



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y

METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO DE LA

MINA 9-10 DE SHOUGANG HIERRO PERÚ

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. YURY DANNY MAMANI YUCRA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO

PUNO – PERÚ

2023



DEDICATORIA

En primer lugar, agradezco a nuestro creador por brindarme sabiduría y cumplir este objetivo tan añorado.

Dedico esta mi tesis a mis padres Sabino Mamani y Lucia Yucra, quienes me dieron la vida y su amor incondicional hacia mi persona, me brindaron su ejemplo y palabras de aliento para cumplir este sueño tan anhelado, espero hacerlos sentir muy orgullosos.

A mi esposa Briscell Vertiz, quien siempre estuvo hay alentándome en todo momento para así cumplir cada sueño que tenemos. A mi hijo Dariel, que, con su llegada a nuestras vidas, llena con mucha dicha felicidad y él es causante de querer seguir adelante y culminar esta tesis.

A mis hermanos Ronal, Rony, Yaneth, Roció, katterin, por su contante amor y consejos. A mis sobrinos Arian, Mateo, Fernanda y Alessandra, quienes llegaron a esta vida a llenar de mucha felicidad a toda la familia.

Yury



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a dios por darme la bendición por cada día de mi vida, a mi alma Mater, “Universidad Nacional del Altiplano” especialmente a la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, por permitirme seguir avanzando en mi desarrollo profesional. A todos los docentes de la escuela profesional de ingeniera geológica de quienes me brindaron sus conocimientos para mi formación académica.

A cada uno de mis familiares por su apoyo moral y recomendaciones, a mis queridos amigos por sus consejos y a los compañeros de trabajo quienes lograron dirigir mi camino profesional.

A mi asesor de tesis al M.Sc. Leonel palomino ascencio por su apoyo y sugerencias en la elaboración y culminación de esta tesis.

Finalmente, a lo largo de formación profesional, agradezco a quienes fueron mis jefes de proyectos, Ing. José Malpica, Ing. Raul pozo e ing. Luis espinosa. por su apoyo y volcar sus experiencias hacia mi persona en los trabajos del ámbito de la ingeniería.

Yury



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
RESUMEN	27
ABSTRACT.....	27
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	29
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	30
1.3 HIPÓTESIS DEL TRABAJO.....	30
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	30
1.4.1 Objetivo General	30
1.4.2 Objetivos Específicos.....	30
1.4.3 Justificación De La Investigación	31
CAPITULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVETIGACIÓN	32
2.2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL	37
2.3 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	37



2.3.1	Terrazas Marinas	37
2.3.2	La Cordillera de la Costa.....	39
2.3.3	Peneplanicie Pliocénica.....	40
2.3.4	Depresión Pre-Andina	41
2.3.5	Estratigrafía regional	41
2.3.5.1	Unidades Pre - Mesozoicas (PE-gr / PE-gn)	43
2.3.5.2	Formación san juan (PE-sj).....	44
2.3.5.3	Formación Marcona (Pi-ma)	45
2.3.5.4	Formación Río Grande (Js- rg)	46
2.3.5.5	Formación Jahuay (Js-ja)	47
2.3.5.6	Formación Pisco (Ts-pi).....	47
2.3.5.7	Volcánico Sencca (Ts-vse).....	49
2.3.5.8	Depósitos Cuaternarios	49
2.3.5.9	Rocas Intrusivas (Batolito Costero)	50
2.3.6	Características tectónicas	51
2.4	GEODINÁMICA	55
2.4.1	Geodinámica interna	55
2.4.2	Geodinámica externa.....	55
2.4.2.1	Evaluación de Riesgos Geológicos	56
2.4.2.2	Riesgos geológicos identificados en la mina 9-10	57
2.4.2.3	Matriz de riesgos	71
2.4.2.4	Alternativas de solución.....	72
2.5	CRITERIOS DE EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO	75
2.5.1	Mapeo geomecánico superficial para el análisis estructural	76



2.5.2	Sistema de clasificación de bieniawski (ÍNDICE RMR89).....	78
2.5.3	Resistencia a la compresión simple	78
2.5.4	Designación de la calidad de roca RQD	79
2.5.5	Clasificación geomecánica de romana slope mass rating (SMR).....	80
2.5.6	Definiciones Conceptuales.....	83
2.5.6.1	Matriz rocosa y roca intacta	83
2.5.6.2	Discontinuidades o juntas	83
2.5.6.3	Dominios estructurales.....	83
2.5.6.4	Apertura.....	83
2.5.6.5	Espaciado	84
2.5.6.6	Persistencia o continuidad.....	84
2.5.6.7	Orientación.....	84
2.5.6.8	Rugosidad.....	84
2.5.6.9	Relleno	85
2.5.6.10	Aguas subterráneas.....	85
2.5.6.11	Meteorización.....	85
2.5.6.12	Alteración.....	86
2.6	CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL MACIZO	
	ROCOSO	86
2.6.1	Criterio de rotura de Hoek-Brown generalizado.....	86
2.6.2	Factor de alteración (D)	87
2.6.3	Constante (m_i).....	88
2.6.4	Sistema de clasificación de la resistencia geológica g_{si} (geological strength index).....	90
2.6.5	Aplicabilidad del criterio de rotura de Hoek-Brown.....	93



2.6.6	Resistencia del macizo rocoso	93
2.6.7	Determinación de los parámetros de mohr-coulomb	94
2.6.8	Módulo de deformación (<i>Em</i>)	96
2.6.9	Coefficiente de poisson del macizo rocoso (<i>vm</i>)	97
2.6.10	Confiabilidad de las estimaciones de resistencia	97
2.7	PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LAS DISCONTINUIDADES DE ACUERDO AL CRITERIO DE ROTURA DE BARTON Y CHOUBEY (1977).....	98
2.7.1	Estimaciones en campo del JRC	98
2.7.2	Estimaciones en campo del JCS.....	100
2.7.3	Estimación del ángulo de fricción.....	101
2.7.4	Efecto de la escala.....	102
2.7.5	Interpretación del criterio de barton.....	103
2.7.6	Métodos de proyecciones estereográficas o cinemáticos.....	103
2.7.6.1	Análisis esferográficos	104
2.7.6.2	Análisis cinemático	108
2.7.6.3	Diferentes Mecanismos de falla de taludes con control estructural	109
2.7.7	Método de dovelas	113
2.7.8	Métodos numéricos	114
2.8	MARCO CONCEPTUAL	114
2.8.1	Factor de seguridad	114
2.8.2	Analisis de estabilidad.....	115
2.8.2.1	Factores condicionantes	115
2.8.2.2	Factores desencadenantes.....	116



2.8.3	Clasificación geomecánica.....	116
2.8.4	Deslizamiento.....	116
2.8.5	Esclerómetro	116
2.8.6	Zonificación geomecánica	117
2.8.7	Factor de seguridad	117
2.8.8	Tilt test	117
2.8.9	Peine de barton.....	117
2.8.10	Tipos de rotura	118
2.8.11	Parámetros geotécnicos	118
2.9	SISMICIDAD	119

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	MATERIALES Y EQUIPOS.....	124
3.1.1	Instrumentos y materiales en campo	124
3.1.2	Equipos y materiales en gabinete.....	124
3.2	METODOS DE TRABAJO.....	125
3.3	INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS	125
3.3.1	Ejecución de estaciones geomecánicas	126
3.3.2	Mediciones de la rugosidad con el peine de barton	130
3.3.3	Ensayos con el martillo schmidt	133
3.3.4	Ensayos de inclinación o tilt test.....	135
3.3.5	Ensayo de tomografía eléctrica	140
3.3.5.1	Etapa de campo	140
3.3.5.2	Etapa de gabinete	142
3.3.5.3	Interpretación	143



3.3.6	Ensayos de refracción sísmica	145
3.3.6.1	Equipos a utilizar.....	145
3.3.6.2	Metodología del Ensayo.....	146
3.3.6.3	Trabajos de campo	146
3.3.6.4	Procesamiento de datos y su Interpretación	147
3.3.7	Mediciones de ondas de superficie en arreglos multicanales - masw... ..	152
3.3.7.1	Procedimiento del Ensayo.....	152
3.3.7.2	Trabajo de Campo	153
3.3.7.3	Procesamiento e Interpretación	153
3.3.8	Parámetros de deformación.....	156
3.3.9	Ensayos de laboratorio de mecánica de rocas	161
3.3.9.1	Carga Puntual (PLT)	161
3.3.9.2	Propiedades Índices de Roca.....	164
3.3.9.3	Comprensión Triaxial.....	167
3.3.9.4	Corte Directo	168
3.3.9.5	Propiedades Elásticas	168
3.3.9.6	Tracción Indirecta (Ensayo Brasileño).....	169
3.3.10	Caracterización geomecánica del macizo rocoso.....	170
3.3.10.1	Resistencia y Dureza	170
3.3.10.2	Grado de Fracturamiento (Indice RQD)	172
3.3.10.3	Espaciamiento	176
3.3.10.4	Persistencia.....	177
3.3.10.5	Abertura.....	179
3.3.10.6	Rugosidad.....	180
3.3.10.7	Relleno	181



3.3.10.8	Número y Orientación de Familias de Discontinuidades.....	181
3.3.10.9	Grado de alteración	188
3.3.10.10	Condición de agua subterránea	189
3.3.10.11	Calidad del Macizo Rcoso (Índice RMR89).....	189
3.3.10.12	Calidad del Macizo Rcoso (Índice SMR)	191
3.3.10.13	Índice de Resistencia Geológica (GSI)	195
3.3.11	Zonificación geomecánica	199
3.3.11.1	Definición de los dominios estructurales	200
3.3.11.2	Estimación de las Propiedades de Resistencia y Deformación de los Macizos Rcosos de Acuerdo al Criterio de Rotura Generalizado de Hoek Y Brown (2002).....	204
3.3.11.3	Estimación de los Parámetros de Resistencia al Corte de las Discontinuidades de Acuerdo al Criterio de Rotura de Barton y Choubey (1977).....	210

CAPITULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

4.1	LOCALIZACION Y UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	229
4.2	MARCO GEOLÓGICO LOCAL.....	230
4.2.1	Geomorfología local.....	230
4.2.1.1	Lomas	230
4.2.1.2	Plataforma de abrasión	231
4.2.2	Litoestratigrafía local	232
4.2.2.1	Roca Hornfels (Metasedimentos).....	233
4.2.2.2	Diques	234
4.2.2.3	Depósito Cuaternarios	236



4.2.2.4	Secuencia sedimentaria	252
4.2.3	Marco geológico estructural.....	255
4.2.3.1	Geología estructural	255
4.2.3.2	Procedimiento de Toma de Datos Estructurales	255
4.2.3.3	Fallas Locales	255
4.2.3.4	Fracturas y Diaclasas.....	260
4.2.3.5	Definición de Dominios Estructurales	261

CAPITULO V

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.....	267
5.2	CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO	267
5.2.1	Análisis De Estabilidad De Taludes A Nivel De Bancos	267
5.2.2	Verificación del diseño de los taludes de banco del tajo	268
5.2.2.1	Verificación del Ancho Mínimo de la Berma de Seguridad	268
5.2.3	Consideraciones geotécnicas generales.....	269
5.2.3.1	Modelo Geológico - Geotécnico	269
5.2.3.2	Verificación del Ángulo de la Cara de los Bancos	271
5.2.4	Factores de seguridad mínimos admisibles.....	274
5.2.5	Coefficiente sísmico utilizado	274
5.2.6	Propiedades de los materiales	274
5.2.7	Análisis cinemático del macizo rocoso	276
5.2.7.1	Deslizamiento de Tipo Planar	278
5.2.7.2	Deslizamiento Tipo Cuña.....	278
5.2.7.3	Deslizamiento por Vuelco de Estratos (Toppling).....	279



5.2.8	Análisis de estabilidad a nivel de bancos	280
5.2.9	Análisis de estabilidad a nivel global de los taludes del la mina	293
5.2.9.1	Consideraciones geotécnicas generales.....	293
5.2.9.2	Condiciones de análisis	306
5.2.9.3	Software empleado para el análisis de estabilidad global	306
5.2.9.4	resultados obtenidos	306
5.2.10	Modelamiento numérico de los taludes del tajo para el análisis de esfuerzos.....	307
5.2.10.1	Condiciones de Análisis	308
5.2.10.2	Secciones de Análisis	309
5.2.10.3	propiedades de los materiales.....	311
5.2.10.4	Resultados del Análisis	313
VI.	CONCLUSIONES	314
VII.	RECOMENDACIONES	316
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	317
ANEXOS		320

Área: Ingeniería y Tecnología

Tema: Geología, Minas y Metalurgia

Fecha de sustentación: 12 de enero del 2023



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista Panorámica de la Línea de Costa y Terrazas Marinas	38
Figura 2. Vista 3D de Imagen Landsat Mostrando las Terrazas Marinas Identificas en San Juan de Marcona con sus Respectives Altitudes	39
Figura 3. Vista de Cuerpos Ígneos que Forman la Cordillera de la Costa.....	40
Figura 4. Vista de los Cañones Formados por los Ríos Yauca y Acarí, Mostrando la Zona Geomorfológica Peneplanicie Pliocénica.....	41
Figura 5. Columna Estratigráfica Regional del Área de Estudio y Alrededores	43
Figura 6. Rocas Intrusivas (Adamelitas) del Batolito San Nicolás, Cercanos a la Planta San Nicolás	51
Figura 7. Sistema de Fallas Regionales en la Zona de Estudio.	55
Figura 8. Caracterización y Clasificación de los Riesgos Asociados a la Estabilidad Física.....	57
Figura 9. Zona de Caída de Rocas en la Mina 10, Cara Norte Nivel 569, CR-02'	59
Figura 10. Análisis de Caida de Rocas CR-20, Cara Este, Nivel 654, Mina 10 (Riesgo Extremo)	63
Figura 11. Análisis de Caida de Rocas CR-24, Cara Norte, Nivel 677, Mina 10 (Riesgo Extremo)	63
Figura 12. Análisis de Caida de Rocas CR-27, Cara Sur, Nivel 605, Mina 10 (Riesgo Extremo)	64
Figura 13. Ejemplo de Zona de Deslizamiento en la Mina 10, cara Suroeste, del Nivel 605 al Nivel 569, DZ-01' Riesgo Moderado.....	68
Figura 14. Ejemplo de Zona de Agrietamiento en la Mina 9 (AG-02) Riesgo Extremo	69
Figura 15. Sección de Modelamiento (Zona de Agrietamiento AG-01)	70
Figura 16. Sección de Modelamiento (Zona de Agrietamiento AG-02)	71
Figura 17. Esquema que ilustra las condiciones de término que pueden presentar las estructuras de un macizo rocoso.....	77
Figura 18. Técnica mapeo de ventana estructural	77
Figura 19. Resistencia del macizo rocoso según el criterio generalizado de Hoek y Brown	93
Figura 20. En la imagen se aprecia las envolventes de rotura para el criterio de Hoek y Brown y del criterio de Mohr Coulomb. Apreciándose las gráficas de la	



resistencia uniaxial y global. (Hoek, 2005).	94
Figura 21. Relación entre los esfuerzos principales mayor y menor del criterio generalizado de Hoek y Brown y el criterio equivalente de Mohr-Coulomb.	96
Figura 22. sistema proporciona estimaciones razonables de las características de resistencia y deformación.	97
Figura 23. Se muestran diez muestras típicas, junto con sus perfiles de rugosidad	99
Figura 24. Un simple criterio basado en la rugosidad de juntas (JRC) para la resistencia al corte pico.	99
Figura 25. Evaluación del JRC a partir de la amplitud de las asperezas y la longitud del perfil de las juntas.	100
Figura 26. Ábaco para la obtención de la resistencia a compresión de los labios de una discontinuidad a partir de medidas con el martillo Schmidt tipo L o esclerómetro (Basado en Deere y Miller 1966).	101
Figura 27. Ensayo típicos para estimar el JRC y JCS de una discontinuidad.	101
Figura 28. Efecto de escala sobre las tres componentes de una discontinuidad rugosa y sin relleno.	102
Figura 29. Representación gráfica en ejes tensión cortante – tensión normal de la ley de Barton. Cada gráfica corresponde a un valor de JRC y en ella aparecen las líneas correspondientes cuatro valores JCS.	103
Figura 30. Convenciones para registrar strike / dip. (A) strike / dip; el strike corresponde a la dirección en la que apunta el dedo índice de la mano derecha cuando el pulgar apunta hacia abajo, es decir, 212/43. (B) dip direction/ dip, es decir, 122/43.	105
Figura 31. La definición de trend and plunge de una estructura lineal. El Plunge es el buzamiento de la línea.	105
Figura 32. Proyección estereográfica ecuatorial equiareal.	106
Figura 33. Proyección de un gran círculo definiendo un plano.	107
Figura 34. Diagrama de contornos.	108
Figura 35. Principales tipos de fallas en taludes y condiciones geológicas estructurales que pueden causar estas fallas.	109
Figura 36. Identificación de modo de falla tipo planar, usando la representación de un gran círculo para el plano y el talud.	110
Figura 37. En la figura de la izquierda se aprecia la identificación de modo de falla tipo	

	planar, usando la representación de polos. La figura de la derecha se aprecia el análisis cinemático de deslizamiento planar, modo de vector de polo en DIPS.	110
Figura 38.	En la figura de la izquierda se aprecia Identificación de modo de falla tipo cuña, usando la representación de un gran círculo para los planos y el talud. La figura de la derecha se aprecia el análisis cinemático de deslizamiento de cuña, puntos de intersección y contornos en DIPS.....	111
Figura 39.	En la figura de la izquierda se aprecia Identificación de modo de falla tipo volcamiento por flexión.....	112
Figura 40.	Inestabilidad por deslizamiento y vuelco de un bloque en un plano inclinado.	113
Figura 41.	Análisis cinemático de vuelco por flexión, modo de vector de polo en DIPS. Análisis de vuelco directo utilizando intersecciones y vectores polares (planos base) en DIPS.	113
Figura 42.	Método de la dovela es para un tipo de rotura circular en una serie de fajas y rebanas verticales.....	114
Figura 43.	Zonificación Sísmica del Perú Según la Norma E-030 (2016)	120
Figura 44.	Distribución Espacial de Sismos en el Centro y Sur del Perú.....	121
Figura 45.	Estructura Tectónica Regional – Grandes Sismos Históricos.....	122
Figura 46.	Vista de la EG–03’, Nivel 545 donde se realizó la línea de detalle de 140 m de longitud. Con dirección de buzamiento del talud: 159° y buzamiento de talud: 72°.	129
Figura 47.	Vista de la EG–30, Nivel 641 donde se realizó la línea de detalle de 50 m de longitud. Con dirección de buzamiento del talud: 350° y buzamiento de talud: 66°.	129
Figura 48.	Vista de la EG–05, Nivel 713 donde se realizó la línea de detalle de 50 m de longitud. Con dirección de buzamiento del talud: 018° y buzamiento de talud: 58°.	130
Figura 49.	Estación Geomecánica 02 (EG – 02), Nivel 569, Cara Norte, Mina 10. ...	132
Figura 50.	Foto de la Estación Geomecánica 03 (EG – 03), Nivel 725, Cara Norte, Mina 9.....	133
Figura 51.	Foto de la Estación Geomecánica 03 (EG – 03’), Nivel 545, Cara Norte, Mina 10.	133
Figura 52.	Vista de ejecución del ensayo del Martillo Schmidt en la estación	



geomecánica EG-41.....	134
Figura 53. Vista de ejecución del ensayo del Martillo Schmidt en la estación geomecánica EG-26.....	135
Figura 54. Ensayo Tilt Test, Estación Geomecánica EG-13	138
Figura 55. Ensayo Tilt Test, Estación Geomecánica EG-46	138
Figura 56. Vista de la línea de tomografía eléctrica TM-01 en Mina 9-10	142
Figura 57. Vista de la línea de tomografía eléctrica TM-03 en Mina 9-10	142
Figura 58. Gráfico Comparativo de Valores de RQD del Macizo Rcoso	176
Figura 59. Gráfico Comparativo de Valores de RQD del Macizo Rcoso Gráfico Comparativo de Valores de Espaciamiento entre las Discontinuidades .	177
Figura 60. Gráfico Comparativo de Valores de Persistencia de las Discontinuidades	178
Figura 61. Gráfico Comparativo de Valores de Aberturas de las Discontinuidades ...	180
Figura 62. (a)Diagrama de Concentración de Polos, (b) Orientación de las Familias de Discontinuidades Principales.....	182
Figura 63. Índice de Resistencia Geológica (GSI) Para Macizos Rcosos Fracturados.	196
Figura 64. Zonificación de la Resistencia en Base a la Compresión Simple.	200
Figura 65. Cartografiado geológico superficial de canales de muestreo de estructuras mineralizadas.	201
Figura 66. Diagrama de Contornos y Diagrama de Rosas Para la Determinación de las Principales Familias de Discontinuidades del Sector Sur Obtenidas del Mapeo de Bancos de la Mina 9-10	202
Figura 67. Diagrama de Contornos y Diagrama de Rosas Para la Determinación de las Principales Familias de Discontinuidades del Sector Este Obtenidas del Mapeo de Bancos de la Mina 9-10.	203
Figura 68. Diagrama de Contornos y Diagrama de Rosas Para la Determinación de las Principales Familias de Discontinuidades del Sector Oeste Obtenidas del Mapeo de Bancos de la Mina 9-10.	204
Figura 69. Perfiles de Rugosidad y Valores de JRC Propuestos por Barton y Choubey	214
Figura 70. Ábaco de Barton.....	214
Figura 71. Localización del Proyecto	229
Figura 72. Ubicación del proyecto.....	230
Figura 73. Vista de la Cima y la Ladera de Loma	231



Figura 74. Vista de la Cima y la Ladera de Loma	232
Figura 75. Afloramiento de Hornfels Moderadamente Fracturado	233
Figura 76. Afloramiento de Hornfels fracturado en Mina 10, cara Norte, Nivel 569 .	234
Figura 77. Afloramiento del Cuerpo Pórfido – Andesítico en la Mina 10 (Cara Oeste)	235
Figura 78. Afloramiento de Andesita Porfirítica en Mina 10, Cara Norte, Niveles 569 y 545	235
Figura 79. Vista Panorámica de los Depósitos Marinos Ubicados en la Mina 9 (Cara Este), Indicando las Diferentes Litofacies Presentes en el Afloramiento.	237
Figura 80. Facies de Arena con Laminación Horizontal (Líneas Negras), Donde se Puede Observar Tambien Trazas Biogénicas Horizontales (Elipsoides Rojos) y una Falla Inversa Sin Sedimentar de Desplazamiento Centimétrico (Línea Azul)	238
Figura 81. Facies de Arena con Deformación sin Sedimentar (Líneas Negras), Donde se Puede Observar Tambien Trazas Biogénicas Horizontales Deformadas (Elipsoides Rojos) y una Capa Blanca de Ceniza Re - Transportada.....	239
Figura 82. Facies de Arena con Laminación Cruzada (Líneas Azules)	239
Figura 83. Facies de Gravas con Matriz Soportada Formando un Canal (Línea Azul)	240
Figura 84. Facies de Gravas con Laminación Cruzada (Líneas Negras) Siendo Parte de un Canal (Línea Azul), Donde se Puede Observar una Costra de Yeso (Línea Amarilla).....	240
Figura 85. Facies de Ceniza Re - Transportada (Línea Amarilla).....	241
Figura 86. Vista Panorámica de los Depósitos Fluviales de la Mina, Indicando las Diferentes Litofacies Presentes en el Afloramiento.	241
Figura 87. Depósitos Fluviales: Facies de Arenas Masivas	242
Figura 88. Vista de la Facies de Arenas con Laminación Horizontal (Líneas Negras)	242
Figura 89. Facies de Arena con Laminación Cruzada (Líneas Azules), Siendo Parte de un Lente de Arena (Línea Negra).....	243
Figura 90. Facies de Gravas Soportadas por Clastos en Donde se Pueden ver hasta la Superposición de Tres Canales (Líneas Azules). En el Canal (a) la Matriz es Arenosa y los Clastos Llegan hasta 5 cm de diámetro, en el canal (b) la matriz es arenos limosa y los clastos llegan hasta 15 cm de Diámetro, y en	

el Canal (c) la Matriz es Limo - Arenosa y los Clastos Llegan hasta 10 cm de Diámetro	244
Figura 91. Vista panorámica de la Mina 9 (cara norte), donde se aprecia los depósitos aluviales, depósitos coluviales, afloramiento rocoso de hornfels, depósito de material estéril (DME) y material antrópico de relleno, en ello se observaron las Diferentes Litofacies Presentes en el Afloramiento.....	245
Figura 92. Facies de Arenas Masivas Donde se Puede Observar Trazas Biogenicas Verticales a Subverticales (Elipsoides Rojos).....	246
Figura 93. Facies de Arenas Bioturbadas (Elipsoides Rojos) Donde se Observan Restos de conchas Re-Trasportadas (Elipsoides Amarillos).....	246
Figura 94. Facies de Gravas Soportadas por Matriz, Donde la Matriz es Limo - Arenosa. En la Imagen se Observa el Nivel de Estas Facie entre Líneas Azules...	247
Figura 95. Facies de Gravas Masivas Soportadas por Matriz, Donde la Matriz es Limo – Arenosa.....	247
Figura 96. Facies de Gravas Masivas Soportadas por Matriz, Donde la Matriz es Arenosa y se Encuentra en ese Caso Siendo Parte de un Canal. En la Foto se Observa el Nivel de Esta Facie Entre Líneas Azules.....	248
Figura 97. Facies de Gravas con Matriz Soportada con Laminación Cruzada (Líneas Azules).....	249
Figura 98. Facies de Gravas Soportadas por Matriz que Presenta Abundantes Restos de Conchas Re-Transportadas	249
Figura 99. Facies de Gravas Soportadas por Clastos que Presenta Restos de Conchas Re-Transportadas (Elipsoides Amarillos)	250
Figura 100. Facies de Ceniza Re - Transportada (Nivel Blanco) en Donde en su Parte Superior se Observa un Depósito Fluvial. En la Foto se Observa el Nivel de Esta Facie Entre Líneas Amarillas.....	250
Figura 101. Vista de los Depósitos Coluviales Ubicados en la Mina 9 (Cara Este)....	251
Figura 102. Vista de los Depósitos Antrópicos Ubicados en el Fondo de la Mina 10	251
Figura 103. Vista de los Depósitos Antrópicos Ubicados en el Fondo de la Mina 10	252
Figura 104. Vista de los Depósitos de Material Estéril (DME) en la Parte Alta de la Mina 10 (Cara Sur)	252
Figura 105. Columna Sedimentaria de los Depósitos Cuaternarios de la Mina	254
Figura 106. Método de Contacto	255
Figura 107. Método a Distancia.....	255



Figura 108. Principales Dominios Estructurales de la Mina 9 y 10 – Cara Norte.....	263
Figura 109. Principales Dominios Estructurales de la Mina 10 – Cara Sureste	263
Figura 110. Principales Dominios Estructurales de la Mina 10 – Cara Sur	264
Figura 111. Principales Dominios Estructurales de la Mina 10 – Cara Oeste.....	265
Figura 112. Principales Dominios Estructurales de la Mina 9 – Cara Oeste.....	266
Figura 113. Principales Dominios Estructurales de la Mina 9 – Cara Este.....	266
Figura 114. Verificación del Ancho Mínimo de la Berma de Seguridad de la Mina 9-10	269
Figura 115. Valores de la Berma de Seguridad y Altura de Bancos en la Mina 10 – Sección A-A	270
Figura 116. Valores de la Berma de Seguridad y Altura de Bancos en la Mina 10 – Sección B-B.....	270
Figura 117. Valores de la Berma de Seguridad y Altura de Bancos en la Mina 10 – Sección C-C.....	271
Figura 118. Valores de la Berma de Seguridad y Altura de Bancos en la Mina 10 – Sección D-D	271
Figura 119. Verificación del Diseño Genérico de Bancos de 36 m de altura.....	272
Figura 120. Verificación del Diseño Genérico de Bancos de 48 m de altura.....	273
Figura 121. Configuración de Bancos de los Taludes de la Mina 9-10. (a) Bancos de 36 m de altura y (b) Bancos de 48 m de altura.....	273
Figura 122. Ejemplo de Análisis de Deslizamiento Tipo Planar (EG-01)	278
Figura 123. Ejemplo de Analisis de Deslizamiento Tipo Cuña (EG-01)	279
Figura 124. Ejemplo de Analisis de Deslizamiento Tipo Vuelco de Estratos (EG-16)	280
Figura 125. Sección de Análisis de Estabilidad A-A	294
Figura 126. Sección de Análisis de Estabilidad B-B.....	294
Figura 127. Sección de Análisis de Estabilidad C-C.....	295
Figura 128. Sección de Análisis de Estabilidad D-D	295
Figura 129. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Hornfels (Sección A-A, Talud NW)	297
Figura 130. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Hornfels (Sección A-A, Talud SE).....	297
Figura 131. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Mineral (Sección A-A)	298
Figura 132. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Hornfels (Sección B-B, Talud	



NW)	299
Figura 133. Curva de Resistencia del Macizo Rocosó – Hornfels (Sección B-B, Talud SE)	299
Figura 134. Curva de Resistencia del Macizo Rocosó – Mineral (Sección B-B).....	300
Figura 135. Curva de Resistencia del Macizo Rocosó – Diques (Sección B-B).....	300
Figura 136. Curva de Resistencia del Macizo Rocosó – Hornfels (Sección C-C, Talud NW)	301
Figura 137. Curva de Resistencia del Macizo Rocosó – Hornfels (Sección C-C, Talud SE)	302
Figura 138. Curva de Resistencia del Macizo Rocosó – Mineral (Sección C-C).....	302
Figura 139. Curva de Resistencia del Macizo Rocosó – Diques (Sección C-C).....	303
Figura 140. Curva de Resistencia del Macizo Rocosó – Hornfels (Sección D-D, Talud SW).....	304
Figura 141. Curva de Resistencia del Macizo Rocosó – Hornfels (Sección D-D, Talud NE)	304
Figura 142. Curva de Resistencia del Macizo Rocosó – Mineral (Sección D-D)	305
Figura 143. Curva de Resistencia del Macizo Rocosó – Diques (Sección D-D)	305
Figura 144. Sección de Análisis Numérico A-A	310
Figura 145. Sección de Análisis Numérico B-B.....	310
Figura 146. Sección de Análisis Numérico C-C.....	310
Figura 147. Sección de Análisis Numérico D-D	311



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Coeficientes de Restitución R_t y R_n Recomendados por Rocscience	61
Tabla 2:	Resumen de Zonas de Caída de Rocas en la Mina 9-10	64
Tabla 3:	Resumen de Zonas de Caída de Rocas en la Mina 10	66
Tabla 4:	Resumen de Zonas de Deslizamientos en la Mina 10.....	68
Tabla 5:	Resumen de Zonas de Deslizamientos en la Mina 10.....	68
Tabla 6:	Resumen de Zonas de Agrietamientos en la Mina 9.....	70
Tabla 7:	Resumen del Análisis de la Matriz de Riesgos Geológicos Identificados en los Niveles Inferiores de la Mina 10	71
Tabla 8:	Resumen del Análisis de la Matriz de Riesgos Geológicos Identificados en la Mina 9-10.....	72
Tabla 9:	Resumen de Medidas de Control de los Riesgos Geológicos Identificados en la Mina 9-10.....	73
Tabla 10:	Resumen de Medidas de Control de los Riesgos Geológicos Identificados en la Mina 10	75
Tabla 11:	Criterio para clasificación de la masa rocosa.....	78
Tabla 12:	Criterio para clasificación de la masa rocosa.....	80
Tabla 13:	Parámetros de corrección para SMR.....	81
Tabla 14:	Valores del factor de alteración D, para las distintas situaciones del macizo.	88
Tabla 15:	Valores indicativos de m_i para algunas rocas (Marinos y Hoek 2000).	89
Tabla 16:	GSI para macizos rocosos homogéneos. Adaptada de Hoek (2006)	91
Tabla 17:	Tabla de evaluación el índice de resistencia geológica en macizos rocosos estratificados y heterogéneos.	92
Tabla 18:	Sismos más Importantes Registrados en los Últimos 500 Años en el Sur - Oeste Peruano	123
Tabla 19:	Resumen de las Estaciones Geomecánicas Ubicadas en la Mina 9-10.....	127
Tabla 20:	Resumen de las Estaciones Geomecánicas Ubicadas en la Mina 10	128
Tabla 21:	Resultado del Peine de Barton de la Mina 10 en la parte inferior.	131
Tabla 22:	Resultado del Peine de Barton de la mina 9-10	131
Tabla 23:	Resultado de los Ensayos de prueba de inclinación (Tilt Test)	136



