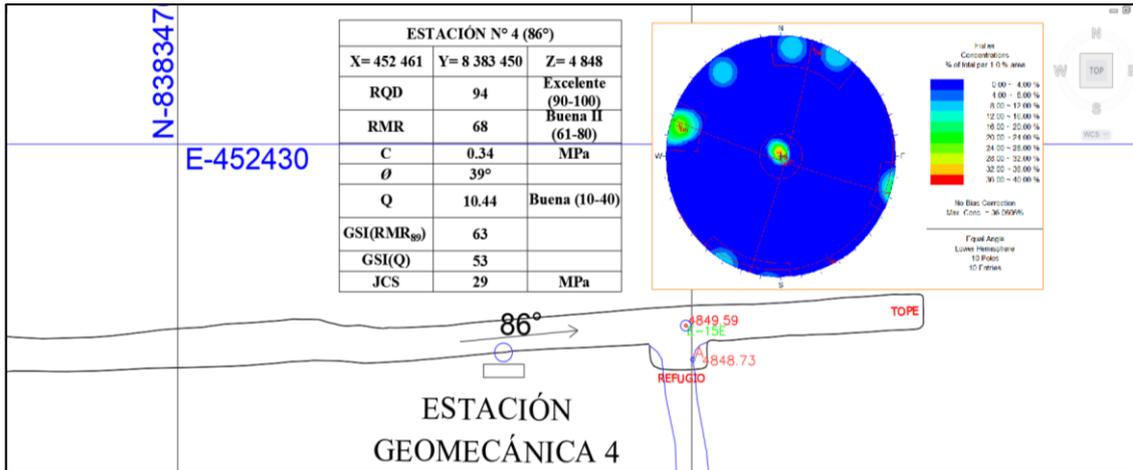


Figura 19. Calidad estructural del macizo rocoso en la estación N° 4

Fuente: Elaboración propia de tesista.

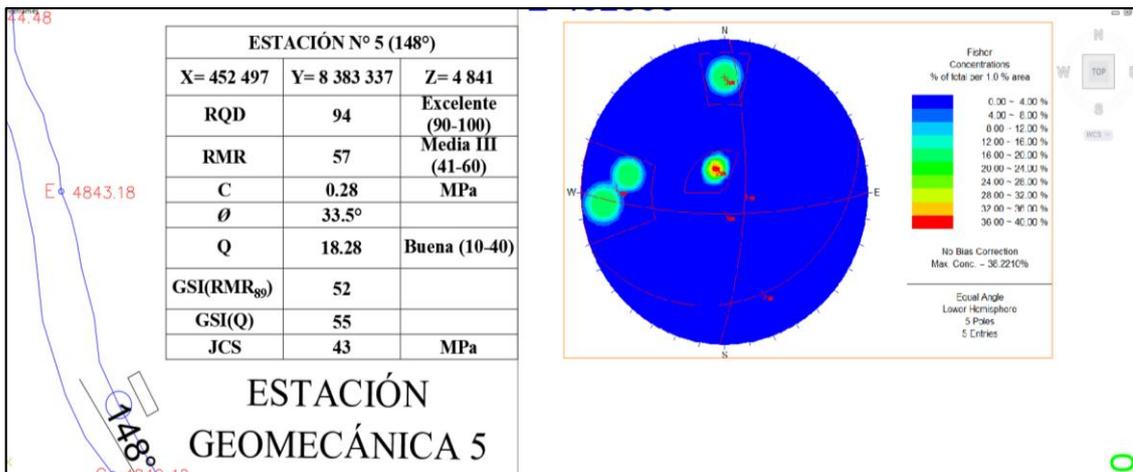


Figura 20. Calidad estructural del macizo rocoso en la estación N° 5

Fuente. Elaboración propia de tesista.

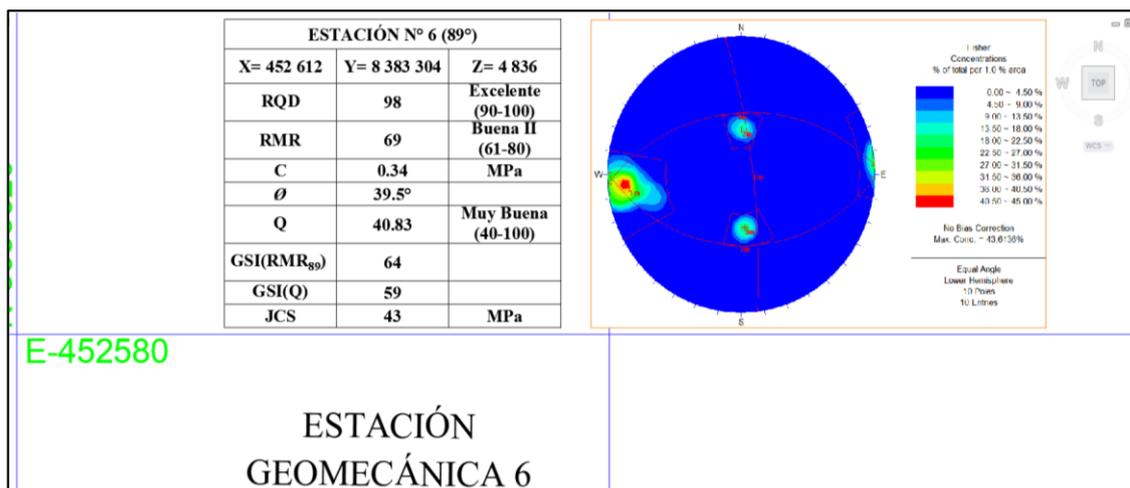


Figura 21. Calidad estructural del macizo rocoso en la estación N° 6

Fuente: Elaboración propia de tesista.

4.5 Diseño de sostenimiento

La importancia de la interacción en el diseño de sostenimiento dependerá de los parámetros geomecánicos y operativos, siendo el pilar clave para una adecuada recomendación de sostenimiento. Esto con el objetivo de brindar un adecuado control de inestabilidad, la iteración conjunta, también es vital para seleccionar en forma óptima la alternativa de sostenimiento, salvaguardando los intereses de seguridad, productividad y de costos en el proyecto subterráneo. (Flores, 2013).

4.5.1 Parámetro geomecánico

La evaluación geomecánica de las labores, corresponde a un principio fundamental en la elección correcta de la técnica de sostenimiento. (Flores, 2013). La importancia del estudio del parámetro geomecánico, deberá considerar los siguientes parámetros básicos de estudio:

4.5.1.1 Calidad geomecánica de la zona inestable

Las zonas inestables dentro del presente proyecto, se detallaran los resultados obtenidos en los Cuadros 54, 55, 56, 57, 58 y 59.

CUADRO 54

Calidad geomecánica estación N° 1

ESTACIÓN N° 1 (85°)		
X = 451 900	Y = 8 383 394	Z = 4 842
RQD	70	Regular (50 – 75)
RMR	49	Media III (41 – 60)
C	0.24	MPa
ϕ	29.5°	
Q	4.67	Media (4 – 10)
GSI (RMR₈₉)	44	
GSI (Q)	50	
JCS	22	MPa

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 55

Calidad geomecánica estación N° 2

ESTACIÓN N° 2 (68°)		
X = 452 060	Y = 8 383 417	Z = 4 845
RQD	94	Excelente (90 – 100)
RMR	74	Buena II (61 – 80)
C	0.37	MPa
ϕ	42°	
Q	31.33	Buena (10 – 40)
GSI (RMR₈₉)	69	
GSI (Q)	57	
JCS	29	MPa

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 56

Calidad geomecánica estación N° 3

ESTACIÓN N° 3 (92°)		
X = 452 258	Y = 8 383 447	Z = 4 847
RQD	77	Buena (75 – 90)
RMR	54	Media III (41 – 60)
C	0.27	MPa
ϕ	32°	
Q	4.28	Media (4 – 10)
GSI (RMR₈₉)	49	
GSI (Q)	50	
JCS	32	MPa

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 57

Calidad geomecánica estación N° 4

ESTACIÓN N° 4 (86°)		
X = 452 461	Y = 8 383 450	Z = 4 848
RQD	94	Excelente (90 – 100)
RMR	68	Buena II (61 – 80)
C	0.34	MPa
ϕ	39°	
Q	10.44	Buena (10 – 40)
GSI (RMR₈₉)	63	
GSI (Q)	53	
JCS	29	MPa

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 58

Calidad geomecánica estación N° 5

ESTACIÓN N° 5 (148°)		
X = 452 497	Y = 8 383 337	Z = 4 841
RQD	94	Excelente (90 – 100)
RMR	57	Media III (41 – 60)
C	0.28	MPa
ϕ	33.5°	
Q	18.28	Buena (10 – 40)
GSI (RMR₈₉)	52	
GSI (Q)	55	
JCS	43	MPa

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CUADRO 59

Calidad geomecánica estación N° 6

ESTACIÓN N° 6 (89°)		
X = 452 612	Y = 8 383 304	Z = 4 836
RQD	98	Excelente (90 – 100)
RMR	69	Buena II (61 – 80)
C	0.34	MPa
ϕ	39.5°	
Q	40.83	Muy buena (40 – 100)
GSI (RMR₈₉)	64	
GSI (Q)	59	
JCS	43	MPa

Fuente: Elaboración propia del tesista.

4.5.1.2 Niveles de esfuerzos presentes en la zona de trabajo

Los niveles de esfuerzo obtenidos en el presente proyecto se realizaron con el software Phases, mostrando como resultados en las Figuras 22, 23, 24, 25, 26 y 27.

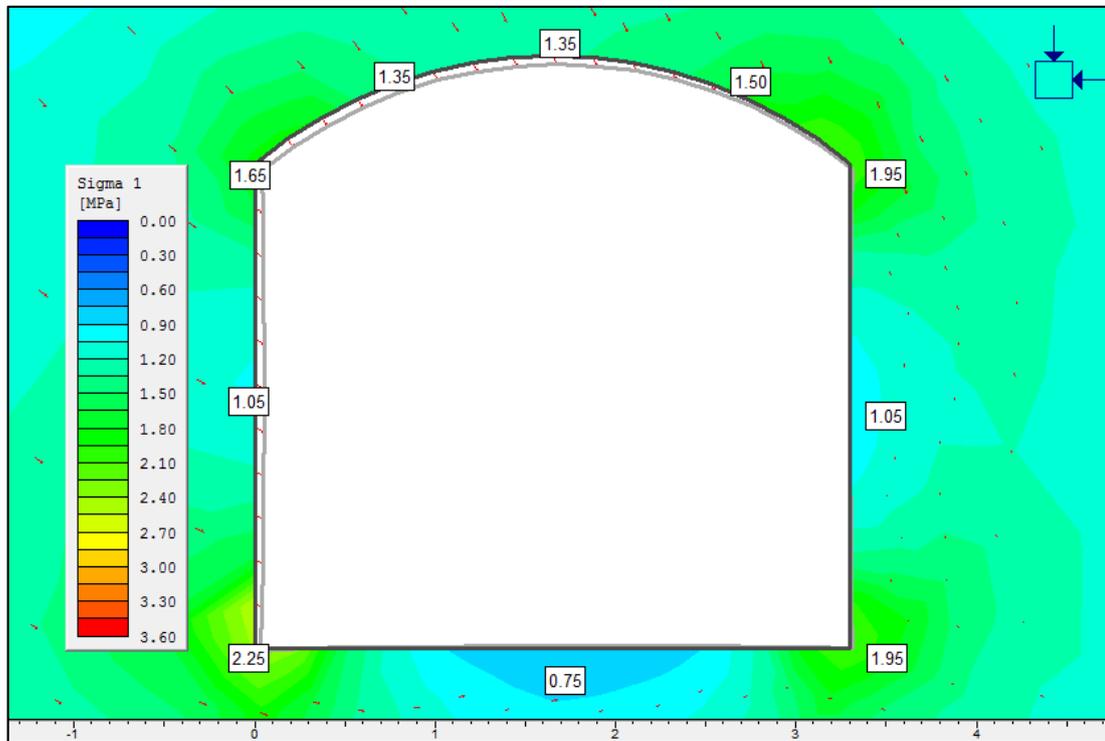


Figura 22. Niveles de esfuerzo presentes en la estación N° 1

Fuente: Elaboración propia de tesista.

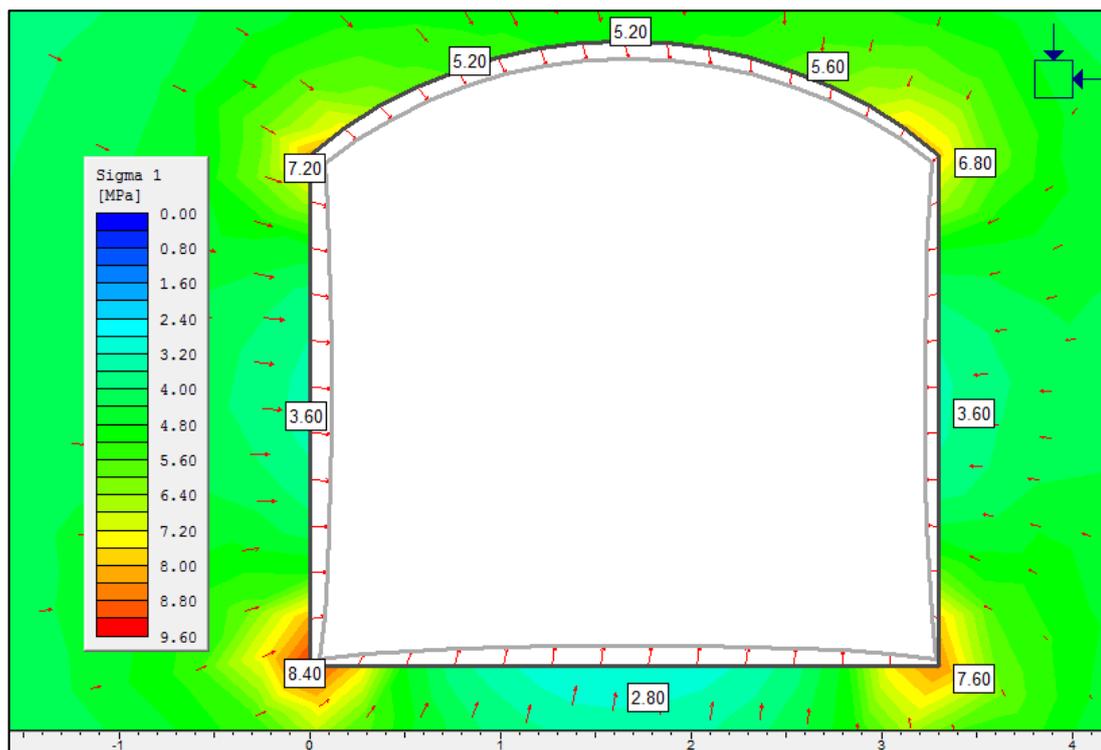


Figura 23. Niveles de esfuerzo presentes en la estación N° 2

Fuente: Elaboración propia de tesista.

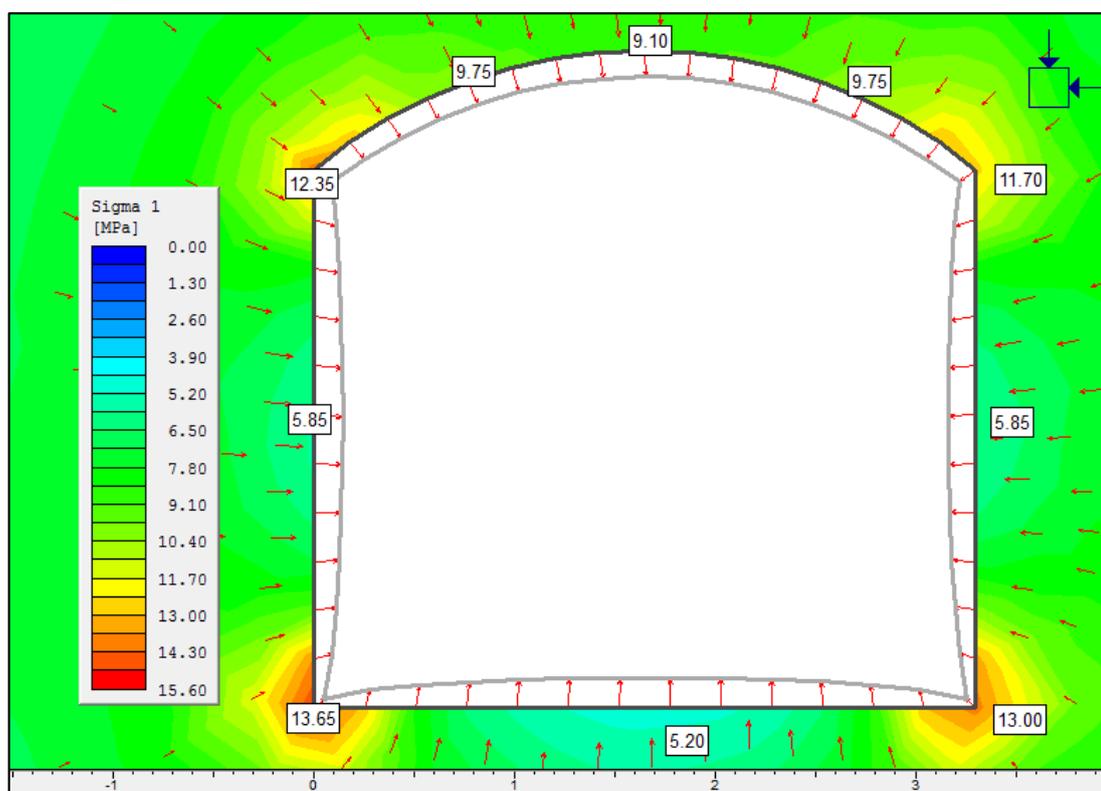


Figura 24. Niveles de esfuerzo presentes en la estación N° 3

Fuente. Elaboración propia de tesista.