Tabla 24:	Resultado de los Ensayos de prueba de inclinación (Tilt Test)	136
Tabla 25:	Ángulo de Fricción Básico Promedio de las Discontinuidades	139
Tabla 26:	Resultados del Ensayo de Tomografía Eléctrica	144
Tabla 27:	Componentes del Sismógrafo	145
Tabla 28:	Resumen de Ensayos de Refracción Sísmica.....	147
Tabla 29:	Velocidades de Ondas P en Suelos y Rocas	148
Tabla 30:	Velocidades de Ondas P en Suelos y Rocas Según Hellberg	149
Tabla 31:	Velocidades de Ondas P en Suelos y Rocas Según Curvich y Dobrin	149
Tabla 32:	Resultado de los Ensayos de Refracción Sísmica.....	150
Tabla 33:	Resumen del Ensayo MASW – Mina 9-10.....	153
Tabla 34:	Clasificación de los Suelos Según el Código IBC.....	154
Tabla 35:	Resultados del Ensayo MASW – Mina 9-10	155
Tabla 36:	Veta Resumen de los Parámetros Dinámicos	159
Tabla 37:	Resultados de cada Ensayo de Carga Puntual.....	162
Tabla 38:	Resultados de cada Ensayo de Carga Puntual.....	163
Tabla 39:	Resultado de los Ensayos de Propiedades Índice de Rocas	165
Tabla 40:	Resultado de los Ensayos de Propiedades Índice de Rocas	165
Tabla 41:	Resultado de los Ensayos de Compresión Triaxial.....	167
Tabla 42:	Resultado de los Ensayos de Compresión Triaxial.....	167
Tabla 43:	Resultado de los Ensayos de Corte Directo	168
Tabla 44:	Resultado de los Ensayos de Propiedades Elásticas	169
Tabla 45:	Resultados de los Ensayos de Tracción Indirecta o brasileño	170
Tabla 46:	Clasificación de las Rocas Según su Resistencia Uniaxial	171
Tabla 47:	Cuadro de Calidad del Macizo Rocosos Según el Índice RQD	172
Tabla 48:	Rangos de Valoración según el Índice RQD en la Mina 10	174
Tabla 49:	Rangos de Valoración según el Índice RQD en la Mina 9-10.....	174
Tabla 50:	Descripción del Espaciamiento.....	176
Tabla 51:	Descripción de la Persistencia	178
Tabla 52:	Evaluación del Grado de Meteorización del Macizo Rocosos	179
Tabla 53:	Orientación de las Principales Familias de Discontinuidades – mina 10 ..	183
Tabla 54:	Orientación de las Principales Familias de Discontinuidades – mina 9-10	183
Tabla 55:	Evaluación del Grado de Meteorización del Macizo Rocosos	188
Tabla 56:	Diferencias de Puntajes entre RMR ₇₆ y RMR ₈₉	190
Tabla 57:	Sistema de Clasificación del Macizo Rocosos RMR ₈₉	190



Tabla 58: Rangos de Valoración según el Índice RMR ₈₉	191
Tabla 59: Rangos de Valoración según el Índice SMR	192
Tabla 60: Resumen de la Valoración RMR – SMR en la Mina 10.....	193
Tabla 61: Resumen de la Valoración RMR – SMR en la Mina 9-10	193
Tabla 62: (a) Resumen de la Valoración GSI en la Mina 10	197
Tabla 63: (a) Resumen de la Valoración GSI en la Mina 9-10.....	198
Tabla 64: Veta Valores de la Constante m_i Para la Matriz Rocosa.....	206
Tabla 65: Resumen de las Propiedades de Resistencia y Deformación del Macizo Rocoso - Mina 10.....	208
Tabla 66: Resumen de las Propiedades de Resistencia y Deformación del Macizo Rocoso - Mina 9- 10	208
Tabla 67: Resumen de Ángulos de Fricción Básicos y Residuales	212
Tabla 68: Resumen de Ángulos de Fricción Básicos y Residuales	212
Tabla 69: Valores de JRC	215
Tabla 70: Valores de JRC	215
Tabla 71: Valores de JRC Reducido	217
Tabla 72: Valores de JRC Reducido	217
Tabla 73: Valores de JCS	219
Tabla 74: Valores de JCS	220
Tabla 75: Resumen de Parámetros de Resistencia al Corte de las Discontinuidades	223
Tabla 76: Resumen de Parámetros de Resistencia al Corte de las Discontinuidades	223
Tabla 77: Afinidad de elementos de las fases principales que componen la Tierra...	236
Tabla 78: Resumen de las Fallas Ubicadas en la Mina 9-10.....	257
Tabla 79: Resumen de las Fallas Ubicadas en la Mina 10.....	260
Tabla 80: Resumen de Ángulos de Fricción Básicos y Residuales	275
Tabla 81: Resumen de Análisis de Estabilidad de Taludes a Nivel de Bancos	281
Tabla 82: Resumen de Análisis de Estabilidad de Taludes a Nivel de Bancos	282
Tabla 83: Parámetros de los Materiales a Usar en el Análisis de Estabilidad – Sección A-A	296
Tabla 84: Parámetros de los Materiales a Usar en el Análisis de Estabilidad – Sección B-B.....	298
Tabla 85: Parámetros de los Materiales a Usar en el Análisis de Estabilidad – Sección C-C.....	301
Tabla 86: Parámetros de los Materiales a Usar en el Análisis de Estabilidad – Sección	



D-D	303
Tabla 87: Resultado del Análisis de Estabilidad Global de los Taludes de Mina.....	307
Tabla 88: Parámetros Deformacionales – Sección A-A	312
Tabla 89: Parámetros Deformacionales – Sección B-B.....	312
Tabla 90: Parámetros Deformacionales – Sección C-C.....	312
Tabla 91: Parámetros Deformacionales – Sección D-D	312
Tabla 92: Resultados del Modelamiento Numérico.....	313



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ASTM	: American Section of the International Association for Testing
Materials.	
Cgl	: Conglomerado
E	: Este
Fe	: Hierro
FeO	: Óxido de hierro
FS	: Factor de seguridad
GPS	: Global Positioning System
GSI	: Geological Strength Index
Hfs	: Hornfels
Hz	: Hertz
INGEMMET	: Instituto Geológico Minero Metalúrgico
ISRM	: International Society for Rock Mechanics
JCS	: Joint Compressive Strength
JRC	: Join Roughness Condition
Js-rg	: Jurásico superior Río Grande
K	: Potásico
Km	: Kilómetro
m	: Metro
MASW	: Análisis multicanal de ondas superficiales
MEM	: Ministerio de Energía y Mina
Mg	: Magnetita
MO	: Mineral oxidado
MP	: Mineral primario
MPa	: Megapascal
msnm	: Metros sobre el nivel del mar
MT	: Mineral transicional
N	: Norte
NE	: Noreste
NW	: Noroeste
O	: Oeste



Pe-gr/Pe-gn	: Precambrico granítico/granodiorítico
Pe-sj	: Precambrico San Juan
PGA	: Aceleración máxima horizontal
Pi-adsn	: Paleozoico inferior adamelita San Nicolás
Pi-gdsn	: Paleozoico inferior granodiorita San Nicolás
Pi-ma	: Paleozoico Marcona
Q-al	: Cuaternario aluvial
Q-ant	: Cuaternario antrópico
Q-e	: Cuaternario eólico
Q-tm	: Cuaternario terrazas marinas
RCS	: Resistencia a la Compresión Simple
RMR	: Rock Mass Rating
RQD	: Rock Quality Designation
S	: Azufre
SE	: Sureste
SMR	: Slope Mass Rating
SO	: Suroeste
SRF	: Stress Reduction Factor
SW	: Suroeste
Ts-pi	: Terciario superior Pisco
USBM	: United States Bureau of Mines
Vp	: Velocidad de onda primaria
VPP	: Velocidad Pico Partícula



RESUMEN

El presente trabajo de investigación se originó por la necesidad de comprender las características geológicas y su vez entender el comportamiento geomecánico del macizo rocoso con fines en determinar el análisis de estabilidad de taludes en la Mina 9-10, ubicado en el distrito de Marcona, Provincia de Nazca, Departamento de Ica, en la costa Sur del Perú. Regionalmente la mina se ubica en la zona denominada Meseta de Marcona, comprendida en la Cordillera de la Costa, al Oeste de la Cordillera Occidental de los Andes; en dirección hacia el Oeste se presentan terrazas marinas. El área mineralizada se encuentra dentro de un grueso paquete de rocas metamórficas, sedimentarias y volcánicas del Paleozoico y Mesozoico, que forman un monoclinas de orientación NE que buza 40° al N-NW. Localmente la litología del área de estudio, son los afloramientos meta - sedimentarios denominados hornfels, que conforman la roca encajonante, y el enjambre de diques andesíticos formando principalmente estructuras tipo sills. Para determinar la evaluación geomecánica del macizo rocoso se caracterizó el macizo rocoso clasificándose en 4 zonas, la Zona Norte como una roca de buena calidad (RMR=63-70) y de regular calidad (RMR=52-60). Zona Sur de buena calidad (RMR=61-67) y de regular calidad (RMR=57-60). La Zona Este, de buena calidad (RMR=62-70); y regular calidad (RMR=57-59). La Zona Oeste como regular calidad (RMR=46-59). Con los parámetros obtenidos en campo y su posterior análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos y a nivel global de tajo. Para ello se ha considerado todos los parámetros adquiridos mediante las investigaciones geotécnicas, los resultados los análisis cinemáticos utilizando los softwares y con estos datos se identificaron algunos deslizamientos tipo planar y tipo cuña con factores de seguridad estáticos y pseudo - estáticos menores que ≥ 1.0 . y también mayores mínimos requerido. Finalmente, para en análisis de estabilidad a nivel de taludes del tajo se han obtenido factores de seguridad superiores al mínimo requeridos, en condición estática ($FS \geq 1.3$) y ($FS \geq 1.0$), con lo que se verifica que los taludes globales son estables en las condiciones actuales.

Palabras Clave: Estabilidad, Discontinuidades, Macizo Rcoso, Tajo, Roca intacta.

ABSTRACT



The present research work was originated by the need to understand the geological characteristics and its geomechanical behavior of the rock mass for the purpose of determining the slope stability analysis in Mine 9-10, located in the district of Marcona, Province of Nazca, Department of Ica, on the southern coast of Peru. Regionally, the mine is located in the area called Meseta de Marcona, included in the Coastal Range, to the West of the Western Cordillera of the Andes; towards the West there are marine terraces. The mineralized area is located within a thick package of Paleozoic and Mesozoic metamorphic, sedimentary and volcanic rocks, which form a NE oriented monocline that dips 40° to the N-NW. Locally, the lithology of the study area, are the meta-sedimentary outcrops called hornfels, which form the capping rock, and the swarm of andesitic dikes forming mainly sill-type structures. In order to determine the geomechanical evaluation of the rock massif, the rock massif was characterized and classified in 4 zones, the North Zone as a rock of good quality (RMR=63-70) and of regular quality (RMR=52-60). South Zone as good quality (RMR=61-67) and regular quality (RMR=57-60). The East Zone as good quality (RMR=62-70); and regular quality (RMR=57-59). The West Zone as regular quality (RMR=46-59). With the parameters obtained in the field and their subsequent analysis of slope stability at the bench level and at the overall pit level. For this purpose, all the parameters acquired through geotechnical investigations, the results of the kinematic analysis using the software were considered and with these data some planar and wedge type landslides were identified with static and pseudo-static safety factors lower than ≥ 1.0 and also higher than the minimum required. Finally, for the stability analysis at the pit slope level, safety factors higher than the minimum required have been obtained, in static condition ($FS \geq 1.3$) and ($FS \geq 1.0$), which verifies that the global slopes are stable in the current conditions.

Keywords: Stability, Discontinuities, Rock Mass, Open Pit, Intact Rock.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es indudable que el campo de la ingeniería de civil y en la minería es muy usual encontrar problemas relacionados a la estabilidad de un macizo rocoso, la importancia de reconocer los tipos de fallas en un talud es muy importante para un posterior análisis de estabilidad de macizo rocoso.

Los trabajos realizados en la mina 9-10, durante varios años con el objetivo de extraer el mineral económico, han generado un diseño de minado el área de estudio, como apertura de taludes, rampas, bermas. En consecuencia, podrían generar inestabilidad del macizo rocoso por efecto del proceso de excavaciones, La información existente del área de estudio es muy genérica, al momento de la revisión solo se tenía datos de las perforaciones diamantina durante las etapas de exploración, por lo tanto, se requiere más investigaciones y un procesamiento adecuado de la información, para analizar la estabilidad local y global de los taludes.

Es de vital importancia el análisis en función a la caracterización geológica y geomecánica y su clasificación correcta, con la recolección de los datos de campo se identificarán las fallas más comunes y delimitar los dominios estructurales y a su vez delimitar el tajo en función a la calidad de roca. los problemas mencionados anteriormente como el desconocimiento del estado de tenciones, puesto que el macizo rocoso estuvo sujeto a diferentes procesos de deformación, los diseños de los bancos no tomaron en cuenta o énfasis en la actualización del comportamiento del macizo rocoso a medida que se desarrollaba el tajo, creando así zonas de desprendimientos del mismo mineral económico



y/o de la masa rocosa que alberga los paquetes de mineral. Parte de este problema, se debe también, no tener actualizado geomecánicamente en forma global el tajo.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

- **Problema general**

¿Qué características geomecánicas tendrá el macizo rocoso de la mina 9-10 de Shougang?

- **Problemas Específicos**

¿Cuáles serán las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos a nivel de bancos como a nivel global de la mina 9-10 de Shougang?

¿Cuáles serán las características litológicas que conforman la mina 9-10 de Shougang?

1.3 HIPÓTESIS DEL TRABAJO

Con la evaluación geomecánica del macizo rocoso y con el entendimiento de la litología a nivel de bancos y a nivel global se determina que los taludes de la mina 9-10 Shougang Son estables.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General

Determinar las características geomecánicas de macizos rocosos a nivel de bancos como a nivel global de la mina 9-10 de Shougang.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Verificar las propiedades geomecánicas de los macizos rocosos a nivel de bancos como a nivel global de la mina 9-10 de Shougang
- Determinar las características litológicas que presentan los taludes en mina 9-10 de Shougang.



1.4.3 Justificación De La Investigación

En el ámbito de la ingeniería geológica, es usual encontrar problemas relacionados a la estabilidad de taludes, ya estos se han en suelos o en un macizo rocoso, por ende, el presente estudio se trata obtener información de las características geomecánicas del macizo rocoso esto nos puede llevar a determinar el factor de seguridad de los taludes a nivel de bancos y a niveles globales de los tajos, también se realizarán trabajos de cartografiado litológico a detalle en toda la mina.

En bases a los resultados que se obtendrán en este proyecto de investigación servirán también como guía para los estudiantes que quieran ahondar más en la investigación que desean incursionar o estudiar un tema similar, así como Universidades, Empresas que desarrollen temas alusivos a la Geomecánica.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVETIGACIÓN

El estudio Geológicas - Geotécnicas Para La Elaboración Del Plan De Cierre De Minas SHP, Realizado Por Cesel (2006). En el informe se resume la evaluación geotécnica de los componentes mineros (canchas de desmonte, tajos y presa de relaves), se realizaron investigaciones mediante la excavación de calicatas en la zona de las canchas de desmontes y de la presa de relaves. Para la evaluación de los tajos de las Minas 2, 3, 4, 5, 7, 9 y 10 se establecieron siete estaciones geomecánicas, cuyos resultados indican la presencia de mecanismos de deslizamiento planar y por cuña, en el análisis de estabilidad de los deslizamientos se tienen factores de seguridad superiores a la unidad, por lo que, se descarta su colapso en condiciones estáticas, sin embargo, se recomienda para la etapa de cierre realizar trabajos de desquinche.

Estudio de estabilidad de taludes y zonas de riesgo de las minas 2-3-4, realizado por E&E Perú S.A. (2015), En este informe se presenta la evaluación geológica - geotécnica y la evaluación de la estabilidad local y global de los taludes de las Minas 2-3-4, en total se realizaron 55 estaciones geomecánicas distribuidas en el área de los tajos, también se caracterizó el afloramiento rocoso, se zonificó y determinó las zonas de riesgo de las Minas 2-3-4.

Estudio básico de peligro sísmico para el depósito de relaves Choclón 2, realizado por Zer Geosystem Perú (2012). La sismicidad histórica indica que en la región de estudio se han producido eventos sísmicos con intensidades de hasta IX grados en la escala Mercalli Modificada. Concluye que para la zona de Estudio recomienda, valores de aceleraciones



horizontales máximas (PGA) de 0.37 g para roca (Tipo B, roca compacta algo fracturada) y 0.46 g y para suelo (Tipo C, roca sana muy fracturada), respectivamente, correspondientes a un período de retorno de 475 años asociado a un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años de período de exposición sísmica. Para los análisis de estabilidad de taludes en condición pseudoestático para taludes se recomienda emplear un coeficiente sísmico igual a 1/2 de la aceleración máxima (PGA), en base a la recomendación del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (Hynes y Franklin, 1984). De acuerdo a lo mostrado líneas arriba se sugiere un valor de coeficiente sísmico para el basamento rocoso (Tipo B) de 0,19 g.

Estudio de estabilidad de taludes y zonas de riesgo de la mina 14, realizado por G&E S.A. (2018). El informe se presenta la evaluación geológica - geotécnica y la evaluación de la estabilidad local y global de los taludes de la mina 14, en total se realizaron 21 estaciones geomecánicas distribuidas en el área del tajo, también se caracterizó el afloramiento rocoso, se zonificó y determinó las zonas de riesgo de la mina 14. Se monitoreó la influencia de la voladura en dos puntos representativos del tajo. Con la intención de caracterizar geomecánicamente el basamento rocoso en profundidad, se perforó en total 1688.64 m bien distribuidos en siete puntos de perforaciones diamantinas. El material recuperado está conformado por relleno y/o depósitos antrópicos (cobertura) sobre el basamento rocoso constituido principalmente por hornfels, andesita porfirítica y mineral.

Nina (2014), desarrolla su tesis de pre grado. Estudio geológico – geotécnico del proyecto túnel de desvío río Asana – Quellaveco - Moquegua, teniendo como objetivo principal determinar las características geológicas y geomecánicas del macizo rocoso del proyecto túnel de desvío río Asana, concluyendo que la clasificación geomecánica del macizo rocoso son: portal de entrada se ha evaluado como roca mala de tipo de roca IV según



(RMR) y muy mala con valores de (0.02 – 2.5) según (Q).

Mamani (2016), desarrolla su tesis de pre grado denominado Análisis de la estabilidad de taludes en macizo rocoso de la carretera sina yanahuaya tramo III - sub tramo 02, a partir de la caracterización geológica y resistencia a la compresión simple, teniendo como objetivo específico realizar la clasificación geomecánica de los macizos rocosos.

Tupa (2017), Evaluación geológica - geotécnica para la estabilidad de taludes en la carretera Muñani - Saytococho tramo km. 14+700 al 30+00, para optar profesional de Ingeniería geológica. Tenido como objetivo principal de demostrar las propiedades físicas mecánicas de los taludes de la carretera Muñani Saytococho del tramo Km 14+700 al Km. 30+000, examinar el flujo de aguas subterráneas y superficiales, y valorar los taludes utilizando el método de equilibrio límite, tanto en rocas como en suelos.

Herrera (2020), Caracterización geomecánica del macizo rocoso aplicado al análisis de estabilidad de taludes en el yacimiento Jésica, Ocuvi - Lampa - Puno - 2015 – 2016, la tesis evalúa los diferentes tipos de alteración hidrotermal, sus características geomecánicas y su distribución en los distintos sectores del tajo abierto Jésica.

Ale (2012), Influencia de la alteración hidrotermal en la calidad del macizo rocoso en taludes de tajos abiertos. Tesis para optar el Grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Geotécnica, Universidad Nacional de Ingeniería. La tesis tiene por objetivo determinar la relación de la influencia de la alteración hidrotermal en la calidad del macizo rocoso en un yacimiento mineral, desde el punto de vista geomecánico a partir de la resistencia compresiva de la roca intacta, y el impacto de esta alteración en el diseño de los taludes de un tajo abierto.

Rodríguez (2019), Estudio geotécnico para tajo, Proyecto Coroccohuayco - Cusco –



Perú, tiene como objetivos principales, *Determinar y caracterizar de los parámetros de las discontinuidades, del macizo rocoso para las diferentes litologías presentes, para determinar su comportamiento geotécnico, *Procesar y analizar de la información geotécnica y *Evaluar por resistencia del macizo rocoso de los taludes del tajo. Tiene como colusión que el análisis geotécnico Según la evaluación del análisis cinemático, en el rajo Norte no habría controles estructurales para desarrollar fallas tipo planar en bancos con ángulos de cara de 63° , Las fallas tipo cuña se aprecia con mayor presencia en los taludes con dirección de buzamiento entre N355 y N040, resaltándose la intersección entre las Fallas L1 y E-W con plunge de 74° , la cual no ocasionará inestabilidad para bancos con ángulo de cara de 63° .

Stephen Cooper (2017), Estudio de la Estabilidad de los Taludes en una Mina Operativa Excavada en Suelo Duro/Roca Blanda - en las cruces en el sur de España, A thesis submitted to the Superior Technical school of Mining and Energy Engineers, Polytechnic University of Madrid, in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, el propósito de la tesis es planificar e identificar, los procesos implementados para garantizar la estabilidad geotécnica y la seguridad en la mina de las cruces, la evaluaciones principales es caracterizar geomecánica de los materiales, Analisis de estado limite 2D, con el programa SLIDE de Rocscience y análisis mediante diferencias finitas en el programa FLAC3D, FLAC2D y Phase2, de itasca.

Parra Monte I. Andrés (2020). En esta investigación se analizan dos casos de taludes de roca situados en la provincia de Concepción, los cuales presentas distintas condiciones de estabilidad entre sí; el Talud A permanece estable, mientras el Talud B presenta un colapso de material en forma de cuña. El objetivo del estudio es replicar las condiciones reales de ambos taludes a través de un modelo numérico, interpretando resultados y comparándolos con las características observadas en terreno con el fin de determinar la causa



del desprendimiento en el Talud B. Para esto, se utiliza un método de modelamiento continuo, lo que favorece el estudio de deformaciones de materiales, siendo el Método de Elementos Finitos la opción disponible que mejor se ajusta al estudio. En primer lugar, se realizan mediciones de ambos casos mediante trabajo en terreno a través de instrumentación topográfica, los resultados indican una altura máxima de 24 metros e inclinación promedio de 54° para el Talud A y una altura máxima de 9 metros e inclinación promedio de 55° para el Talud B. Por otro lado, se realiza una caracterización del macizo rocoso, donde el modelo conceptual para ambos taludes indica condiciones de baja competencia, con condiciones de superficie de calidad media a buena y una estructura con alta presencia de bloques; se definen tres y dos sets de discontinuidades para el Talud A y B respectivamente. Entre las características de roca principales comunes para ambos casos se destaca una densidad de 2640 kg/m^3 con una porosidad de $11,7\%$, UCS de 15 MPa y módulo de deformación de macizo rocoso menores a 500 MPa . Los resultados de las simulaciones indican una condición de estabilidad para ambos casos, con un factor de seguridad similar que varía de $1,3$ a $1,6$. Sin embargo, a través de un análisis de deformación se detectan diferencias en la geometría, localización y tamaño de una eventual superficie de falla de cada caso, lo cual se complementa a través de un análisis cinemático de discontinuidades, detectando un posible colapso por cuña en el Talud A y una combinación de cuña y volcamiento para el Talud B. En conclusión, se obtienen resultados cercanos a las condiciones reales, recomendando un estudio particular para el Talud A y su riesgo de falla por cuña, considerando las limitaciones existentes en el presente estudio.



2.2 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Regionalmente el área de la investigación está ubicada en la zona denominada Meseta de Marcona, presente en la Cordillera de la Costa, al oeste de la Cordillera Occidental de los Andes; en dirección al Oeste se presentan terrazas marinas.

La zona mineralizada se encuentra dentro de un paquete grueso de rocas metamórficas, sedimentarias y volcánicas que van desde el Paleozoico y Mesozoico, el cual forman un monoclinial de orientación NE con un buzamiento de 40° al N-NW; la estructura del cuerpo mineralizado se encuentra fallado, fracturado y contiene intrusiones de dacitas, pórfidos andesíticos y zonas de oxidación, dicho cuerpo se encuentra limitado al Norte por estratos de derrames volcánicos pertenecientes al Terciario y al Sur con el batolito de San Nicolás, compuesto de granodiorita. Estratigráficamente los basamentos rocosos son limitados por la cubierta de los depósitos cuaternarios. Para más detalle se presenta el *Plano de Geología Regional PL-GG-002* en el *Anexo A-11*, donde se representa la ubicación del Proyecto y la distribución de las unidades litoestratigráficas a nivel regional.

2.3 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

Geomorfológicamente, el área de la investigación muestra un relieve diverso, que se extiende desde la línea litoral hasta las zonas andinas, alcanzando cotas de 2 230 msnm, destacan tres unidades geomorfológicas principales, dispuestas en las franjas contiguas y parcialmente superpuestas, las cuales se describen a continuación. Para más detalle, se presenta el *Plano de Geomorfología Regional PL-GG-003* en el *Anexo A-11*.

2.3.1 Terrazas Marinas

Las terrazas marinas de San Juan, presentan una acción combinada de la abrasión con el levantamiento andino. Una vista de las terrazas marinas se presenta la *Figura 1*.



Figura 1. Vista Panorámica de la Línea de Costa y Terrazas Marinas

En la superficie de abrasión se encuentran en la zona de San Juan de Marcona, donde se distinguen relieves escalonados en el flanco occidental de la Cordillera de la Costa, quedando algunos tramos discontinuos debido al estrago parcial por la erosión fluvial, que actuó en condiciones climáticas muy diferentes a la actualidad. Las terrazas de deposición se hallan destruidas, presentando una topografía abrupta en este sector.

Dada la condición natural de la sedimentación en este sector, hasta el más leve movimiento eustático dejó evidencias, por ejemplo, las terrazas pequeñas y las marcas de eventuales líneas de playa.

Los levantamientos localizados en el área fueron consecuentemente rápidos y continuos, las superficies emergentes anteriormente no fueron objeto de modificaciones por la acción marina, quedando en tierra firme un relieve escalonado sin mayor estrago. Sin embargo, ciertos sectores con cotas bajas estuvieron sujetos a que el mar ingrese por efecto de fallamientos gravitacionales ocasionando la destrucción y socavamiento de las terrazas. En la **Figura 2** se presenta una imagen Landsat de las terrazas marinas identificadas en San Juan de Marcona, indicando sus respectivas altitudes.

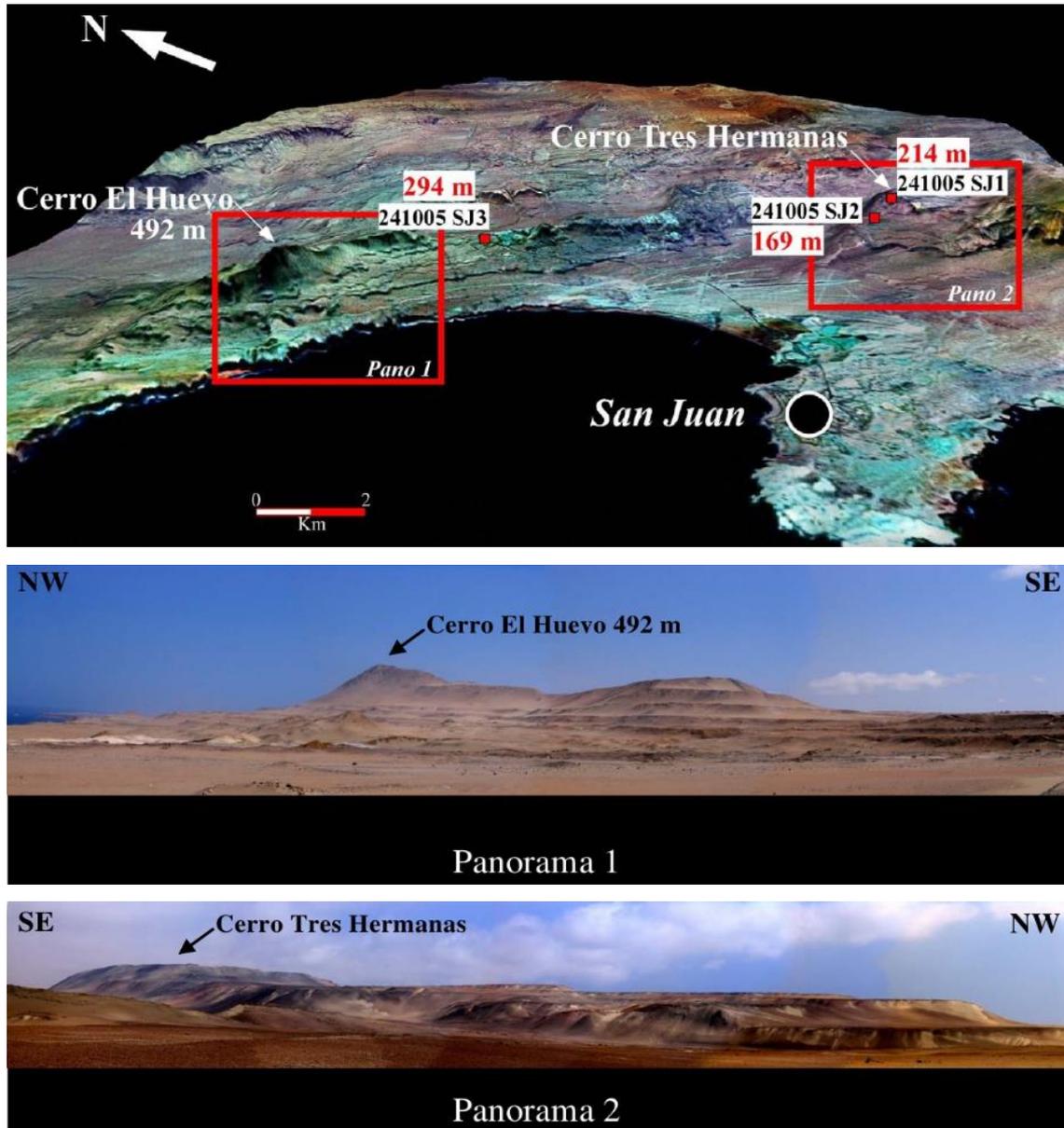


Figura 2. Vista 3D de Imagen Landsat Mostrando las Terrazas Marinas Identificas en San Juan de Marcona con sus Respectivas Altitudes

Fuente: Saillard (2008).

2.3.2 La Cordillera de la Costa

Se denomina como una cadena de cerros de baja elevación que ocupa en todo borde continental. Está compuesto por rocas del basamento cristalino y granitos rojos antiguos cubiertos por una costra sedimentaria de edad paleozoica. Su ancho es variable, en el sector de Marcona tiene un área aproximada de 40 km², hacia el Sureste se angosta progresivamente. Una vista de este rasgo geomorfológico se presenta la **Figura 3**.



Figura 3. Vista de Cuerpos Ígneos que Forman la Cordillera de la Costa

2.3.3 Peneplanicie Pliocénica

Esta unidad comprende una peneplanicie de abrasión, la que actualmente se encuentra disectada por los cañones de los ríos Yauca, Acarí y quebrada Carbonera con sus respectivos afluentes (*Ver Figura 4*), dicha superficie cubre una extensa área, comprendida entre Mollendo y las cercanías del departamento de Ica.

En el área investigada solo se aprecia un sector, ya que la gran parte está cubierta por tufos, muestra una leve inclinación hacia el occidente, siendo más visible al Oeste de los cerros copara donde se hunde en la depresión preandina.

En lugar está conformado por conglomerados y areniscas con presencia de fósiles marinos, lo que afirma una abrasión marina, pero hacia el Este se encuentran zonas que pueden confundirse con superficies de erosión continental.



Figura 4. Vista de los Cañones Formados por los Ríos Yaucha y Acari, Mostrando la Zona Geomorfológica Peneplanicie Pliocénica

2.3.4 Depresión Pre-Andina

Esta unidad se encuentra entre la Cordillera de la Costa y el frente andino, hundida entre un sistema de fallas paralelas entre sí, de orientación NO – SE, perteneciente a la llanura pre - andina conocida como llano.

Se encuentra rellena por gravas y arenas de origen marino y aluvial, relacionadas al desarrollo de terrazas marinas, en dirección SE existen terrazas aisladas en forma de mesetas, formadas debido a los procesos fluviales.

2.3.5 Estratigrafía regional

En el área de estudio se exponen diferentes unidades litológicas: sedimentarias, metamórficas e ígneas, con edades que van desde precambrianas hasta recientes, las cuales se presenta en el *Plano de Geología Regional PL-GG-002* en el *Anexo A-11*.



Las unidades litológicas más antiguas de la columna estratigráfica están conformadas por rocas de metamorfismo regional, está compuesto por esquistos, gneises, migmatitas y granitos, que se agrupan dentro del Complejo Basal de la Costa. Suprayacente al complejo cratónico, tiene una secuencia meta - sedimentaria de origen glaciar aparentemente precambriana, que se ha denominado Formación Chiquerío, el cual marca un registro climatológico muy significativo en los acontecimientos geológicos.

Las formaciones de rocas calcáreas pre-mesozoicas se dividieron en dos unidades principales: los más antiguos denominada Formación San Juan, de edad probable Precambriana superior, y la más joven denominada Formación Marcona, del Paleozoico inferior, ambas formaciones separadas por una discordancia angular.

Entre las unidades mesozoicas en los periodos del Caloviano y el Neocomiano, se distingue dos facies de acumulación bien marcadas: la primera occidental de margen de cuenca, formada desde inferior hasta la superior por las formaciones Río Grande, Jahuay y Yauca y la segunda oriental constituida por el Grupo Yura. La secuencia mesozoica más joven reconocida, es una serie volcánico - sedimentaria designado como la Formación Copara, de edad Aptiano - Albiana inferior.

El Terciario está representado por los estratos supramiocenos de la Formación Pisco, de ambiente marino, sucesivamente hacia arriba se aprecian los depósitos continentales de edad pliocena conformados por la Formación Millo y el Volcánico Sencca.

Finalmente, en el Pleistoceno se iniciaron a depositarse terrazas marinas, flujos de barro y a desarrollarse dunas de arena, depositándose también depósitos aluviales.

Todas estas unidades formacionales se presentan resumidamente en la columna estratigráfica regional (*Figura 5*).

ERA/ETAPA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	ROCAS INTRUSIVAS				
				PLUTONICAS	HIPABISALES			
CENOZOICO	CUATERNARIO	Reciente	Depósitos : aluviales y eólicos	Q-al	Q-e			
		Pleistoceno	Terrazas Marinas	Q - tm				
	TERCIARIO	Plioceno	Volcánico Sencca	Ts - vse				
		Mioceno	Formación Pisco	Ts - pi	Batolito de la Costa KTI-di/to			
	MESOZOICO	CRETACEO	Albiano	Formación Copara	Kim-co			
			Aptiano					
Neocomiano			Formación Yauca	Ki - ya				
JURASICO		Titoniano			Formación Jahuary	Js - ja		
		Oxfordiano					Formación Río Grande	Js - rg
		Calloviano						
PROTEROZOICO		Inferior	Formación Marcona	P - ma				
	PRECAMBRIANO		Formación San Juan	Pe - sj				
			Formación Chiquerío	Pe - Chi				
			Complejo Basal de la Costa	Pe - gr				
				Pe - gn				
					adpsn adsn gdsn disn	Pi - hisn		

Figura 5. Columna Estratigráfica Regional del Área de Estudio y Alrededores

Fuente: INGEMMET (1998).

2.3.5.1 Unidades Pre - Mesozoicas (PE-gr / PE-gn)

El cinturón de IOCG del Sur del Perú está cimentado por rocas metamórficas de alto grado del Alóctono Paleoprotozoico a Mesoprotozoico (Wasteneys *et al.*, 1995; Loewy *et al.*, 2004). La parte Norte del dominio del basamento de Arequipa - Antofalla, que se unió al Cratón Amazónico durante la orogenia Grenville - Sunsas de *ca.* 1.0 - 1.3 Ga (Loewy *et al.*, 2004; Chew *et al.*, 2007), incluye esquistos, gneises, granitos y migmatitas cortados por diques básicos y pegmatíticos. El complejo de basamento está inconformablemente superpuesto por estratos sedimentarios Neoproterozoicos y Paleozoicos y, mucho más por



rocas sedimentarias y volcánicas de la era Mesozoica (Caldas, 1978; Hawkes *et al.*, 2002).

Es de origen metamórfico de una amplia extensión regional, litológicamente está conformado por esquistos micáceos, gneises, granitos gnéisicos y migmatitas. Los esquistos se extienden en áreas marginales y que conforman la fase más joven del metamorfismo regional; sus tonos varían de gris verdoso oscuro a negruzco. Los gneises son principalmente graníticos (PE-gr) de tinte gris y rosáceo con granos u ojos de cuarzo y ortosa - microclinal peridotizada, dentro de una matriz cuarzo feldespática de grano fino.

Esta unidad en su composición también tiene granodiorita (PE-gn). Los cuales se presentan instruido y atravesados por una serie de diques sintectónicos y postectónicos principalmente andesíticos a básicos. En el área de estudio se presentan las rocas de granitos gnéisicos, se aprecian en la zona meridional y central del área de estudio, con algunas inclusiones en la zona de litoral; en el afloramiento conocido como Cerro Tres Hermanas, Lomas de Marcona y Punta Colorada, donde se ha observado foliaciones de 35° a 80° y juntas mayores a 50°.

2.3.5.2 Formación san juan (PE-sj)

Esta unidad constituida por metasedimentos esencialmente de origen calcáreo y lutáceo, sufriendo un grado de metamorfismo térmico de bajo grado transformado se a esquistos. Estos esquistos calcáreos de tonos grises y rosados claros con superficies lustrosas presentan fracturamiento intenso por la tectónica del área. También se encuentran en esta formación algunas zonas granitizadas.

Esta formación se presenta al SE y NE del Cerro Tres Hermanas donde se reconoce un sector con inclinación de sus metasedimentos de 50° SE.

Se aprecia que esta unidad tiene una potencia 3 000m regionalmente, es única por su



origen y posición, infrayace regionalmente a la Formación Marcona y fue instruida por el batolito de San Nicolás, por ende, su edad es Precambriana Superior - Paleozoica Inferior, posiblemente Ordovícica.

2.3.5.3 Formación Marcona (Pi-ma)

Esta unidad está conformada por una sucesión calcárea pre - mesozoica, que afloran en la región de San Juan. Se ubica el conglomerado basal la cual está cubierto por calizas solidificadas marrones conformando una estructura simple y envolvente en la zona oriental del Domo de Marcona.

Esta unidad litológica, hospeda a la mayor parte de cuerpos mineralizados de magnetita económica en Marcona. Atchley (1956) describió este paquete metasedimentario de aproximadamente 1 500 m de espesor, como dominado por filitas, filitas similares a corneana y corneanas, pero las texturas clásticas están ampliamente preservadas y el clivaje espaciado, y las texturas decusadas microscópicas están desarrolladas más extensamente que la foliación penetrativa. Protolitos identificables incluyen limolitas, areniscas y arenitas de cuarzo menores, todas dominadas por cuarzo con plagioclasa, biotita, sericita, y clorita intersticial menor. Mármol dolomítico y caliza cristalina ocurren en las partes Norte y Sudeste del depósito, pero no son grandes hospedantes de mineral.

El depósito de hierro de Marcona pertenece, al menos en parte, a la era Jurásica Media (información de K-Ar de Injoque, 1985), y está parcialmente hospedado por estratos volcánicos y sedimentarios marinos de poca profundidad del Jurásico Medio. Las edades relativas de estas unidades y su mineralización son entonces críticas para entender el ambiente de formación de minerales. Caldas (1978) documentó exhaustivamente las relaciones estratigráficas del Mesozoico en cuadrángulo 10 000 de San Juan, en donde se encuentran tanto Marcona como Mina Justa y también en los cuadrángulos contiguos de



Acarí y Yauca. Los estratos del Jurásico y Cretácico de la mayor parte de Marcona se subdividen en orden decreciente de edad en las Formaciones Rio Grande, Jahuay, Yauca y Copara (Caldas, 1978). Las edades de las tres formaciones más antiguas están bien establecidas en terrenos de fauna, pero aquellas de la Formación Copara y el complejo Bella Unión predominantemente hipabisal andesítico - dacítico que la penetra, así como también Tunga Andesita hipabisal posterior a la Formación Yauca, están escasamente definidas (Caldas, 1978).

2.3.5.4 Formación Río Grande (Js- rg)

Esta formación se designa a la mayor parte de las unidades volcánicas - sedimentarias que se manifiestan en la faja costanera del departamento de Ica y que se extiende hasta los alrededores de Ocoña. Las rocas pertenecientes a esta formación se exponen en la Cordillera de la Costa y en una parte de la Depresión Preandina, caracterizada por una sucesión de estratos metasedimentarios y meta-tobáceos de aproximadamente 850 m de espesor asignados a una Formación de Cerritos del Paleozoico, un término que aún se usa en mapas geológicos de minas (Marcona Mining Company, 1968).

La Formación de Río Grande hospeda al depósito de Mina Justa y muchos otros cuerpos mineralizados de la Mina Marcona (Injoque, 1985; Hawkes *et al.*, 2002; Moody *et al.*, 2003). La sección tipo de esta sucesión de aproximadamente 3 000 hasta 4 000 m de espesor, con rumbo NE y buzamiento NO generalmente, está expuesta en el área de Monte Grande en el Cañón Río Grande, al NO de Marcona. Incorpora un miembro bajo de 500 m que comprende un conglomerado basal polimictico superpuesto sucesivamente por lodolita, arenisca, caliza, brechas desde riolíticas hasta andesíticas y flujos desde riolíticos hasta andesíticos (Romeuf *et al.*, 1993). Esta asociación que probablemente corresponde a la Formación Cerritos en Marcona de Atchley (1956), está superpuesta por al menos 2 000 m



de flujos andesíticos brechados con composiciones de altas en k-calco-alcaninas hasta shoshoníticas, calizas, esquistos y areniscas rojas suavemente plegadas. La formación está afectada casi en su totalidad por metamorfismos de facies de zeolita no deformativos (Aguirre y Offler, 1985; Aguirre, 1988).

2.3.5.5 Formación Jahuay (Js-ja)

La Formación Jahuay está constituido por aglomerados volcánicos color marrón con clastos redondeados a angulosos, en la parte baja o inferior se compone por derrames lávicos en forma de brechas laminadas, intercaladas con flujos afaníticos verdes e interrumpidas por sills anchos de andesita porfirítica color marrón, presentando fenocristales de plagioclasas; en la parte superior presenta una secuencia sedimentaria, compuesta por areniscas con calizas de grano grueso, marmolizadas, asimismo, se encontraron bancos de areniscas calcáreas, presenta a su vez derrames y sills de dacitas color verde - grisáceas. La potencia de la secuencia se estima en 1 000 m.

2.3.5.6 Formación Pisco (Ts-pi)

Los estratos e intrusiones del Mesozoico y los anteriores al mismo están superpuestos discordantemente por una secuencia del Terciario localmente asignada a las Formaciones Pisco, Millo y Sencca. Las Formaciones Pisco y Millo del Mioceno al Plioceno de 450m de espesor, compuestas de sedimentos marinos de aguas poco profundas y vulcanoclásticos de grano fino subordinados (Caldas, 1978; Hawkes et al., 2002), se extienden desde la cuenca Pisco en el Norte (Devries, 1998) hasta el Sur de Lomas, donde contienen abundantes fósiles de ballenas (Brand et al., 2004). Los vulcanoclásticos del Mioceno Temprano de la Formación Pisco registran un pulso de Neógeno Temprano de actividad volcánica reconocida a lo largo de los Andes centrales (Noble et al., 1990).

Una toba de flujo de ceniza riodacítica vestigialmente preservada, ≤ 50 m, asignada



arbitrariamente a las Formación Sencca (Caldas, 1978; Injoque, 1985), da una edad de meseta de biotita de $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ de 9.13 ± 0.25 (2σ) Ma (Quang et al., 2001). Esta unidad cubre la superficie de la Loma de Marcona, el más joven de los cuatro pedimentos erosionales preservados desarrollados regionalmente en el distrito. Subsecuentemente, se formó una depresión bajo el nivel del mar en el área cubierta por depósitos de playa del Plioceno superior (Ortlieb y Macharé, 1990), y luego se volvió a elevar, un proceso registrado por una extraordinaria serie de terrazas marinas controladas tectónicamente (Broggi, 1946), donde la más joven se formó en respuesta a la subducción local de la asísmica Dorsal de Nazca.

La unidad está conformado por secuencias de rocas sedimentarias consolidadas, constituida en su sección inferior por areniscas conglomerádicas de grano grueso con tonalidades amarillentas, en bancos anchos y horizontes conchíferos bastante triturados por el oleaje, con arcillas laminadas e interestratificadas, con bentonita y abundante ceniza volcánica y yeso; en su sección media y superior por areniscas limolíticas, limolitas, areniscas de grano fino con intercalaciones de areniscas tufáceas, concreciones de areniscas silíceas, tufos y cenizas retrabajadas, se caracteriza por ser livianas y frágiles, con tonalidades gris claro a gris blanquecino levemente anaranjado, presenta igualmente abundante fósiles y microfósiles como foraminíferos, gasterópodos, braquiópodos y lamalibranquios.

Esta formación al noreste se presenta los Cerro Tres Hermanas, en general se caracteriza por presentar una estratificación subhorizontal, ligeramente ondulada y con presencia de numerosas vetillas compuesta por yeso; en el área de San Juan tiene un espesor estimado de 500 m y su edad corresponde al Mioceno del Terciario Superior.



2.3.5.7 Volcánico Sencca (Ts-vse)

El Volcánico Sencca está conformado por tufos de color blanco a gris claro, de naturaleza dacítica o riolítica, se presenta en bancos tabulares compactos variando a ignimbritas pseudo - estratificadas. Posee un espesor considerable, que en algunos casos está cubierta por una capa de material aluvial o polvo blanco proveniente de material retrabajado. La textura de los tufos es porfirítica, con fenocristales de ortosa o plagioclasas, asimismo presenta biotitas.

2.3.5.8 Depósitos Cuaternarios

- **Depósitos Cuaternarios – Terrazas Marinas (Q-tm)**

Estos depósitos están asociadas a mesetas aisladas, estuvo sujeto a una intensa erosión fluvial posterior a la deposición, como las terrazas de San Juan, conservadas en la depresión preandina y en sectores donde la Cordillera de la Costa muestra ondulaciones suaves. Se originaron como consecuencia del levantamiento y retiro del mar, dejando como rasgo geomorfológico una superficie plana con cubierta de gravas y arenas.

Está conformado por capas de conglomerados con elementos heterogéneos englobado de una matriz arenácea, lentes de arenisca y areniscas bioclásticas se caracteriza por presentar horizontes conchíferos. Asu vez contienen algo de tufos Re-depositados y flujos de barro de materiales volcánicos. Generalmente son acumulaciones sub - horizontales pertenecientes al cuaternario pleistocénico.

- **Depósitos Cuaternarios – Aluviales (Q-al)**

Los depósitos aluviales, se presentan en forma muy enfocada en el lecho de quebradas antiguas, están conformado por mezclas de grava y arena, regularmente con cantos sub redondeados a angulosos y matriz areno - limosa, lentes de arena sucia, lodolitas de materia tufáceos en estado suelto a levemente consolidados, de origen heterogénea y



heterométrica. Estos depósitos pertenecen al Cuaternario Holoceno (reciente).

- **Depósitos Cuaternarios – Eólicos (Q-e)**

Los depósitos eólicos tapan someramente a los afloramientos rocos en forma lomadas, pampas y laderas, están constituidos por arenas y arenas limosas, en la parte superficial están conformados por esporádicas gravas y algunos fragmentos de rocas, este material se encuentra en estado suelto, seco, de espesor variable, esta unidad por lo diseminada que se encuentra en el área de estudio no ha sido mapeada.

2.3.5.9 Rocas Intrusivas (Batolito Costero)

Esta roca intrusiva se muestra masivamente al Norte de las lomas de Marcona, en la pampa Choclón y la Mina Marcona, así como en las cercanías de Bella Esperanza, en la zona de San Juan de Marcona en los alrededores de las bahías San Nicolás y San Juan. Está conformado por plutones granitoides, pertenecientes al Batolito Costero (Pitcher et al., 1985), que penetran estratos de Neocomiano o más antiguos en el área de Acarí-Cobrepampa (Dunin-Borkowski, 1970; Caldas, 1978).

La información sobre la edad de los circones de U-Pb es insuficiente en esta parte del segmento de Arequipa del batolito, la fecha de K-Ar (Cobbing, 1998) y Rb-Sr (Sánchez, 1982) para la diorita de Acarí y la monzonita-monzogranito de Cobrepampa respectivamente sugieren que intrusión gran escala de manera local empezó en ca. 109 ± 4 Ma, poco después del emplazamiento del complejo de Bella Unión. Stocks dioríticos pequeños y sin fecha 7-8 km a ESE y SE del prospecto de Mina Justa (Caldas, 1978), podrían ser correlativos con intrusiones más grandes al Este. Una vista de este tipo de rocas se presenta la **Figura 6**.



Figura 6. Rocas Intrusivas (Adamelitas) del Batolito San Nicolás, Cercanos a la Planta San Nicolás

Los afloramientos de granodioritas (Pi-gdsn) tiene una textura de grano grueso, mesócratas, gris verdoso, la peculiaridad de estas rocas, presentar cristales tabulares de hornblenda verde, con ligera orientación, dando una distribución radial. La Formación de Marcona fue afligido por intrusión de monzogranitos, granodioritas y gabro - dioritas del batolito post - cinemático, de 425 ± 4 Ma

2.3.6 Características tectónicas

El área investigada y sus alrededores ha sido moderadamente deformado por los eventos tectónicos, estas deformaciones generan fallamientos cuyos alineamientos tienen la orientación andina. Las fallas principales están acompañadas por los diaclasamientos y fracturas cuyas orientaciones no son preferenciales, de similar modo sus espaciamentos, persistencias y rellenos son muy variables.

Se puede estimar que las unidades geológicas identificadas fueron afectadas por estos fallamientos. Estas estructuras se localizan hacia el Sur de la península San Juan.

Entre los acontecimientos tectónicos más importantes que han afectado la región del



área estudiada se encuentran:

- **Domo de Marcona**

En la Cordillera de la Costa se encuentra emplazado el Batolito de San Nicolás, donde presenta un sistema de diques que afecta a las rocas encajonantes, teniendo una tendencia general de orientación NE-SO.

El Domo de Marcona está asociado a un movimiento post - málmico, con eventos compresivos de dirección NO-SE, dando como resultado se tiene estructura transversal a la tendencia andina, por lo tanto, dicha estructura está relacionada al desarrollo de la Deflexión de Abancay, conjuntamente con la Dorsal de Nazca.

- **Fallamientos**

La región está afectada por un sistema de fallas en bloque, las cuales son fallas de tipo gravitacionales predominantes a lo largo del flanco occidental de Cordillera de la Costa, esta a su vez en la faja central presenta una Depresión Preandina, generando fallas de desplazamiento de rumbo.

En el estudio geológico de SHP ha diferenciado tres grupos o familias de fallas, denominadas “Pista”, “Repetición” y “La Huaca”. Estas fallas se definen en gran parte por sus orientaciones más que por su sentido de desplazamiento, o naturaleza de la falla (por ejemplo: dúctil, frágil, lístrica, planar). Las posiciones mapeadas de las fallas proceden en su mayoría del registro de sondajes de Marcona y de la exposición en los tajos abiertos. Los afloramientos fuera de los tajos son generalmente pobres. La exposición en los tajos de labores es muy pobre debido al polvo de la mina. Cada una de las familias de fallas mapeadas parece cortar y ser cortada por las otras familias. La explicación más sencilla para esto sería que todas las fallas estuvieron activas al mismo tiempo. Las fallas “La Huaca” con tendencia NO también muestran clara evidencia de postmineral hasta la actividad actual.



El patrón del mapa geológico de Marcona sugiere firmemente el fallamiento de desprendimiento, como lo propone Brian Marten. La evidencia principal es que las unidades litológicas dentro de la Formación Marcona están truncadas contra el contacto basal con el complejo de basamento metamórfico Lomas, y en algunos casos, contra la aparente Formación Río Grande concordantemente superpuesta. Estas discordancias son paralelas y/o corresponden directamente a las fallas “Pista” mapeadas.

La falla “Repetición” de los mantos de hierro en el distrito de Marcona hace parecer que existen más mantos de los que en realidad hay. Mediante la restauración (es decir, la “anulación”) de los desplazamientos de falla, se puede observar que solo existen tres horizontes de manto principales, dos en la formación Marcona y una en la formación suprayacente Río Grande, con dos mantos más delgados adicionales en la parte superior de la Formación Río Grande.

- **Manto 3** – N13, N12, A15, A21, M8, FCW3, N14, N16, Mancha Justa, Mancha Zona Nueva
- **Manto 2** – Mina 11, 14, 5, F6, 6, 10, 9, 4, 3, 2, 1
- **Manto 1** – Mina 12, 16, N8, 7, 17.

Aunque las fallas “La Huaca” corten las fallas “Pista”, y viceversa, con más frecuencia, parece que estas se “unen”. Las uniones son alojadas por la geoméricamente necesaria rotación y deformación de las estratificaciones y mantos cerca de las uniones que, de otro modo, no ocurrirían. Un buen ejemplo se da en el lugar donde el manto de la Mina 1-2-3-4 ha sido decapitado por una falla “Pista” con aparente desplazamiento dextral. La continuación del techo del mismo manto (la Mina 9-10-6 ha sido rotada a una orientación más E-O mediante un giro hacia atrás en sentido antihorario en muchas fallas “La Huaca” que se unen a la falla “Pista”.



Se interpreta que, de manera conjunta, las fallas “La Huaca” y “Pista” comprenden un sistema de fallas con “estilo de desprendimiento”. Las fallas “Repetición”, evidentemente, no son parte del sistema de desprendimiento en términos de un patrón de mapa de diagnóstico, pero se mostrará más adelante que si bien no es parte del mismo sistema de fallas, estas fueron casi contemporáneas. Las fallas “La Huaca” tienen un rumbo NNO y buzanan generalmente 70-80° al ENE.

El desplazamiento del contacto de la Formación Marcona/Río Grande, y los mantos de magnetita muestran consistentemente un aparente sentido dextral de desplazamiento (en vista de plano – el lado Este del techo se mueve hacia el Sur). Porque los estratos y mantos buzanan aproximadamente 40-50° al NNO, los desplazamientos puramente extensionales, e incluso sinistral del oblicuo (con >50° de inmersión) pueden aún dar aparentes desplazamientos dextrales a través de las fallas “La Huaca”. Las medidas de los indicadores cinemáticos muestran con más frecuencia desplazamiento normal (*dip-slip*) en asociación con las zonas de gouge gruesa. Sin embargo, también muestran con frecuencia una extensión oblicua dextral y sinistral (vectores de deslizamiento hacia 030° y 140° respectivamente), algunas veces, con los tres vectores de deslizamiento en la misma falla, por ejemplo, la bien marcada falla al extremo Este del tajo de la Mina 14 (observado por Brian Marten).

En la **Figura7** se presenta la ubicación de las fallas de deslizamiento de carácter regional en la zona del proyecto, las cuales han sido mencionadas anteriormente.

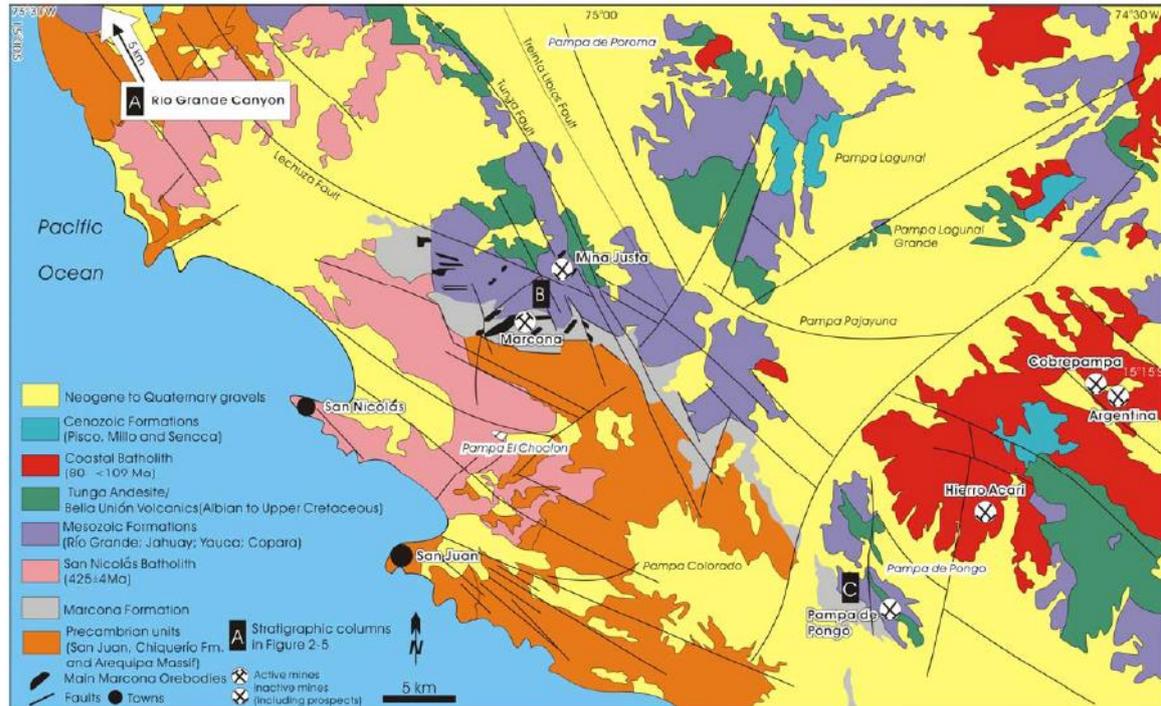


Figura 7. Sistema de Fallas Regionales en la Zona de Estudio.

Fuente: Huanyong Chen (2008)

2.4 GEODINÁMICA

En el presente proyecto de investigación es necesario considerar los procesos geodinámicos que puede causar daños en forma directa o indirecta dentro del área de estudio de la mina 9-10.

2.4.1 Geodinámica interna

Con respecto a las condiciones geológicas internas, el área de estudio se encuentra en una zona altamente sísmica, en el mapa de zonificación sísmica del Perú, según el RNE Norma E.030, está catalogado en la zona 4: 0.45, está sometido a sismos de intensidades altas a moderadas. Por tal motivo en el área de estudio se debe considerar para los análisis de estabilidad seudo estático para todo el tajo.

2.4.2 Geodinámica externa.

Los procesos de geodinámica externa en el área de estudio son producidos por



factores condicionantes como la meteorización de la roca o taludes muy fracturados, casi en toda la mina, los taludes tienden a tener valores de ángulo muy parados, por ende, esto hacen que los desprendimientos de rocas sean más recurrentes, también los deslizamientos de suelo, por consecuencia es de vital importancia identificar y evolución de riesgos geológicos.

2.4.2.1 Evaluación de Riesgos Geológicos

Para el análisis de los riesgos geológicos identificados en el cartografiado geológico, se ha elaborado una matriz de riesgos con la finalidad de evaluar la clasificación del riesgo de cada uno de estos eventos. El efecto de eventos tales como deslizamientos, agrietamientos, caída de rocas o derrumbes, por lo general están asociados a un costo, el cual tiene una pérdida de producción debido a una paralización de las operaciones mineras.

Para estimar el índice de severidad de las consecuencias, se consideró una combinación de dos criterios: primero la categoría, el cual se subdivide de menor, moderado, serio y catastrófico; el segundo criterio es la pérdida de producción, teniendo en cuenta los efectos que pudiera producir en el tiempo. Una vez estimada la severidad de los diferentes eventos que podrían ocurrir, se procede a evaluar su frecuencia, la cual se clasifica de acuerdo a los cuatro índices: frecuente, ocasional, imposible y raro. Para fines del presente estudio, debido a que no se cuenta con datos estadísticos de ocurrencia de deslizamientos, agrietamientos, caída de rocas o derrumbes (frecuencia), para la definición de las categorías de frecuencia y severidad de los riesgos, se han considerado las observaciones realizadas durante los trabajos de campo y la experiencia previa en la elaboración de este tipo de análisis, mas no una base de datos estadística.

Finalmente, cruzando las matrices severidad y frecuencia, se obtiene una matriz de clasificación de riesgos (ver la **Figura 8**), la cual presenta tres categorías: riesgo bajo, riesgo moderado y riesgo extremo.

		INDICE DE SEVERIDAD DE LA CONSECUENCIA				
		Categoría	1. Menor	2. Moderado	3. Serio	4. Catastrófico
		Pérdida de Producción	2-4 Semanas	1-3 Meses	3-6 Meses	> 6 Meses
FRECUENCIA						
Índice	Eventos/Año					
D) Frecuente	>1					
C) Ocasional	1-1/10					
B) Imposible	1/10-1/100					
A) Raro	1/100-1/1000					

	Riesgo Extremo (decisión ejecutiva para aceptar)
	Riesgo moderado (se reduce según sea práctico)
	Bajo riesgo (monitorear y manejar)

No incluye eventos a gran escala

Figura 8. Caracterización y Clasificación de los Riesgos Asociados a la Estabilidad Física

Se ha seguido el proceso mencionado para evaluar individualmente cada una de las zonas de riesgo identificadas en campo. La ubicación de estas zonas de riesgo y su respectiva simbología se presenta en los *Planos PL-GG-014 y 015 del Anexo A-11*, en el cual se puede observar el nivel de riesgo asociado. En estos planos se han incluido las zonas de riesgo reportadas en los niveles superiores, medios y en los bancos inferiores.

2.4.2.2 Riesgos geológicos identificados en la mina 9-10

A continuación, se detallan los principales tipos de riesgos geológicos - geodinámicos identificados durante el estudio de campo en todos los niveles de los bancos de la Mina.

- **Caída de Rocas**

Los desprendimientos de roca usualmente se presentan en los macizos rocosos con un alto grado de fracturamiento y una serie de discontinuidades que permiten los deslizamientos tipo planar y/o cuña. Las dimensiones variadas de estos fragmentos a bloques heterométricos, que van desde angulosos a subangulosos; estando influenciados por la



acción de la gravedad, los agentes geodinámicos y perturbaciones por procesos de las operaciones en el tajo como la voladura y transitabilidad de la maquinaria dentro de la Mina.

Se ha identificado este fenómeno en los diferentes niveles del tajo, ya que los macizos rocosos en general se presentan fracturados a muy diaclasados. El fenómeno de desprendimiento de rocas está asociado a la orientación desfavorable de los planos de discontinuidades que generan principalmente deslizamientos tipo cuña y en menor medida deslizamientos tipo planar.

Se mapearon 37 zonas de caída de rocas (CR-01 a CR-37), de las cuales 27 presentan niveles de riesgo moderado, 3 presentan niveles de riesgo bajo y 7 presentan niveles de riesgo extremo. De acuerdo con las recomendaciones que se den se tiene que llevar a cabo un programa de limpieza de bancos, desquinche selectivo y/ monitoreo de los taludes, teniendo en cuenta el riesgo asociado a cada evento. De esta manera se reducirá el nivel de riesgo y la probabilidad de ocurrencia, tal como se presenta en la Tabla 2.

En la parte inferior se ha identificaron 13 zonas de caída de rocas en los niveles más bajos (CR-1' a CR-13'), de los cuales 7 presentan un nivel de riesgo moderado y 6 presentan un nivel de riesgo bajo, tal como se presenta en la Tabla 3.

Esto se debe a la calidad y estabilidad de la roca, éste último en base a la disposición de las discontinuidades respecto al talud. De acuerdo a los índices SMR calculados en la Mina 9-10, se presentan zonas parcialmente estables, inestables y totalmente inestables, las cuales son riesgos potenciales para generarse caídas de rocas, aumentando su nivel de riesgo debido a los procesos de voladura.

De manera general, la caída de bloques implica un riesgo moderado a extremo en los sectores identificados y señalados en la Tabla 2. En la Mina 9 se presenta principalmente

caída de rocas asociadas a un riesgo moderado en las paredes Norte y Este debido a los planos de las discontinuidades de las fallas F-92, F-93, F-94, F-95, F-96, F-97, F-98, F-99, F-100 y F-101, las cuales forman cuñas y/o bloques de roca.

En la Mina 10 se presenta principalmente caída de rocas asociadas a un riesgo moderado a extremo en las paredes NE y SE debido a los planos de las discontinuidades de las fallas F-8 a F-16, F-27 a F-35, F-40 a F-46, F-72, F-73, F-103 a, F-109. En la Figura 9 se presenta, a manera de ejemplo, una zona de caída de rocas identificada en el Nivel 569 de la Mina 10.



Figura 9. Zona de Caída de Rocas en la Mina 10, Cara Norte Nivel 569, CR-02'

Se realizó el modelamiento de caída de rocas en los taludes de la Mina 9-10 utilizando el programa Rockfall v4.0 de Rocscience, con la finalidad de verificar si la caída de bloques rocosos podría causar algunos problemas de colmatación de las bermas de los taludes rocosos.