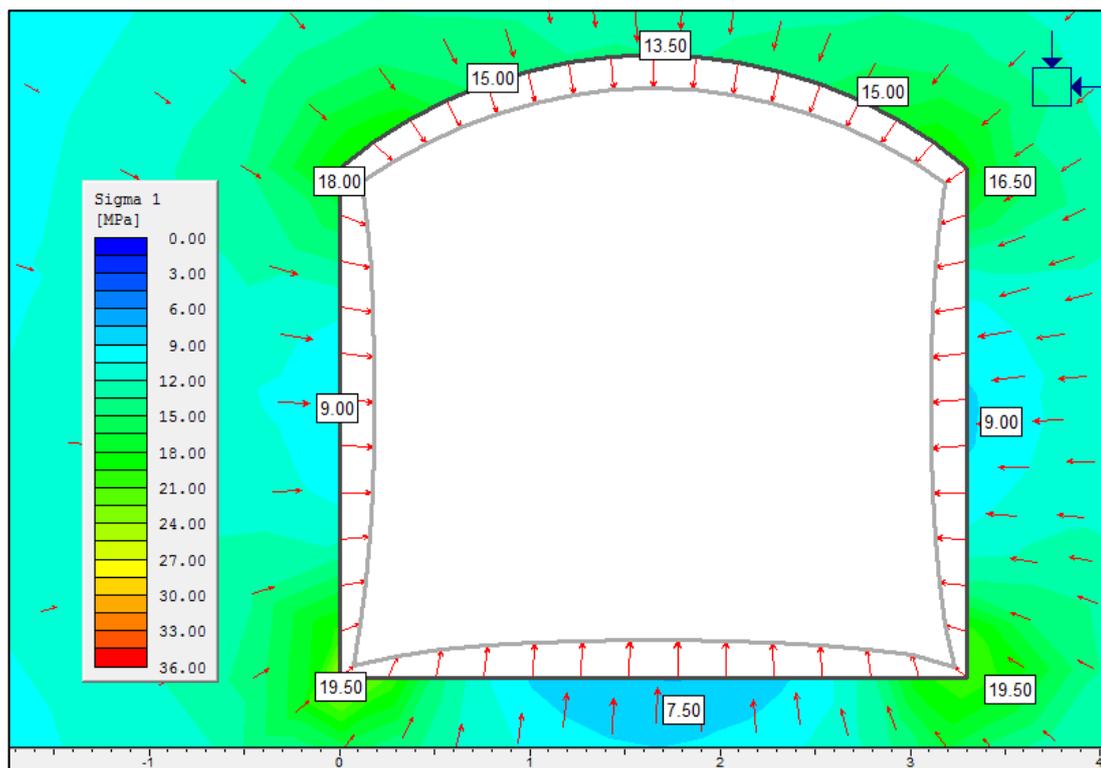


Figura 25. Niveles de esfuerzo presentes en la estación N° 4

Fuente: Elaboración propia de tesista.

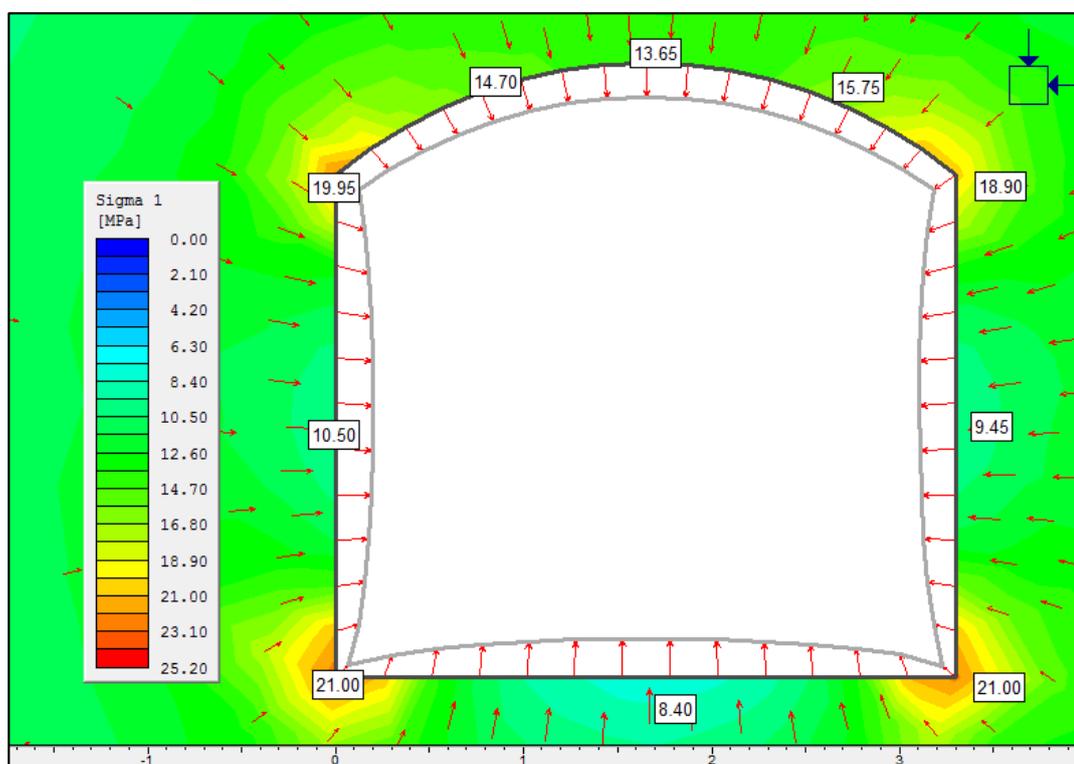


Figura 26. Niveles de esfuerzo presentes en la estación N° 5

Fuente: Elaboración propia de tesista.

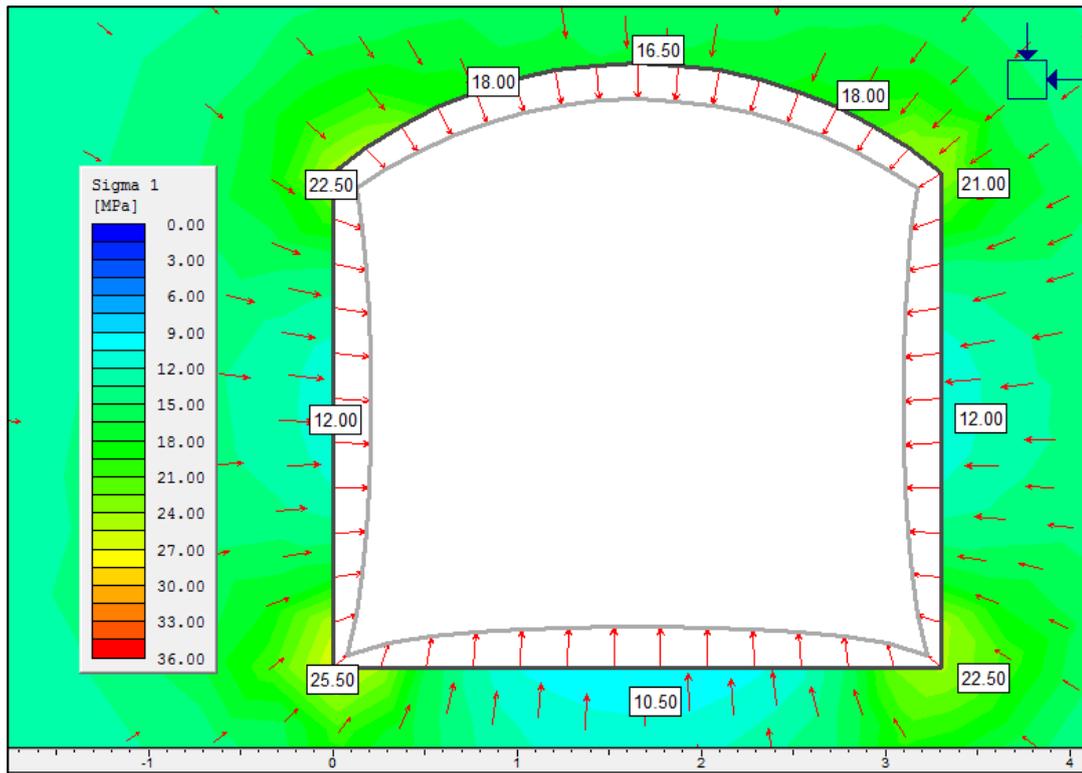


Figura 27. Niveles de esfuerzo presentes en la estación N° 6

Fuente: Elaboración propia de tesista.

4.5.1.3 Parámetros mecánicos del macizo rocoso

Los parámetros mecánicos obtenidos del macizo rocoso, son realizados en el laboratorio de Geotecnia y Geomecánica de la Universidad Nacional del Altiplano - Puno, llegando a los resultados como se detalla en los Cuadros 60 y 61.

CUADRO 60

Parámetros mecánicos - pizarra

Macizo rocoso - Pizarra					
Data	Porosidad (%)	Agua W (%)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia UCS (MPa)	Deformación
Muestra 001	0.1 – 0.5	0.04	2.64	48.96	Frágil
Muestra 002	0.1 – 0.5	0.09	2.64	93.13	Frágil
Muestra 003	0.1 – 0.5	0.16	2.64	76.04	Frágil

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. (2015). Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

CUADRO 61

Parámetros mecánicos - cuarcita

Macizo rocoso - Cuarcita					
Data	Porosidad (%)	Agua W (%)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia UCS (MPa)	Deformación
Muestra 001	0.1 – 0.5	0.14	2.75	270.23	Frágil
Muestra 002	0.1 – 0.5	0.08	2.75	105.36	Frágil
Muestra 003	0.1 – 0.5	0.02	2.75	253.03	Frágil

Fuente: Universidad Nacional del Altiplano. (2015). Laboratorio de Geotecnia y Geomecánica.

4.5.1.4 Análisis de factores de seguridad

Los factores de seguridad obtenidos con el software Unwedge, se muestra a continuación los resultados en las Figuras 28, 29, 30, 31, 32 y 33.

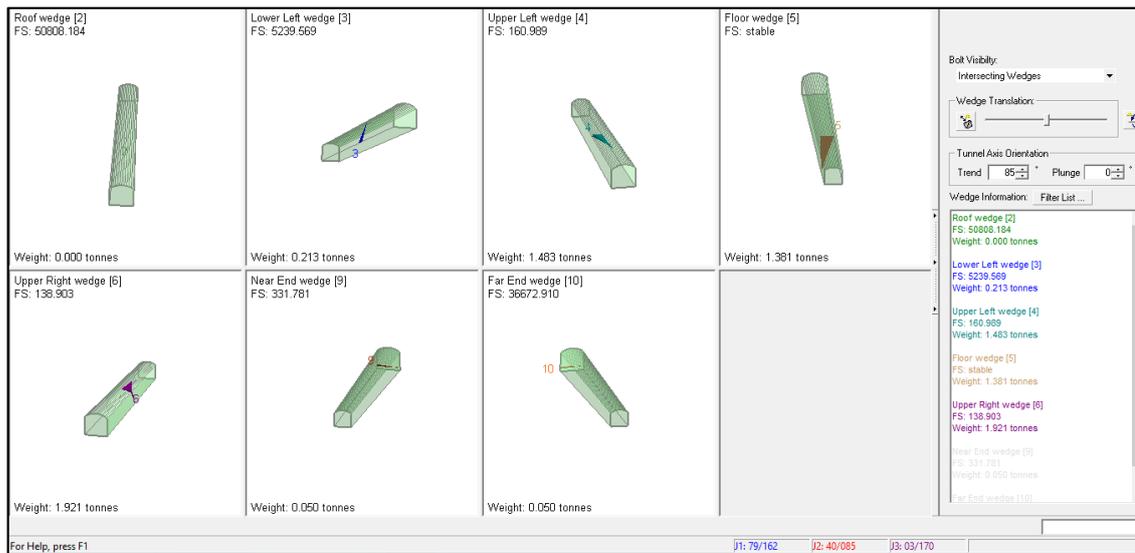


Figura 28. Factores de seguridad presentes en la estación N° 1

Fuente: Elaboración propia de tesista.

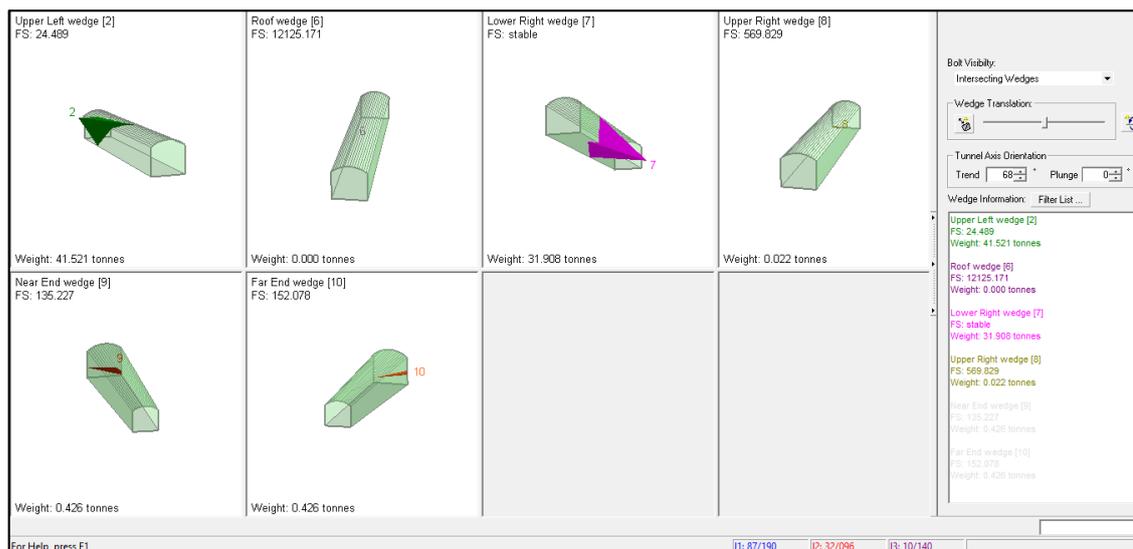


Figura 29. Factores de seguridad presentes en la estación N° 2

Fuente. Elaboración propia de tesista.

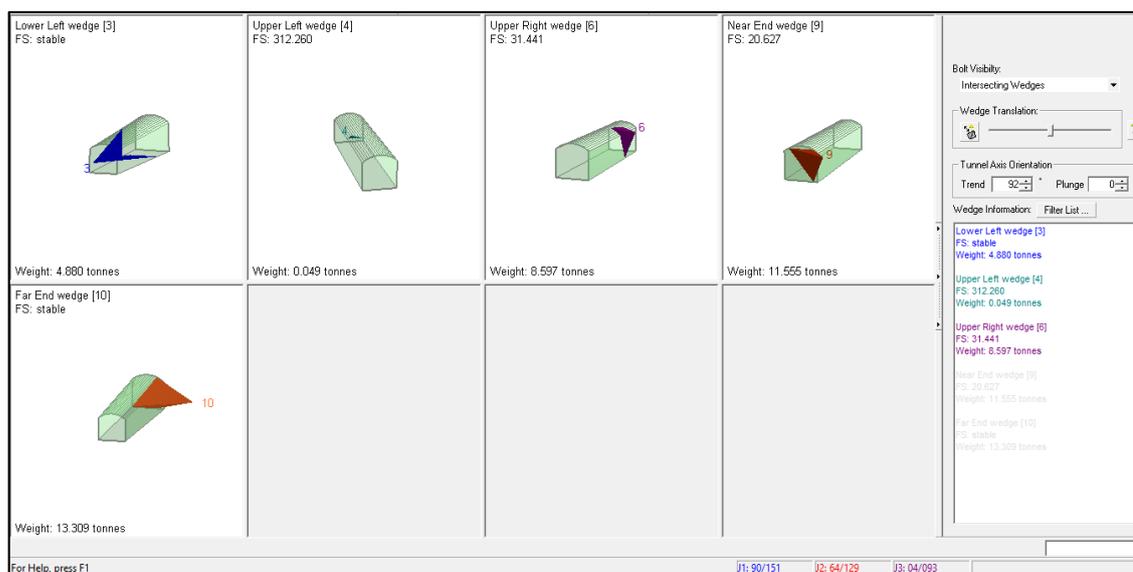


Figura 30. Factores de seguridad presentes en la estación N° 3

Fuente: Elaboración propia de tesista.

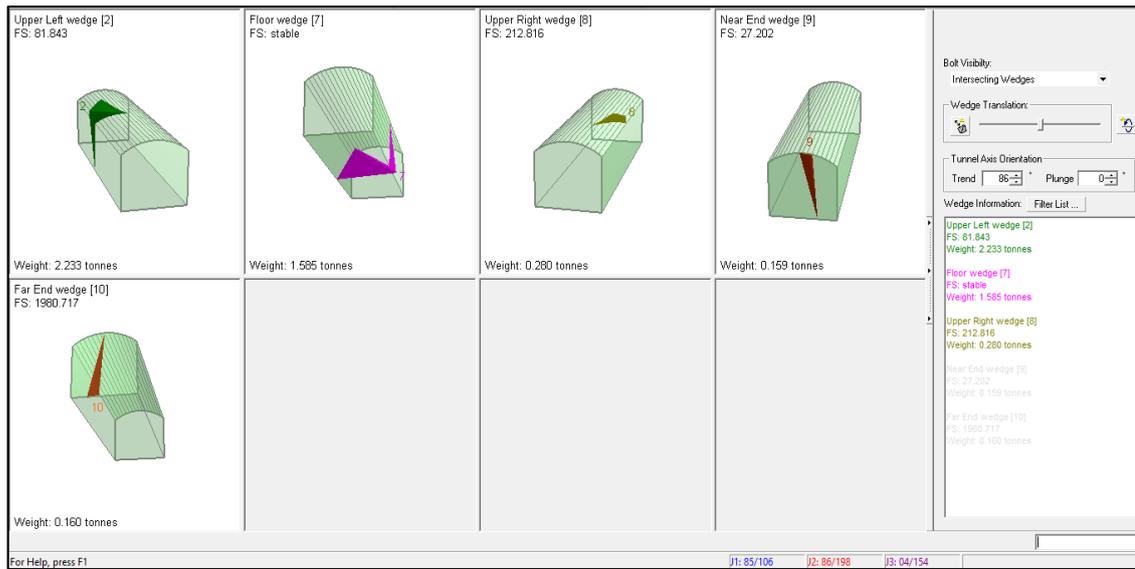


Figura 31. Factores de seguridad presentes en la estación N° 4

Fuente: Elaboración propia de tesista.

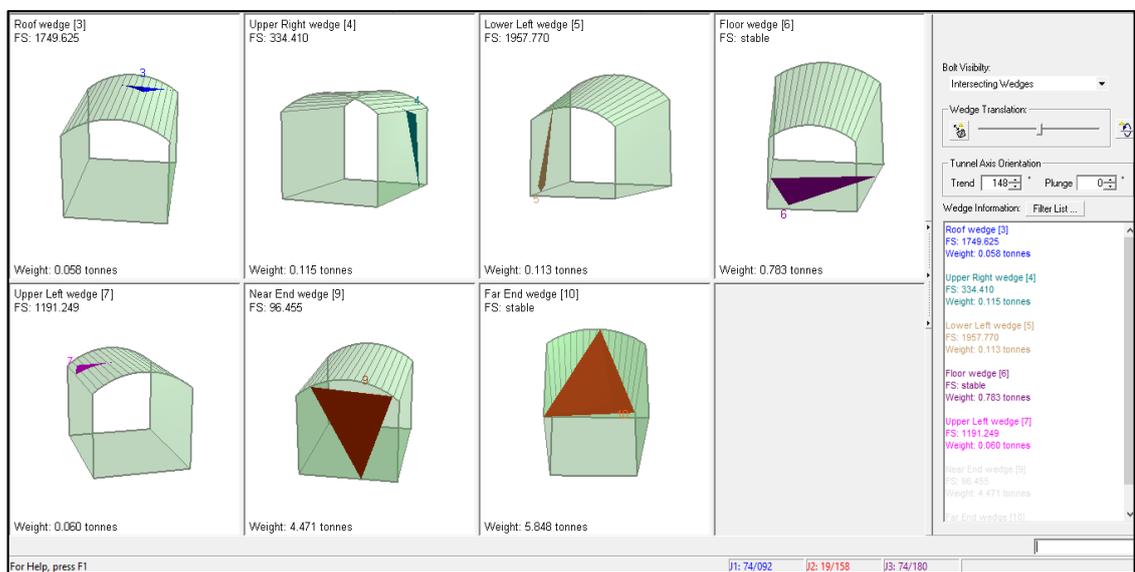


Figura 32. Factores de seguridad presentes en la estación N° 5

Fuente: Elaboración propia de tesista.

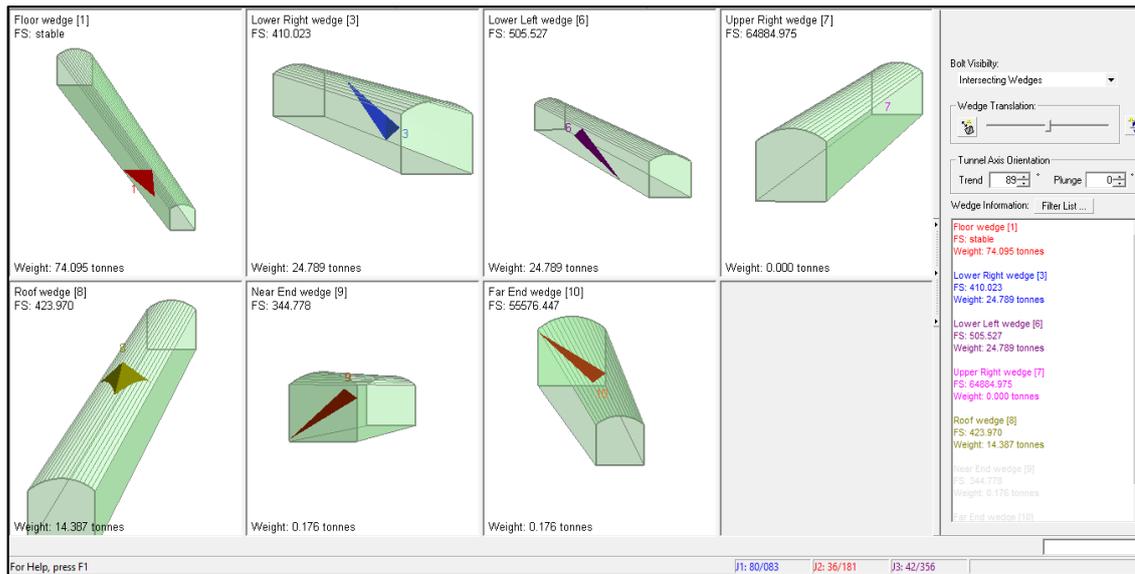


Figura 33. Factores de seguridad presentes en la estación N° 6

Fuente: Elaboración propia de tesista.

4.5.2 Parámetro operativo

Flores (2013). Durante la evaluación de la labor minera, son analizados, por lo general, solo los factores geomecánicos para la selección de la alternativa de sostenimiento, sin considerar muchas veces los factores operativos. Es importante que los supervisores responsables de las recomendaciones de sostenimiento conozcan, no sólo las características geomecánicas de la labor, sino que deben asociar la operatividad minera. Dentro de los parámetros operativos de estudio, se tienen:

4.5.2.1 Tiempo de exposición del proyecto

El tiempo de exposición del acceso en desarrollo, está asociada al grado de seguridad requerida del proyecto, así mismo se determinará la categoría de anclajes a ser aplicada. En esta parte del análisis, es importante tener claro la categoría del anclaje seleccionado corresponde a un soporte permanente con sostenimiento por refuerzo, esto en gran manera del tiempo de explotación que perdure la mina, con los recursos probados se estima un tiempo útil de trabajo de 15 años por lo cual la galería de

preparación, como se observa en las Figuras 34 y 35, que servirá como ingreso y salida de vehículos, personal, ventilación y servicios auxiliares, entre otros, se realizara con todos los estándares que exige la actual ley vigente.

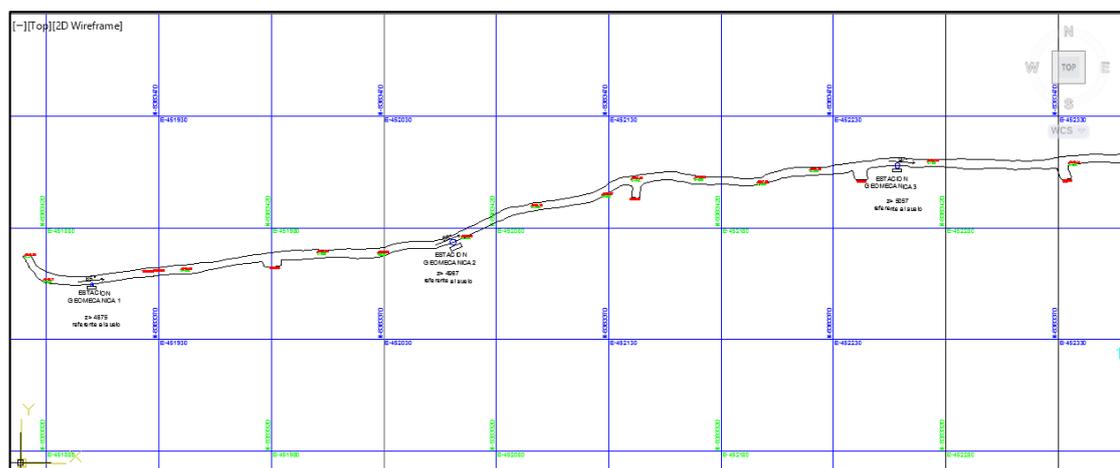


Figura 34. Proyecto de preparación y desarrollo JB - I

Fuente: Elaboración propia de tesista.

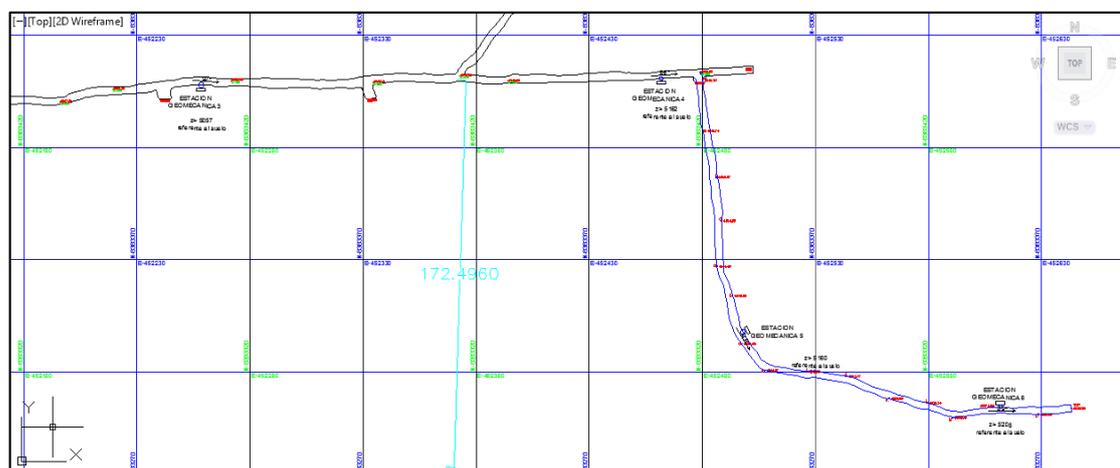


Figura 35. Proyecto de preparación y desarrollo JB - II

Fuente: Elaboración propia de tesista.

4.5.2.2 Capacidad del proyecto

La capacidad del proyecto estará en función a la distancia de extracción por el tonelaje diario, equipos a utilizar en la extracción del mineral y equipos a utilizar en la preparación del mismo, para lo cual se utilizaran los siguientes equipos:

Equipos de Extracción

05 Camiones de bajo perfil Mitsubishi 2.5 TM

02 Equipos de carguío Botcat 0.35 TM

Equipos de Preparación

04 Equipos de perforación tipo Jack-Leg

01 Compresora diésel Atlas

15 Und. De tubería de aire de 100 m.

15 Und. De tubería de agua de 100 m.

01 Ventiladora axial de 50 Hp

15 Und. De polietileno de ventilación de 100 m.

4.5.2.3 Dimensionamiento

El dimensionamiento del proyecto estará vinculado el análisis de las aberturas expuestas susceptibles a inestabilidad, En ésta etapa, el dimensionamiento abierto de la excavación, ver Figura 36, tomará un papel clave en la elección de las alternativas de soporte a proponer; ya que conjugará factores externos más complejos cuando más grande sea la excavación. La determinación del soporte, estará vinculada al dimensionamiento de los elementos de sostenimiento a proponer, así como los

equipamientos anexos que serán destinados para la aplicación del soporte. Se debe visualizar la capacidad de equipo que cuenta la Contrata Minera, para la aplicabilidad de los elementos de soporte propuestos.

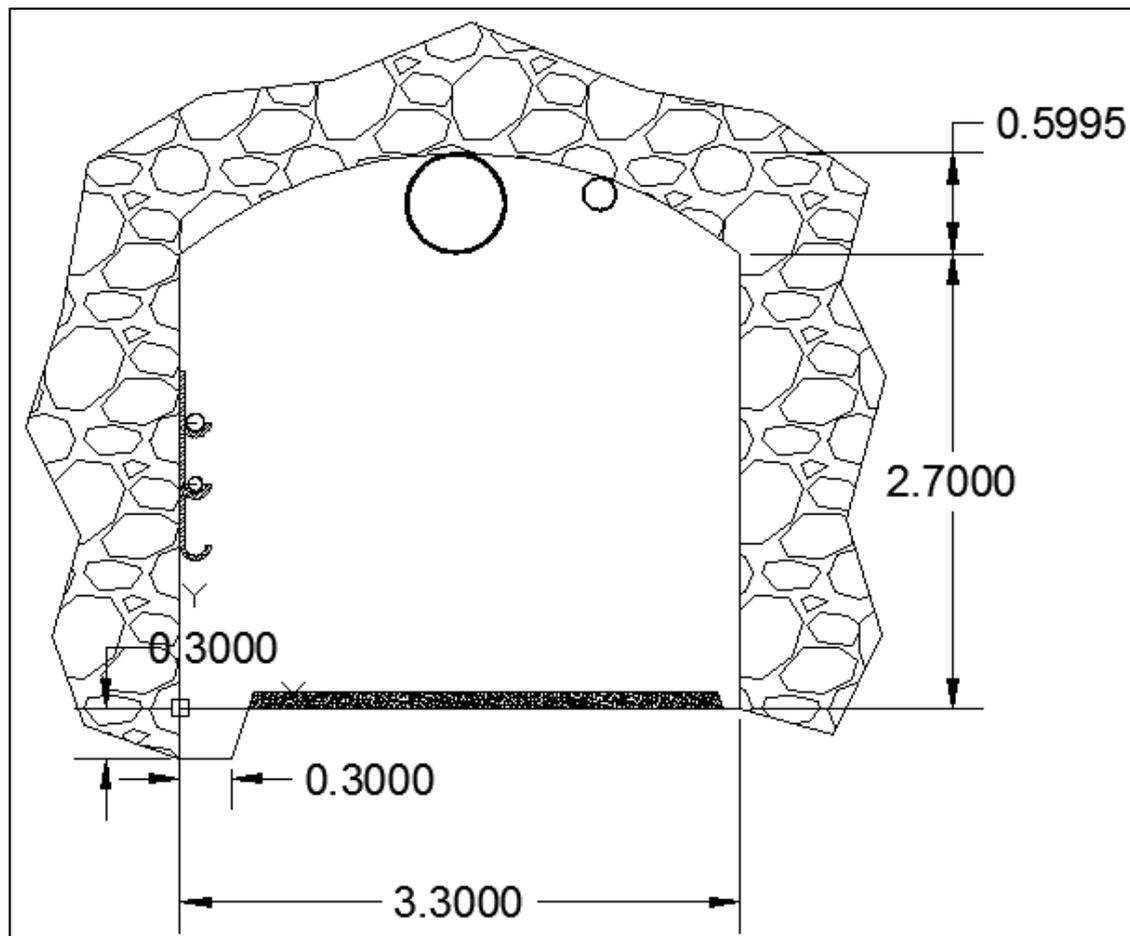


Figura 36. Dimensionamiento transversal del proyecto de desarrollo JB

Fuente: Elaboración propia de tesista.

4.5.2.4 Control de calidad de elementos de soporte

Flores (2013). El control de calidad de los elementos de soporte estará en función a la capacidad de carga que ofrece el anclaje, está representada por el tonelaje que ofrece el anclaje en el control de las inestabilidades subterránea, en ese sentido, es importante tener en cuenta que existe una diferencia entre el elemento de sostenimiento antes de ser insertado en la masa rocosa y el aplicado en el macizo rocoso.

La capacidad de carga del anclaje, es el resultado de la medición cuando este se encuentra dispuesto dentro de la masa rocosa. Por ello, se debe tener claro el concepto de anclaje, el cual resulta de la asociación del macizo rocoso, el perno de acero, y los encapsulantes aplicados: como puede ser cartuchos de cemento, cartuchos de resina e inyecciones de lechada de cemento.

El presente proyecto estará compuesto en su totalidad por labores permanentes, las cuales deberán ser estabilizadas con la dotación de anclajes de la categoría por **adherencia - sostenimiento por refuerzo**, mientras que las labores mineras que tengan un corto tiempo de exposición en un largo plazo como las cámaras de explotación, estas labores temporales, deberán usar anclajes de la categoría por fricción

En la evaluación de las propiedades mecánicas de los pernos de anclaje pre-instalación y propiedades mecánicas post-instalación (simbiosis del macizo rocoso y simbiosis encapsulante), el control de la calidad del anclaje se realizara antes, durante y después de la aplicación soporte, para lo cual se tendrá en cuenta los siguientes análisis:

Límite de Fluencia del Acero.

Resistencia a la tracción del Acero.

Capacidades de carga logradas.

Análisis de curvas deformación vs carga.

El control de calidad pre-instalación estará dado por la hoja técnica del producto a utilizar, mientras que el control de calidad post-instalación se obtendrá mediante un programa de monitoreo, que consiste en efectuar pruebas de arranque o también llamados ensayos “Pull Tests”, observar Figura 37.



Figura 37. Ensayo de pruebas de arranque

Fuente: Flores, M. (2013). Diseño del soporte y reforzamiento del macizo rocoso. Rock Info consultoría en Geomecánica Minera.

4.5.2.5 Evaluación costo beneficio

Es vital la evaluación de costo beneficio de la alternativa de perno de anclaje seleccionada, por lo que permitirá un resultado del beneficio de carga, anexada al costo del anclaje, estableciendo el índice: USD/Tn. Sostenida. (Flores, 2013).

Es decir a que costo sostenemos una tonelada de masa rocosa, estableciendo de esta forma una optimización del sostenimiento aplicado en la operación, esto contribuirá a un mejor control de los costos de sostenimiento. Por otro lado es importante analizar el servicio post venta de los proveedores, asociado al beneficio del producto. Es muy importante este ítem para la estandarización y control de la aplicación efectiva del anclaje seleccionado.

4.5.3 Elementos de sostenimiento

Flores (2013). La importancia de la interacción entre los parámetros geomecánicos y los parámetros operativos, es el pilar clave para una adecuada recomendación de sostenimiento. La iteración conjunta, es vital para seleccionar en forma óptima la alternativa de sostenimiento, salvaguardando los intereses de seguridad, productividad y de costos para la contrata minera.

Por lo general, cuando se evalúa la factibilidad del uso de una alternativa de sostenimiento, pernos de anclaje, muchas veces es analizada únicamente el parámetro geomecánica (condiciones de calidad de roca, evaluación de la estabilidad estructuralmente controlada, principalmente). Mas no las características de los parámetros operativos de la zona inestable, conllevando una incorrecta selección de los mecanismos de anclajes, categorías de pernos de anclaje por adherencia y por fricción.

4.5.3.1 Sostenimiento por refuerzo

Categoría por adherencia

Perno Helicoidal

Es una barra de acero helicoidal cuya sección transversal es ovalada, con resaltes en forma de un hilo helicoidal izquierdo, que actúa en colaboración con un sistema de fijación formado por una placa de acero perforada y una tuerca de fundición nodular, las cuales actúan de forma complementaria para reforzar y preservar la resistencia natural del macizo rocoso, las características técnicas se detallan en los Cuadros 62 y 63.

La inyección de concreto, mortero o resina en la perforación del estrato en que se introduce la barra sirve de anclaje, actuando la rosca como resalte para evitar el desplazamiento del perno, observar Figura 38.

CUADRO 62

Propiedades físicas y mecánicas perno helicoidal

Descripción / Diámetro nominal	19 mm	22 mm	25 mm	32 mm
Diámetro exterior (mm)	21.5	24.6	27.9	34.8
Fluencia, min. (Kn)	146	200	263	425
Tracción, min. (Kn)	195	270	350	564
Límite de fluencia, min. (kg/cm ²)	5,270	5,270	5,270	5,270
Resistencia a la tracción, min. (kg/cm ²)	7,030	7,030	7,030	7,030
Alargamiento en 200 mm, min. (%)	7	7	7	7
Peso nominal (kg/m)	2.14	2.85	3.85	6.03
Composición química Fosforo, max. (%)	0.060	0.060	0.060	0.060
Según norma	ASTM A615 Grado 75			

Fuente: Flores, M. (2013). Diseño del soporte y reforzamiento del macizo rocoso. Rock Info consultoría

en Geomecánica Minera.