De todas las opciones disponibles en el programa para representar el comportamiento



de la superficie de deslizamiento, en todos los casos se ha elegido la opción “Bedrock Outcrops” o “Afloramientos de Roca”, debido a los afloramientos rocosos se presentan en los taludes de la Mina 9-10 están conformados por afloramientos de roca que no tienen ningún tipo de cobertura o recubrimiento.

Se considera que la cantidad de roca representativa para el modelamiento es de 50, dicha cantidad permitirá realizar un cantidad adecuado de simulaciones respecto a la trayectoria de la roca al caer.

Para el cálculo del ángulo de fricción se consideró la opción “Calculate Friction Angle from R_t ”, donde R_t es el Coeficiente de Restitución Lateral, el cual se define como $R_t=0.85$ para el caso de afloramientos rocosos, de acuerdo a las recomendaciones de Rocscience (*Tabla 4*). De la misma manera, se consideró el Coeficiente de Restitución Normal $R_n=0.35$.

Se ha asumido que las rocas pueden caer en “caída libre”, es decir tiene una velocidad inicial en la dirección horizontal y vertical es nula. El peso específico de las rocas se ha asumido de 100 kg.

Para fines de este modelamiento se están considerando los parámetros recomendados por Rocscience para este tipo de materiales (R_t , R_n), en base a resultados de pruebas reales de caída de rocas realizadas en diferentes tipos de superficies de rodadura (*Tabla 1*). Para una mejor estimación de estos parámetros es necesario realizar pruebas reales de caída de rocas en campo, en los cuales se debe comparar la trayectoria real de los bloques de roca (en campo) y la trayectoria teórica (obtenidas con Rockfall), con la finalidad de calibrar el modelo y definir los parámetros R_t y R_n que den como resultado que la trayectoria real y teórica coincidan razonablemente.



Tabla 1: Coeficientes de Restitución R_t y R_n Recomendados por Rocscience

R_n (Normal)				R_t (Tangencial)				Tipo	Verificación	Ubicación	Referencia
Min	Max	Prom	Desv. Estandar	Min	Max	Prom	Desv. Estandar				
0.370	0.420			0.870	0.920			Hard surface paving	Tested using simulated rockfalls of similar size and shape of a previous rockfall.	Glenwood Canyon, Colorado, USA	Pfeiffer, T.J., and Bowen, T.D., "Computer Simulation of Rockfalls." Bulletin of Association of Engineering Geologists. Vol. 26, No. 1. 1989. pp135-146
0.330	0.370			0.830	0.870			Bedrock or boulders with little soil or vegetation			
0.300	0.330			0.830	0.870			Talus with little vegetation			
0.300	0.330			0.800	0.830			Talus with some vegetation			
0.280	0.320			0.800	0.830			Soft soil slope with little vegetation			
0.280	0.320			0.780	0.820			Vegetated soil slope			
		0.315	0.064			0.712	0.116	Limestone face	Tested on restoration-blasting slopes made of four types of materials; blast-generated rock fragments, partially vegetated scree on berms, uncovered blast piles, and vegetated quarry waste.	Limestone quarry in England	Robotham, M.E., and Wang, H., and Walton, G., "Assessment of risk from rockfall from active and abandoned quarry slopes." Institution of mining and Metallurgy, Section A. 1995.104(Jan-April), pp A25-A33
		0.303	0.080			0.615	0.170	Partially vegetated limestone scree			
		0.315	0.064			0.712	0.116	Uncovered limestone blast pile			
		0.251	0.029			0.489	0.141	Vegetated covered limestone pile			
		0.276	0.079			0.835	0.087	Chalk face			
		0.271	0.018			0.596	0.085	Vegetated chalk scree	Chalk quarry in England		
		0.384	0.133			0.687	0.130	Wood platform slope at 45 degrees was used as a control for the field tests they did.	Tested as control parameters	Western North Carolina for Interstate 40.	Wu, Shie-Shin "Rockfall evaluation by computer simulation" Transportation Research Records. Vol. 1031 pp 1-5, 1985.
		0.200				0.530		Dolomitic limestone boulders on rocky surfaces and on talus desposits	Consisted of hand made throws and free fall tests by fragmentation of rock using explosives, of dolomitic limestone boulders on rocky surfaces and on talus deposit of the landslide fans. Also used back-analysis, and information from Urciuoli.	Atrani, Campania, Southern Italy	Budetta, P., and Santo, A. "Morphostructural evolution and related kinematics of rockfalls in Campania(southern Italy)." Engineering Geology. Vol.36 pp197-210.
		0.100				0.200		Remolded pyroclastic from the terraces situated at the base of the cliff			
		0.000				0.240		Impacts on detritus of the fans present at the foot of a rock cliff			
		0.393				0.567		Soil	Tested by dropping 3 to 5 cm cuboid and angular granite rock fragments onto slopes	Hong Kong	Chau, K.T., and Wong, R.H.C., and Lee, C.F. "Rockfall Problems in Hong Kong and some new experimental results for coefficients of Restitution" International Journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics. Vol. 35, Section 4-5. 1996. pp662-663
		0.453				0.737		Shotcrete			
		0.487				0.910		Rock slope			
		0.500				0.950		Bedrock			
		0.350				0.850		Bedrock covered by large blocks	Referenced from tests carried out by Barbieri et al.	Italcementi works at Castellammare di Stabia(northern slope of the Sorrentine Peninsula), and the area of Atrani.	Giani, G.P. "Rock Slope Stability Analysis" Rotterdam, Balkema 1992.
		0.300				0.700		Debris formed by uniform distributed elements			
		0.250				0.550		Soil covered by			



								vegetation				
		0.530				0.990		Clean hard bedrock				Hoek, Evert. "Unpublished notes" NSERC Industrial Research Professor of Rock Engineering, Department of Civil Engineering, University of Toronto, St George Street, Toronto, Ontario, Canada M5S 1A4
		0.400				0.900		Asphalt roadway				
		0.350				0.850		Bedrock outcrops with hard surface, large boulders				
		0.320				0.820		Talus cover				
		0.320				0.800		Talus cover with vegetation				
		0.300				0.800		Soft soil, some vegetation				
0.370	0.420							Smooth hard surfaces and paving	Developed by observation and literature review	Colorado, USA	Pfeiffer, T.J., and Higgens, J.D., "Rockfall Hazard Analysis Using the Colorado Rockfall Simulation." Transportation Research Record 1288, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1990, pp117-126.	
0.330	0.370							Most bedrock and boulder fields				
0.300	0.330							Talus and firm soil slopes				
0.280	0.300							Soft soil slopes				
				0.870	0.920			Smooth hard surfaces such as pavement or smooth bedrock surfaces				
				0.830	0.870			Most bedrock surfaces and talus with no vegetation				
				0.820	0.850			Most talus slopes with some low vegetation				
				0.800	0.830			Vegetated talus slopes and soil slopes with sparse vegetation				
				0.780	0.820			Brush covered soil slope				
		0.530	0.040			0.990	0.040	Clean Hard Bedrock	a) rolled many rocks down the slope to verify used values b) comparison to historical rockfall events at site	Mountain road, near Bolzano, Sothyrol, Italy	feedback from user of RocFall version 3	
		0.350	0.040			0.850	0.040	Bedrock outcrop				
		0.320	0.040			0.820	0.040	Talus cover				
		0.320	0.040			0.800	0.040	Talus with vegetation				
		0.400	0.040			0.900	0.040	Asphalt paving				
		0.530	0.040			0.990	0.040	Clean Hard Bedrock	default program values used	170m deep open pit, Tasmania, Australia (overall pit angle between 55 and 65 degrees)	feedback from user of RocFall version 3	
		0.350	0.040			0.850	0.040	Bedrock outcrop				
		0.480	0.190			0.530	0.170	Concrete	inverse calculation of paths - standard deviations seemed to large	Takamatsu, Japan	feedback from user of RocFall version 3	
		0.470	0.300			0.550	0.230	Weathered Rock				
		0.480	0.000			0.530	0.000	Concrete				
		0.470	0.000			0.550	0.000	Weathered Rock				
		0.850	0.000			0.530	0.000	Concrete				
		1.000	0.000			0.550	0.000	Weathered Rock				
		0.530	0.040			0.990	0.040	Bedrock	Estimation, block diameters 10 to 30 cm	Fjord valley, State of Sogn og Fjordane, Norway	feedback from user of RocFall version 3	
		0.500	0.060			0.700	0.060	Blockfield				
		0.500	0.060			0.650	0.060	Blockfield with bushes and small trees				
		0.500	0.060			0.500	0.060	Blockfield with forest				
		0.300	0.060			0.800	0.060	Top-soil with vegetation				
		0.400	0.040			0.900	0.040	Asphalt paving				

	0.350	0.040			0.850	0.040	Gravel road			
		0.500				0.800	Sparsley forested slope is covered by a veneer of very fine weathered talus derived from weak shistose units underlying the limestone cap.	Calculated from historic rockfall	Sunnybrae, (interior of) British Columbia, Canada	<p>Hungr, O. and Evans, S.G. 1988. Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. Proc. 5th International Symposium on Landslides, Lusanne. July 1988, Vol. 1, pp. 685-690.</p>
		0.500				0.800	Limestone on bare uniform talus slope formed of basalt fragments with a modal size of 5 cm.	Calculated from historic rockfall	Hedley, (southern interior of) British Columbia, Canada	
		0.700				0.900	rectangular bolder of metamorphosed tuff on bare rock and a steep snow covered shelf.	Calculated from historic rockfall	Squamish Highway, north of Vancouver British Columbia, Canada	

Fuente: Rocscience (<https://www.rocscience.com/help/rockfall/webhelp/RocFall.htm>)

Desde la **Figura 10** hasta la **Figura 12** se presentan los resultados de las evaluaciones de las zonas con mayor riesgo (calificadas como riesgo extremo) de la Mina 9-10.

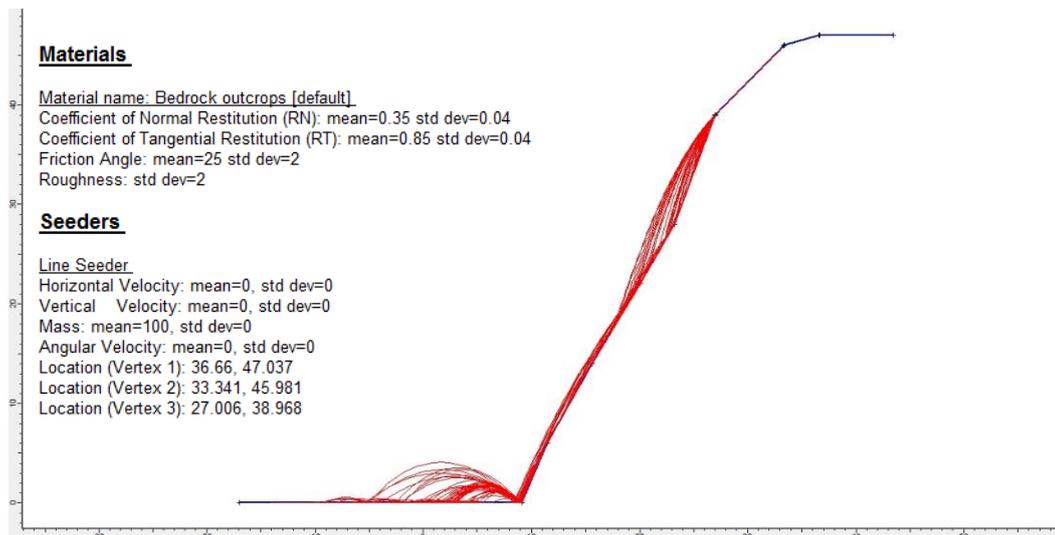


Figura 10. Análisis de Caída de Rocas CR-20, Cara Este, Nivel 654, Mina 10 (Riesgo Extremo)

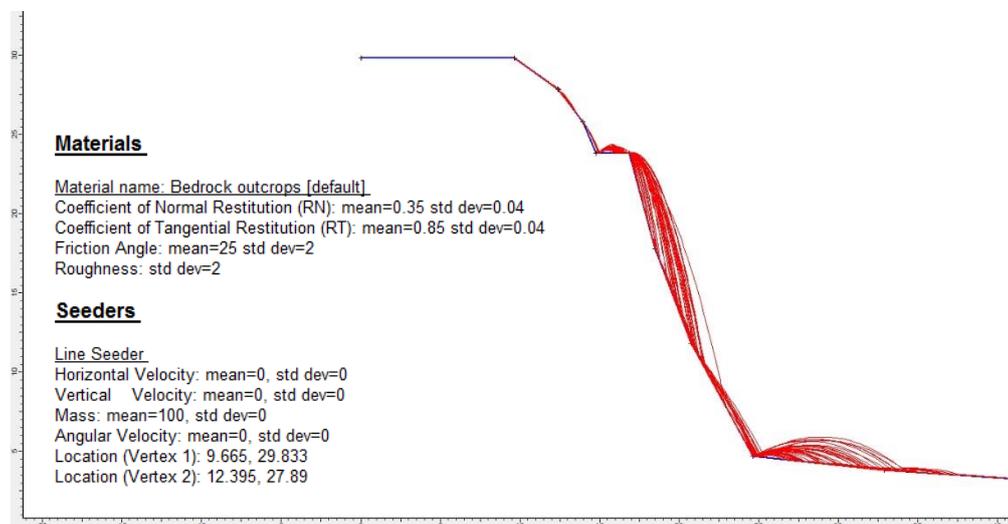


Figura 11. Análisis de Caída de Rocas CR-24, Cara Norte, Nivel 677, Mina 10 (Riesgo Extremo)

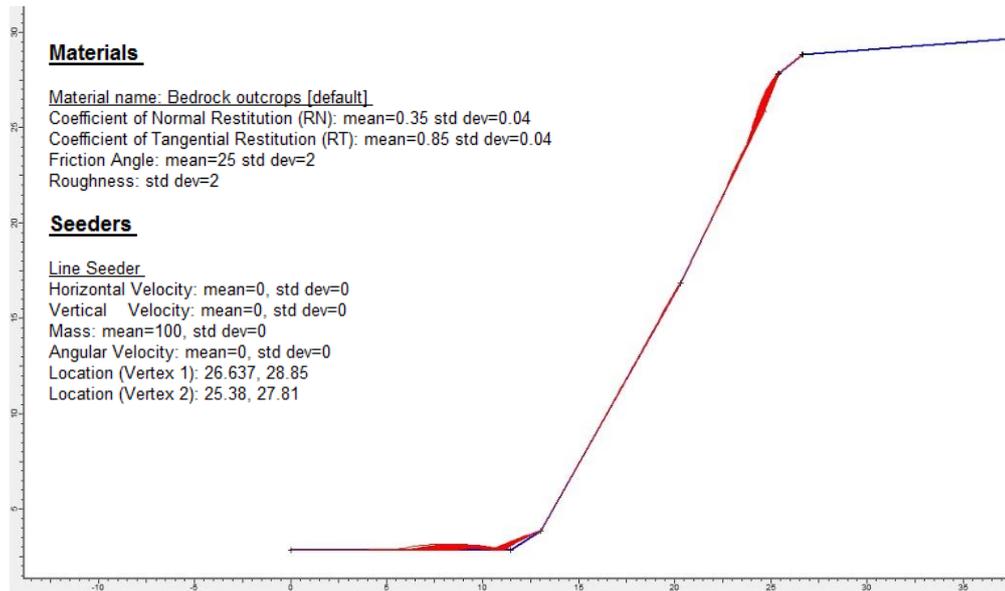


Figura 12. Análisis de Caída de Rocas CR-27, Cara Sur, Nivel 605, Mina 10 (Riesgo Extremo)

12

De acuerdo a los modelamientos realizados, se observa en las zonas CR-20 y CR-24 de los taludes Este y Norte respectivamente, que los bloques presentarían movimientos de rodamiento y saltación, además de un alcance de 20 metros en la berma, debido a los desniveles en la pendiente del talud, y la zona CR-27 del talud Norte, los bloques presentarían sólo movimiento de rodamiento y un alcance que no excede los 10 metros en la berma, esto se debe que la pendiente del talud es homogénea y sin desniveles, permitiendo a los bloques trasladarse de manera rotativa. En estas zonas se recomienda como tratamiento el monitoreo continuo, retirar los fragmentos de roca y limpieza de bancos en la cresta de los taludes.

En la **Tabla 2** se presenta un resumen de la ubicación de las zonas de caída de rocas en la Mina 9-10 y su correspondiente nivel de riesgo.

Tabla 2: Resumen de Zonas de Caída de Rocas en la Mina 9-10

Código	Coordenadas		Nivel de Riesgo
	Este	Norte	
CR-01	489 960	8 319 910	Moderado



Código	Coordenadas		Nivel de Riesgo
	Este	Norte	
CR-02	489 947	8 320 034	Moderado
CR-03	490 066	8 320 074	Moderado
CR-04	490 275	8 320 072	Moderado
CR-05	490 376	8 320 108	Moderado
CR-06	490 426	8 320 184	Bajo
CR-07	490 342	8 320 064	Moderado
CR-08	490 420	8 319 968	Moderado
CR-09	490 552	8 320 278	Bajo
CR-10	491 025	8 320 247	Moderado
CR-11	490 792	8 320 078	Moderado
CR-12	490 814	8 320 116	Moderado
CR-13	490 822	8 320 087	Moderado
CR-14	490 886	8 320 090	Moderado
CR-15	490 968	8 320 151	Moderado
CR-16	491 052	8 320 168	Moderado
CR-17	490 875	8 320 049	Moderado
CR-18	491 143	8 320 211	Moderado
CR-19	491 155	8 320 240	Moderado
CR-20	491 310	8 320 317	Extremo
CR-21	491 251	8 320 506	Bajo
CR-22	490 957	8 320 450	Moderado
CR-23	490 929	8 320 441	Moderado
CR-24	490 825	8 320 403	Extremo
CR-25	490 473	8 320 032	Moderado
CR-26	491 271	8 320 230	Moderado
CR-27	491 049	8 320 190	Extremo
CR-28	490 991	8 320 163	Moderado
CR-29	490 572	8 320 240	Moderado
CR-30	490 692	8 320 303	Moderado
CR-31	490 830	8 320 376	Moderado
CR-32	490 996	8 320 434	Moderado
CR-33	491 358	8 320 157	Moderado
CR-34	490 616	8 320 226	Extremo
CR-35	490 720	8 320 287	Extremo
CR-36	490 859	8 319 947	Extremo
CR-37	491 036	8 320 052	Extremo

De los sectores identificados con desprendimiento de rocas en los niveles inferiores



del tajo, 7 son de nivel de riesgo bajo y 6 son de nivel de riesgo moderado, siendo un total de 13 sectores con desprendimiento de bloques de roca.

En la **Tabla 3** se presenta un resumen de la ubicación de las zonas de caída de rocas en los niveles inferiores de la Mina 10 y su correspondiente nivel de riesgo asociado.

Tabla 3: *Resumen de Zonas de Caída de Rocas en la Mina 10*

Código	Coordenadas (WGS – 84)		Nivel de Riesgo
	Este	Norte	
CR-01'	490 402	8 319 835	Bajo
CR-02'	490 469	8 319 872	Bajo
CR-03'	490 505	8 319 896	Bajo
CR-04'	490 686	8 319 958	Moderado
CR-05'	490 752	8 319 982	Moderado
CR-06'	490 883	8 320 026	Moderado
CR-07'	490 936	8 320 003	Bajo
CR-08'	490 784	8 319 851	Moderado
CR-09'	490 600	8 319 838	Bajo
CR-10'	490 683	8 319 767	Bajo
CR-11'	490 794	8 319 828	Bajo
CR-12'	490 910	8 319 884	Moderado
CR-13'	490 725	8319 911	Moderado

- **Remoción de Masa o Deslizamientos**

Los deslizamientos son una de formas de remoción en masa, donde los volúmenes de material acumulado en las bermas se desprenden y se desplazan cuesta abajo como una sola unidad sobre un plano inclinado o sobre una superficie cóncava. Las principales causas de la ocurrencia de estos fenómenos en los taludes de la Mina 9-10 son dos: la presencia del macizo rocoso en estado disgregado (brecha), y el alto ángulo del talud que conjuntamente con las vibraciones producidas por la voladura en el interior del tajo genera estos deslizamientos

Se han identificado 6 fenómenos de deslizamientos en la Mina 10 (DZ-01, DZ-02, DZ-



03, DZ-04, DZ-05 y DZ-06), cuya evaluación en la matriz de riesgo indicó como resultado que 3 de dichos eventos tienen un riesgo extremo y 3 tienen riesgo moderado. tal como se presenta en la **Tabla 4**.

Las zonas de deslizamiento se encuentran en la cara Este de la Mina 10, generadas a partir de fallas en cuña principalmente y planares. Estas zonas se han evidenciado en campo a través de escarpas, planos de movimiento, y depósitos de los deslizamientos al pie del talud.

En la zona inferior se identificaron 3 zonas de deslizamientos en los niveles más bajos del tajo (DZ-01', DZ-02' y DZ-03'), los cuales presentan un nivel de riesgo moderado, tal como se presenta en la **Tabla 5**. Es difícil evitar la ocurrencia de estos fenómenos, una forma de minimizar o reducir el nivel de riesgo por deslizamientos es identificar los sectores donde el macizo rocoso presenta disgregado (brecha) y realizar limpieza periódica en estas zonas.

En los **Planos PL-GG-014 y 015** se detalla la ubicación de cada uno de los riesgos identificados en la Mina 9-10, en la **Figura 13** se presenta, a manera de ejemplo, una vista de la zona de deslizamiento de riesgo moderado en el Nivel 605 al Nivel 569.



Figura 13. Ejemplo de Zona de Deslizamiento en la Mina 10, cara Suroeste, del Nivel 605 al Nivel 569, DZ-01' Riesgo Moderado

En la **Tabla 4** y **5** se presenta un resumen de la ubicación de las zonas de deslizamiento en la Mina 9-10 y su correspondiente nivel de riesgo.

Tabla 4: Resumen de Zonas de Deslizamientos en la Mina 10

Código	Coordenadas		Nivel de Riesgo
	Este	Norte	
DZ-01, DZ-02	491 334	8 320 257	Extremo
DZ-03	491 319	8 320 356	Moderado
DZ-04	491 349	8 320 302	Moderado
DZ-05	491 259	8 320 384	Moderado
DZ-06	491 269	8 320 313	Extremo

Tabla 5: Resumen de Zonas de Deslizamientos en la Mina 10

Código	Coordenadas (WGS – 84)		Nivel de Riesgo
	Este	Norte	
DZ-01'	490359	8319706	Moderado
DZ-02'	490930	8320029	Moderado
DZ-03'	490916	8319948	Moderado

- **Agrietamientos**

En la Cara Sur (Nivel 742) de la Mina 9 se apreciaron agrietamientos, con una longitud hasta 5 m, los cuales se caracterizan por presentar un ligero desnivel en la cresta del banco. Estos agrietamientos se evidencian sobre un depósito cuaternario, que, por efectos de voladura y profundización del tajo, este depósito ha perdido cohesión en un volumen de suelo que involucra la cara del talud, siendo de riesgo extremo un posible deslizamiento.

En la **Figura 14** se presenta, a manera de ejemplo, una vista del agrietamiento denominado AG-02.



Figura 14. Ejemplo de Zona de Agrietamiento en la Mina 9 (AG-02) Riesgo Extremo

En la **Tabla 6** se presenta un resumen de la ubicación de las zonas de agrietamiento y su correspondiente nivel de riesgo, que solo se presentan en la cara sur de la Mina 9, sobre depósitos aluviales (gravas limosas).

Tabla 6: Resumen de Zonas de Agrietamientos en la Mina 9

Código	Coordenadas PSAD 56		Nivel de Riesgo
	Este	Norte	
AG-01	489 960	8 319 859	Extremo
AG-02	489 989	8 319 855	Extremo

En la **Tabla 9** se presentan las medidas de control a tener en cuenta en cada zona de agrietamiento.

Para cada zona de agrietamiento (AG-01 y AG-02), se realizó una sección de simulación con el programa Rocplane v2.0 de Rocscience, obteniendo como resultado un factor de seguridad de 1.40 para AG-01 y 1.17 para AG-02, tal como se presenta en la **Figura 15** y la **Figura 16**, respectivamente. Factores de seguridad mayores que 1.0 significa que el talud es físicamente estable.

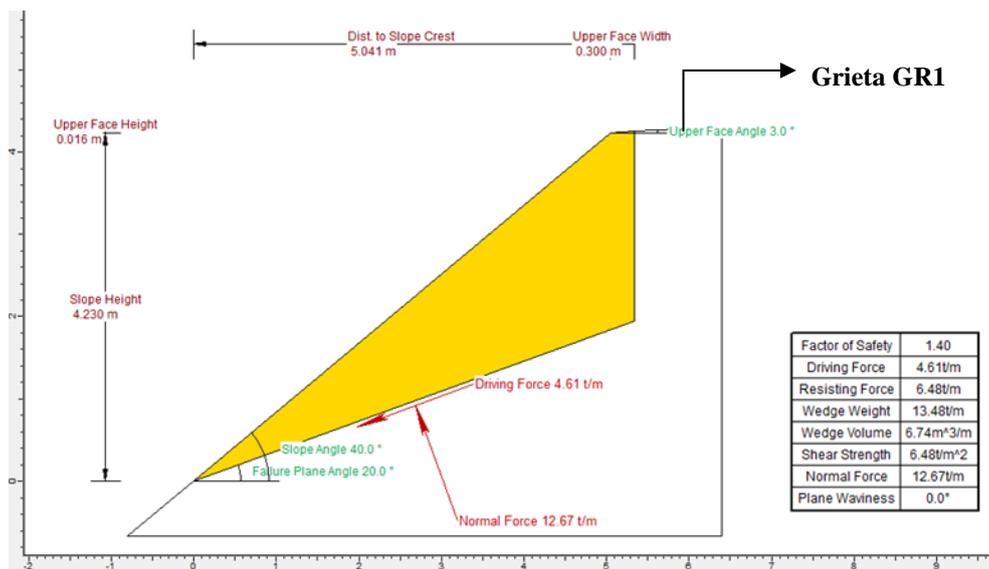


Figura 15. Sección de Modelamiento (Zona de Agrietamiento AG-01)

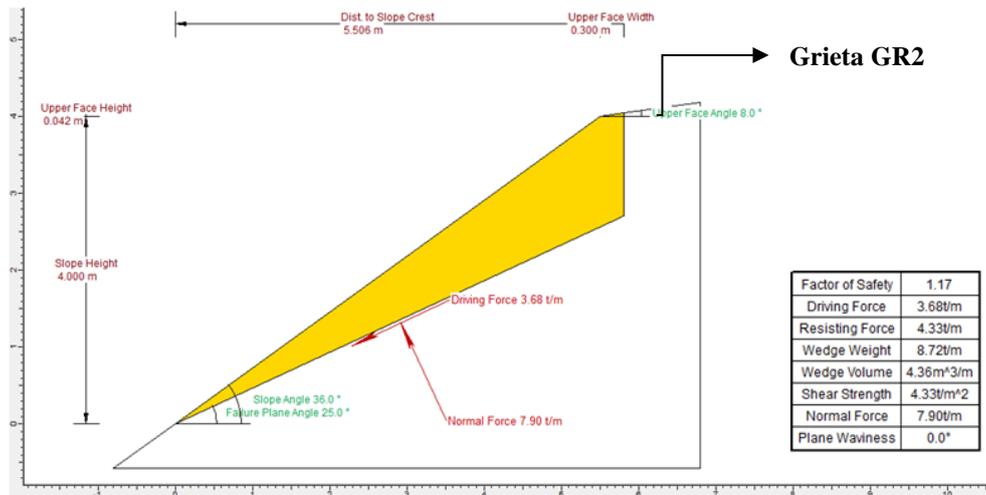


Figura 16. Sección de Modelamiento (Zona de Agrietamiento AG-02)

2.4.2.3 Matriz de riesgos

Considerando los riesgos descritos en los párrafos anteriores y el procedimiento presentado, se asoció a cada evento un nivel de riesgo.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en la **Tabla 7** se presenta la matriz de riesgos de los eventos registrados en los niveles inferiores del tajo.

Tabla 7: Resumen del Análisis de la Matriz de Riesgos Geológicos Identificados en los Niveles Inferiores de la Mina 10

Fenómeno Geodinámico	Nivel de Riesgo			Cantidad Total Identificada
	Riesgo Bajo	Riesgo Moderado	Riesgo Extremo	
Caída de Rocas (CR)	7	6	0	13
Deslizamientos (DZ)	0	3	0	3
Zonas de Agrietamiento (AG)	0	0	0	0

En la **Tabla 8** se representa la matriz de riesgos correspondiente es estudio de la mina 9 -10, cuyas características para su evaluación fueron tomadas de la investigación de campo de los taludes actuales de la Mina 9-10.

Tabla 8: Resumen del Análisis de la Matriz de Riesgos Geológicos Identificados en la Mina 9-10

Fenómeno Geodinámico	Nivel de Riesgo			Cantidad Total Identificada
	Riesgo Bajo	Riesgo Moderado	Riesgo Extremo	
Caída de Rocas (CR)	3	27	7	37
Deslizamientos (DZ)	0	3	3	6
Zonas de Agrietamiento (AG)	0	0	2	2

2.4.2.4 Alternativas de solución

En la investigación de los taludes de la Mina 9-10, se han identificado principalmente las áreas de riesgo que requieren un monitoreo y una evaluación mucho más detallada. La magnitud de los posibles eventos en la Mina 9-10 son principalmente serios y catastróficos que tendrían como consecuencia vidas humanas, infraestructura e ingeniería y la paralización de la producción. De acuerdo a la evaluación de riesgos geológicos, se recomienda:

- Para las zonas identificadas con riesgos de nivel bajo, se recomienda realizar desquinche selectivo de los taludes afectados y limpieza de los bancos.
- Para las zonas identificadas con nivel de riesgo moderado, se recomienda realizar el desquinche selectivo y la limpieza del material, para luego evaluar zonas de posibles eventos a ocurrir y que puedan presentar un riesgo potencial.
- Para las zonas identificadas con nivel de riesgo extremo, se recomienda realizar un monitoreo diario, desquinche selectivo, retiro de fragmentos de roca y la limpieza del material.
- Para las zonas de agrietamientos se recomienda retirar los fragmentos de roca que generarían posibles caídas de rocas en dirección al talud inferior, y de esta forma



minimizar el riesgo. Además, realizar un monitoreo diario de los niveles topográficos que vinculen el área agrietada, mayor aún después de cada voladura.

La **Tabla 9** se aprecia un resumen de las posibles medidas de control que se recomiendan para cada uno de los eventos que se han identificado durante la investigación de campo.