Dónde:

$$1Kn = 0.101971621 \text{ TM.}$$

CUADRO 63

Propiedades físicas placa de acero perforada

Dimensión (mm)	Tipo espesor (mm)	Φ Perforación (mm)
150 x 150 200 x 200	4	25 a 50
	4.5	
	5	
	6	
	8	
	10	
Según norma ASTM A36		

Fuente: Flores, M. (2013). Diseño del soporte y reforzamiento del macizo rocoso. Rock Info consultoría

en Geomecánica Minera.

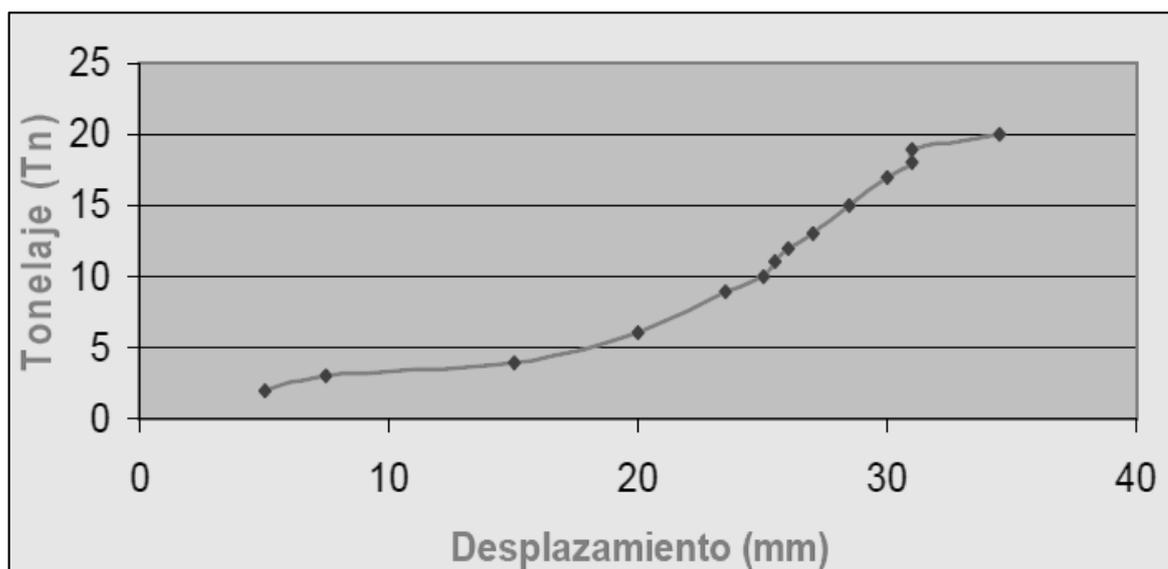


Figura 38. Curva de desplazamiento vs tonelaje del perno helicoidal 19 mm de 6 p

Fuente: Flores, M. (2013). Diseño del soporte y reforzamiento del macizo rocoso. Rock Info consultoría en Geomecánica Minera.

Las ventajas geomecánicas y operacionales:

- * En labores en donde exista presencia de rocas de muy mala calidad y también en zonas de altos esfuerzos.
- * Gran capacidad de transferencia de carga en macizos rocosos.
- * Su simple diseño permite una rápida y fácil instalación.
- * La instalación es simple y no requiere de equipo sofisticado para el ajuste.

Categoría por adherencia – Encapsulantes

Cartucho de Resina

El cartucho de resina es un sistema de encapsulantes para la fijación de pernos de anclaje compuesto por dos componentes: una pasta de resina poliéster y catalizador, ubicado dentro del cartucho, debidamente separados. La reacción química se produce

cuando el perno gire a través de los cartuchos insertados dentro del agujero del taladro mezclando los componentes, e iniciando el fraguado. Una vez mezclada, la resina alcanza su resistencia compresiva más potente que de la roca que la rodea

Dimensiones

Diámetro = 28 mm

Longitud = 30.5 mm

Tiempo de fragua

Menor a 0.30 segundos (resina rápida)

2-5 minutos (resina lenta)

Ventajas

Alcanza altas resistencias rápidamente

Resistente a los ácidos y álcalis entre 2 y 10 ph.

Alto poder de fijación en la roca.

Impide la corrosión del perno.

Anclaje rápido y eficaz.

Cartucho de Cemento “CEMBOLT”

El cartucho de cemento “Cembolt” es un mortero que contiene una base de cemento portland tipo I y aditivos especiales. Su presentación es en envase plástico pre-perforado, de amplia aplicación de superficie corrugada en el reforzamiento permanente en excavaciones mineras subterráneas. Para su aplicación se debe remojar los cartuchos

por 5-10 minutos. Al ser hidratados los cartuchos de cemento absorberán la cantidad necesaria de agua para consolidar una pasta de proporciones agua/cemento de 0.3:1 respectivamente.

Dimensiones

Diámetro = 30 mm

Longitud = 30.5 mm

Tiempo de fragua

24 horas (cemento normal)

08 horas (cemento rápido)

Ventajas

No se utilizan equipos de inyección y mezclado (mangueras, conexiones, etc.)

Reducción de tiempos muertos en preparación y pérdidas.

Se eliminan inconvenientes por dosificación.

Mortero con compensación de contracción.

Mayor resistencia que la lechada de cemento.

Se puede calcular la cantidad exacta de cartuchos requeridos.

No usa componentes tóxicos.

4.5.3.2 Diseño del sostenimiento por refuerzo

Los resultados obtenidos de Q, nos da como referencia un Abaco con el cual podemos correlacionar el tipo de sostenimiento a utilizar, como se demuestra en las Figuras 39, 40, 41, 42, 43 y 44.

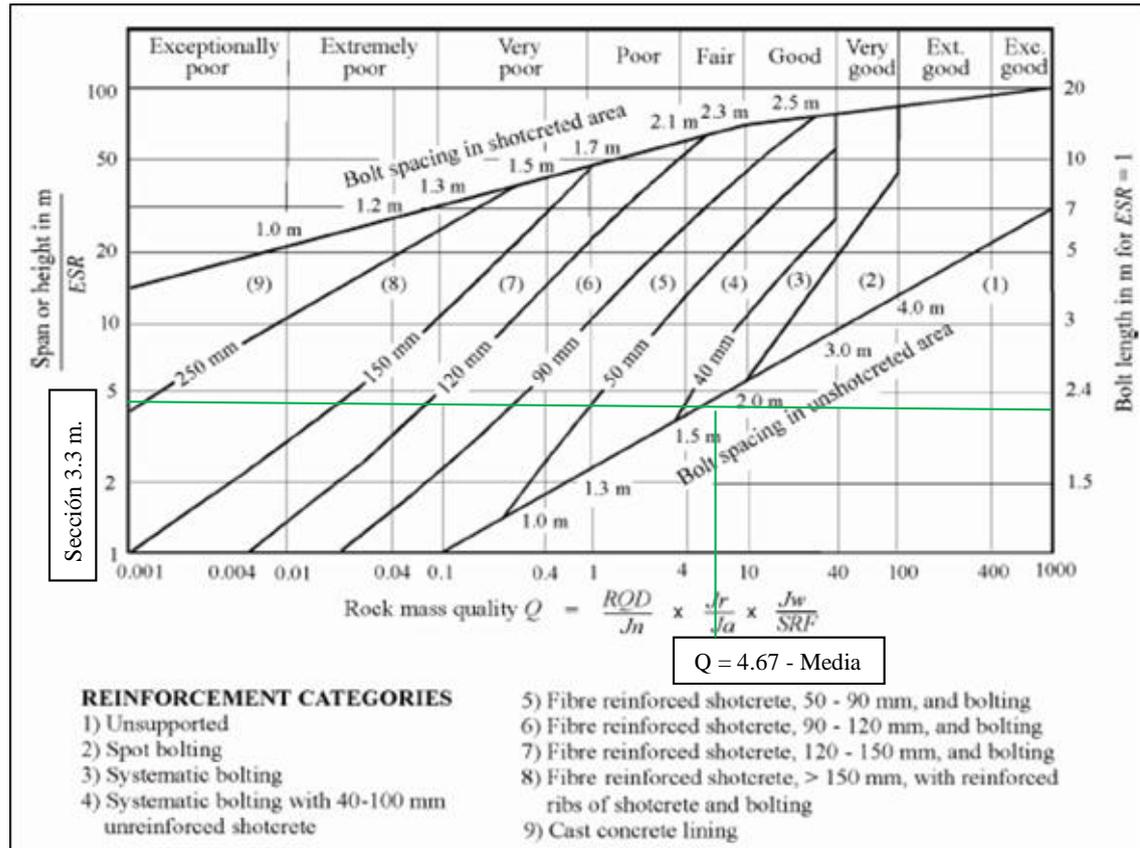


Figura 39. Diseño del sostenimiento en la estación N° 1

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

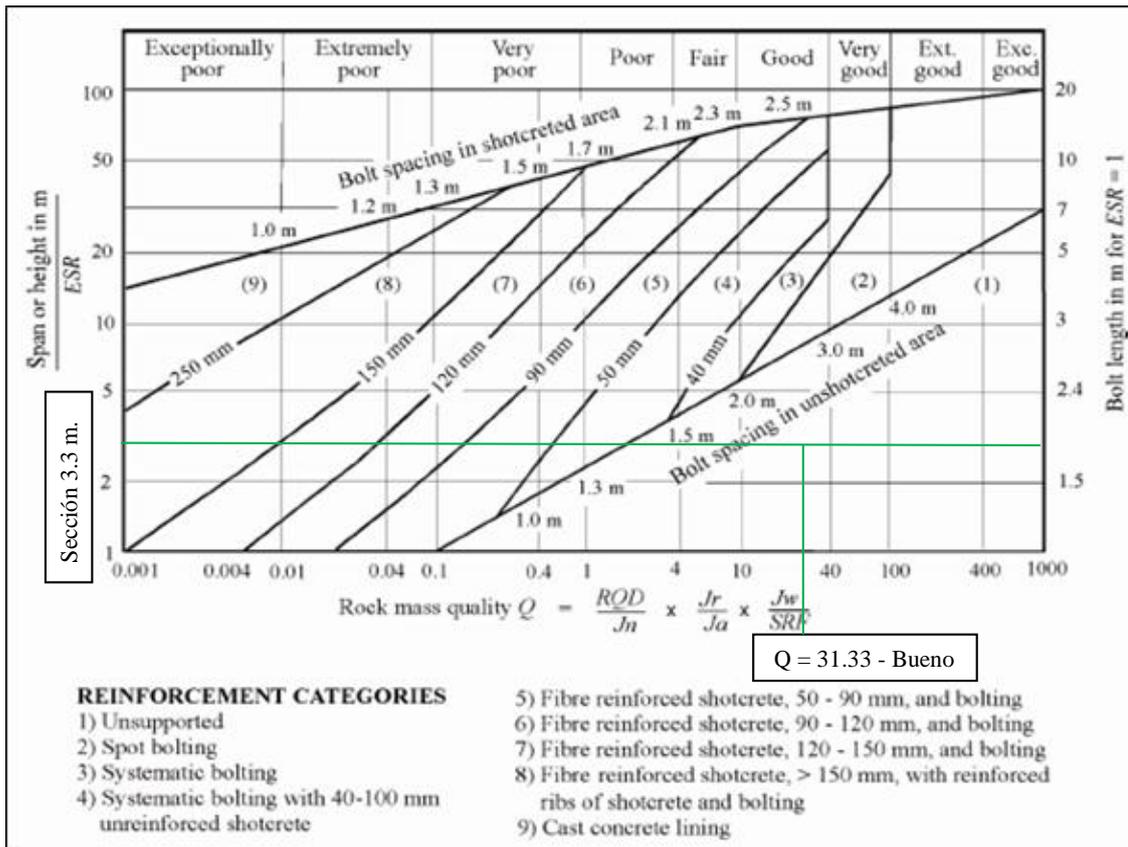


Figura 40. Diseño del sostenimiento en la estación N° 2

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

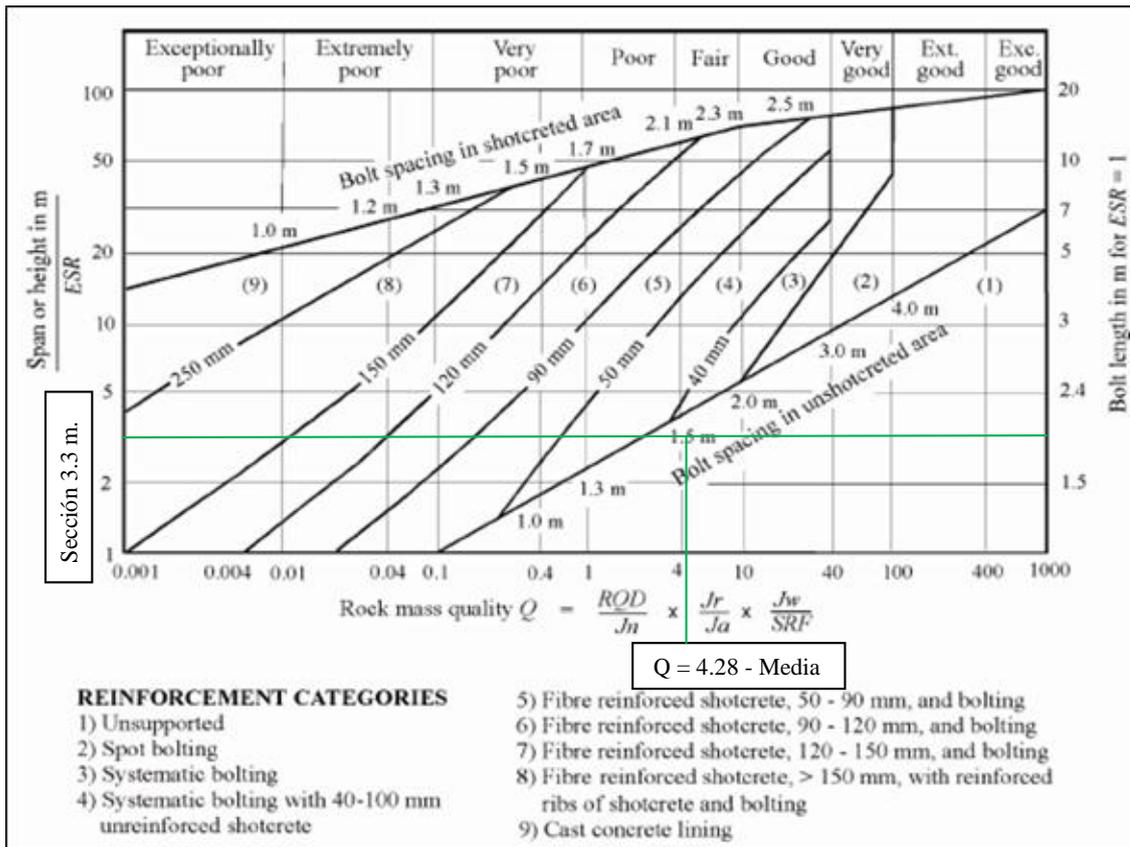


Figura 41. Diseño del sostenimiento en la estación N° 3

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

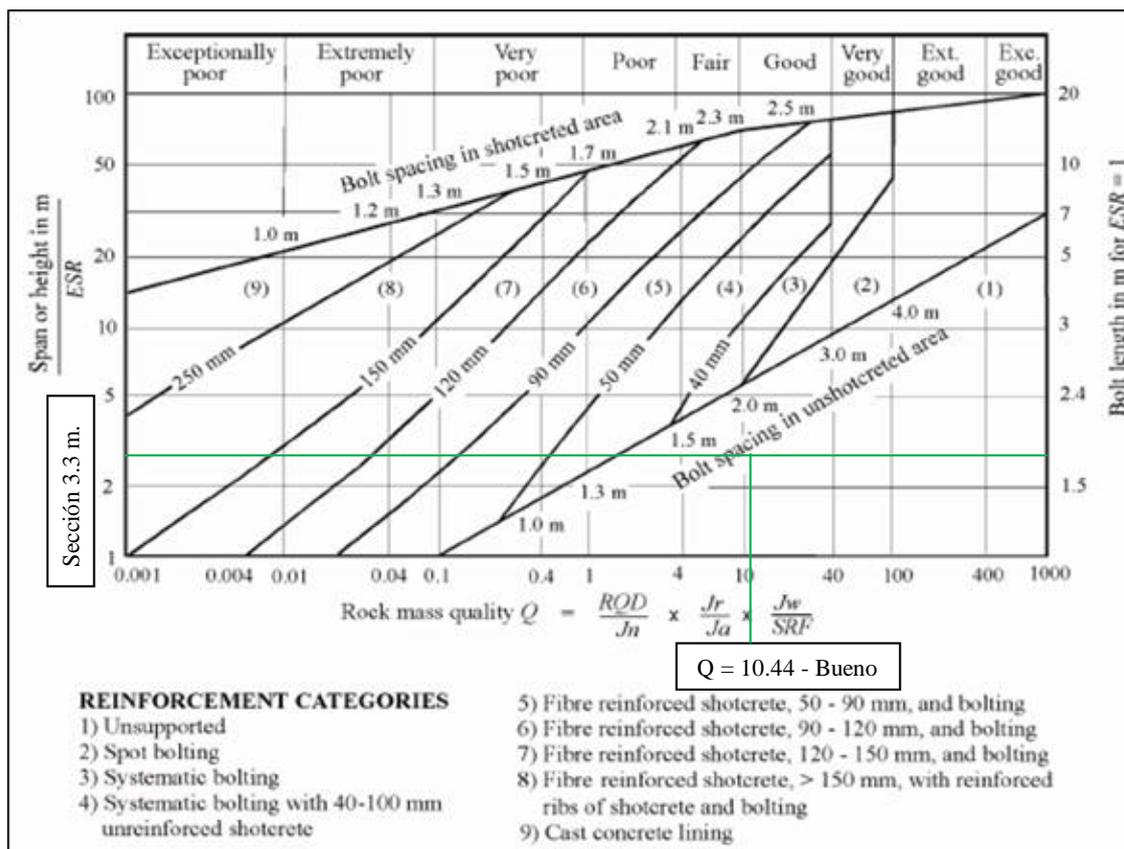


Figura 42. Diseño del sostenimiento en la estación N° 4

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

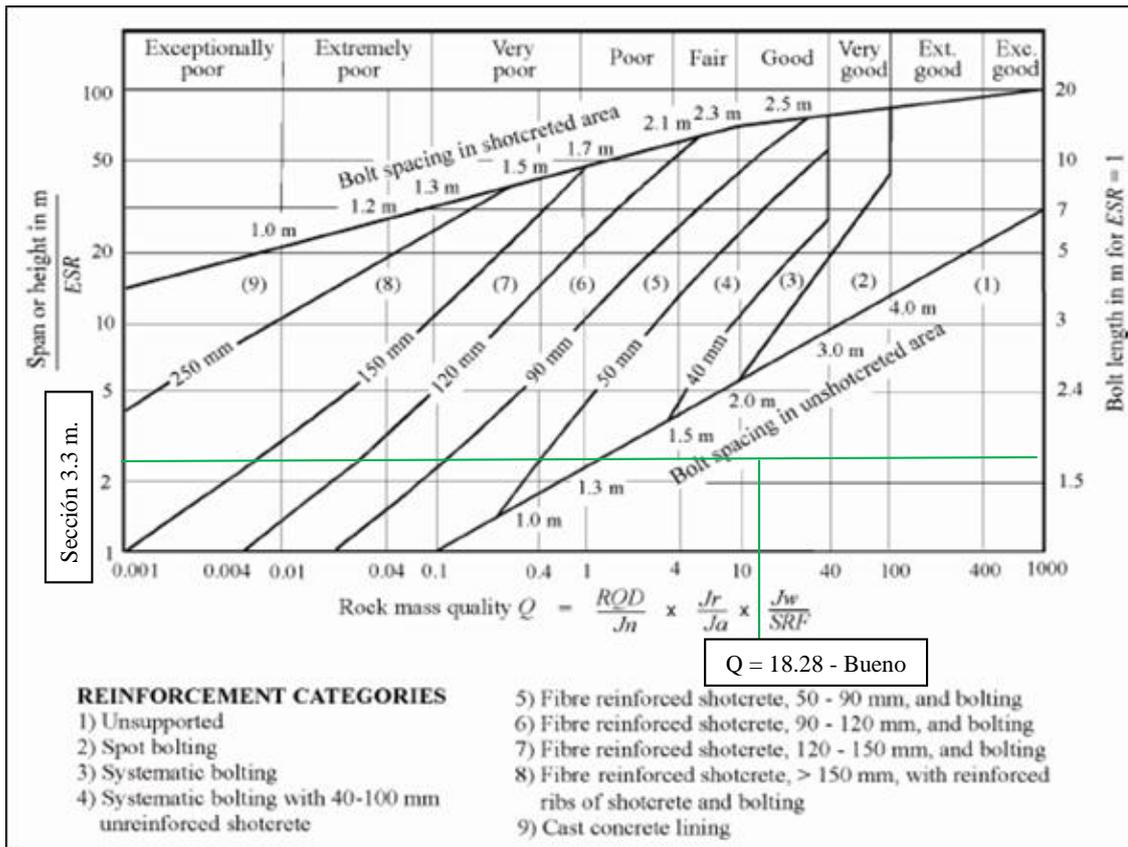


Figura 43. Diseño del sostenimiento en la estación N° 5

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

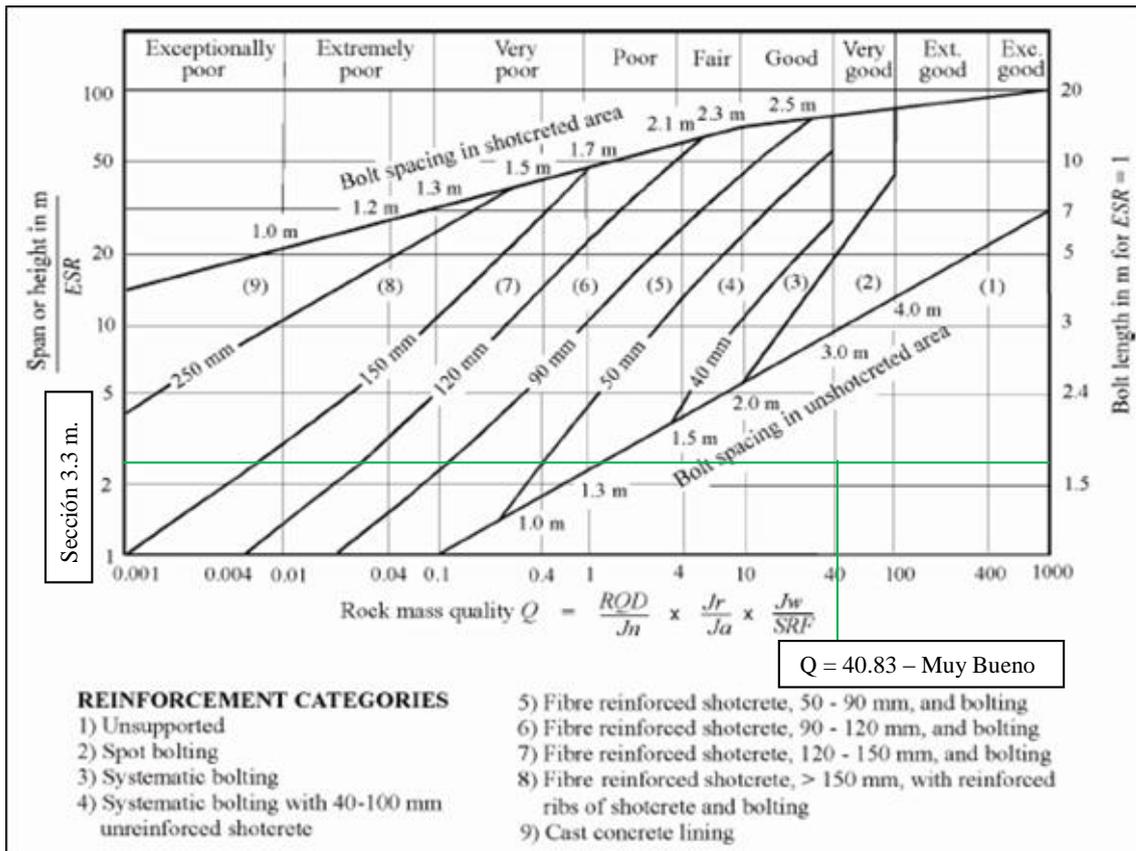


Figura 44. Diseño del sostenimiento en la estación N° 6

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

Sostenimiento por efecto cuña

En roca masiva, levemente fracturada y/o en rocas fracturadas, el papel principal del sostenimiento con pernos helicoidales, es el control de la estabilidad de los bloques y cuñas rocosas potencialmente inestables. Esto es lo que se llama también el “efecto cuña”, como se observe en la Figura 45.

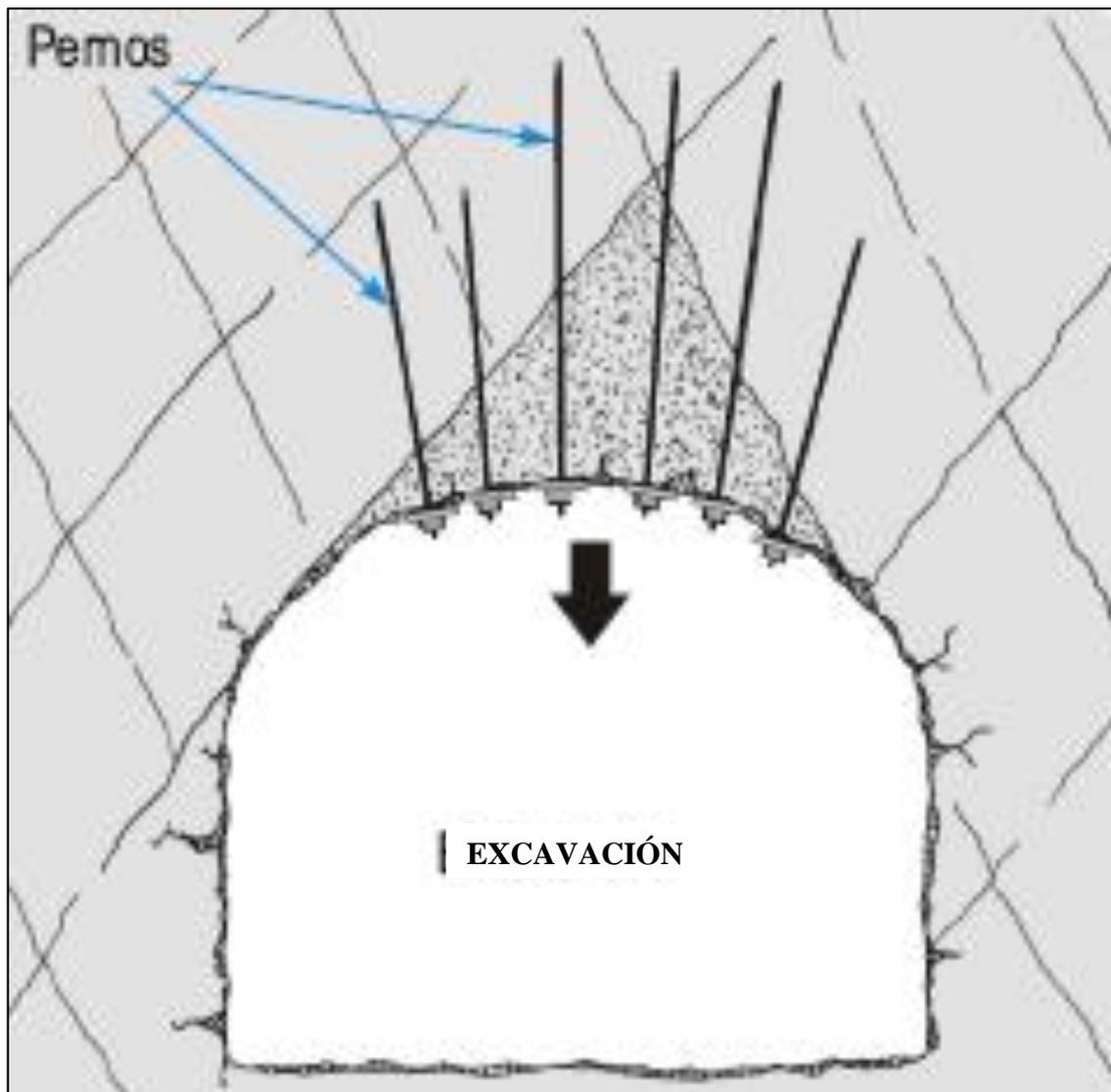


Figura 45. Diseño del sostenimiento por el efecto cuña

Fuente: Flores, M. (2013). Diseño del soporte y reforzamiento del macizo rocoso. Rock Info consultoría en Geomecánica Minera.

4.6 Discusión

La caracterización del macizo rocoso se detalla en los Cuadros 64 y 65.

CUADRO 64

Caracterización de la toca pizarra

ESTACIÓN N° 1 (85°)	X = 451 900	Y = 8 383 394	Z = 4 842
	RQD	70	Regular (50 – 75)
	RMR	49	Media III (41 – 60)
	C	0.24	MPa
	ϕ	29.5°	
	Q	4.67	Media (4 – 10)
	GSI (RMR₈₉)	44	
	GSI (Q)	50	
	JCS	22	MPa
ESTACIÓN N° 2 (68°)	X = 452 060	Y = 8 383 417	Z = 4 845
	RQD	94	Excelente (90 – 100)
	RMR	74	Buena II (61 – 80)
	C	0.37	MPa
	ϕ	42°	
	Q	31.33	Buena (10 – 40)
	GSI (RMR₈₉)	69	
	GSI (Q)	57	
	JCS	29	MPa
ESTACIÓN N° 3 (92°)	X = 452 258	Y = 8 383 447	Z = 4 847
	RQD	77	Buena (75 – 90)
	RMR	54	Media III (41 – 60)
	C	0.27	MPa
	ϕ	32°	
	Q	4.28	Media (4 – 10)
	GSI (RMR₈₉)	49	
	GSI (Q)	50	
	JCS	32	MPa
ESTACIÓN N° 4 (86°)	X = 452 461	Y = 8 383 450	Z = 4 848
	RQD	94	Excelente (90 – 100)
	RMR	68	Buena II (61 – 80)
	C	0.34	MPa
	ϕ	39°	
	Q	10.44	Buena (10 – 40)
	GSI (RMR₈₉)	63	
	GSI (Q)	53	
	JCS	29	MPa

Fuente: Elaboración propia del tesista.

La caracterización geomecánica realizada en la formación de la roca metamórfica pizarra, elaborado en el proyecto se logra obtener la calidad de la roca, hecho en estaciones distribuido estratégicamente en 04 zonas representativas a lo largo del proyecto en desarrollo y como resultados nos indican que el macizo rocoso en las estaciones 1 y 3, da como calidad de roca regular (III) con un RMR_{89} por encima de 40 y en las estaciones 2 y 4, da como calidad de roca buena (II) con un RMR_{89} por encima de 60, resultando así en una doble zonificación dentro de una misma formación, con un comportamiento del macizo rocoso de tres a cuatro familias de discontinuidades existentes.

CUADRO 65

Caracterización de la toca cuarcita

ESTACIÓN N° 5 (148°)	X = 452 497	Y = 8 383 337	Z = 4 841
	RQD	94	Excelente (90 – 100)
	RMR	57	Media III (41 – 60)
	C	0.28	MPa
	ϕ	33.5°	
	Q	18.28	Buena (10 – 40)
	GSI (RMR_{89})	52	
	GSI (Q)	55	
	JCS	43	MPa
ESTACIÓN N° 6 (89°)	X = 452 612	Y = 8 383 304	Z = 4 836
	RQD	98	Excelente (90 – 100)
	RMR	69	Buena II (61 – 80)
	C	0.34	MPa
	ϕ	39.5°	
	Q	40.83	Muy buena (40 – 100)
	GSI (RMR_{89})	64	
	GSI (Q)	59	
	JCS	43	MPa

Fuente: Elaboración propia del tesista.

La caracterización geomecánica realizada en la formación de la roca metamórfica cuarcita, elaborado en el proyecto se logra obtener la calidad de la roca, hecho en estaciones distribuido estratégicamente en 02 zonas representativas a lo largo del proyecto en desarrollo y como resultados nos indican que el macizo rocoso en la estación 5, da como calidad de roca regular (III) con un RMR_{89} cercano a los 60 y en la estación 6, da como calidad de roca buena (II) con un RMR_{89} superior a los 60, resultando así también en una doble zonificación dentro de una misma formación, con un comportamiento del macizo rocoso de dos a tres familias de discontinuidades existentes.

Así mismo se observa en el proyecto de desarrollo 02 zonificaciones bien marcadas por las rocas metamórficas pizarra y cuarcita.

Los dominios geotécnicos obtenidos en cada estación del proyecto se representan en las siguientes Figuras 46, 47, 48, 49, 50 y 51. Del mismo modo el tipo de sostenimiento a utilizar independientemente en cada estación.

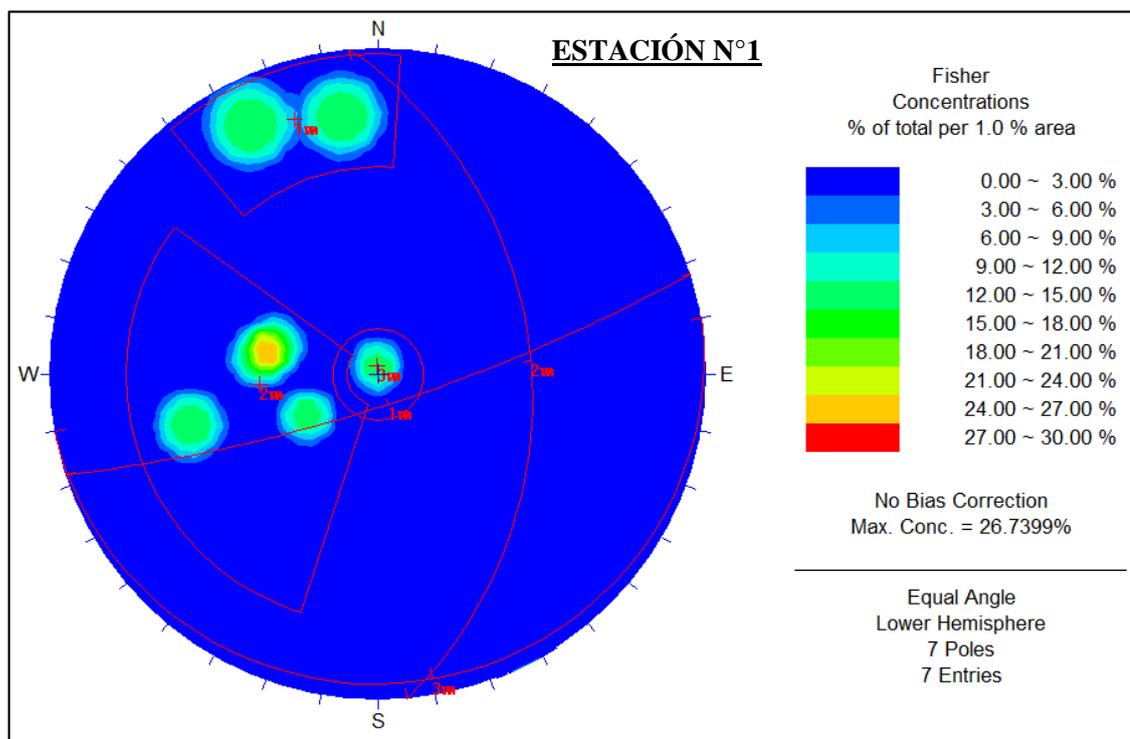


Figura 46. Dominio geotécnico de la estación N° 1

Fuente: Elaboración propia del tesista.

El dominio geotécnico que presenta la estación 1 de la caracterización geomecánica, roca pizarra, está dada por 03 familias de discontinuidades que se interceptan entre sí, generando el modo de falla por efecto cuña, el cual requiere de un tipo de sostenimiento inmediato de forma sistemática y permanente, para evitar el desprendimiento de rocas en el proyecto que es una causal primordial en accidentes de mina.