Tabla 9: *Resumen de Medidas de Control de los Riesgos Geológicos Identificados en la Mina 9-10*

Código	Coordenadas		Nivel de Riesgo	Medidas de Control
	Este	Norte		
AG-01	489 960	8 319 859	Extremo	Monitoreo y controles topográficos
AG-02	489 989	8 319 855	Extremo	Monitoreo y controles topográficos
CR-01	489 960	8 319 910	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza del banco en la cresta del talud
CR-02	489 947	8 320 034	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza del banco en la cresta del talud
CR-03	490 066	8 320 074	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza del banco en la cresta del talud
CR-04	490 275	8 320 072	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza del banco en la cresta del talud
CR-05	490 376	8 320 108	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza del banco
CR-06	490 426	8 320 184	Bajo	Retirar fragmentos de rocas y limpieza del banco
CR-07	490 342	8 320 064	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza del banco en la cresta del talud
CR-08	490 420	8 319 968	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza del banco en la cresta del talud banco
CR-09	490 552	8 320 278	Bajo	Retirar fragmentos de rocas y limpieza del banco
CR-10	491 025	8 320 247	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza del banco
CR-11	490 792	8 320 078	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza del banco
CR-12	490 814	8 320 116	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza del banco en la cresta del talud
CR-13	490 822	8 320 087	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza de bancos en la cresta del talud
CR-14	490 886	8 320 090	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza del banco
CR-15	490 968	8 320 151	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza del banco
CR-16	491 052	8 320 168	Moderado	Desquinche selectivo, retirar fragmentos de rocas y



Código	Coordenadas		Nivel de Riesgo	Medidas de Control
	Este	Norte		
				limpieza de bancos en la cresta del talud
CR-17	490 875	8 320 049	Moderado	Desquinche selectivo, retirar fragmentos de rocas y limpieza de bancos en la cresta del talud
CR-18	491 143	8 320 211	Moderado	Desquinche selectivo, retirar fragmentos de rocas y limpieza de bancos en la cresta del talud
CR-19	491 155	8 320 240	Moderado	Desquinche selectivo, retirar fragmentos de rocas y limpieza de bancos en la cresta del talud
CR-20	491 310	8 320 317	Extremo	Monitoreo, limpieza de bancos en la cresta de los taludes
CR-21	491 251	8 320 506	Bajo	Retirar fragmentos de rocas y limpieza de bancos
CR-22	490 957	8 320 450	Moderado	Desquinche selectivo, retirar fragmentos de rocas y limpieza del banco
CR-23	490 929	8 320 441	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza de bancos en la cresta del talud
CR-24	490 825	8 320 403	Extremo	Monitoreo, retirar fragmentos de rocas y limpieza de bancos en la cresta de los taludes
CR-25	490 473	8 320 032	Moderado	Desquinche selectivo
CR-26	491 271	8 320 230	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza de bancos en la cresta del talud
CR-27	491 049	8 320 190	Extremo	Monitoreo, retirar fragmentos de rocas y limpieza de bancos en la cresta de los taludes
CR-28	490 991	8 320 163	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza de bancos en la cresta de los taludes
CR-29	490 572	8 320 240	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza de bancos
CR-30	490 692	8 320 303	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza de bancos
CR-31	490 830	8 320 376	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza de bancos
CR-32	490 996	8 320 434	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza de bancos en la cresta de los taludes
CR-33	491 358	8 320 157	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza de bancos
CR-34	490 616	8 320 226	Extremo	Desquinche selectivo y limpieza de bancos
CR-35	490 720	8 320 287	Extremo	Desquinche selectivo y limpieza de bancos
CR-36	490 859	8 319 947	Extremo	Desquinche selectivo y limpieza de bancos
CR-37	491 036	8 320 052	Extremo	Desquinche selectivo y limpieza de bancos
DZ-01, DZ-02	491 334	8 320 257	Extremo	Desquinche selectivo y limpieza de bancos
DZ-03	491 319	8 320 356	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza de bancos
DZ-04	491 349	8 320 302	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza de bancos



Código	Coordenadas		Nivel de Riesgo	Medidas de Control
	Este	Norte		
DZ-05	491 259	8 320 384	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza de bancos
DZ-06	491 269	8 320 313	Extremo	Desquinche selectivo y limpieza de bancos

(*) El color que identifica el nivel de riesgo es el definido en la Tabla 08.

Fuente: Elaboracion Propia.

La **Tabla 13** se presenta un resumen de las medidas de control que se recomiendan para cada uno de los eventos que se han identificado durante la inspección de campo

Tabla 10: Resumen de Medidas de Control de los Riesgos Geológicos Identificados en la Mina 10

Código	Coordenadas (WGS – 84)		Nivel de Riesgo	Medidas de Control
	Este	Norte		
CR-01'	490402	8319835	Bajo	Retirar fragmentos de rocas y limpieza
CR-02'	490469	8319872	Bajo	Retirar fragmentos de rocas y limpieza
CR-03'	490505	8319896	Bajo	Retirar fragmentos de rocas y limpieza del banco
CR-04'	490686	8319958	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza
CR-05'	490752	8319982	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza
CR-06'	490883	8320026	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza del banco en la cresta del talud
CR-07'	490936	8320003	Bajo	Retirar fragmentos de rocas y limpieza
CR-08'	490784	8319851	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza
CR-09'	490600	8319838	Bajo	Retirar fragmentos de rocas y limpieza
CR-10'	490683	8319767	Bajo	Retirar fragmentos de rocas y limpieza del banco
CR-11'	490794	8319828	Bajo	Retirar fragmentos de rocas y limpieza del banco
CR-12'	490910	8319884	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza del banco
CR-13'	490725	8319911	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza
DZ-01'	490359	8319706	Moderado	Desquinche selectivo y limpieza de bancos
DZ-02'	490930	8320029	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza
DZ-03'	490916	8319948	Moderado	Retirar fragmentos de rocas y limpieza

(*) El color que identifica el nivel de riesgo es el definido en la Tabla 07.

Fuente: elaboracion propia.

2.5 CRITERIOS DE EVALUACIÓN GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO

Las clasificaciones geomecánicas más utilizadas en el presente son las de Bieniawsky



(RMR), la de Barton, Lien y Lunde (Q) y la de Hoek and Brown (GSI). Los primeros aplican un parámetro, RQD (Rock Quality Designation), que constituye la base de la clasificación de Deere. En el uso de los sistemas de clasificaciones geomecánicas RMR y Q, se ha aplicado factores aplicables a áreas superficiales; en el RMR, se aplicó el factor de corrección correspondiente a Tajos Abiertos. Cabe recordar que estos tipos de clasificación geomecánica son métodos empíricos, desarrollados a través de casos estudiados, principalmente obras subterráneas (túneles). En la estimación de algunos parámetros previos para la determinación del RMR y Q, se ha usado las recomendaciones del ISRM, con la finalidad de uniformizar el criterio de valoración.

2.5.1 Mapeo geomecánico superficial para el análisis estructural

Los datos estructurales son una entrada clave para los análisis de diseño cinemático, de equilibrio límite y análisis numérico. Recopilar estos datos y estimar cómo las características de orientación y distribución espacial de los conjuntos de juntas y fallas varían es, por lo tanto, una de las actividades de modelado estructural más importantes. Las técnicas de mapeo utilizadas para la recopilación detallada de datos estructurales generalmente se dividen en uno de los siguientes tres tipos: *Line mapping (Scanline mapping)* el mapeo de línea de exploración implica medir y registrar los atributos de todas las estructuras que intersecan una determinada línea de muestreo. el mapeo consiste en establecer una línea, para lo cual se emplea una **cinta de** medición sobre la que se identifican todas las estructuras o discontinuidades que intersectan o cortan dicha línea.

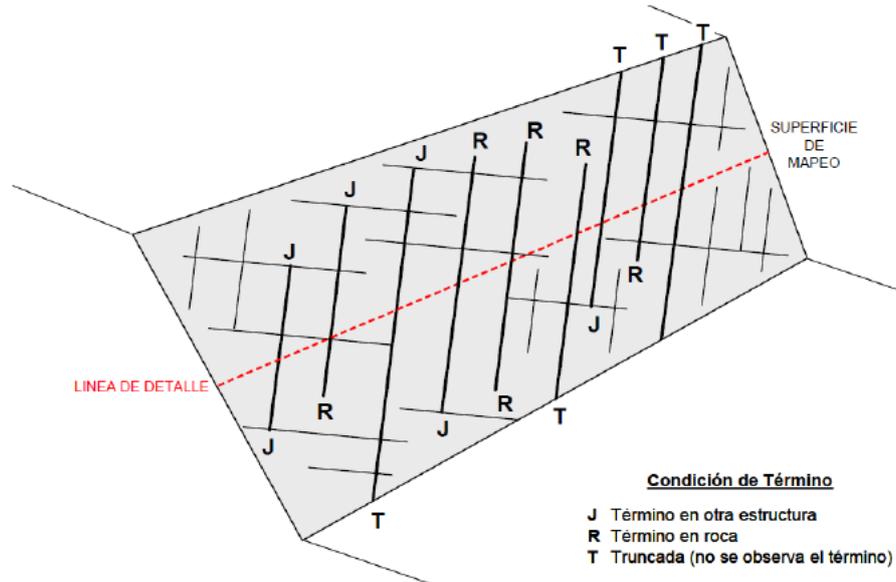


Figura 17. Esquema que ilustra las condiciones de término que pueden presentar las estructuras de un macizo rocoso. Fuente: Brown, 1981

Window (cell) Mapping: El mapeo de ventanas implica recopilar todos los datos estructurales por encima de un tamaño de corte dado dentro de un área específica de una cara de roca. Alternativamente, solo se pueden registrar los atributos de cada uno de los conjuntos reconocidos dentro de la ventana (por ejemplo, orientación, longitud, espacio y naturaleza del relleno en cada conjunto), aunque se requiere precaución ya que este procedimiento puede introducir sesgos subjetivos en los datos.

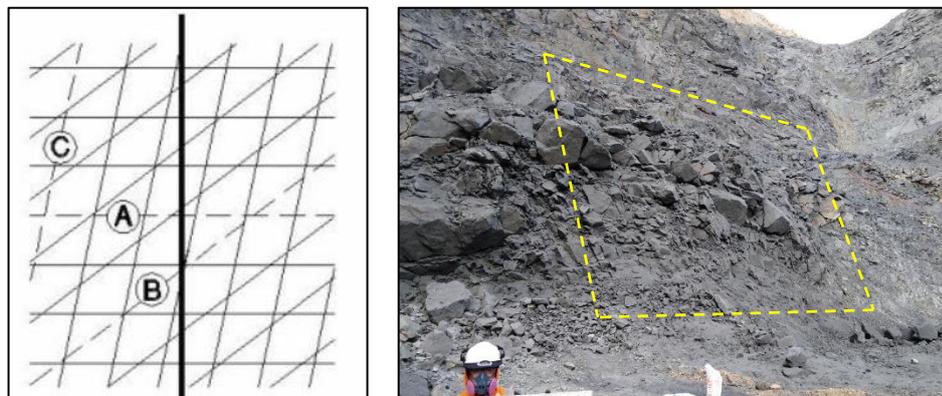


Figura 18. Técnica mapeo de ventana estructural

Fuente: Tomado de Read, 2009.



2.5.2 Sistema de clasificación de bieniawski (ÍNDICE RMR89)

El sistema de clasificación RMR el cual fue desarrollado por el profesor Bieniawski dando a conocer una clasificación para una masa rocosa, denominada sistema de clasificación Geomecánica o valorar la calidad de la masa rocosa RMR (Rock Mass Rating). Al transcurrir los años este sistema ha sido modificado y actualizado en los años 1976 y 1989 sucesivamente conforme han ido examinando más casos registrados, esta clasificación de Bieniawski hizo cambios significativos en las valoraciones asignadas a los diferentes parámetros. Los siguientes seis parámetros son usados para clasificar una masa rocosa con el sistema RMR. (Hoek, 2000). Ver la tabla 11.

- Resistencia a la compresión uniaxial de los materiales rocosos.
- Designación de calidad de roca (RQD).
- Espaciamiento de discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones de las aguas subterráneas.
- Orientación de discontinuidad.

Tabla 11: Criterio para clasificación de la masa rocosa

CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO SEGÚN EL RMR					
RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	< 20
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Cohesión	> 4 Kp/cm ²	3 - 4 Kp/cm ²	2 - 3 Kp/cm ²	1 - 2 Kp/cm ²	< 1 Kp/cm ²
Ángulo de rozamiento	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°
Tiempo de Autososte y longitud sin sostener	10 años 15m.	6 meses 8m.	1 semana 5m.	10 horas 2.5m.	30 minutos 1m.

Fuente: Ingeniería Geológica. Gonzales de Vallejo, Luis, 2002.

2.5.3 Resistencia a la compresión simple

Este parámetro se puede obtener mediante laboratorio, Martillo de Geólogo y



también a partir de resultados de rebote del Martillo Schmidt, según normas ISRM (International Society for Rock Mechanics).

2.5.4 Designación de la calidad de roca RQD

Cuando no se dispone de núcleos de perforación, el RQD puede ser estimado a partir de una línea o un área de mapeo, como se describe a continuación: en un mapeo de línea de detalle, se puede obtener el promedio del espaciado de las discontinuidades (número de discontinuidades dividida para la longitud de la línea de muestreo). (Gavilanes H. & Andrade B., 2004). El RQD se obtiene de esta manera, se puede calcular con la siguiente ecuación:

Para una **línea de mapeo**, Priest y Hudson (1976) encontraron que una estimación razonable de RQD podría obtenerse a partir de las medidas de espaciamiento de discontinuidad realizadas de una exposición mediante el uso de la ecuación:

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

Donde:

λ : número de discontinuidades /longitud (m)

Para un **área de mapeo**, Palmström (1982) sugirió que el RQD puede ser estimado a partir del número de discontinuidades por unidad de volumen. La fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$RQD = 115 - 3,3 Jv$$

Posteriormente, Palmström (2005) mantuvo la ecuación anterior para macizos rocosos de bloques alargados, mientras que para bloques cúbicos propuso:

$$RQD = 115 - 3,3 Jv$$

$$Jv = \sum_{i=1}^J \frac{1}{S_i}$$

Donde:

Jv = representa el número total de discontinuidades por metro cúbico.



S_i = espaciado medio de las discontinuidades en metros para el sistema de discontinuidades actual.

Tabla 12: Criterio para clasificación de la masa rocosa

RQD	<25	25-50	50-75	75-90	90-100
CLASIFICACION	Muy pobre	Pobre	Regular	Bueno	Muy Bueno

Fuente: ISRM (1981).

2.5.5 Clasificación geomecánica de romana slope mass rating (SMR)

La clasificación geomecánica Slope Mass Rating (SMR) fue desarrollada por Romana en 1985 y ha tenido actualizaciones, el SMR se obtiene a partir del índice RMR89 de Bieniawski (1989).

Para evaluar la estabilidad de taludes en un macizo rocoso, el índice geomecánico SMR se calcula sumando cuatro factores de corrección al RMR básico. Se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$SMR = RMR_{básico} + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

Donde:

- $RMR_{básico}$ = es evaluado de acuerdo con Bieniawski (1976, 1989) mediante la suma de la calificación de cinco parámetros.
- F_1 , F_2 y F_3 = son factores de ajuste relacionados a la orientación de las juntas con respecto a la orientación del talud.
- F_4 = es el factor de corrección por el método de excavación.

Tabla 13: *Parámetros de corrección para SMR.*

Type of failure			Very favorable	Favorable	Normal	Unfavorable	Very unfavorable
P	A	$ \alpha_j - \alpha_s $	$> 30^\circ$	$30-20^\circ$	$20-10^\circ$	$10-5^\circ$	$< 5^\circ$
T		$ \alpha_j - \alpha_s - 180 $					
W		$ \alpha_i - \alpha_s $					
P/T/W	F_1		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P/W	B	$ \beta_j $ or $ \beta_i $	$< 20^\circ$	$20-30^\circ$	$30-35^\circ$	$35-45^\circ$	$> 45^\circ$
P/W	F_2		0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T			1.00				
P	C	$\beta_j - \beta_s$	$> 10^\circ$	$10-0^\circ$	0°	$0-(-10^\circ)$	$< (-10^\circ)$
W		$\beta_i - \beta_s$					
T		$\beta_j + \beta_s$	$< 110^\circ$	$110-120^\circ$	$> 120^\circ$	—	—
P/T/W	F_3		0	-6	-25	-50	-60
<i>Excavation method (F_4)</i>							
Natural slope			+15	Blasting or mechanical		0	
Presplitting			+10	Deficient blasting		-8	
Smooth blasting			+8				

Notaciones:

P: rotura planar; T: rotura por vuelco; W: rotura en cuña; α_j : dirección de buzamiento de la discontinuidad; α_i : dirección de inmersión (plunge direction) de la línea de intersección; α_s : dirección de buzamiento del talud. β_j : buzamiento de la discontinuidad; β_i : inmersión (plunge) de la línea de intersección; β_s : buzamiento del talud.

Para el cálculo de los Factores de Ajuste del SMR, se evalúan tal como se indica a continuación:

F_1 depende del paralelismo entre la dirección de buzamiento de las discontinuidades y la cara del talud para fallas planas y por vuelco. Se le asigna un valor de 1 cuando los dos rumbos son paralelos y 0.15 cuando éstos difieren en más de 30° . De acuerdo con Anbalagan et al. (1992), en el caso de fallas en cuña debe considerarse el ángulo formado entre la intersección de los dos planos de discontinuidad (la dirección de inmersión o plunge direction) y la dirección de buzamiento del talud.

Para determinar este valor, Romana (1993) propuso la siguiente ecuación:

$$F_1 = (1 - |\text{Sen}(A)|)^2$$

$$A = \alpha - \alpha_s$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_j & \text{para rotura plana y en vuelco} \\ \alpha_i & \text{para rotura en cuña} \end{cases}$$

Donde:

α_j = es la dirección de buzamiento de la discontinuidad.

α_i = dirección de inmersión (plunge direction) de la línea de intersección.

α_s = es la dirección de buzamiento del talud.



F_2 depende del buzamiento de la discontinuidad en el caso de falla plana; en cuanto a la falla en toppling, este parámetro toma el valor 1. Para falla en cuña, Anbalagan et al. (1992) mencionan que debe considerarse la inmersión (plunge) de la línea de intersección. Este parámetro está relacionado con la probabilidad de la resistencia al corte de la discontinuidad. Se calcula mediante la siguiente función:

$$F_2 = \begin{cases} \tan^2 B, & \text{si } B < 45^\circ \\ 1, & \text{si } B \geq 45^\circ \\ 1, & \text{para rotura en vuelco} \end{cases}$$
$$B = \begin{cases} \beta_j & \text{para rotura plana} \\ \beta_i & \text{para rotura en cuña} \end{cases}$$

Donde:

β_j = es el buzamiento de la discontinuidad.

β_i = es la inmersión (plunge) de la línea de intersección.

F_3 refleja la relación entre la cara del talud y el buzamiento de las discontinuidades. Se han mantenido los valores propuestos por Bieniawski (1976) que son siempre negativos.

Para roturas planares, F_3 expresa la probabilidad de que las juntas afloren en la cara del talud. Las condiciones son regulares cuando el buzamiento de la cara del talud y de las discontinuidades es paralela; pero, si el buzamiento del plano del talud es 10° mayor que el de las discontinuidades, las condiciones serán muy desfavorables. En el caso de roturas por vuelco o toppling, las condiciones desfavorables dependen de la suma del buzamiento de las discontinuidades y del talud (Singh y Goel 1999). Según sea el tipo de rotura, F_3 se calcula con la siguiente expresión:

$$F_3 = C = \begin{cases} |\beta_j - \beta_s|, & \text{para rotura plana} \\ |\beta_i - \beta_s|, & \text{para rotura en cuña} \\ |\beta_j + \beta_s|, & \text{para rotura por vuelco} \end{cases}$$

Donde:

β_j = es el buzamiento de la discontinuidad.

β_i = es la inmersión (plunge) de la línea de intersección.

β_s = es el buzamiento de la cara del talud.



F_4 es un factor de corrección que depende del método de excavación utilizado.

2.5.6 Definiciones Conceptuales

2.5.6.1 Matriz rocosa y roca intacta

Definido en ingeniería como roca que no contiene fracturas significativas. Sin embargo, a pequeña escala se compone de granos con la forma de la microestructura que se rige por los procesos básicos de formación de la roca. Los eventos geológicos posteriores pueden afectar sus propiedades mecánicas, su susceptibilidad a la penetración del agua y a los efectos de la intemperie (Hudson y Harrison, 1997).

2.5.6.2 Discontinuidades o juntas

Son superficies de debilidad que imparten a la roca una condición de anisotropía de resistencia. se utilizará el término genérico discontinuidad para referirse indistintamente a diaclasa, falla, esquistosidad/foliación y estratificación. El reconocimiento de las discontinuidades es útil en la descripción de la masa rocosa porque cada tipo tiene propiedades que influyen en el comportamiento de la masa rocosa. Los tipos de discontinuidades más comunes incluyen: Fallas, Estratificación, Foliación, Juntas y Esquistosidad.

2.5.6.3 Dominios estructurales

se refiere a la masa de roca delimitada por discontinuidades geológicas, dentro de la cual, la estructura es prácticamente homogénea.

2.5.6.4 Apertura

Se define apertura como la distancia perpendicular que separa las paredes adyacentes de roca de una discontinuidad abierta, cuando este espacio intermedio tiene agua o aire. En esto se distingue la apertura del espesor de relleno (Sociedad Nacional de Minería, 2004).



2.5.6.5 Espaciado

Es la distancia perpendicular entre discontinuidades de un mismo set o familia. El espaciado de discontinuidades adyacentes controla el tamaño de bloques individuales de roca intacta, la permeabilidad del macizo rocoso y la circulación de agua (Gonzales de Vallejo, 2002).

2.5.6.6 Persistencia o continuidad

La persistencia o continuidad corresponde a la extensión en área o tamaño de una discontinuidad en el macizo rocoso. Cuanto menor sea la persistencia, la masa rocosa será más estable y cuanto mayor sea esta, será menos estable (Sociedad Nacional de Minería, 2004).

2.5.6.7 Orientación

El buzamiento se define como la inclinación de la línea de máxima pendiente del plano medio de discontinuidad, medida desde la horizontal. La dirección de buzamiento o de la línea de máxima pendiente, se mide desde el norte en el sentido de las agujas del reloj. La posición de la discontinuidad en el espacio, comúnmente es descrito por el rumbo o azimut y buzamiento (Sociedad Nacional de Minería, 2004).

2.5.6.8 Rugosidad

La rugosidad de una discontinuidad es la aspereza o irregularidad de la superficie. Cuanto menor rugosidad tenga una discontinuidad, la masa rocosa es menos competente y cuanto mayor sea esta, la masa rocosa será más competente, también es un factor muy determinante para la resistencia al cizallamiento su valor disminuye al aumentar la abertura, el relleno o cualquier desplazamiento sufrido con anterioridad (Sociedad Nacional de Minería, 2004).



2.5.6.9 Relleno

Son los materiales que se encuentran dentro de la discontinuidad separando las paredes adyacentes de las misma, por ejemplo: calcita, cuarzo, clorita, yeso, arcilla, limo, brecha de falla. Generalmente, el relleno es más débil que la pared de la discontinuidad. La distancia perpendicular entre las paredes de la discontinuidad se llama “ancho de la discontinuidad rellena”. Cuando los materiales son suaves, la masa rocosa es menos competente y cuando éstos son más duros, ésta es más competente (Sociedad Nacional de Minería, 2004).

2.5.6.10 Aguas subterráneas

La presencia de agua subterránea es de suma importancia en la estabilidad de los taludes, ya que implica menor resistencia en el macizo rocoso, por ende, en la clasificación de macizo rocoso en las cuales puede estar seco, ligeramente húmedo, húmedo, goteando y fluyendo. Generalmente, el tránsito del agua en los macizos rocosos tiende a fluir a lo largo de las discontinuidades (permeabilidad secundaria), salvo en las rocas sedimentarias con un alto índice de poros, en las cuales el agua circula por la misma masa rocosa, permeabilidad primaria (Ramírez & Alejano, 2004).

2.5.6.11 Meteorización

También llamada intemperización, está relacionada con la modificación físico químicas que sufre la superficie del basamento rocoso o en sus proximidades, debido a la acción de agentes físicos, químicos y biológicos. El grado de la meteorización dependerá de las condiciones climatológicas, morfológicas y la composición de la masa rocosa. Su clasificación geomecánica dentro de las discontinuidades se clasifican: frasco, levente meteorizado, moderadamente meteorizado, altamente meteorizado completamente meteorizado y por último como suelo residual (Sociedad Nacional de Minería, 2004).



2.5.6.12 Alteración

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

2.6 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL MACIZO ROCOSO

Para caracterizar las propiedades del macizo rocoso y estimar la resistencia pico de un macizo rocoso, en el que se incluye la estimación de los criterios de Hoek-Brown y de Mohr-Coulomb, que son los que se utilizan mayoritariamente en el ámbito de la ingeniería geotécnica aplica a los macizos rocosos.

2.6.1 Criterio de rotura de Hoek-Brown generalizado

El criterio de rotura generalizada de Hoek y Brown es la mas utilizado en la actualidad en el estudio del comportamiento de los macizos rocosos una vez evaluadas las propiedades de la roca intacta y definida la calidad del macizo rocoso, es posible estimas las propiedades geomecánicas de éste. Para esto se recomienda emplear el criterio generalizado de Hoek-Brown, con lo que la resistencia del macizo rocoso puede evaluarse como:



$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \times \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Dónde:

- σ_1' y σ_3' : Esfuerzos efectivos principales mayor y menor respectivamente en el momento de la rotura.
- σ_{ci} : Resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa.
- m_b : Parámetro relacionado con la naturaleza friccionante del macizo rocoso.
- s, a : Constantes que dependen de la naturaleza del macizo rocoso.

Los parámetros m_b , s y a del macizo rocoso han sido determinados mediante las siguientes expresiones:

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

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

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

Dónde:

- m_i : Es un parámetro dependiente de la litología de la roca.
- GSI: Índice de Resistencia Geológica (Hoek et al, 1995).
- D: Factor de perturbación del macizo rocoso por efectos de voladura.

A continuación, se describe como se han estimado los valores de m_i , D y E.

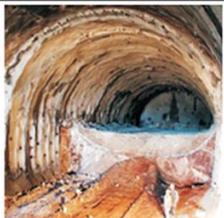
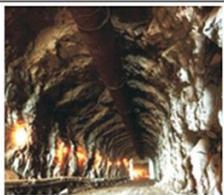
2.6.2 Factor de alteración (D)

La versión 2002 del criterio de Hoek – Brown ha considerado el factor de perturbación “D”, para tomar en cuenta la influencia de los daños causados por las explosiones en las propiedades del macizo rocoso de la superficie cercana. D es un factor que depende del grado de alteración al que estará sujeto el macizo rocoso por efecto de la voladura y de la relajación de tensiones. Este factor varía desde 0 para macizos rocosos no alterados hasta 1 para macizos rocosos altamente perturbados, por lo que para el caso de este

proyecto se ha optado por considerar un factor de 1.

El valor del parámetro D no se puede cuantificar, por lo tanto, los resultados que éste se indican son estimativos. Algunas directrices para la selección del factor D se presentan en la tabla 14.

Tabla 14: Valores del factor de alteración D , para las distintas situaciones del macizo.

Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel	$D = 0$
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante. Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso circundante.	$D = 0.8$
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensiones resulta en alguna alteración.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Fuente: Criterio original de Hoek y Brown, 1980.

2.6.3 Constante (m_i)

La constante de Hoek-Brown m_i solo puede determinarse mediante pruebas triaxiales en muestras de núcleos o estimarse a partir de una descripción cualitativa del material rocoso según lo descrito por Hoek y Brown (1997).

Este parámetro depende de las características de fricción de los minerales componentes en la muestra de roca intacta y tiene una influencia significativa en las características de resistencia de la roca. Cuando no es posible realizar una prueba triaxial, se puede obtener una estimación de m_i tabla 15.

Tabla 15: Valores indicativos de m_i para algunas rocas (Marinos y Hoek 2000).

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates *	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias *		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Spartic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2	
Organic					Chalk 7 ± 2	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites 20 ± 3	
		Slightly foliated	Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites 26 ± 6	Gneiss 28 ± 5	
	Foliated**		Schists 12 ± 3	Phyllites (7 ± 3)	Slates 7 ± 4	
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3	Diorite 25 ± 5	Granodiorite (29 ± 3)	
		Dark	Gabbro 27 ± 3	Norite 20 ± 5	Dolerite (16 ± 5)	
	Hypabyssal		Porphyries (20 ± 5)	Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)	
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5) Andesite 25 ± 5	Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5)	
		Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

* Conglomerates and breccias may present a wide range of m_i values depending on the nature of the cementing material and the degree of cementation, so they may range from values similar to sandstone, to values used for fine grained sediments (even under 10).

** These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

Notas:

- Los valores en paréntesis son estimados.
- El rango de valores citados para cada material depende de la granularidad y trabazón de la estructura cristalina: los valores más altos se asocian con un trabazón estrecha y características más friccionales.



2.6.4 Sistema de clasificación de la resistencia geológica *gsi* (geological strength index)

Hoek y Brown reconocieron que un criterio de rotura de macizos rocosos no tendría un valor práctico a menos que esté relacionado con las observaciones geológicas que pudieran ser hechas rápidamente y fácilmente por un ingeniero geólogo o geólogo en campo. Por ende, implementaron una clasificación GSI se basa en una observación más detallada del macizo rocoso y, por tal razón, es esencialmente cualitativa. Este índice incorpora la estructura del mismo y las características geomecánicas de las superficies de las discontinuidades existentes en él y se obtiene a partir de un examen visual del macizo rocoso en afloramientos y sondeos. El *GSI* combina los dos aspectos fundamentales del comportamiento de los macizos rocosos, es decir: su fracturación, o sea, el tamaño y la forma de los bloques, y la resistencia al corte de las discontinuidades. (Ramirez Oyanguren & Alejano Monge, 2007).

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

- RMS: es la “estructura del macizo rocoso”, definida en términos de su blocosidad y alteración.
- JC: es la condición de las estructuras presentes en el macizo rocoso.

La evaluación del GSI se hace por comparación del caso que interesa con las condiciones típicas que se muestran en *Tabla 16* y *la Table 17*, y el mismo puede variar de 0 a 100, lo que permite definir 5 clases de macizos rocosos:

- Macizos de calidad MUY MALA (Clase V, $0 \leq GSI \leq 20$).

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

Tabla 16: *GSI para macizos rocosos homogéneos. Adaptada de Hoek (2006)*

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

Fuente: (Marinos & Hoek, 2000)

En la etapa inicial del *GSI*, los creadores de esta clasificación propusieron (Hoek y Brown, 1997) estimar el *GSI* a partir del *RMR* realizando algunas correcciones en estos índices. Actualmente se considera que esta forma de proceder puede resultar correcta

2.6.5 Aplicabilidad del criterio de rotura de Hoek-Brown

El criterio de rotura de Hoek y Brown sólo se puede aplicar al material rocoso intacto a los macizos rocosos altamente fracturados que puedan ser considerados homogéneos e isotrópicos. No se debe aplicar en macizos rocosos cuyas propiedades estén controladas por una sola familia de discontinuidades como los estratificados. Cuando aparecen dos familias muy marcadas de discontinuidades se debe utilizar el criterio de Hoek – Brown con cierta prudencia, así estaría bien aplicado en el caso de que ninguna de las dos familias tenga un efecto dominante sobre la otra. En caso contrario no se debe usar este criterio, *ver figura 19*.

- 1: Roca masiva (Usar HGB)
- 2: 1 familia de diaclasas (No usar HGB)
- 3: 2 familias de diaclasas (No usar HGB)
- 4: Multi familias de diaclasas (Usar HGB con cautela)
- 5: Altamente diaclasado (Usar HGB)

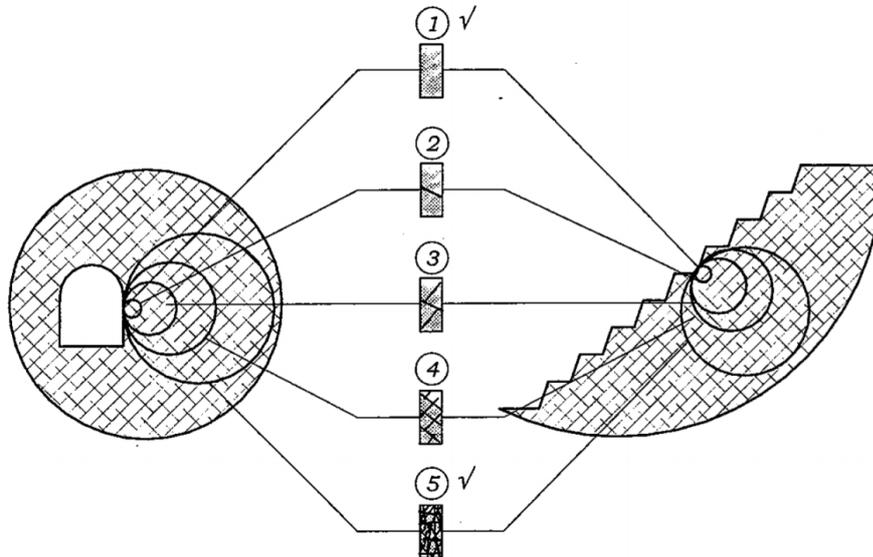


Figura 19. Resistencia del macizo rocoso según el criterio generalizado de Hoek y Brown

Fuente: Tomado de Gavilanes y Andrade, 2004.

2.6.6 Resistencia del macizo rocoso

La resistencia a compresión uniaxial y la resistencia a la tracción del macizo rocoso

viene dada por:

Ecuacion a: $\sigma_c = \sigma_{ci} s^a$

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

Hoek y Brown (1997) propusieron una ecuación para estimar la resistencia la resistencia del macizo rocoso:

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)](\frac{m_b}{4} + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

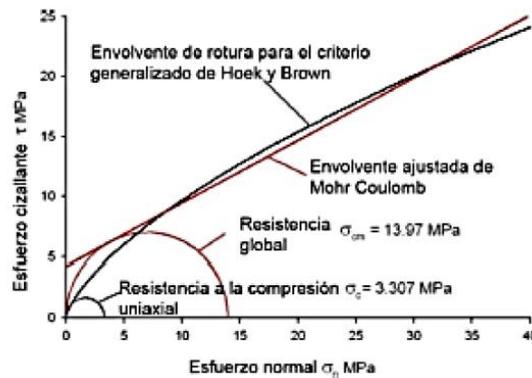


Figura 20. En la imagen se aprecia las envolturas de rotura para el criterio de Hoek y Brown y del criterio de Mohr Coulomb. Apreciándose las gráficas de la resistencia uniaxial y global. (Hoek, 2005).