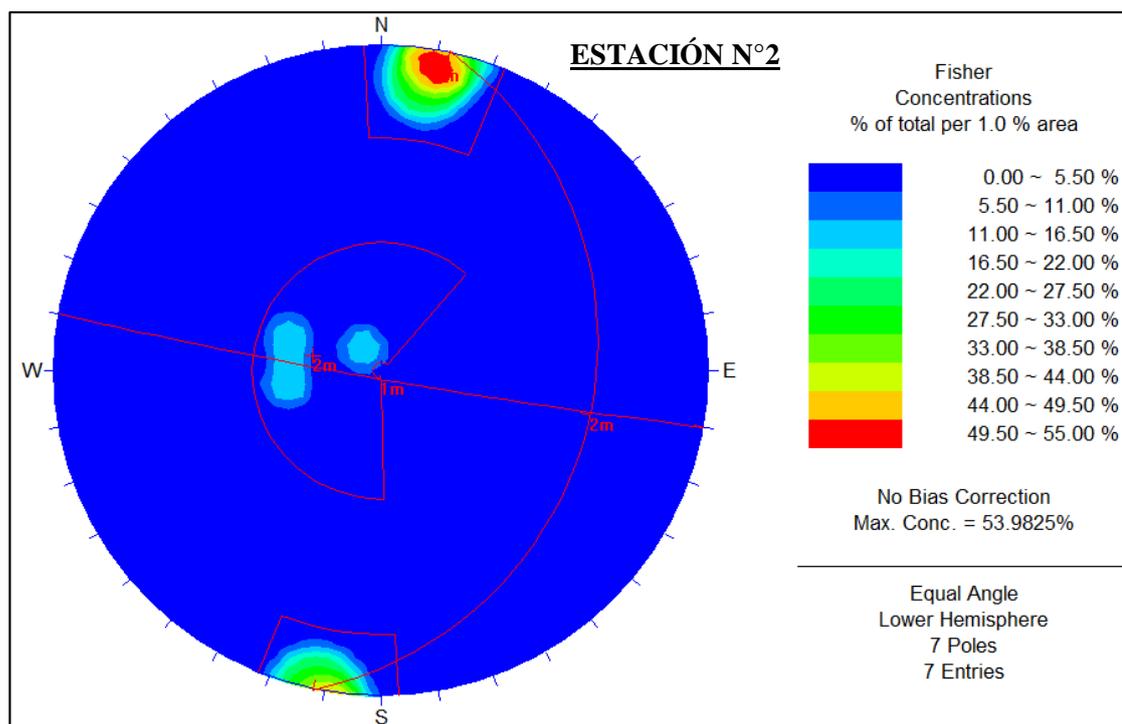


Figura 47. Dominio geotécnico de la estación N° 2

Fuente. Elaboración propia del tesista.

El dominio geotécnico en particular que presenta la estación 2 de la caracterización geomecánica, roca pizarra, está dada solo por 02 familias de discontinuidades que se interceptan en un punto el cual no genera el modo de falla por efecto cuña, por lo que no requiere de un sostenimiento inmediato.

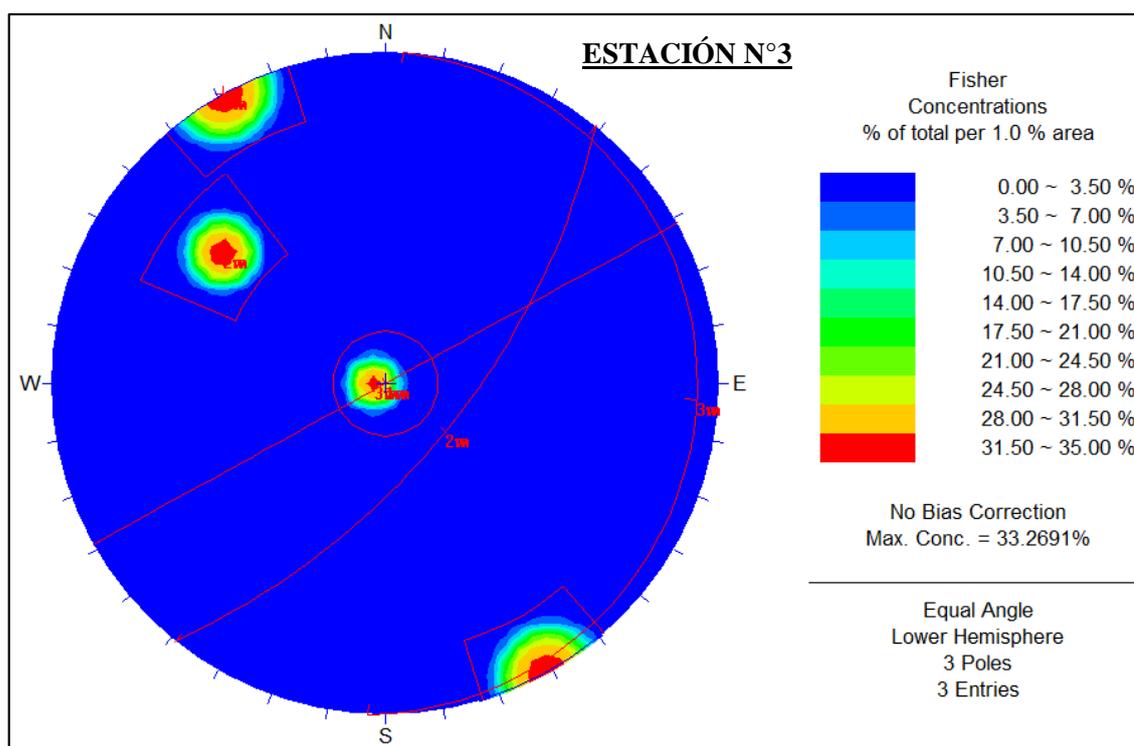


Figura 48. Dominio geotécnico de la estación N° 3

Fuente: Elaboración propia del tesista.

El dominio geotécnico que presenta la estación 3 de la caracterización geomecánica, roca pizarra, está conformada por 03 familias de discontinuidades que se interceptan en 03 puntos, generando el modo de falla por efecto cuña, el cual requiere de un tipo de sostenimiento inmediato de forma puntual y permanente.

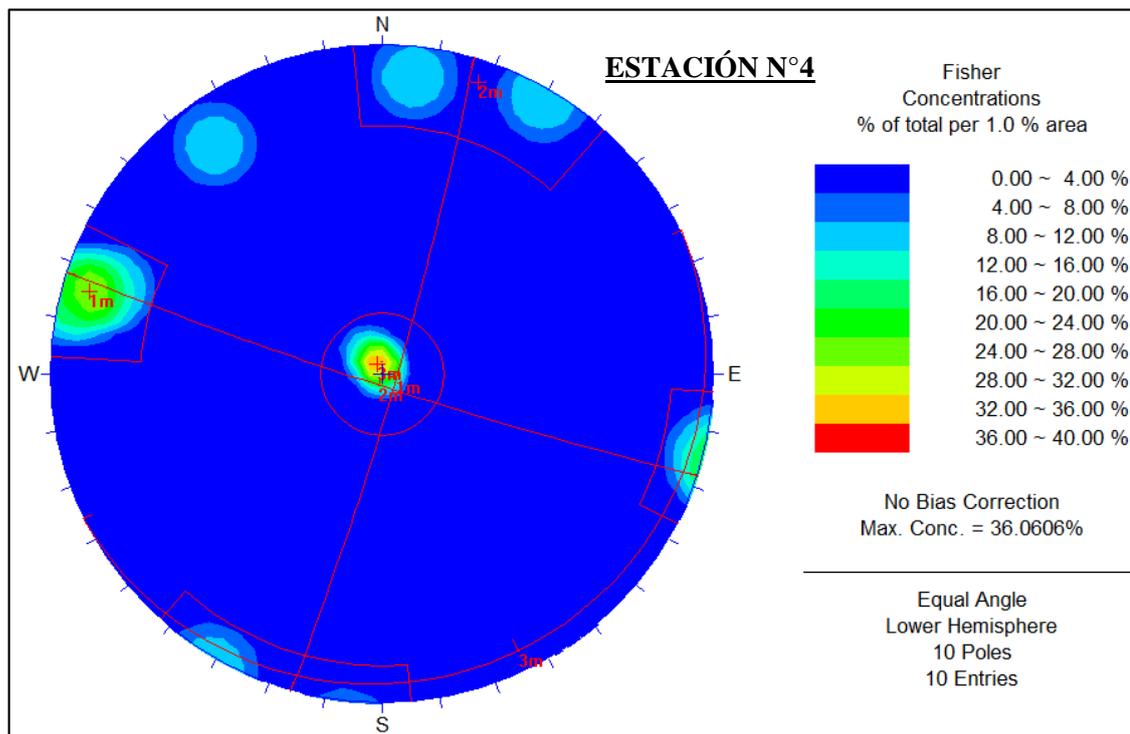


Figura 49. Dominio geotécnico de la estación N° 4

Fuente: Elaboración propia del tesista.

El dominio geotécnico que presenta la estación 4 de la caracterización geomecánica, roca pizarra, está dada del mismo modo por 03 familias de discontinuidades que se interceptan entre sí, generando también el modo de falla por efecto cuña, el cual requiere de un tipo de sostenimiento inmediato de forma sistemática y permanente.

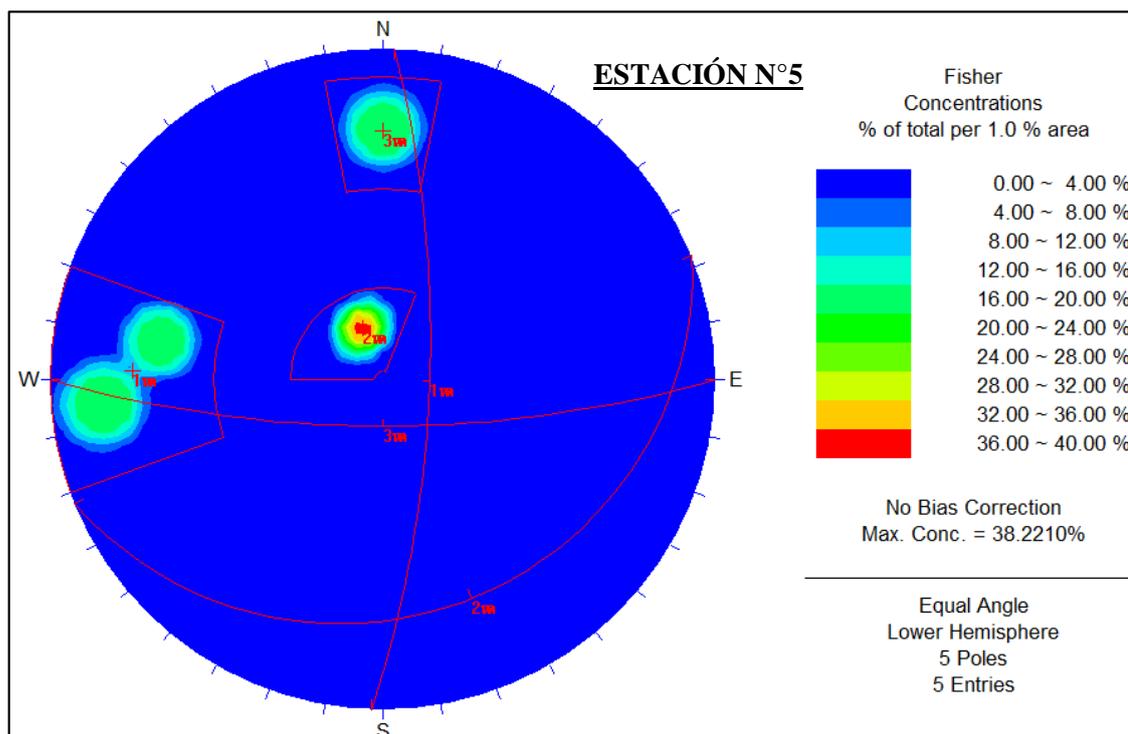


Figura 50. Dominio geotécnico de la estación N° 5

Fuente: Elaboración propia del tesista.

El dominio geotécnico que presenta la estación 5 de la caracterización geomecánica, roca cuarcita, del mismo modo que en las anteriores está conformada por 03 familias de discontinuidades que se interceptan entre sí, generando el modo de falla por efecto cuña, el cual requiere de un tipo de sostenimiento inmediato de forma sistemática y permanente.

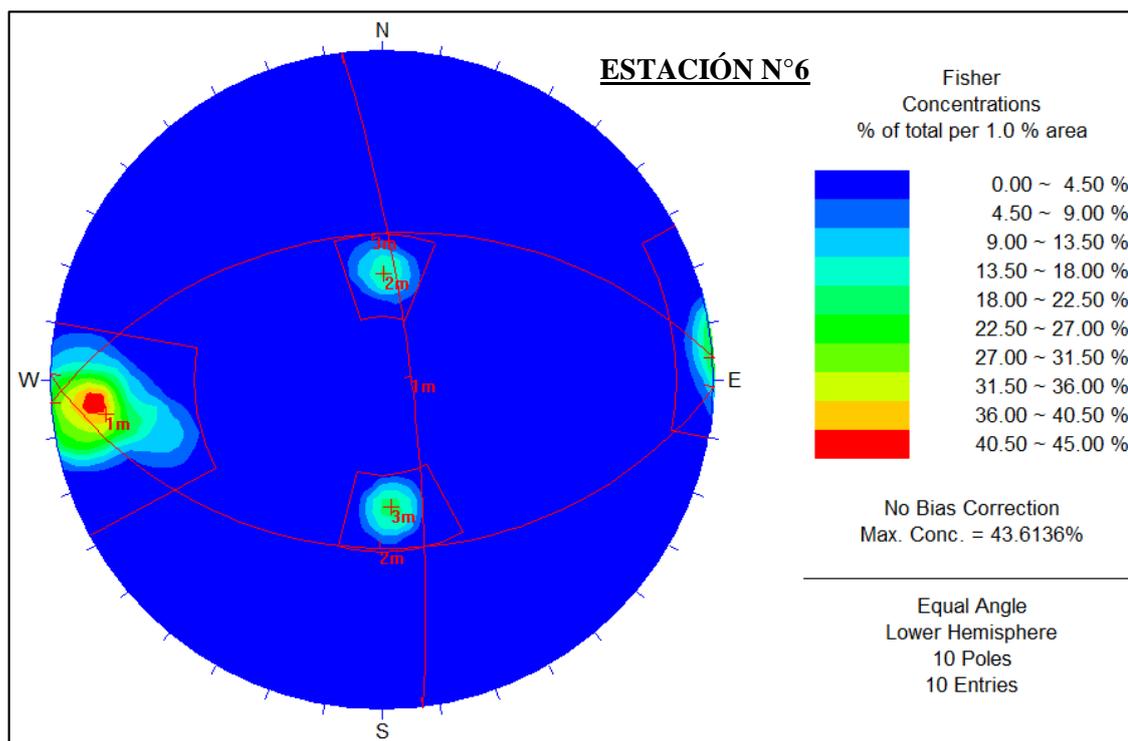


Figura 51. Dominio geotécnico de la estación N° 6

Fuente: Elaboración propia del tesista.

El dominio geotécnico que presenta la estación 6 de la caracterización geomecánica, roca cuarcita, está conformada por 03 familias de discontinuidades en polos distintos el cual genera el modo de falla por efecto cuña, lo que nos permite observar, que se requiere un tipo de sostenimiento inmediato de forma sistemática y permanente, ya que se encuentra en proximidades del final del proyecto, con la presión litostática existente en dicha estación, hará que falle la estabilidad del macizo rocoso con desprendimiento de rocas del tipo estallido.

En función a los resultados obtenidos en la caracterización del macizo rocoso se determinó que el tipo y diseño de sostenimiento que se aplicara en el proyecto, en las estaciones 1,3 será consistente a un diseño de sostenimiento por refuerzo con un empernado sistemático activo, categoría por adherencia a un espaciado de instalación de 1.5 metros y en las estaciones 2, 4, 5 y 6, será con el diseño de sostenimiento por refuerzo con un empernado puntual activo, categoría por adherencia a un espaciado de instalación que varía entre los intervalos de 2 a 3 metros, en ambos casos el dominio geotécnico es por efecto cuña, el cual nos dará un control mejor de la estructura rocosa y un elevado factor de seguridad. Ver Cuadro 66.

CUADRO 66

Sostenimiento por estación

EST.	SECCIÓN (m)	Q	SOSTENIMIENTO	ESPACIADO (m)	LONG. PERNO (m)	DOMINIO GEOTÉCNICO
1	3 x 3	4.67	Empernado sistemático	1.5	1.8	Cuña
2	3 x 3	31.33	Empernado puntual	2.7	1.8	Cuña
3	3 x 3	4.28	Empernado sistemático	1.5	1.8	Cuña
4	3 x 3	10.44	Empernado puntual	2	1.8	Cuña
5	3 x 3	18.28	Empernado puntual	2.2	1.8	Cuña
6	3 x 3	40.83	Empernado puntual	3	1.8	Cuña

Fuente: Elaboración propia del tesista.

4.7 Contrastación

Los resultados obtenidos del presente proyecto se hacen una contrastación con los objetivos e hipótesis, como se observa en el Cuadro 67.

CUADRO 67

Contrastación

HIPÓTESIS	OBJETIVOS	RESULTADOS
<p>HIPÓTESIS GENERAL</p> <p>La caracterización geomecánica nos permite identificar zonas y dominios geotécnicos del macizo rocoso lo que nos permitirá un diseño de sostenimiento para las labores de desarrollo.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICOS</p> <p>*Los parámetros geomecánicos a considerar dentro de la caracterización serán las propiedades de las discontinuidades y las propiedades del macizo rocoso el cual dará a conocer zonas y dominios geotécnicos.</p> <p>*El diseño de sostenimiento para las labores de desarrollo dependerá del dominio geotécnico influyente en la inestabilidad del macizo rocoso.</p>	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <p>Analizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso para la aplicación en el diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la U.E.A., Ana María – La Rinconada.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>*Determinar los parámetros geomecánicos para la caracterización del macizo rocoso en la U.E.A., Ana María – La Rinconada.</p> <p>*Determinar el diseño de sostenimiento para las labores de desarrollo en la U.E.A., Ana María – La Rinconada.</p>	<p>a) La caracterización del macizo da como calidad de roca según la zona y RMR_{89} de Bieniawski entre regular (III) y buena (II) los valores fluctúan entre 40 a 80 como indicador cuantificable.</p> <p>b) Los parámetros como la resistencia a la compresión simple, discontinuidades, rugosidad, relleno, espaciado, persistencia, presencia de agua nos grafica los dominios geotécnicos presentes en el macizo rocoso que da como resultado dominio geotécnico del tipo cuña.</p> <p>c) Según los valores del índice de Q de Barton, Lien y Lunde, sugieren un tipo de sostenimiento por refuerzo activo de forma puntual y sistemática con pernos de longitudes de 1.8m. (6 pies), con espaciados que fluctúan entre 1.5 a 3.0 m. sin refuerzo con cemento lanzado.</p>

Fuente: Elaboración propia del tesista.

CONCLUSIONES

La clasificación geomecánica obtenido en la ejecución del presente proyecto nos da a conocer que según el RMR_{89} de Bieniawski, da como resultado una calidad de tipo III, roca regular en pizarra y calidad buena tipo II en cuarcita, el dominio estructural de la caracterización geomecánica en ambas calidades de rocas se muestra es un mecanismo de falla de tipo cuña, debido a un comportamiento de discontinuidades de dos a tres familias presentes.

Los valores del índice Q de Barton, están muy estrechamente relaciona a la calidad de roca, sugiriendo el tipo de sostenimiento a utilizar, el cual da como resultado aplicar un sostenimiento por refuerzo activo de pernos de anclaje con longitudes de 1.8 metros (6 pies), a un espaciado que interactúan entre 1.5 a 3 metros, empernados de forma puntual o sistemática sin refuerzo de concreto lanzado.

Los pernos anclaje utilizados en el diseño de sostenimiento es el perno helicoidal de 19 milímetros de diámetro por 1.8 metros de largo (6 pies) y su alta resistencia a la fluencia y tracción de 14 a 19 TM, con cartuchos encapsulantes de resina y cemento según el área a sostener, esto debido a que el proyecto en una labor permanente de desarrollo.

RECOMENDACIONES

Para la selección del anclaje en la etapa de sostenimiento se debe de conocer la calidad de las propiedades físicas-mecánicas del perno pre-instalación y post-instalación a utilizar y cumplir los procedimientos indicados por el fabricante para su instalación, esto con el fin de que cumpla su función de sostener eficientemente, evitar el colapso de rocas colgadas y realizar un monitoreo periódico.

Para la obtención de los dominios geotécnicos, se deberá apoyar con programas computacionales de Rocscience como son, el software Dips y Unwedge, con el objetivo de visualizar a un mejor y detallado, para luego diseñar el sostenimiento a utilizar.

BIBLIOGRAFÍA

- Albarracín O. Gómez D. (2000). “Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso del sector la sierra” Sogamoso, Boyacá, Colombia.
- Antenor, G. (1996) Boletín N° 66 INGEMMET.
- Apshana Y. et al. (2011). “Caracterización y clasificación geomecánica del macizo rocoso para determinar la estabilidad óptima de los taludes” municipio de Bosconia, departamento del Cesar.
- Azuarte D. (2004). “Caracterización geológica y geomecánica de los macizos rocosos de la sección Guatire – Caucagua de la autopista Rómulo Betancourt” estado Miranda. Universidad Central de Venezuela.
- Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.* **6**(4), 189-239.
- Barton, N., Løset, F., Lien, R. and Lunde, J. (1980). Application of the Q-system in design decisions. In *Subsurface space*, (ed. M. Bergman) **2**, 553-561. New York: Pergamon.
- Blanco, R. (2005). “Características físico y mecánico estructurales del macizo rocoso” Proyecto CYTED XIII, Córdoba, Argentina.
- Bieniawski, Z.T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. In *Exploration for rock engineering, proc. of the symp.*, (ed. Z.T. Bieniawski) **1**, 97-106. Cape Town: Balkema.
- Comisión Federal de Electricidad (1979). “Manual de diseño de obras civiles” B-3.4, México.

- Condori A. E. (2010). Evaluación geomecánica de San Andrés de la mina La Rinconada.
- Deere, D.U. and Deere, D.W. (1988). The rock quality designation (RQD) index in practice. In Rock classification systems for engineering purposes, (ed. L. Kirkaldie), ASTM Special Publication 984, 91-101. Philadelphia: Am. Soc. Test. Mat.
- Ferrer, M. y González V, L. Eds. (1999). “Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos” IGME.
- Flores, M. (2013). “Diseño del soporte y reforzamiento del macizo rocoso” Rock Info consultoría en Geomecánica Minera.
- Givera, L. (2013), “Aplicación de geomecánica en la construcción de chimeneas Raise Borer en la mina San Rafael” Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano.
- Gonzales, L. (2002). Ingeniería Geológica.
- Guamán V. Mendieta F. (2013). “Evaluación geomecánica del macizo rocoso en la cantera de materiales de construcción las Victorias” Universidad de Cuenca.
- Hoek, E. y Brown, E. T. (1985). Excavaciones subterráneas en roca, Mexico, McGraw-Hill.
- Hoek E. (1994). Strength of rock and rock masses. ISRM News Journal, 2(2).
- ISRM (1981). Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. ISRM Suggested methods. Ed. E.T. Brown. Pergamon Press.

- Jorda, L. (2012). “Casos reales de geomecánica aplicado a la minería” Escuela de Post Grado Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.
- Maday C. P. (2001). “Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país” Instituto Superior Minero Metalúrgico.
- MINEM. (2014), Anuario “Resumen de índice de frecuencia, severidad sobre accidentes de trabajo – Corporación Minera Ananea S.A.” presentado en la web institucional del Ministerio de Energía y Minas del Perú.
- Norly B. y Francisco B. (2012). “Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos – geotecnia aplicada”, Mérida, Venezuela.
- Sumiri, P. (2013), “Aplicación de geomecánica en prevención de caída de rocas en corte y relleno ascendente Unidad Económica Administrativa Poracota CIA de minas Buenaventura” Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano.
- SNMPE. (2004). Manual de geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea.
- SENAMHI. (2014). Resumen anual del control de meteorología e hidrología de la estación de Ananea, San Antonio de Putina, Puno.
- Tejada, L. (2012). “Mecánica de rocas”, Escuela de Post Grado Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.
- Velásquez, D. (2010). “Evaluación del yacimiento Cumuni – Santa Ana”. Puno, Perú.

Wendor, C. (1980). "Hidrología para estudiantes de ingeniería civil" 2da edición,
Pontificia Universidad Católica del Perú.

ANEXOS

ANEXO 1

Matriz de consistencia

1. PROBLEMAS	2. OBJETIVOS	3. HIPÓTESIS	4. VARIABLES	5. METODOLOGÍA
<p>PROBLEMA GENERAL ¿Qué importancia tiene la caracterización geomecánica del macizo rocoso para el diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la U.E.A., Ana María – La Rinconada?</p> <p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</p> <p>*¿Cuáles son los parámetros geomecánicos a considerar dentro de la caracterización geomecánica en la U.E.A., Ana María – La Rinconada?</p> <p>*¿Cuál será el diseño de sostenimiento para las labores de desarrollo en la U.E.A., Ana María – La Rinconada?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL Analizar la caracterización geomecánica del macizo rocoso para la aplicación en el diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la U.E.A., Ana María – La Rinconada.</p> <p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</p> <p>*Determinar los parámetros geomecánicos para la caracterización del macizo rocoso en la U.E.A., Ana María – La Rinconada.</p> <p>*Determinar el diseño de sostenimiento para las labores de desarrollo en la U.E.A., Ana María – La Rinconada.</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL La caracterización geomecánica nos permite identificar zonas y dominios geotécnicos del macizo rocoso lo que nos permitirá un diseño de sostenimiento para las labores de desarrollo.</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICOS</p> <p>*Los parámetros geomecánicos a considerar dentro de la caracterización serán las propiedades de las discontinuidades y las propiedades del macizo rocoso el cual dará a conocer zonas y dominios geotécnicos.</p> <p>*El diseño de sostenimiento para las labores de desarrollo dependerá del dominio geotécnico influyente en la inestabilidad del macizo rocoso.</p>	<p>VARIABLE INDEPENDIENTE Caracterización geomecánica del macizo rocoso en la U.E.A., Ana María – La Rinconada.</p> <p>VARIABLE DEPENDIENTE Diseño de sostenimiento en labores de desarrollo de la U.E.A., Ana María – La Rinconada.</p>	<p>1.TIPO INVESTIGACIÓN Aplicada</p> <p>2.NIVEL INVESTIGACIÓN Descriptivo</p> <p>3.METODO Descriptivo</p> <p>4.DISEÑO Investigación por objetivo</p> <p>5.POBLACIÓN U.E.A., Ana María – La Rinconada</p> <p>6.MUESTRA Proyecto Cobra, E.E. JB</p> <p>7.TÉCNICAS Levantamiento topo Figura. Mapeo geomecánicos.</p> <p>8.INSTRUMENTOS Esclerómetro. Brújula. Distancio metro. Flexo metro. Picsa. Wincha. Tablas y ábacos.</p>

Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO 2

Formato de registro en estaciones

LIBRETA GEOMECÁNICA

ESTACIÓN N°: _____

LITOLOGÍA: _____ **FORMACIÓN:** _____

METEORIZACIÓN: _____ **RESISTENCIA:** _____

CROQUIS FRACTURAS

Martillo Schmidt						Media
Matriz						
Juntas						

UCS según los golpes del martillo (Mpa):

Fracturas / Metro	$\lambda 1$	
Normalmente tomamos una sola scan line (1), pero habrimos la posibilidad de mas de una.	$\lambda 2$	
	$\lambda 3$	
	$\lambda 4$	
	Juntas/m3	Jv
Ensayo Tilt - Test	ϕ Básico	

CROQUIS AFLORAMIENTO

Añadir escala y hacer fotografía

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geomecánica aplicado a la minería, Escuela de Post Grado Maestría en Geotecnia y Geomecánica minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

ANEXO 3

Formato de mapeo geomecánico

FICHA DE ESTACIÓN GEOMECAÁNICA N°										
COORDENADAS:		X: <input type="text"/>			Y: <input type="text"/>			Z: <input type="text"/>		
FECHA:/...../.....				Calidad de Afloramiento:						

MEDIDAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipo de Plano										
Dir. Buz. (DIPDIR)										
Buzamiento (DIP)										
ESPACIADO										
> 2000 mm										
600 - 2000 mm										
200 - 600 mm										
60 - 200 mm										
< 60 mm										
CONTINUIDAD										
< 1 m										
1 - 3 m										
3 -10 m										
10 - 20 m										
> 20 m										
APERTURA										
Nada										
< 0,1 mm										
0,1 - 1,0 mm										
1 - 5 mm										
> 5 mm										
RUGOSIDAD										
Ondulación										
JRC										
METEORIZACIÓN JUNTA										
Grado										
AGUA										
Seco										
Lig. Húmedo										
Húmedo										
Goteando										
Fluyendo										
RELLENO										
Naturaleza										
Espesor mm										

Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geomecánica aplicado a la minería, Escuela de Post Grado Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

ANEXO 4

Formato de registro con esclerómetro

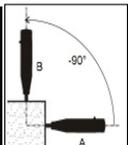
Procedimiento para el Cálculo de Resistencia Compresiva Uniaxial con el Martillo de Clasificación de Rocas Schmidt.

1

Ingrese los datos de los rebotes registrados con el Martillo en campo.

2

Ingrese la orientación del Martillo, conforme se tomo las muestras en campo.
 90 - (Martillo en posición hacia abajo = Ejemplo Figura B, no tiene corrección el rebote).
 90+ (Martillo en posición hacia arriba).
 45 - (Martillo a 45° hacia abajo).
 45+ (Martillo a 45° hacia arriba).
 Horizontal (Martillo en posición horizontal = Ejemplo Figura A).
 NOTA: En la celda debes digitar = 90+, 90-, 45+, 45-, Horizontal (con ello se activa las correcciones)



Muestra	Rebote	Rebote Corregido	Orientación del Martillo
1	42	41.3	45-
2	44	43.3	45-
3	42	41.3	45-
4	48	47.3	45-
5	50	49.4	45-
6	42	41.3	45-
7	40	39.3	45-
8	44	43.3	45-
9	48	47.3	45-
10	50	49.4	45-
Promedio		44.3	

3

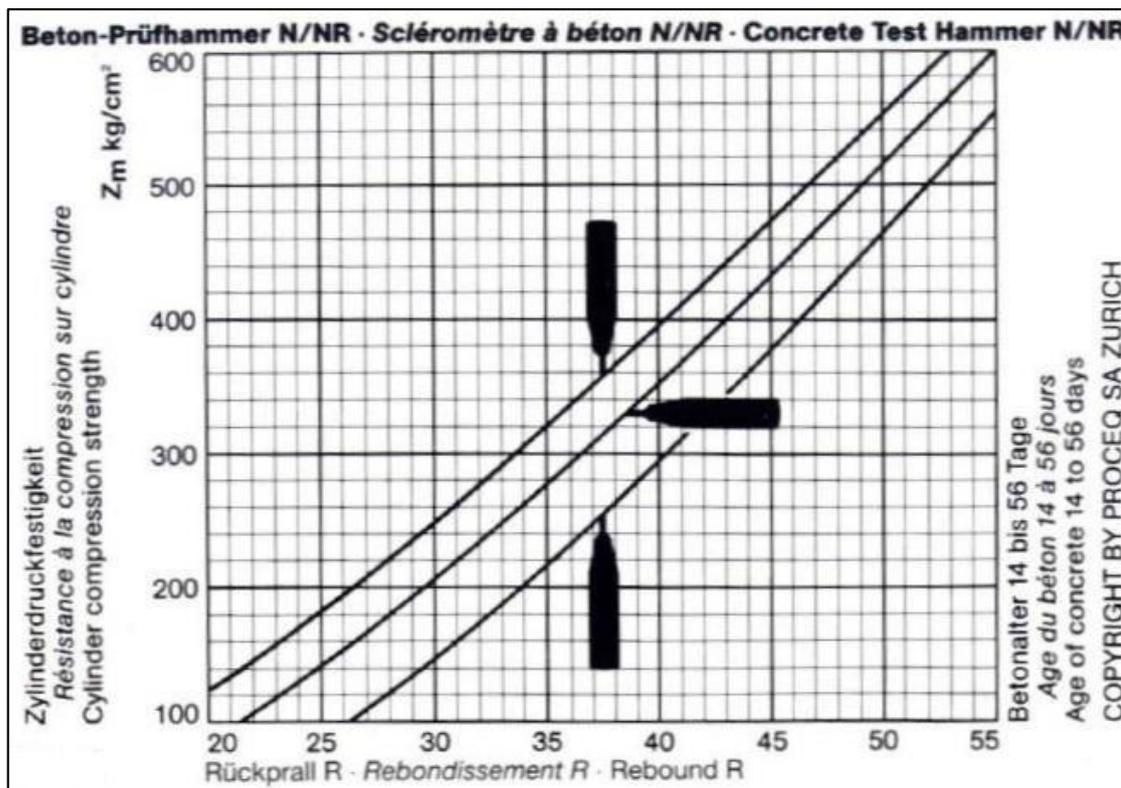
Ingrese la densidad de la roca. Sea Mineral o Desmonte según el caso

Rebote Promedio	Densidad de la Roca Tn/m3	Resistencia Compresiva Uniaxial (MPa)
44.3	2.55	101

Fuente: Flores, M. 2013. Diseño del soporte y reforzamiento del macizo rocoso. Rock Info consultoría en Geomecánica Minera.

ANEXO 5

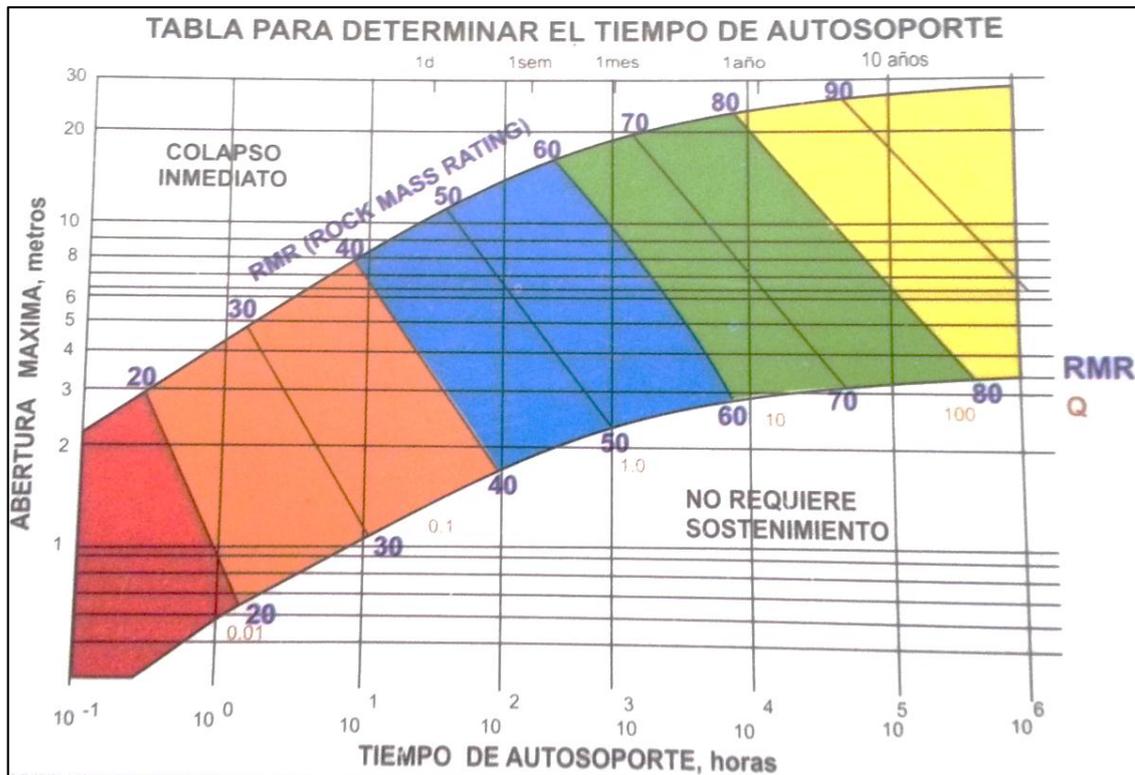
Cuadro ponderación con esclerómetro



Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geomecánica aplicado a la minería, Escuela de Post Grado Maestría en Geotecnia y Geomecánica minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

ANEXO 6

Cuadro de auto soporte de galería



Fuente: Jorda, L. 2012. Casos reales de geomecánica aplicado a la minería, Escuela de Post Grado Maestría en Geotecnia y Geomecánica Minera, Universidad Nacional del Altiplano – Puno.