2.6.7 Determinación de los parámetros de mohr-coulomb

Hoek et al. (2002) proponen utilizar un ajuste basado en una regresión lineal de la ecuación generalizada propuesta por Hoek y Brown. Este ajuste da como resultado:

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

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

Siendo: $\sigma'_{3n} = \sigma'_{3max} / \sigma_{ci}$



Para estimar el valor de σ'_{3max} (límite superior de la tensión de confinamiento sobre el que se ha considerado la relación entre los criterios de Hoek-Brown y Morh-Coulomb) en estudios de taludes, se sugiere aplicar la ecuación:

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

Donde:

γ = peso específico del macizo rocoso,

H = altura del talud,

σ'_{cm} = resistencia del macizo rocoso

La gráfica equivalente, en términos de los esfuerzos principal mayor y menor. Donde:

- σ'_1 y σ'_3 = son las tensiones principales máximas y mínimas efectivas.
- σ_{ci} = es la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta.
- GSI = es el índice de resistencia geológica.
- m_b = es el valor de la constante de Hoek-Brown para el macizo rocoso, depende de la constante de Hoek-Brown de la roca intacta (m_i).
- s y a = son constantes intrínsecas del macizo rocoso.
- D = es un factor que depende del grado de perturbación al cual ha estado sometido el macizo rocoso.

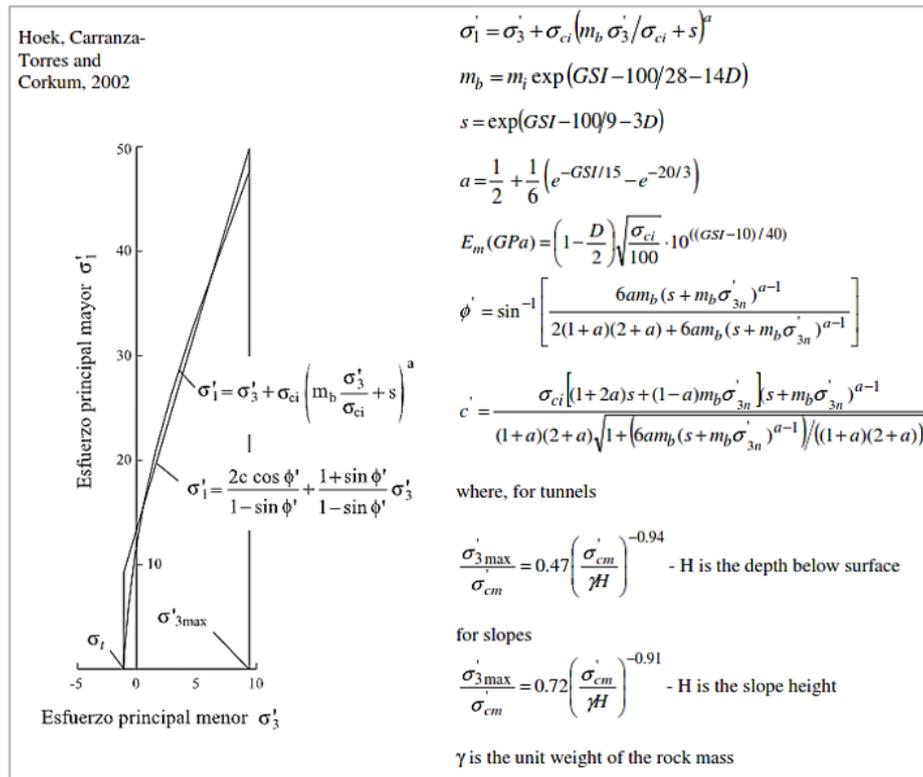


Figura 21. Relación entre los esfuerzos principales mayor y menor del criterio generalizado de Hoek y Brown y el criterio equivalente de Mohr-Coulomb.

Fuente: Modificado de Hoek y Marinos 2007.

2.6.8 Módulo de deformación (E_m)

Las ecuaciones para determinar el módulo E_m , están dadas por:

$$E_m [GPa] = \begin{cases} \left(1 - \frac{D}{2} \right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}}; & \text{para } \sigma_{ci} \leq 100 \\ \left(1 - \frac{D}{2} \right) 10^{\frac{GSI-10}{40}}; & \text{para } \sigma_{ci} > 100 \end{cases}$$

Hoek y Diederichs (2006) basándose en datos de un gran número de mediciones in situ, han propuesto una relación empírica para estimar el valor del módulo de deformación del macizo rocoso:

$$E_m [MPa] = 100\,000 \left(\frac{1-D/2}{1+e^{((75+25D-GSI)/100)}} \right)$$

2.6.9 Coeficiente de poisson del macizo rocoso (ν_m)

Ramírez y Alejano (2004), con respecto al coeficiente ν_m del macizo rocoso, mencionan que su influencia sobre los resultados de las simulaciones suele ser bastante pequeña, al mismo tiempo que lo es su rango de variabilidad natural (0.15 – 0.45), por lo cual, no se suele dar demasiada atención a su estimación.

2.6.10 Confiabilidad de las estimaciones de resistencia

Según Hoek (2007), la aplicación práctica del sistema GSI y el criterio de falla Hoek-Brown en una serie de proyectos de ingeniería en todo el mundo han demostrado que el sistema proporciona estimaciones razonables de las características de resistencia y deformación de una gran variedad de macizos rocosos fracturados de comportamiento isótropo.

GENERALIZED HOEK-BROWN CRITERION		SURFACE CONDITION				
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a$ <p> σ_1' = major principal effective stress at failure σ_3' = minor principal effective stress at failure σ_c = uniaxial compressive strength of <i>intact</i> pieces of rock m_b, s and a are constants which depend on the composition, structure and surface conditions of the rock mass </p>		VERY GOOD Very rough, unweathered surfaces	GOOD Highly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slack-sided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings containing angular rock fragments	VERY POOR Slack-sided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE						
	BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets m_b / m_i s a E_{pr} ν GSI	0.60 0.190 0.5 75,000 0.2 85	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	0.26 0.015 0.5 20,000 0.25 62	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.08 0.0004 0.5 3,000 0.25 34
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with angular blocks formed by four or more discontinuity sets m_b / m_i s a E_{pr} ν GSI	0.40 0.062 0.5 40,000 0.2 75	0.29 0.021 0.5 24,000 0.25 65	0.16 0.003 0.5 9,000 0.25 48	0.11 0.001 0.5 5,000 0.25 38	0.07 0 0.5 2,500 0.3 25
	BLOCKY/SEAMY - folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks m_b / m_i s a E_{pr} ν GSI	0.24 0.012 0.5 18,000 0.25 60	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.5 2,000 0.3 20
	CRUSHED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks m_b / m_i s a E_{pr} ν GSI	0.17 0.004 0.5 10,000 0.25 50	0.12 0.001 0.5 6,000 0.25 40	0.08 0 0.5 3,000 0.3 30	0.06 0 0.5 2,000 0.3 20	0.04 0 0.6 1,000 0.3 10

Figura 22. sistema proporciona estimaciones razonables de las características de resistencia y deformación.

Fuente: Tomado de Read y Stacey 2009: 125.

2.7 PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LAS DISCONTINUIDADES DE ACUERDO AL CRITERIO DE ROTURA DE BARTON Y CHOUBEY (1977)

De acuerdo con el modelo de Barton y sus colaboradores (Barton y Choubey 1977, Barton et al. 1985), es un criterio de rotura empírico, deducido a partir del análisis del comportamiento de las discontinuidades en ensayos de laboratorio, que permite estimar la resistencia al corte en discontinuidades rugosas, la resistencia al corte τ de una discontinuidad sometida a una tensión normal efectiva σ'_n viene dada por:

$$\tau = \sigma'_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) + \phi_r \right]$$

Dónde:

ϕ_r : Ángulo de fricción residual de la discontinuidad.

JRC : Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (Joint Roughness Coefficient).

JCS : Resistencia de la pared de la discontinuidad (Joint Wall Compression Strength).

2.7.1 Estimaciones en campo del JRC

El coeficiente JRC depende de la rugosidad de las paredes de la discontinuidad, y varía entre 1 y 20. Se puede estimar mediante.

- La comparación visual de los perfiles de rugosidad reales con el conjunto de perfiles estándar propuesto por Barton y Choubey (1977), ver figura 14.
- La gráfica de Barton (1982) presentada en la figura 15, es un método alternativo para evaluar JRC_n a partir de las medidas de amplitud de las asperezas y de la longitud de la junta.

- El ensayo Tilt Test. Para ello se toman dos bloques de roca asociados a los labios de una discontinuidad o bien testigos de sondeos. Se determina el ángulo α a partir del cual se inicia el movimiento de uno de los fragmentos con respecto al otro. Se aplica

la expresión: $JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\log_{10}(JCS/\sigma_n)}$

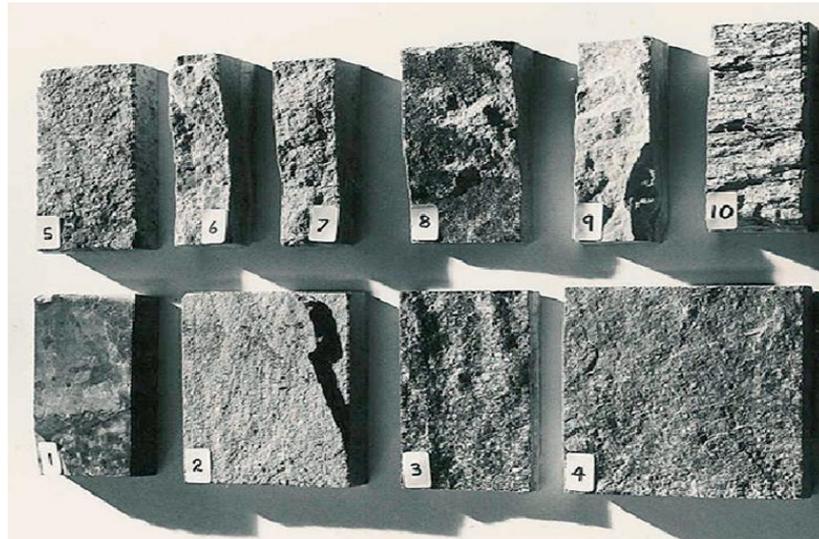


Figura 23. Se muestran diez muestras típicas, junto con sus perfiles de rugosidad

Fuente: (Barton 2013:251).

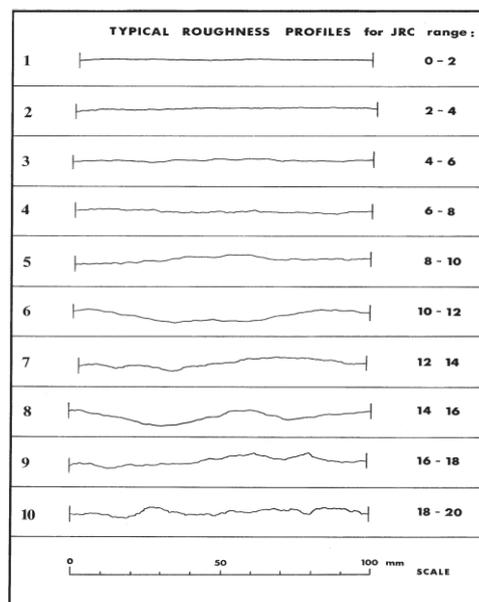


Figura 24. Un simple criterio basado en la rugosidad de juntas (JRC) para la resistencia al corte pico.

Fuente: (Barton 2013:251).

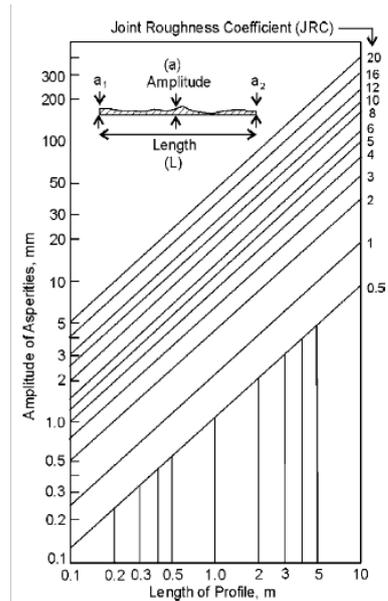


Figura 25. Evaluación del JRC a partir de la amplitud de las asperezas y la longitud del perfil de las juntas.

Fuente: Tomado de Singh and Goel 1999:151.

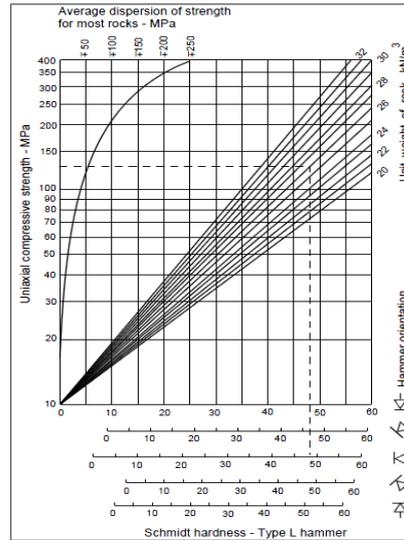
2.7.2 Estimaciones en campo del JCS

Se puede obtener realizando pruebas de martillo de Schmidt (tipo L) sobre las superficies de la discontinuidad y aplicando expresión propuesta por Miller, citado por Barton y Choubey (1977):

$$\log_{10}(\sigma_c) = 0,00088 \gamma_{roca} r + 1,01$$

Donde:

- σ_c = resistencia a la compresión no confinada (MN/m^2). El valor de σ_c puede representar el valor de JCS de la superficie.
- γ = densidad seca de la roca (kN/m^3)
- r = valor del rebote del esclerómetro sobre la superficie de la junta. Este número debe corregirse en el caso en que el martillo no se aplique verticalmente y hacia abajo (rebote contra la gravedad).



Notas: El martillo Schmidt da resultados erróneos en las juntas rugosas; Por lo tanto, es aconsejable no usar rebote de martillo Schmidt para JCS con juntas rugosas.

Figura 26. Ábaco para la obtención de la resistencia a compresión de los labios de una discontinuidad a partir de medidas con el martillo Schmidt tipo L o esclerómetro (Basado en Deere y Miller 1966).

Fuente: Tomado de Hoek 2007:83.

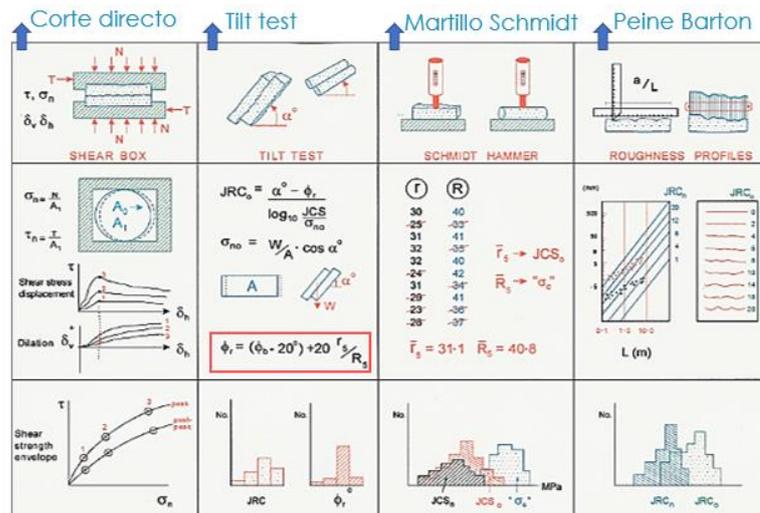


Figura 27. Ensayo típicos para estimar el JRC y JCS de una discontinuidad.

Fuente: Tomado de Barton 2013:253.

2.7.3 Estimación del ángulo de fricción

Generalmente, las paredes de la junta están alteradas y por lo tanto el ángulo de fricción residual ϕ_r será inferior al ángulo de la roca sana ϕ_b . Para su evaluación se emplea la fórmula:

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

Donde:

- ϕ_b = es el ángulo de fricción básico de la roca obtenido mediante ensayos Tilt test y con ensayos de corte directo en laboratorio sobre superficies de roca sanas, lisas y secas.
- R = es el valor del rebote del martillo Schmidt en superficies lisas no alteradas de la misma roca.
- r = es el valor del rebote del esclerómetro en superficies húmedas y meteorizadas.

2.7.4 Efecto de la escala

Conviene precisar que, la rugosidad y la resistencia son dependientes de la escala de la discontinuidad. Por ello, Barton y Bandis (1990) propusieron las correcciones de escala para JRC y JCS que se presentan en las siguientes expresiones:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.02 * JRC_0}$$

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.03 * JRC_0}$$

Donde:

- JRC_0 , JCS_0 y L_0 (longitud) se refieren a muestras a escala de laboratorio, de 100 mm.
- JRC_n , JCS_n y L_n se refieren a tamaños de las juntas naturales in situ.

El parámetro JCS_0 tiene un valor máximo cuando la junta presenta una superficie fresca, no meteorizada e inalterada. La resistencia se irá reduciendo a medida que aumente el nivel de alteración de las superficies de discontinuidad y también el tamaño de la junta.

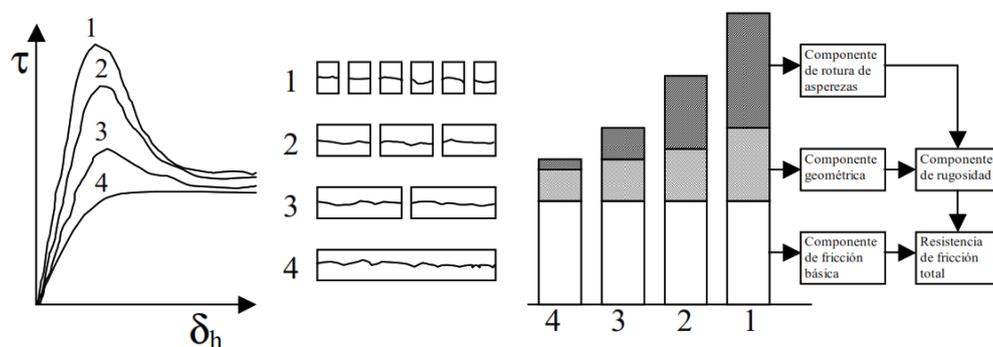


Figura 28. Efecto de escala sobre las tres componentes de una discontinuidad rugosa y sin relleno.

Fuente: Tomado de Ramírez, 2004:94

2.7.5 Interpretación del criterio de barton

Los factores de geometría JRC y resistencia de asperezas JCS se potencian mutuamente. Esto obedece al hecho de que cuando la junta es plana (poco rugosa) la resistencia del material de los labios apenas influye sobre la resistencia de la junta; mientras que en discontinuidades muy rugosas su influencia es muy grande, tal y como demuestra en la figura 29.

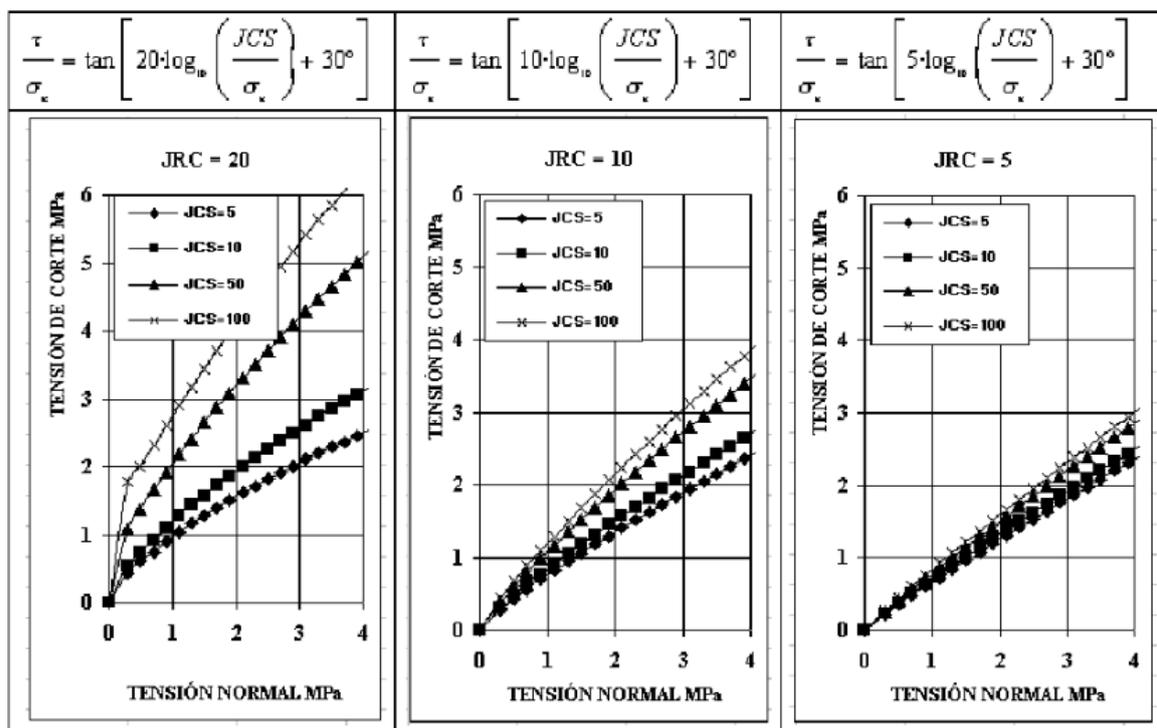


Figura 29. Representación gráfica en ejes tensión cortante – tensión normal de la ley de Barton. Cada gráfica corresponde a un valor de JRC y en ella aparecen las líneas correspondientes cuatro valores JCS.

Fuente: Tomado de Ramírez, 2004:94

2.7.6 Métodos de proyecciones estereográficas o cinemáticos

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



pueden ocurrir. (Kliche, 1999)

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

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

2.7.6.1 Análisis esferográficos

Si bien la orientación de las discontinuidades es el principal factor geológico que influye en la estabilidad, otras propiedades como la persistencia y el espaciamiento también son importantes en el diseño. Desde el punto de vista de análisis, la característica más importante de una discontinuidad es su orientación es el sistema de dirección de buzamiento / buzamiento que facilita el mapeo de campo, el trazado de estereonets y el análisis de los datos de orientación de discontinuidad. Las proyecciones más comúnmente utilizadas son la red de Wulf de igual ángulo y la red de Schmidt de igual área. (Suarez Diaz, 1998)

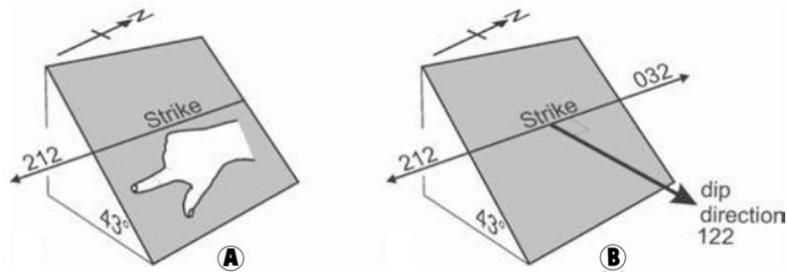


Figura 30. Convenciones para registrar strike / dip. (A) strike / dip; el strike corresponde a la dirección en la que apunta el dedo índice de la mano derecha cuando el pulgar apunta hacia abajo, es decir, 212/43. (B) dip direction/ dip, es decir, 122/43.

Fuente: Lisle *et al.* 2011:102

El Plunge es el buzamiento de la línea. El Trend es la dirección de la proyección horizontal de la línea medida en el sentido de las agujas del reloj desde el norte, y corresponde a la dirección de buzamiento de un plano.

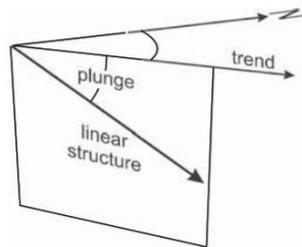


Figura 31. La definición de trend and plunge de una estructura lineal. El Plunge es el buzamiento de la línea.

Fuente: Lisle *et al.* 2011:103

Proyección Estereográfica: Las proyecciones estereográficas eliminan una dimensión para que las líneas o los puntos puedan representar planos y los puntos puedan representar líneas.

En el análisis estereográfico, los métodos comunes de proyección son (1) proyección equiareal y (2) proyección equiangular. Ambos métodos son buenos, pero nunca deben mezclarse porque son diferentes. En Mecánica de Rocas se emplea, por convención y tradición, la proyección estereográfica equiareal. En la red EQUIAREAL o de LAMBERT (SCHMIDT) cualquier área de la superficie de la esfera de referencia se proyecta como un área igual en la estereonet. Esta propiedad de la red se usa en el contorneado de las gráficas

de polos para encontrar concentraciones de polos que representan orientaciones preferentes o conjuntos de discontinuidades.

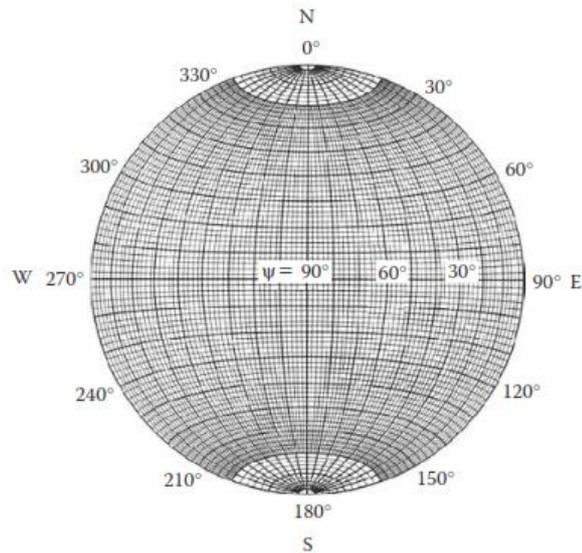


Figura 32. Proyección estereográfica ecuatorial equiareal.

Fuente: Sivakugan *et al.* 2013:64

Proyección de Grandes Círculos en Planos Horizontales, un plano con dip Ψ y dip direction α puede ser representado en el hemisferio de referencia inferior por un gran círculo o por su polo.

Las dos características que es importante tener en cuenta son las siguientes:

- Cuanto más grande es el buzamiento, más cerca está la proyección del centro del gran círculo.
- Cuanto más grande es el buzamiento, más lejos está el polo del centro.

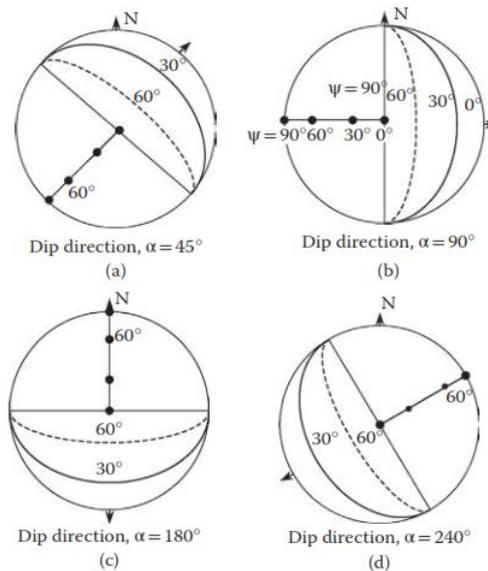


Figura 33. Proyección de un gran círculo definiendo un plano.

Fuente: Sivakugan *et al.* 2013:59

Densidad de polos: Si queremos obtener una representación más precisa de las variaciones en orientación, debemos cuantificar el número de puntos por unidad de área de la proyección. La mejor manera de representar estas variaciones en la concentración de puntos, es dibujando líneas de contornos que delimitan áreas determinadas.

Una línea de contorno en una proyección que conserva el área, separa zonas dentro de la proyección en las que las densidades de puntos se mantienen dentro de la misma área. Estas densidades se miden como porcentajes del número total de puntos por 1% del área del estereograma y se dibujan las líneas de contornos separando zonas en las que el porcentaje de puntos totales por 1% de área tenga un valor específico (2%, 3%, etc.).

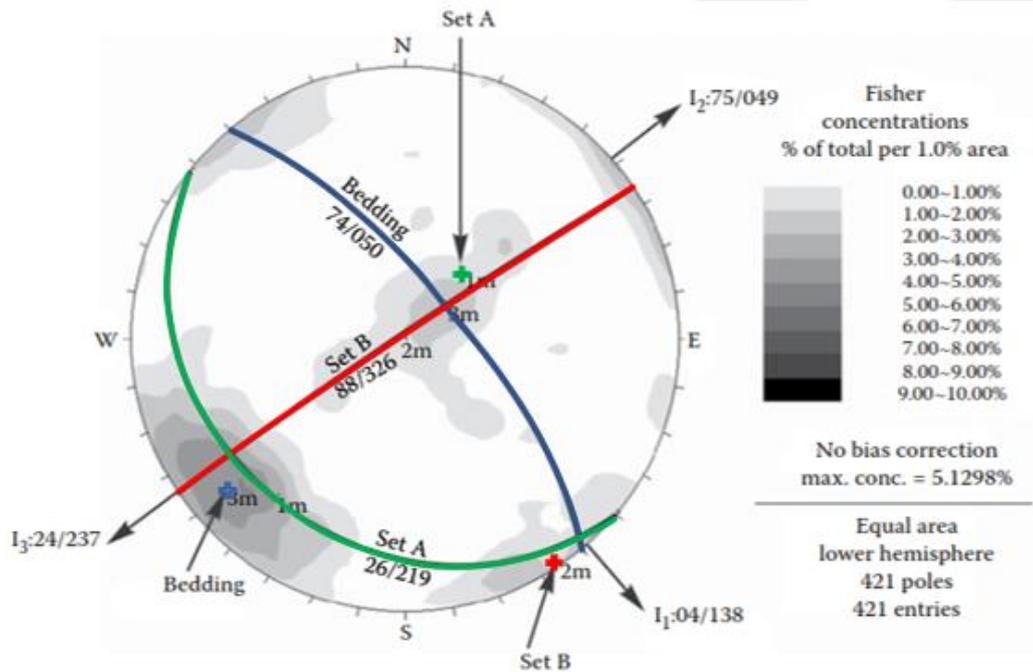


Figura 34. Diagrama de contornos.

Fuente: Wyllie y Mah 2014:31

2.7.6.2 Análisis cinemático

La identificación de modos de inestabilidad de taludes para los diferentes tipos de fallas, están asociados a las diferentes estructuras geológicas y es importante que el diseñador de taludes sea capaz de reconocer posibles problemas de estabilidad durante las primeras etapas de un proyecto.

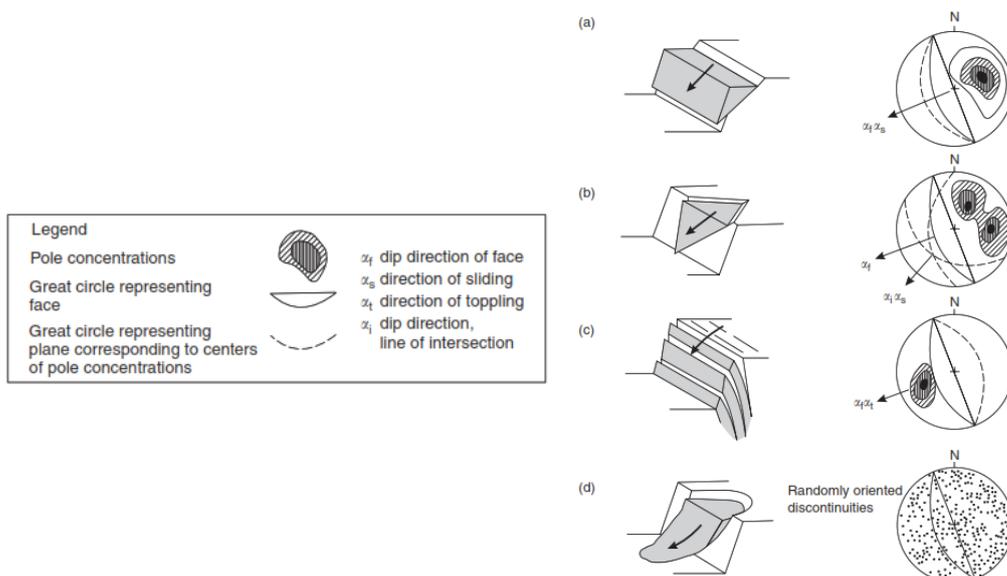


Figura 35. Principales tipos de fallas en taludes y condiciones geológicas estructurales que pueden causar estas fallas.

Fuente: Wyllie y Mah 2014:36

2.7.6.3 Diferentes Mecanismos de falla de taludes con control estructural

Una vez que el tipo se haya identificado los tipos de fallas con el estereograma, el mismo diagrama también se puede evaluar la dirección en la que un bloque se deslizará y dará una indicación de las condiciones de estabilidad. Este procedimiento se conoce como el análisis cinemático, esta relación entre la dirección en la que el bloque de roca se deslizará y la orientación del talud evaluado es fácilmente evidente en el estereograma.

2.9.2.3.1 Falla planar

La rotura planar en taludes tiene lugar sobre todo en macizos rocosos constituidos por rocas de resistencia media o alta afectadas por fallas o diaclasas. Según Hoek y Bray (1981), para que exista la probabilidad de rotura planar, deben cumplirse las siguientes condiciones geométricas.

- El plano de discontinuidad debe orientarse paralelo o casi paralelo (dentro de aproximadamente $\pm 20^\circ$) a la cara del talud; es decir: $\alpha_f - 20 \leq \alpha_j \leq \alpha_f + 20$
- El plano de falla debe intersectar la cara del talud. Esto significa que el buzamiento del plano de falla debe ser menor que el buzamiento de la cara del talud; es decir: $\psi_j < \psi_f$
- El ángulo de fricción interna debe ser menor que el buzamiento de la discontinuidad; es decir: $\phi_j < \psi_j$
- Las superficies de liberación lateral (que proporcionan una resistencia despreciable al deslizamiento) deben estar presentes en la masa de roca para definir los límites laterales del deslizamiento potencial. Ver la figura 25.

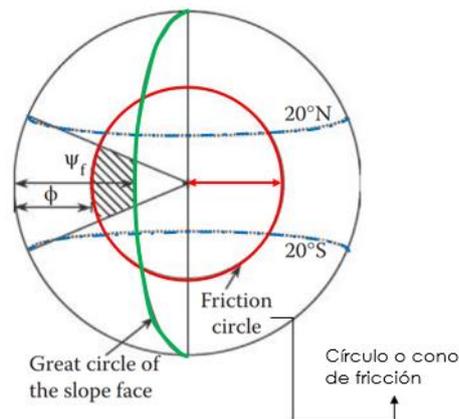


Figura 36. Identificación de modo de falla tipo planar, usando la representación de un gran círculo para el plano y el talud. **Fuente:** Sivakugan et al. 2013:71

Notas:

- En el estereonet de grandes círculos, el ángulo de fricción que se considera representativo de la resistencia al corte se representa como un círculo completo, con un ángulo medido desde la circunferencia (la fricción actúa en cualquier dirección).
- Los criterios de $\pm 20^\circ$ se pueden dibujar como radios desde el centro, o a lo largo de grandes círculos convenientes, como se muestra aquí.
- En el estereonet polar, el círculo de fricción marca el límite inferior de la "zona de peligro", esta vez extraída del centro del estereonet, en lugar de la circunferencia.

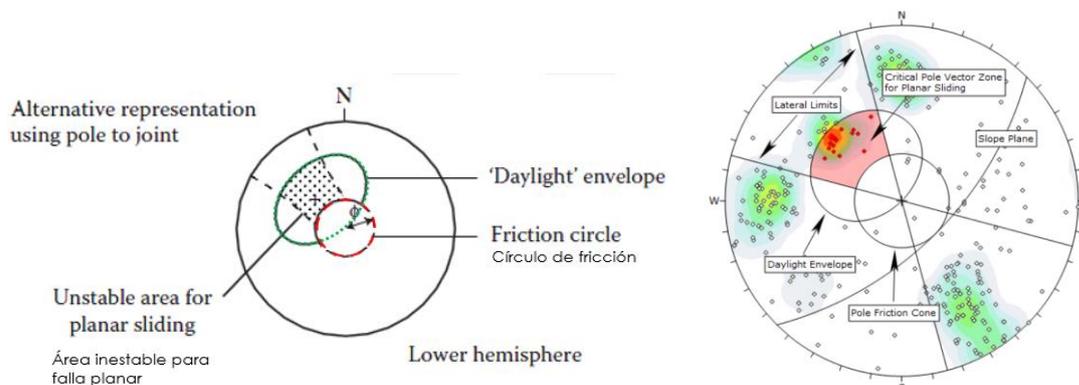


Figura 37. En la figura de la izquierda se aprecia la identificación de modo de falla tipo planar, usando la representación de polos. La figura de la derecha se aprecia el análisis cinemático de deslizamiento planar, modo de vector de polo en DIPS.

Fuente: Hencher 2015.

2.9.2.3.2 Falla por cuña

La rotura en cuña suele presentarse en macizos rocosos que está controlado con dos o más familias de discontinuidades (estratificación, esquistosidad, diaclasas, fallas, etc.); cuya orientación, espaciado y continuidad determina la forma y el volumen de la cuña. Según

Hearn (2011). Ver la figura 27, este tipo de rotura se observa comúnmente en taludes de pendiente escarpada en rocas fracturadas. Para que se produzca este tipo de rotura es fundamental que:

- La dirección de la línea de intersección debe ser aproximadamente cercana a la del buzamiento de la cara del talud (aflora hacia fuera del talud).
- La línea de intersección debe tener un ángulo de inmersión (plunge) que es menor que el buzamiento de la cara del talud y mayor que el ángulo de fricción promedio de las dos juntas, es decir: $\phi_j < \psi_i < \psi_f$.

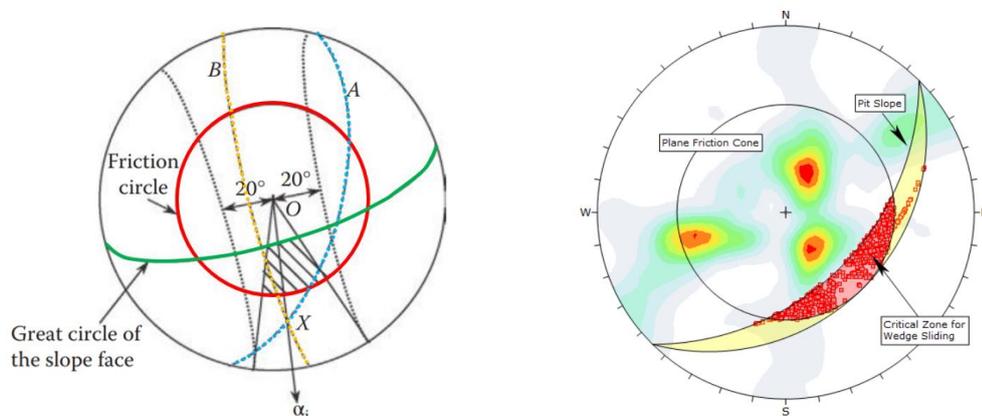


Figura 38. En la figura de la izquierda se aprecia Identificación de modo de falla tipo cuña, usando la representación de un gran círculo para los planos y el talud. La figura de la derecha se aprecia el análisis cinemático de deslizamiento de cuña, puntos de intersección y contornos en DIPS.

Fuente: sivakugan et al. 2013:71

2.9.2.3.3 Falla por vuelco

Flexural Toppling (Volcamiento): Las roturas por vuelco de taludes aparecen principalmente cuando una rotación de columnas o bloques de roca alrededor de una base fija, coincide aproximadamente con el del plano del talud y además tiene un fuerte buzamiento hacia el interior del macizo rocoso. Las condiciones necesarias para este mecanismo se mencionan a continuación:

- Para que ocurra una falla por vuelco, la dirección de buzamiento de la discontinuidad debe estar dentro de **aproximadamente 10°** de la dirección de buzamiento de la cara del talud, de modo que se formen una serie de bloques paralelas a la cara.

- Según Wyllie y Mah (2004), si los planos tienen un ángulo de fricción ϕ_j , entonces el deslizamiento sólo ocurrirá si la dirección de compresión aplicada está en un ángulo mayor que ϕ con la normal a los planos. Si el buzamiento de los planos es ψ_j , entonces la falla por vuelco puede ocurrir si se cumple la condición: $(90^\circ - \psi_j) + \phi_j < \psi_f$. Ver la figura 28.

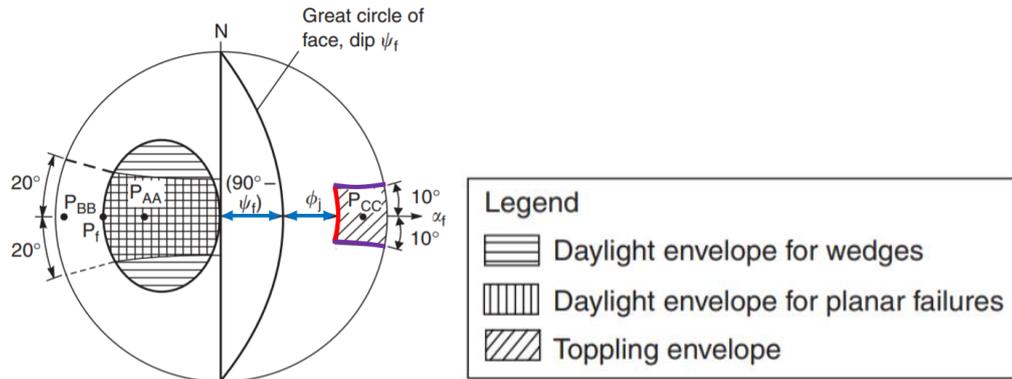


Figura 39. En la figura de la izquierda se aprecia Identificación de modo de falla tipo volcamiento por flexión.

Fuente: Wyllie y Mah 2014:38

Direct toppling: La naturaleza de la inestabilidad, si la hay, se determina a partir de consideraciones de la geometría del bloque y el ángulo de fricción entre el bloque y la superficie sobre la que reposa. El deslizamiento solo ocurrirá cuando el buzamiento de un plano exceda el ángulo de fricción. Las cuatro posibilidades se muestran en la figura 29.

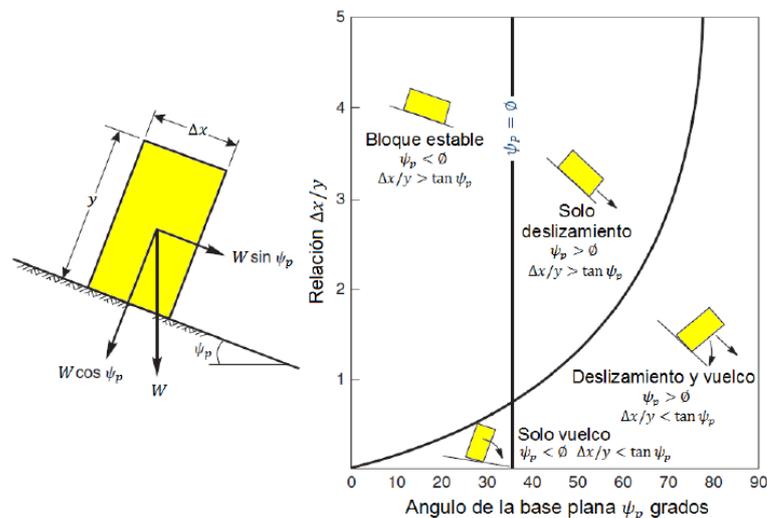


Figura 40. Inestabilidad por deslizamiento y vuelco de un bloque en un plano inclinado.

Fuente: Hoek y Bray, 1981.

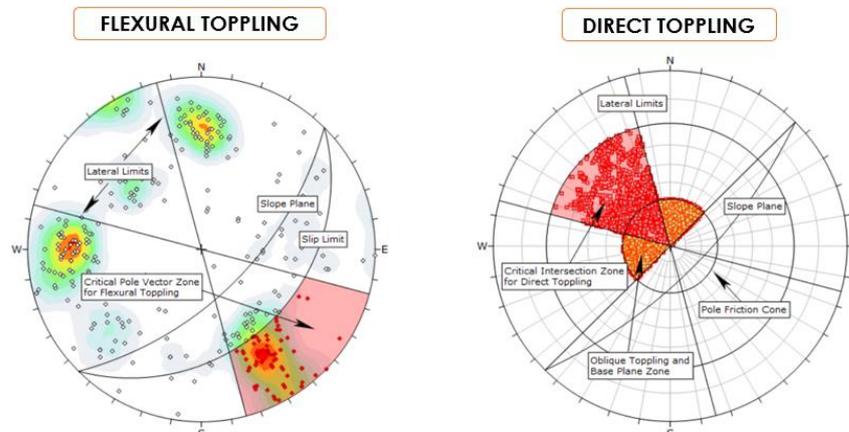


Figura 41. Análisis cinemático de vuelco por flexión, modo de vector de polo en DIPS. Análisis de vuelco directo utilizando intersecciones y vectores polares (planos base) en DIPS.

Fuente: cersa.

2.9.2.3.4 Falla circular

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

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

2.7.7 Método de dovelas

Los métodos de dovelas consideran el problema bidimensional por lo que la estabilidad del talud se analiza en una sección transversal del mismo. La zona de terreno potencialmente deslizante se divide en una serie de fajas verticales estudiándose el equilibrio de cada una de ellas, tal como se muestra en la figura 42.

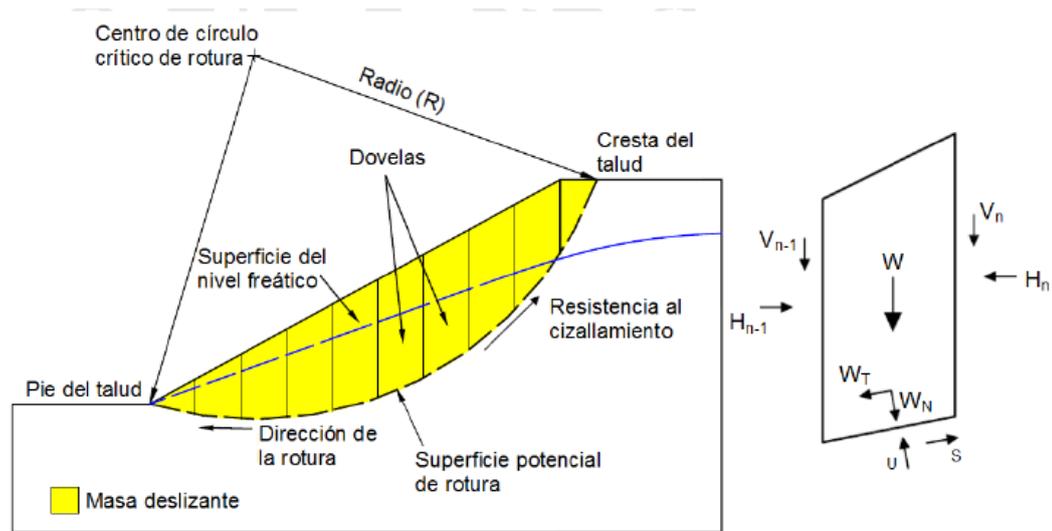


Figura 42. Método de la dovela es para un tipo de rotura circular en una serie de fajas y rebanas verticales

2.7.8 Métodos numéricos

El uso de modelos numéricos en ingeniería de taludes puede contribuir a mejorar el conocimiento sobre los posibles mecanismos de rotura que pueden dar lugar a fenómenos de inestabilidad. Así mismo, puede ayudar a encontrar una geometría óptima del talud y permite el análisis de la secuencia de excavación y construcción. Finalmente, y mediante el método de reducción de la resistencia al corte (y a la tracción) se pueden estimar los coeficientes de seguridad de taludes mediante técnicas numéricas. (Dawson & Roth, 1999).

Los métodos numéricos se pueden dividir en:

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

2.8 MARCO CONCEPTUAL

2.8.1 Factor de seguridad

El Factor de Seguridad está determinada entre la relación entre las fuerzas de resistencia (capacidad) y las fuerzas impulsoras (demanda) del sistema en su entorno



considerado. El FS es el criterio más básico de diseño aceptado en la ingeniería. En geomecánica saltó a la fama a mediados del siglo XX, cuando la ingeniería geotécnica se desarrolló como una disciplina de ingeniería independiente en 1940 (Read & Stacey, 2009).

$$F.S. = \frac{FUERZAS ESTABILIZADORAS}{FUERZAS DESESTABILIZADORAS}$$

En términos de tensiones

$$F.S. = \frac{Tensiones Tangenciales Resistentes}{Tensiones Tangenciales Deslizantes}$$

Los taludes serán estables siempre en cuando que el factor de seguridad sea mayor (F.S. > 1)

2.8.2 Análisis de estabilidad

Con el estudio de la estabilidad de taludes es posible conocer la inestabilidad de un talud a la hora de realizar un proyecto, o llevar a cabo una obra de construcción de ingeniería civil, siendo un aspecto directamente relacionado con la ingeniería geológica - geotécnica. La inestabilidad de un talud, se puede producir por un desnivel, que tiene lugar por diferentes factores que integran el incremento en los esfuerzos de corte y disminución en la resistencia del material. Para que un talud falle se debe identificar los factores condicionantes y desencadenantes que afectan a desarrollo del fenómeno:

2.8.2.1 Factores condicionantes

Litología: Tipo de material existente.

Los dominios estructurales: discontinuidades, fallas, estratificaciones.

Hidrológicos: Presencia de agua y flujos subterráneos.

Geométricos: Los pendientes, orientaciones de las discontinuidades.



2.8.2.2 Factores desencadenantes

Geodinámica Externa: Variación en presión de poros, flujos superficiales, meteorización, relleno de fisuras y grietas por el agua.

Geodinámica Interna: Alteración del estado de inercia (sismicidad), movimiento

Antrópicos: Excavación del Pie, sobrepeso en cabeza, rellenos o excavaciones tanto de obra civil, como en minería.

El estado de tensiones del macizo rocoso de los taludes será estables en función a la resistencia de los geomateriales que la conforman, los empuje a los que son sometidos las discontinuidades que presentan. Los taludes pueden estar compuesto por roca o de materiales terroso. En los dos casos los análisis son muy distintos.

2.8.3 Clasificación geomecánica

La clasificación de los macizos rocosos es un sistema que permite a su vez relacionar índices de calidad de la roca para su posterior análisis de estabilidad y la zonificación geomecánica. (Torrijo Echarri & Córtes Gimeno, 2007)

2.8.4 Deslizamiento

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

2.8.5 Esclerómetro

Sirve para determinar la respuesta que ofrece la superficie de un material rocoso a la acción del impacto de una masa metálica caída desde una altura determinada. Mediante correlaciones se obtiene la resistencia a compresión uniaxial del material rocoso, la



resistencia a compresión de la superficie de la discontinuidad expuesta (JCS: Joint Compressive Strength) o la dureza del material rocoso, dependiendo del estado de la superficie y el interior de la roca ensayada.

2.8.6 Zonificación geomecánica

Se define teniendo los valores de la calidad geomecánica de la roca, la intensidad del fracturamiento, el tipo de roca, las propiedades de las discontinuidades y las orientaciones preferentes de las discontinuidades. La zonificación consiste en relacionar las similitudes de acuerdo a la calidad y las propiedades del macizo rocoso.

2.8.7 Factor de seguridad

El Factor de Seguridad esta determinista entre la relación entre las fuerzas de resistencia (capacidad) y las fuerzas impulsoras (demanda) del sistema en su entorno considerado. El FS es el criterio más básico de diseño aceptado en la ingeniería. En geomecánica saltó a la fama a mediados del siglo XX, cuando la ingeniería geotécnica se desarrolló como una disciplina de ingeniería independiente en 1940 (Read & Stacey, 2009).

2.8.8 Tilt test

Es un ensayo que permite estimar el ángulo de rozamiento de discontinuidades o el ángulo de rozamiento básico de discontinuidades lisas, a partir de los que se pueden evaluar el ángulo de rozamiento residual y el coeficiente de rugosidad de las juntas, JRC. (Gonzáles de Vallejo, 2002)

2.8.9 Peine de barton

Es un parámetro de la resistencia al corte de as discontinuidades, se define como un parámetro de rugosidad de la discontinuidad, tiene como objetivo obtener la rugosidad de la superficie en un perfil, propuesta por Barton. Cada perfil generado por el peine de Barton se



le asigna un valor de clasificación JRC (coeficiente de rugosidad de la junta) que varía entre 0 y 20. Donde 0 es muy lisa o espejo de falla y 20 muy rugosa. (Barton y Choubey 1977, Barton et al. 1985).

2.8.10 Tipos de rotura

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

2.8.11 Parámetros geotécnicos

La geotecnia se ocupa de la aplicación de principios geológicos y de ingeniería al comportamiento de suelos rocas y aguas subterráneas además del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas y de ingeniería de los materiales del suelo y rocas para diseñar los cimientos de estructuras y obras geotécnicas y civiles como túneles, edificios, puentes entre otros. Varias fases de estos estudios que incluyen exploración, análisis de muestras, caracterización diseño de proyectos y monitoreo geotécnico mediante instrumentos; pueden realizarse durante las fases de construcción, operación, mantenimiento y cierre.



2.9 SISMICIDAD

El Perú se localiza en una de las regiones con más altas de actividad sísmica que existe en la Tierra, por ubicarse dentro del Cinturón del Fuego del Pacífico, que conforma una de las zonas sísmicas más activas del mundo por la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana, cuyo índice de convergencia entre las dos placas tectónicas es de unos 10 cm aproximadamente por año.

El área investigada se encuentra en la Zona 4, correspondiéndole una sismicidad alta, de acuerdo al Mapa de Zonificación Sísmica, de la Nueva Norma de Diseño Sismoresistente E-030 (2016). Para más detalle ver la **Figura 43**.

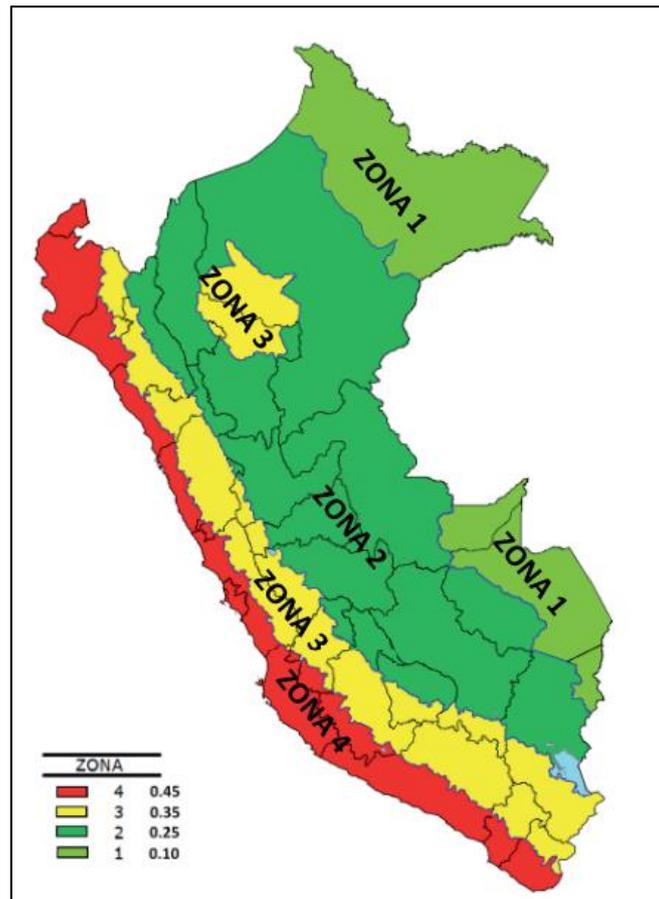


Figura 43. Zonificación Sísmica del Perú Según la Norma E-030 (2016)

Fuente: Norma E-030 (2016)

Cabe mencionar la actividad sísmica ocurrida en el pasado, ya que son datos importantes para estimar la amenaza sísmica. Los principales eventos sísmicos que ocurrieron en el pasado, los cuales afectaron la costa Central y Sur del Perú, se muestran en la **Tabla 18**. Los epicentros de los sismos históricos e instrumentales con magnitudes $M \geq 5,0$ en los alrededores del área se presentan en la **Figura 44** y **Figura 45**, en las cuales se registra además sismos superficiales (0 a 50 km de profundidad), sismos intermedios (51 a 100 km de profundidad) y sismos profundos (más de 101 km de profundidad). De los eventos registrados, más del 90% ocurrieron a profundidades mayores a 25 km.

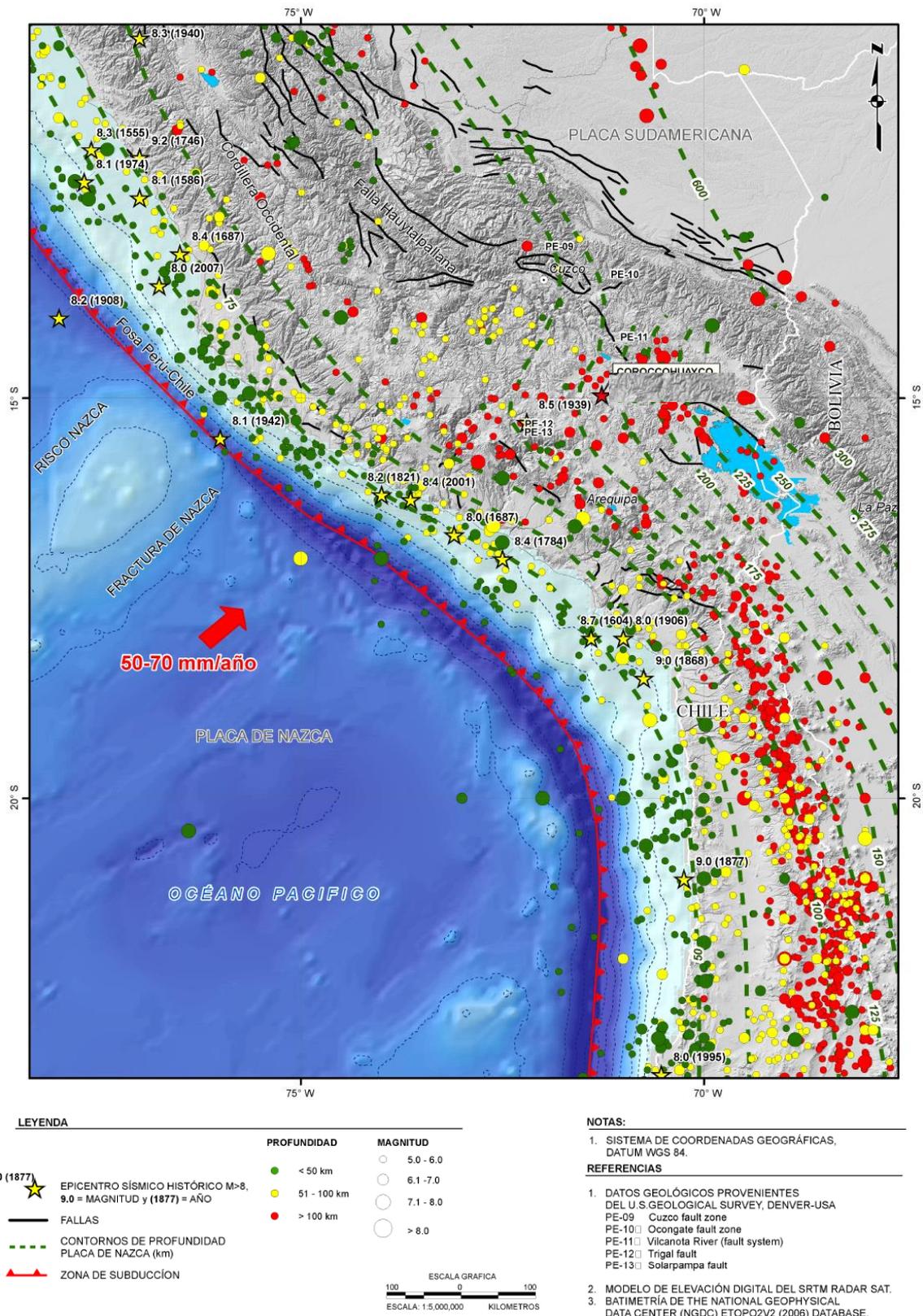
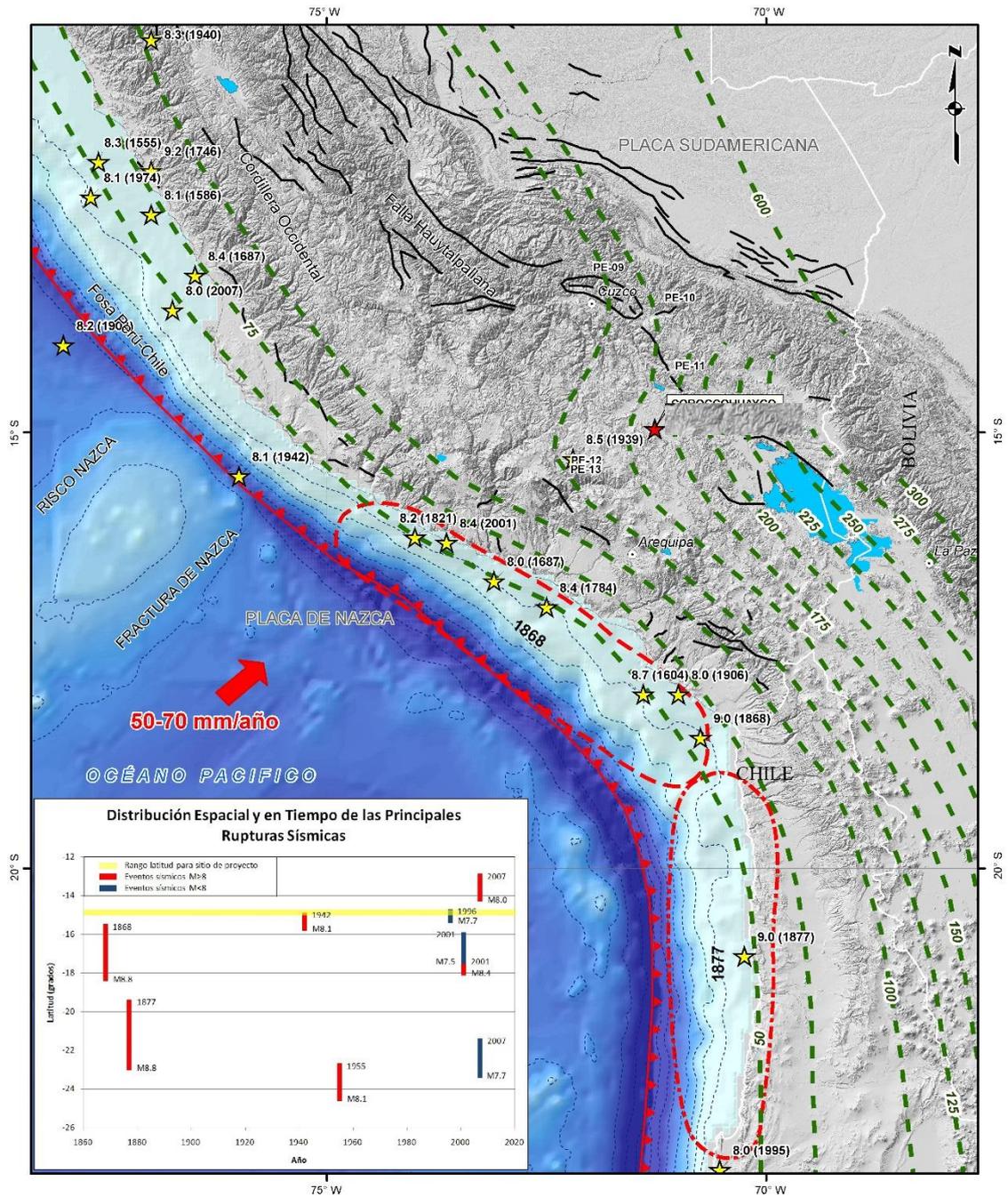


Figura 44. Distribución Espacial de Sismos en el Centro y Sur del Perú

Fuente: Golder (2012)



LEYENDA

- ★ 9.0 (1877) EPICENTRO SÍSMICO HISTÓRICO M>8. 9.0 = MAGNITUD y (1877) = AÑO
- FALLAS
- - - - - CONTORNOS DE PROFUNDIDAD PLACA DE NAZCA (km)
- ▲ ZONA DE SUBDUCCIÓN
- - - - - ÁREA DE RUPTURA SISMO 1868 (Dewey et al, 2003)
- - - - - ÁREA DE RUPTURA SISMO 1877 (Dewey et al, 2003)

ESCALA GRAFICA
0 100
ESCALA: 1:5.000.000 KILOMETROS

NOTAS:

1. SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS, DATUM WGS 84.

REFERENCIAS

1. DATOS GEOLÓGICOS PROVENIENTES DEL U.S.GEOLOGICAL SURVEY, DENVER-USA
PE-09 Cuzco fault zone
PE-10 Ocongate fault zone
PE-11 Vilcanota River (fault system)
PE-12 Trigal fault
PE-13 Solarpampa fault
2. MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL DEL SRTM RADAR SAT.
3. BATIMETRÍA DE THE NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER (NGDC) ETOPO2V2 (2006) DATABASE.