ANEXO 7

Clasificación geomecánica RMR₈₉

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

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

ANEXO 8

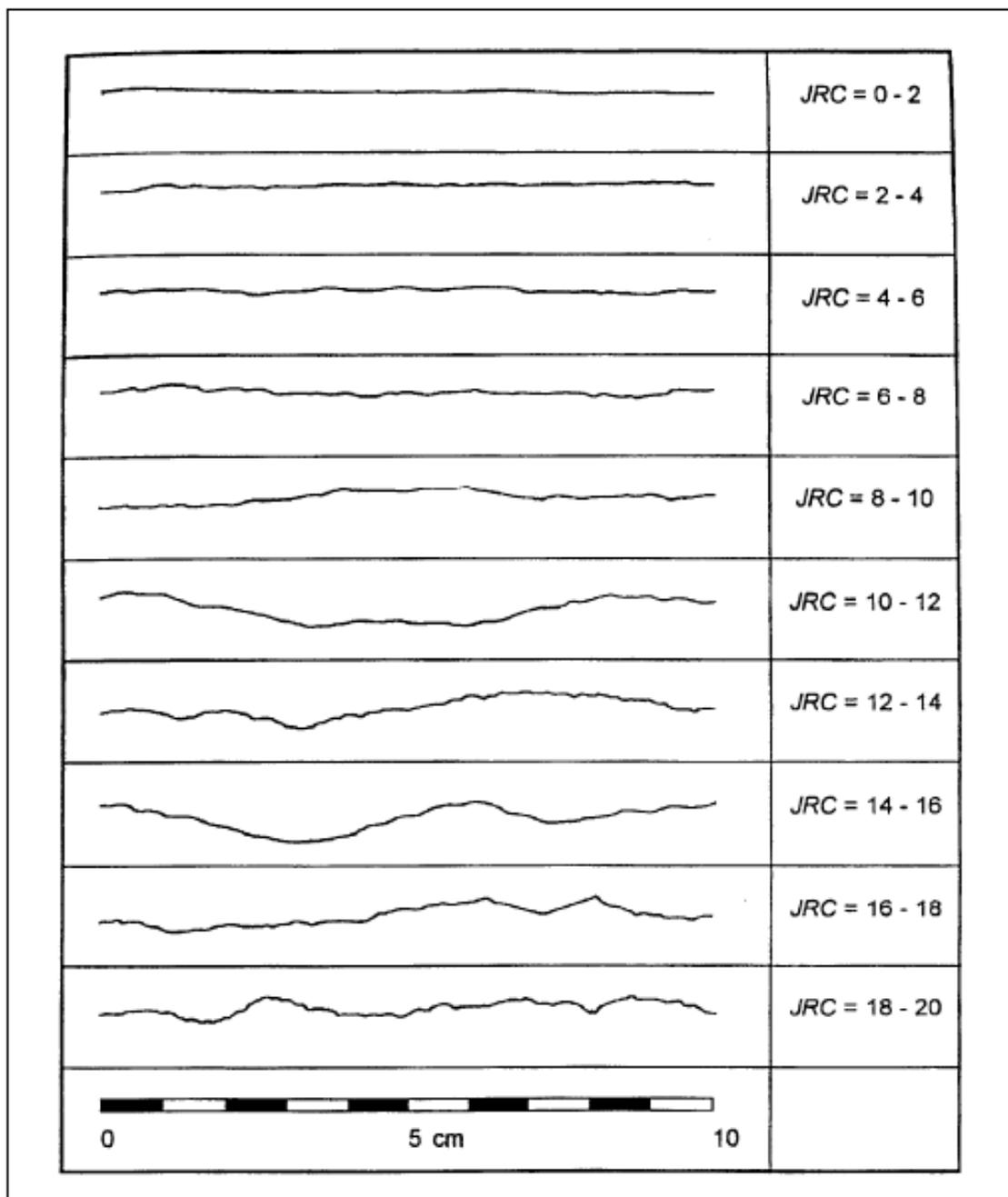
GSI basado en observaciones geológicas

(GSI) MODIFICADO		CONDICIÓN SUPERFICIAL				
<p>De los códigos de letra definidos que describen la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades, seleccione el cuadro apropiado es esta tabla. Estime el valor típico del Índice Geológico de Resistencia GSI, de los contornos que muestra la tabla. No trate de obtener un mayor grado de precisión. Indicar un rango de valores para GSI, por ejemplo de 36 a 42, es más realista que indicar un único valor por ejemplo 38.</p>		MUY BUENA (extremadamente resistente, fresca superficie de las discontinuidades muy rugosas e inalteradas, cerradas, (Rc > 250 MPa) (se astilla con golpes de picota)	BUENA (muy resistente, levemente alterada) discontinuidades rugosas, lev. alterada, manchas de oxidación, lig. abierta, (Rc 100 a 250 MPa) (se rompe con varios golpes de picota)	REGULAR (resistente, levemente alterada) discontinuidades lisas, moderadamente alterada, ligeramente abierta. (Rc 50 a 100 MPa) (se rompe con uno o dos golpes de picota)	POBRE (moderadamente resist. moderam. alter. superficie pulida o con estriaciones, muy alterada, relleno compacto o con fragmentos de roca. (Rc 25 a 50 MPa), (se indenta superficialmente)	MUY POBRE (blanda, muy alterada) Superficie pulida y estriada, muy abierta, con relleno de arcillas blandas. (Rc < 25 MPa) (se disgrega o indenta superficialmente)
ESTRUCTURA						
	<p>LEVEMENTE FRACTURADA Tres a menos sistemas de discontinuidades muy espaciadas entre sí (RQD 75 - 90%) (2 a 6 fractura por metro) (RQD = 115 - 3.3 Jn)</p>	95 90 85 80				
	<p>MODERADAMENTE FRACTURADA Muy bien trabada, no disturbada, bloques cúbicos formados por tres sistemas de discontinuidades ortogonales. (RQD 50 - 75%) (6 a 12 fracturas por metro)</p>		75 70 65 60			
	<p>MUY FRACTURADA Moderadamente trabada, parcialmente disturbada, bloques angulosos formados por cuatro o más sistemas de discontinuidades. (RQD 25 - 50%) (12 a 20 fracturas por metro)</p>			55 50 45 40		
	<p>INTENSAMENTE FRACTURADA Plegamiento y fallamiento con muchas discontinuidades interceptadas formando bloques angulosos o irregulares. (RQD 0 - 25%) (Más de 20 fracturas por metro)</p>				35 30 25 20	
	<p>TRITURADA O BRECHADA Ligeramente trabada, masa rocosa extremadamente rota con una mezcla de fragmentos fácilmente disgregables, angulosos y redondeados. (Sin RQD)</p>					15 10 5

Fuente: Hoek E. 1994. Strength of rock and rock masses. ISRM News Journal, 2(2).

ANEXO 9

Perfiles de rugosidad



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

ANEXO 10

Contacto de roca pizarra y cuarcita



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO 11

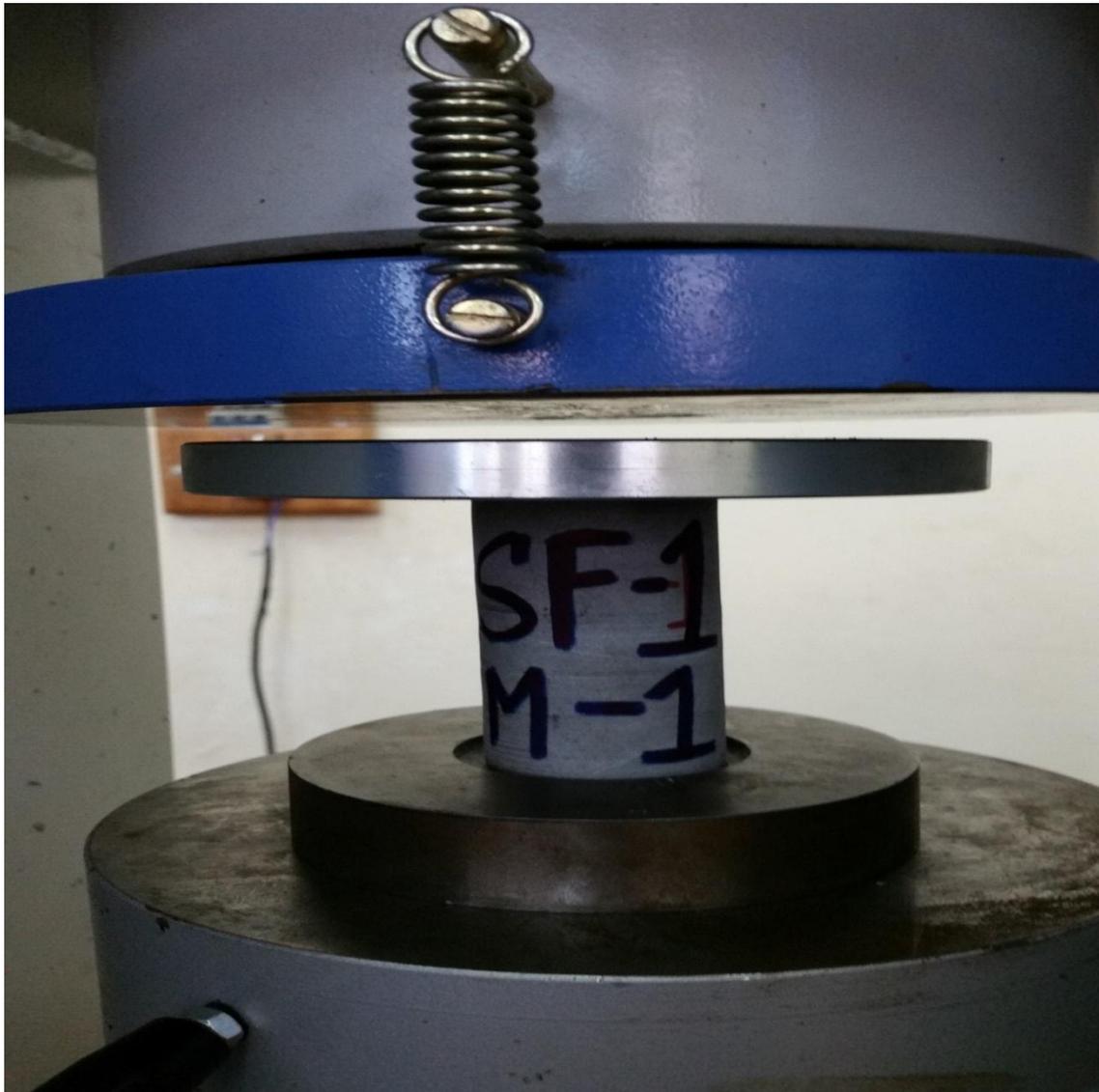
Toma de muestras en laboratorio de mecánica de rocas



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO 12

Prueba de muestra a la compresión simple



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO 13

Resultado de muestras realizadas a la prueba de compresión simple



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO 14

Toma de datos en campo con martillo Schmidt



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO 15

Toma de datos en campo con brújula



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO 16

Instrumentos geo mecánicos



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO 17

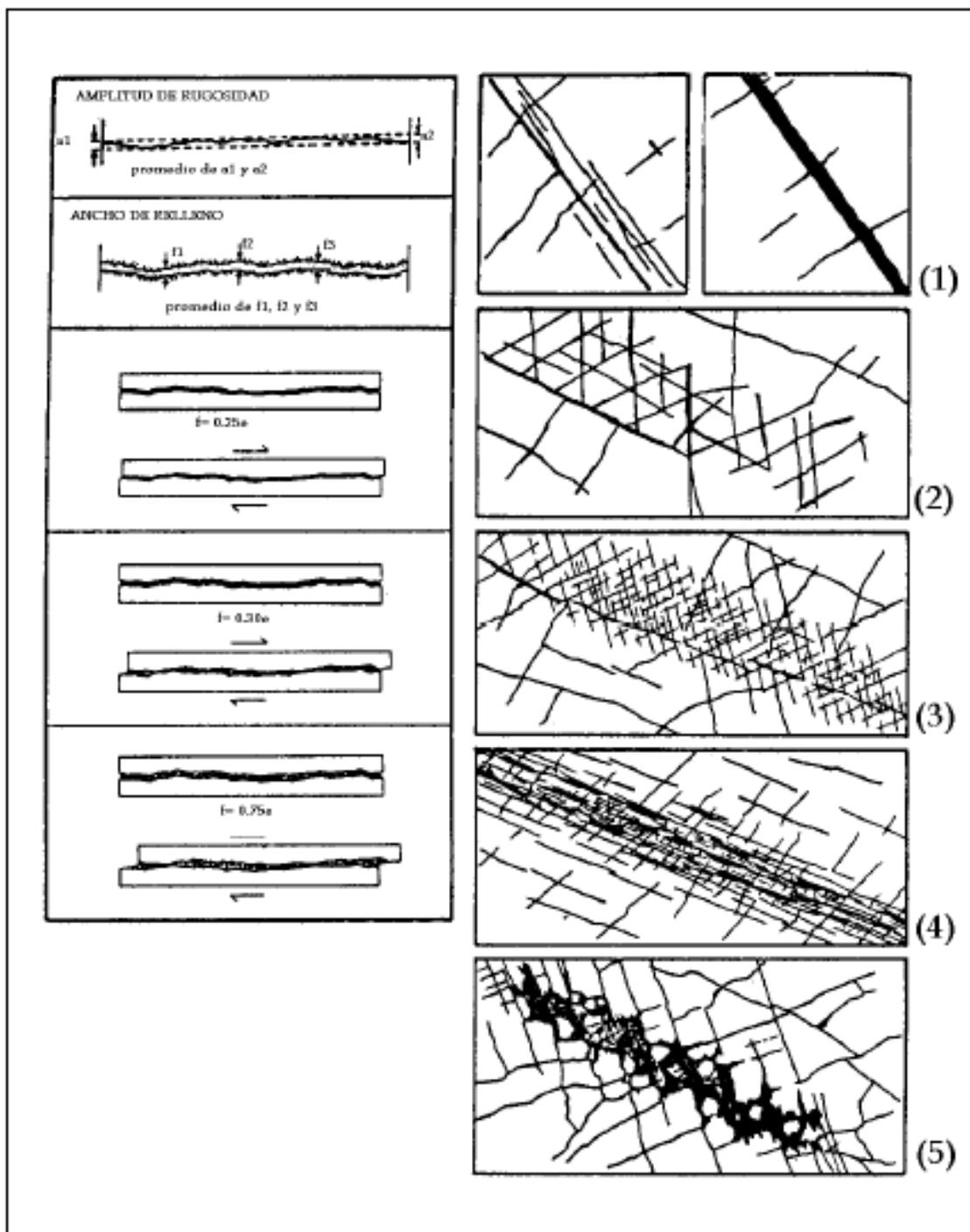
Brújula de contraste en la toma de datos



Fuente: Elaboración propia del tesista.

ANEXO 18

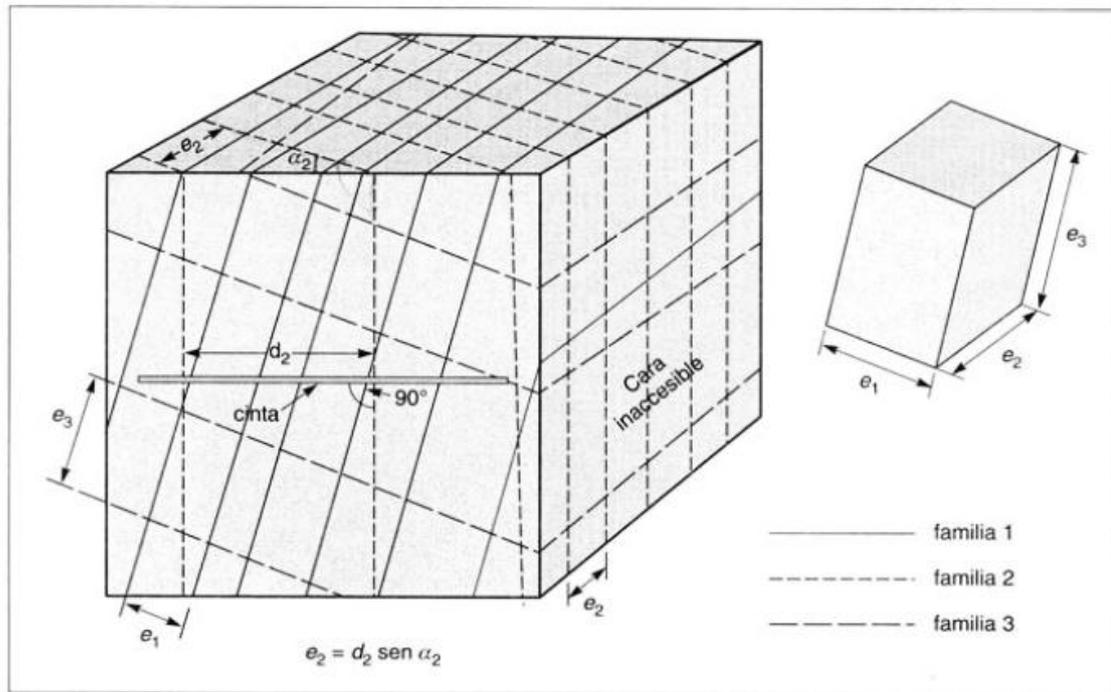
Descripción de rellenos



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

ANEXO 19

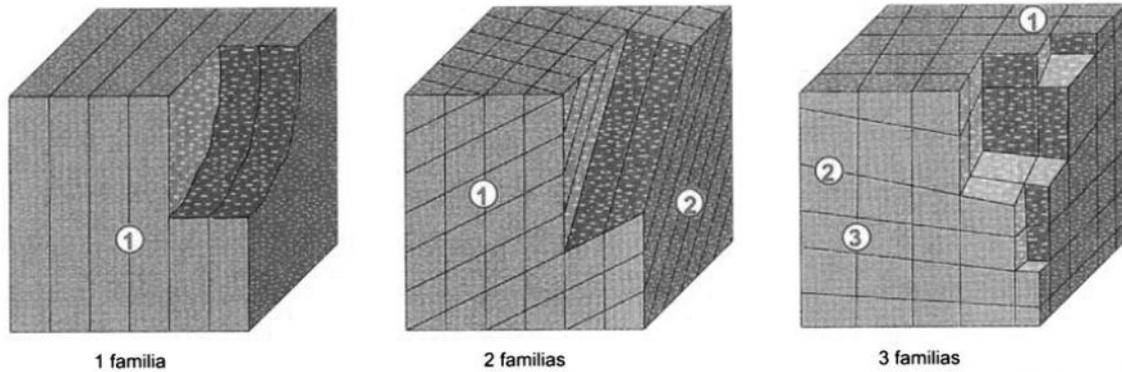
Espaciado de discontinuidades



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

ANEXO 20

Representación del número de familias mediante diagramas de bloques



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

ANEXO 21

Mapa de ubicación



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

ANEXO 22

- 02:Plano del proyecto
- 03:Plano representativo de los dominios geotécnicos