Figura 45. Estructura Tectónica Regional – Grandes Sismos Históricos

Fuente: Golder (2012)



Tabla 18: *Sismos más Importantes Registrados en los Últimos 500 Años en el Sur - Oeste Peruano*

Fecha	Tipo de Mecanismo	Magnitud	Dirección' del Movimiento	Profundidad (km) (*)	Longitud de la Ruptura (km) (**)
Sur del Perú					
1604	Subducción Interfase	8.7	Cabalgamiento	30	450
1687	Subducción Interfase	8.0	Cabalgamiento	28	150
1784	Subducción Interfase	8.4	Cabalgamiento	30	300
1821	Subducción Interfase	8.2	Cabalgamiento	30	?
1868	Subducción Interfase	8.8 – 9.0	Cabalgamiento	25	500
1906	Subduccion Intraplaca	7.7 – 7.9	Normal	60	?
1913	Subducción Interfase	7.9	Cabalgamiento	25	?
2001	Subducción Interfase	8.4	Cabalgamiento	33	320
Centro del Perú					
1586	Subducción Interfase	8.1 – 8.5	Cabalgamiento	60	175
1664	ND	7.5 – 7.8	ND	15	75
1678	Subducción Interfase	7.7 – 8.0	Cabalgamiento	40	100 - 150
1687	Subducción Interfase	8.4 – 8.8	Cabalgamiento	30	300
1725	Subducción Interfase	7.5 – 7.6	Cabalgamiento	40	75
1746	Subducción Interfase	8.6 – 9.5	Cabalgamiento	30	350
1940	Subducción Interfase	8.0	Cabalgamiento	60	180
1942	Subducción Interfase	8.1	Cabalgamiento	60	200
1963	Subducción Interfase	7.8	Cabalgamiento	543	ND
1966	Subducción Interfase	7.7 – 8.2	Cabalgamiento	38	100
1974	Subducción Interfase	7.9	Cabalgamiento	27	140
1970	Subduccion Intraplaca	7.8	Normal	64	130
2007	Subducción Interfase	8.0	Cabalgamiento	39	ND

Notas: (*) Profundidades estimadas de U.S. Geological Survey (2012) y NGDC (2012)

(**) Longitudes de rotura estimadas de Dorbath et al (1990); ND: No Disponible

Fuente: Golder (2012)



CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES Y EQUIPOS

Con la finalidad de realizar las investigaciones geológicas - geotécnicas es necesario hacer el uso de diferentes materiales y equipos, los cuales se detallan son los siguientes:

3.1.1 Instrumentos y materiales en campo

- GPS marca Garmin GPSMAP64s.
- Brújula marca Brunton.
- Lupa 10x – 20x marca *Iwamoto*.
- Cámara fotográfica
- Libreta de campo
- Protactor de diferentes escalas marca *Westcott*.
- Lápices de colores.
- Base topográfica
- Picota o martillo de geólogo
- Lápiz de dureza
- Lápiz magnético
- Bolsas polietileno
- Esclerómetro (Martillo Schmidth)
- Formato de registro geomecánico (Scan Line).
- Equipo Sismógrafo Smartseis ST.
- Peine de Barton
- Tilt test

3.1.2 Equipos y materiales en gabinete

- Laptop corei7, Lenovo
- Impresora canon
- Escritorio



3.2 METODOS DE TRABAJO

El presente estudio de investigación se realizó con la metodología de un análisis de tipo cualitativo y descriptivo; La descripción es el método empírico de estudio de un objeto, en el cual el investigador observa, describe y toma las características geomecánicas, para el conocimiento de las propiedades y relaciones del objeto, que son de gran utilidad en la investigación, está orientado a la evaluación geomecánica de la estabilidad física del macizo rocoso, donde se realizaron una campaña de investigaciones en campo, que consiste en cartografiado geológico (geología regional, local, estructural, geomorfología y geodinámica externa), evaluación geotécnica (mapeo geomecánico por línea de detalle y ensayos de campo), evaluación geomecánica (caracterización de los macizo rocoso y la posterior zonificación geomecánica) y las investigaciones geofísicas, ensayos en el laboratorio (propiedades índice y de resistencia) y el análisis de estabilidad física a nivel de bancos y a nivel global de los taludes del rajo. A continuación, se detallará cada uno de estas metodologías:

3.3 INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS

Con la finalidad de caracterizar los macizos rocosos que conforman los taludes de la Mina 9-10, se realizaron estaciones geomecánicas, se ejecutaron ensayos con el Martillo Schmidt en las discontinuidades principales, se midió la rugosidad de las discontinuidades con el Peine de Barton, para realizar los ensayos de laboratorio de mecánica de rocas para ellos se tomó muestras representativas en todo el tajo de la mina 9-10, y adicionalmente se realizaron ensayos geofísicos (tomografía eléctrica, refracción sísmica y MASW).

En los siguientes ítems se describen con más detalle una descripción de las actividades ejecutadas durante la investigación geotécnica.



3.3.1 Ejecución de estaciones geomecánicas

Con la finalidad de caracterizar geomecánicamente los taludes expuestos del macizo rocoso en superficie de la mina 9-10, se realizó 57 estaciones geomecánicas (utilizando la metodología de mapeo de líneas de detalle) se distribuyeron convenientemente en todos los niveles del tajo de la Mina 9-10. registrando las características de las discontinuidades, buzamiento, dirección de buzamiento, espaciamiento, persistencia, separación, tipo de rugosidad, meteorización o alteración y presencia de agua. También se realizó la tomaron muestras representativas de roca debidamente distribuidas, las muestras fueron identificadas y embaladas para ser remitidas al laboratorio. Las labores a ejecutar en las estaciones geomecánicas son las siguientes:

- Sectorización del macizo rocoso a evaluar.
- Identificación de las discontinuidades predominantes del frente del macizo rocoso sectorizado.
- Toma de datos con brújula electrónica de la dirección del buzamiento y el buzamiento de las discontinuidades.
- Evaluación del grado de fracturamiento (RQD), toma de datos de las características de las discontinuidades, tales como persistencia, espaciamiento, aberturas, tipo de relleno, rugosidad, grado de meteorización y presencia de agua.
- Toma de muestras representativas para ejecutar ensayos de laboratorio.
- Medición de la rugosidad con el Peine de Barton y medición del número de rebotes en los planos de las discontinuidades con el Martillo Schmidt.
- Por último, se realizó un registro fotográfico de la zona evaluada y la toma de coordenadas con GPS.

En la **Tabla 19**, se presenta un resumen de las estaciones geomecánicas ubicadas en la Mina 9-10.



Tabla 19: Resumen de las Estaciones Geomecánicas Ubicadas en la Mina 9-10

Estación Geomecánica	Inicio		Final		Longitud	Nivel	Litología
	Este	Norte	Este	Norte			
EG-01 (M-9)	490 009	8 320 051	490 056	8 320 066	50	725	Hornfels
EG-02 (M-9)	490 186	8 320 086	490 235	8 320 074	50	724	Hornfels
EG-03 (M-9)	490 297	8 320 071	490 339	8 320 098	50	726	Hornfels
EG-04 (M-9)	490 307	8 319 945	490 348	8 320 073	50	715	Hornfels Alterado
EG-05 (M-9)	490 324	8 320 015	490 372	8 319 999	50	714	Hornfels Alterado
EG-06 (M-10)	490 428	8 320 174	490 428	8 320 224	50	724	Arenisca Poco Consolidada
EG-07 (M-9)	489 959	8 319 921	489 963	8 319 886	35	734	Magnetita
EG-08 (M-10)	490 452	8 320 225	490 494	8 320 250	50	702	Hornfels
EG-09 (M-10)	491 207	8 320 532	491 245	8 320 500	50	703	Andesita Porfírica
EG-10 (M-10)	491 257	8 320 483	491 282	8 320 440	50	701	Hornfels
EG-11 (M-10)	490 840	8 320 355	490 871	8 320 370	35	629	Andesita Porfírica
EG-12 (M-10)	490 954	8 320 398	491 002	8 320 413	50	628	Hornfels
EG-13 (M-10)	491 174	8 320 448	491 201	8 320 419	40	629	Hornfels
EG-14 (M-10)	490 671	8 320 345	490 715	8 320 369	50	702	Hornfels Alterado
EG-15 (M-10)	490 922	8 320 465	490 969	8 320 481	50	702	Hornfels
EG-16 (M-10)	491 035	8 320 503	491 082	8 320 517	50	701	Hornfels
EG-17 (M-10)	490 461	8 320 178	490 463	8 320 128	50	677	Hornfels Alterado
EG-18 (M-10)	490 468	8 320 081	490 470	8 320 031	50	678	Zona de Óxidos
EG-19 (M-10)	490 463	8 320 198	490 504	8 320 227	50	678	Hornfels
EG-20 (M-10)	490 543	8 320 247	490 588	8 320 269	50	677	Hornfels
EG-21 (M-10)	490 672	8 320 316	490 715	8 320 341	50	678	Hornfels
EG-22 (M-10)	490 815	8 320 395	490 841	8 320 409	30	677	Andesita Porfírica
EG-23 (M-10)	490 931	8 320 440	490 978	8 320 456	50	679	Hornfels
EG-24 (M-10)	491 046	8 320 480	491 094	8 320 494	50	678	Hornfels
EG-25 (M-10)	491 243	8 320 457	491 260	8 320 426	35	676	Hornfels
EG-26 (M-10)	491 200	8 320 505	491 231	8 320 479	40	677	Hornfels
EG-27 (M-10)	490 527	8 320 005	490 528	8 319 960	45	641	Zona de Óxidos
EG-28 (M-10)	490 474	8 319 965	490 476	8 319 920	45	678	Zona de Óxidos
EG-29 (M-10)	491 351	8 320 293	491 375	8 320 249	50	703	Pórfido Andesítico
EG-30 (M-10)	490 568	8 319 951	490 617	8 319 960	50	642	Zona de Óxidos
EG-31 (M-10)	490 708	8 319 955	490 754	8 319 975	50	640	Hornfels
EG-32 (M-10)	490 839	8 320 014	490 882	8 320 040	50	642	Hornfels Alterado
EG-33 (M-10)	490 783	8 319 931	490 817	8 319 951	40	678	Hornfels
EG-34 (M-10)	491 163	8 320 243	491 208	8 320 266	50	626	Hornfels
EG-35 (M-10)	491 083	8 320 204	491 129	8 320 225	50	620	Hornfels
EG-36 (M-10)	490 805	8 320 049	490 849	8 320 072	50	594	Hornfels
EG-37 (M-10)	491 133	8 320 127	491 172	8 320 138	40	672	Hornfels
EG-38 (M-10)	491 206	8 320 208	491 250	8 320 232	50	646	Hornfels
EG-39 (M-10)	491 296	8 320 332	491 312	8 320 295	40	658	Magnetita
EG-40 (M10)	490 548	8 320 185	490 548	8 320 145	40	624	Hornfels
EG-41 (M10)	491 096	8 320 471	491 143	8 320 486	50	642	Hornfels



Estación Geomecánica	Inicio		Final		Longitud	Nivel	Litología
	Este	Norte	Este	Norte			
EG-42 (M-10)	491 032	8 320 222	491 019	8 320 214	35	581	Andesita Porfírica
EG-43 (M-10)	490 840	8 319 917	490 869	8 319 938	35	718	Hornfels Alterado
EG-44 (M-10)	491 054	8 320 042	491 081	8 320 054	30	715	Magnetita
EG-45 (M-10)	490 974	8 320 009	490 996	8 320 020	25	715	Zona de Óxidos
EG-46 (M-10)	490 586	8 320 214	490 629	8 320 239	50	620	Hornfels Alterado
EG-47 (M-10)	490 715	8 320 286	490 750	8 320 305	40	629	Hornfels Alterado
EG-48 (M-10)	491 089	8 320 103	491 124	8 320 122	40	668	Hornfels Alterado
EG-49 (M-10)	491 330	8 320 168	491 377	8 320 150	50	690	Hornfels Alterado

*Sistema de Coordenadas en PSAD-56.

En la **Tabla 20** se presenta un resumen de las estaciones geomecánicas ubicadas en la Mina 10.

Tabla 20: Resumen de las Estaciones Geomecánicas Ubicadas en la Mina 10

Estación Geomecánica	Inicio		Final		Longitud	Nivel	Litología
	Este	Norte	Este	Norte			
EG-01'(M-10)	490 392	8 319 816	490 477	8 319 869	100	569	Hornfels –Magnetita
EG-02'(M-10)	490 490	8 319 875	490 577	8 319 924	100	569	Magnetita – Hornfels
EG-03'(M-10)	490 667	8 319 936	490 798	8 319 987	140	545	Magnetita – Andesita
EG-04'(M-10)	490 920	8 319 016	490 944	8 319 972	50	545	Magnetita – Hornfels
EG-05'(M-10)	490 851	8 319 870	490 718	8 319 801	150	581	Magnetita – Hornfels – Andesita
EG-06'(M-10)	490 692	8 319 781	490 612	8 319 721	100	581	Hornfels – Magnetita
EG-07'(M-10)	490 492	8 319 713	490 399	8 319 676	100	569	Magnetita – Hornfels
EG-08'(M-10)	490 386	8 320 688	490 379	8 319 758	70	569	Magnetita - Hornfels

*Sistema de Coordenadas en WGS-84.

En el **Anexo A-3: Registros de Mapeo Geomecánico**, se presentan solo unos registros representativos de las mediciones obtenidas en las estaciones geomecánicas por el método de líneas de detalle (**Anexo A-3.1**). En la **Figura 46** hasta la **Figura 48**, se presenta como ejemplo una de las estaciones geomecánicas ubicadas en la Mina 9-10.



Figura 46. Vista de la EG-03', Nivel 545 donde se realizó la línea de detalle de 140 m de longitud. Con dirección de buzamiento del talud: 159° y buzamiento de talud: 72°.



Figura 47. Vista de la EG-30, Nivel 641 donde se realizó la línea de detalle de 50 m de longitud. Con dirección de buzamiento del talud: 350° y buzamiento de talud: 66°.



Figura 48. Vista de la EG-05, Nivel 713 donde se realizó la línea de detalle de 50 m de longitud. Con dirección de buzamiento del talud: 018° y buzamiento de talud: 58° .

En el *Anexo A-11*, se presenta el *Plano PL-GG-016: Ubicación de Investigaciones Geotécnicas*, donde se presenta la ubicación de las estaciones Geomecánicas.

3.3.2 Mediciones de la rugosidad con el peine de barton

Para determinar los parámetros de rugosidad superficial de las fracturas o discontinuidades principales, se realizaron mediciones con el Peine de Barton, las mediciones brindan un perfil de la superficie de rugosidad de las juntas, el cual se compara con una escala de perfiles de rugosidad propuesta por Barton. Cada perfil de rugosidad tiene asignado un valor de clasificación JRC, que varía entre 0 y 20 (JRC = Coeficiente de Rugosidad de la Junta).

Los valores de JRC obtenidos directamente de las mediciones con el peine de Barton se presentan en las *Tablas 21 y 22*. En el *Anexo A-2.4* se presenta un registro fotográfico representativo, donde se pueden observar los perfiles de las discontinuidades mapeadas en las estaciones geomecánicas y su respectivo JRC.



Tabla 21: Resultado del Peine de Barton de la Mina 10 en la parte inferior.

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Coefficiente de Rugosidad (JRC)	Clasificación
EG-01'	Hornfels – Magnetita	569	12	Lig. Rugosa
EG-02'	Magnetita – Hornfels	569	10	Lig. Rugosa
EG-03'	Magnetita – Andesita	545	8	Lig. Rugosa
EG-04'	Magnetita – Hornfels	545	12	Lig. Rugosa
EG-05'	Magnetita – Hornfels – Andesita	581	8	Lig. Rugosa
EG-06'	Hornfels – Magnetita	581	12	Lig. Rugosa
EG-07'	Magnetita – Hornfels	569	10	Lig. Rugosa
EG-08'	Magnetita - Hornfels	569	12	Lig. Rugosa

Tabla 22: Resultado del Peine de Barton de la mina 9-10

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Coefficiente de Rugosidad (JRC)	Clasificación
EG-01 (Mina 9)	Hornfels	725	12	Lig. Rugosa
EG-02 (Mina 9)	Hornfels	724	4	Lisa
EG-03 (Mina 9)	Hornfels	726	12	Lig. Rugosa
EG-04 (Mina 9)	Hornfels Alterado	715	12	Lig. Rugosa
EG-05 (Mina 9)	Hornfels Alterado	714	16	Rugosa
EG-06 (Mina 10)	Arenisca Poco Consolidada	724	12	Lig. Rugosa
EG-07 (Mina 9)	Magnetita	734	5	Lisa
EG-08 (Mina 10)	Hornfels	702	5	Lisa
EG-09 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	703	12	Lig. Rugosa
EG-10 (Mina 10)	Hornfels	701	20	Muy Rugosa
EG-11 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	629	5	Lisa
EG-12 (Mina 10)	Hornfels	628	2	Lisa
EG-13 (Mina 10)	Hornfels	629	16	Rugosa
EG-14 (Mina 10)	Hornfels Alterado	702	4	Lisa
EG-15 (Mina 10)	Hornfels	702	2	Lisa
EG-16 (Mina 10)	Hornfels	701	8	Lig. Rugosa
EG-17 (Mina 10)	Hornfels Alterado	677	6	Lisa
EG-18 (Mina 10)	Zona de Óxidos	678	12	Lig. Rugosa
EG-19 (Mina 10)	Hornfels	678	10	Lig. Rugosa
EG-20 (Mina 10)	Hornfels	677	4	Lisa
EG-21 (Mina 10)	Hornfels	678	2	Lisa
EG-22 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	677	12	Lig. Rugosa
EG-23 (Mina 10)	Hornfels	679	10	Lig. Rugosa
EG-24 (Mina 10)	Hornfels	678	16	Rugosa
EG-25 (Mina 10)	Hornfels	676	20	Muy Rugosa
EG-26 (Mina 10)	Hornfels	677	2	Lisa

EG-27 (Mina 10)	Zona de Óxidos	641	8	Lig. Rugosa
EG-28 (Mina 10)	Zona de Óxidos	678	5	Lisa
EG-29 (Mina 10)	Pórfido Andesítico	703	6	Lisa
EG-30 (Mina 10)	Zona de Óxidos	642	20	Muy Rugosa
EG-31 (Mina 10)	Hornfels	640	10	Lig. Rugosa
EG-32 (Mina 10)	Hornfels Alterado	642	4	Lisa
EG-33 (Mina 10)	Hornfels	678	8	Lig. Rugosa
EG-34 (Mina 10)	Hornfels	626	4	Lisa
EG-35 (Mina 10)	Hornfels	620	10	Lig. Rugosa
EG-36 (Mina 10)	Hornfels	594	8	Lig. Rugosa
EG-37 (Mina 10)	Hornfels	672	10	Lig. Rugosa
EG-38 (Mina 10)	Hornfels	646	6	Lisa
EG-39 (Mina 10)	Magnetita	658	5	Lisa
EG-40 (Mina 10)	Hornfels	624	2	Lisa
EG-41 (Mina 10)	Hornfels	642	10	Lig. Rugosa
EG-42 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	581	8	Lig. Rugosa
EG-43 (Mina 10)	Hornfels Alterado	718	10	Lig. Rugosa
EG-44 (Mina 10)	Magnetita	715	12	Rugosa
EG-45 (Mina 10)	Zona de Óxidos	715	10	Lig. Rugosa
EG-46 (Mina 10)	Hornfels Alterado	620	8	Lig. Rugosa
EG-47 (Mina 10)	Hornfels Alterado	629	6	Lisa
EG-48 (Mina 10)	Hornfels Alterado	668	16	Muy Rugosa
EG-49 (Mina 10)	Hornfels Alterado	690	16	Muy Rugosa

En la **Figura 49** hasta **Figura 51**, se presenta como ejemplo una vista del Peine de Barton con el correspondiente perfil de rugosidad de una de las discontinuidades de la EG-01 durante el estudio de actualización.



Figura 49. Estación Geomecánica 02 (EG – 02), Nivel 569, Cara Norte, Mina 10.



Figura 50. Foto de la Estación Geomecánica 03 (EG – 03), Nivel 725, Cara Norte, Mina 9.



Figura 51. Foto de la Estación Geomecánica 03 (EG – 03'), Nivel 545, Cara Norte, Mina 10.

3.3.3 Ensayos con el martillo schmidt

Para poder hallar los parámetros de resistencia de las discontinuidades se ejecutaron ensayos con el Martillo Schmidt en las discontinuidades ya identificadas de las estaciones geomecánicas. Los resultados obtenidos de los ensayos con el Martillo Schmidt y su posterior procesamiento se presentan en el *Anexo A-7.1: Parámetros de Resistencia de las Discontinuidades*, donde a partir del ángulo de fricción básico (Tilt Test) y de los valores de rebote r y R (Martillo Schmidt) es posible calcular el ángulo de fricción residual de las discontinuidades.

En las **Figura 52** y la **Figura 53** se observa la ejecución de los ensayos ejecutados con el Martillo Schmidt.



Figura 52. Vista de ejecución del ensayo del Martillo Schmidt en la estación geomecánica EG-41.



Figura 53. Vista de ejecución del ensayo del Martillo Schmidt en la estación geomecánica EG-26.

3.3.4 Ensayos de inclinación o tilt test

El ensayo de inclinación permite estimar el ángulo de fricción básico de las discontinuidades, el cual es necesario para el posterior cálculo del ángulo de fricción residual. Para la ejecución del ensayo se utiliza un bloque de roca que contenga un plano de discontinuidad, dicho bloque se coloca sobre una superficie de apoyo y a continuación, se inclina el plano de apoyo hasta que comience a deslizarse un fragmento de rocas sobre otro. En el momento que se inicia el desplazamiento se mide el ángulo de apoyo con respecto a la horizontal (α).

Los ángulos de fricción básicos obtenidos de este ensayo serán utilizados para definir la resistencia al corte de las discontinuidades de acuerdo con el criterio de rotura de Barton y Choubey (1977), con la finalidad de la evaluación de estabilidad local a nivel de bancos de los taludes de la Mina 9-10.

Para obtener el ángulo de fricción básico de las discontinuidades (Φ_b) a partir de las



lecturas de α , se utiliza la siguiente relación:

$$\tan \phi_b = 1.155 \tan \alpha$$

Dónde:

- Φ_b : Ángulo de fricción básico de la discontinuidad.
- α : Ángulo medido directamente del ensayo Tilt Test.

En la **Tabla 23** y **24** se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo.

Tabla 23: Resultado de los Ensayos de prueba de inclinación (Tilt Test)

Estación Geomecánica	Nivel	Litología	Ángulo de Fricción Básico (Φ_b)
EG-01'	569	Hornfels – Magnetita	30.6
EG-02'	569	Magnetita – Hornfels	29.1
EG-03'	545	Magnetita – Andesita	30.2
EG-04'	545	Magnetita – Hornfels	29.6
EG-05'	581	Magnetita – Hornfels – Andesita	31.4
EG-06'	581	Hornfels – Magnetita	28.8
EG-07'	569	Magnetita – Hornfels	31.6
EG-08'	569	Magnetita - Hornfels	30.0

Tabla 24: Resultado de los Ensayos de prueba de inclinación (Tilt Test)

Estación Geomecánica	Nivel	Litología	Ángulo de Fricción Básico (Φ_b)
EG-01 (Mina 9)	725	Hornfels	32.6
EG-02 (Mina 9)	724	Hornfels	28.0
EG-03 (Mina 9)	726	Hornfels	27.0
EG-04 (Mina 9)	715	Hornfels Alterado	30.0
EG-05 (Mina 9)	714	Hornfels Alterado	33.0
EG-06 (Mina 10)	724	Arenisca Poco Consolidada	28.0
EG-07 (Mina 9)	734	Magnetita	27.0
EG-08 (Mina 10)	702	Hornfels	26.0
EG-09 (Mina 10)	703	Andesita Porfirítica	28.0
EG-10 (Mina 10)	701	Hornfels	28.0
EG-11 (Mina 10)	629	Andesita Porfirítica	28.0
EG-12 (Mina 10)	628	Hornfels	32.0
EG-13 (Mina 10)	629	Hornfels	28.0
EG-14 (Mina 10)	702	Hornfels Alterado	26.0
EG-15 (Mina 10)	702	Hornfels	24.0



Estación Geomecánica	Nivel	Litología	Ángulo de Fricción Básico (Φ_b)
EG-16 (Mina 10)	701	Hornfels	26.0
EG-17 (Mina 10)	677	Hornfels Alterado	32.0
EG-18 (Mina 10)	678	Zona de Óxidos	27.0
EG-19 (Mina 10)	678	Hornfels	26.0
EG-20 (Mina 10)	677	Hornfels	29.0
EG-21 (Mina 10)	678	Hornfels	23.0
EG-22 (Mina 10)	677	Andesita Porfirítica	25.0
EG-23 (Mina 10)	679	Hornfels	24.0
EG-24 (Mina 10)	678	Hornfels	27.0
EG-25 (Mina 10)	676	Hornfels	28.0
EG-26 (Mina 10)	677	Hornfels	27.0
EG-27 (Mina 10)	641	Zona de Óxidos	23.0
EG-28 (Mina 10)	678	Zona de Óxidos	22.0
EG-29 (Mina 10)	703	Pórfido Andesítico	28.0
EG-30 (Mina 10)	642	Zona de Óxidos	27.0
EG-31 (Mina 10)	640	Hornfels	23.0
EG-32 (Mina 10)	642	Hornfels Alterado	26.0
EG-33 (Mina 10)	678	Hornfels	27.0
EG-34 (Mina 10)	626	Hornfels	25.0
EG-35 (Mina 10)	620	Hornfels	24.0
EG-36 (Mina 10)	594	Hornfels	27.0
EG-37 (Mina 10)	672	Hornfels	28.0
EG-38 (Mina 10)	646	Hornfels	28.0
EG-39 (Mina 10)	658	Magnetita	25.0
EG-40 (Mina 10)	624	Hornfels	30.0
EG-41 (Mina 10)	642	Hornfels	30.0
EG-42 (Mina 10)	581	Andesita Porfirítica	25.0
EG-43 (Mina 10)	718	Hornfels Alterado	26.0
EG-44 (Mina 10)	715	Magnetita	25.0
EG-45 (Mina 10)	715	Zona de Óxidos	24.0
EG-46 (Mina 10)	620	Hornfels Alterado	26.0
EG-47 (Mina 10)	629	Hornfels Alterado	25.0
EG-48 (Mina 10)	668	Hornfels Alterado	24.0
EG-49 (Mina 10)	690	Hornfels Alterado	25.0

En la *Figura 54* y *Figura 55*, se presenta como ejemplo una vista de la ejecución del ensayo Tilt Test en una estación geomecánica durante el estudio de actualización.



Figura 54. Ensayo Tilt Test, Estación Geomecánica EG-13

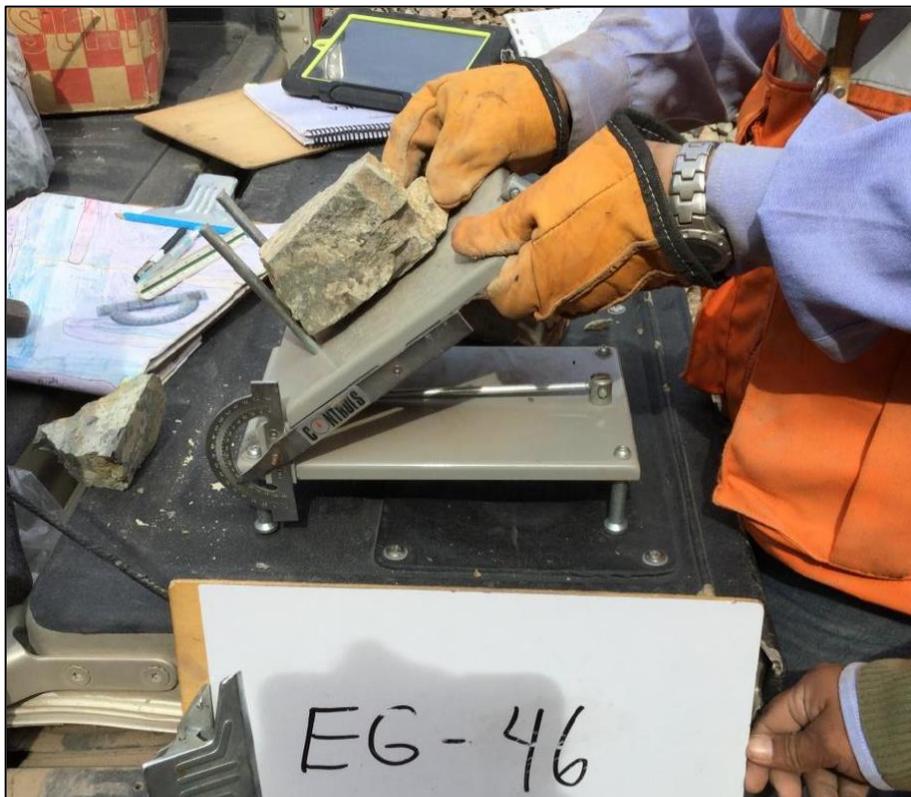


Figura 55. Ensayo Tilt Test, Estación Geomecánica EG-46



Los ángulos de fricción básicos obtenidos del ensayo de corte directo se encuentran comprendidos entre 29.58° y 31.51° , para poder definir el ángulo de fricción básico a utilizar en la evaluación el estado de tensiones de los taludes a nivel local (bancos), se ha considerado el promedio entre los valores obtenidos del ensayo de inclinación (tilt test) y del corte directo (considerando estaciones geomecánicas cercanas a los puntos de ensayo de corte directo).

El resumen de los ángulos de fricción básicos utilizados en el análisis se presenta en la **Tabla 25**.

Tabla 25: *Ángulo de Fricción Básico Promedio de las Discontinuidades*

Estación Geomecánica	Nivel	Litología	Φ_b (Tilt Test)	Φ_b (Corte Directo)	Φ_b (Promedio)
EG-01 (Mina 9)	725	Hornfels	32.6	30.7	31.7
EG-02 (Mina 9)	724	Hornfels	28.0	30.7	29.4
EG-03 (Mina 9)	726	Hornfels	27.0	30.7	28.9
EG-04 (Mina 9)	715	Hornfels Alterado	30.0	30.7	30.4
EG-05 (Mina 9)	714	Hornfels Alterado	33.0	30.7	31.9
EG-06 (Mina 10)	724	Arenisca Poco Consolidada (*)	28.0	-	28.0
EG-07 (Mina 9)	734	Magnetita	27.0	31.4	29.2
EG-08 (Mina 10)	702	Hornfels	26.0	30.7	28.4
EG-09 (Mina 10)	703	Andesita Porfírica	28.0	30.8	29.4
EG-10 (Mina 10)	701	Hornfels	28.0	30.7	29.4
EG-11 (Mina 10)	629	Andesita Porfírica	28.0	30.8	29.4
EG-12 (Mina 10)	628	Hornfels	32.0	30.7	31.4
EG-13 (Mina 10)	629	Hornfels	28.0	30.7	29.4
EG-14 (Mina 10)	702	Hornfels Alterado	26.0	30.7	28.4
EG-15 (Mina 10)	702	Hornfels	24.0	30.7	27.4
EG-16 (Mina 10)	701	Hornfels	26.0	30.7	28.4
EG-17 (Mina 10)	677	Hornfels Alterado	32.0	30.7	31.4
EG-18 (Mina 10)	678	Zona de Óxidos	27.0	29.6	28.3
EG-19 (Mina 10)	678	Hornfels	26.0	30.7	28.4
EG-20 (Mina 10)	677	Hornfels	29.0	30.7	29.9
EG-21 (Mina 10)	678	Hornfels	23.0	30.7	26.9
EG-22 (Mina 10)	677	Andesita Porfírica	25.0	30.8	27.9
EG-23 (Mina 10)	679	Hornfels	24.0	30.7	27.4
EG-24 (Mina 10)	678	Hornfels	27.0	30.7	28.9
EG-25 (Mina 10)	676	Hornfels	28.0	30.7	29.4
EG-26 (Mina 10)	677	Hornfels	27.0	30.7	28.9
EG-27 (Mina 10)	641	Zona de Óxidos	23.0	29.6	26.3



EG-28 (Mina 10)	678	Zona de Óxidos	22.0	29.6	25.8
EG-29 (Mina 10)	703	Pórfido Andesítico	28.0	30.8	29.4
EG-30 (Mina 10)	642	Zona de Óxidos	27.0	29.6	28.3
EG-31 (Mina 10)	640	Hornfels	23.0	30.7	26.9
EG-32 (Mina 10)	642	Hornfels Alterado	26.0	30.7	28.4
EG-33 (Mina 10)	678	Hornfels	27.0	30.7	28.9
EG-34 (Mina 10)	626	Hornfels	25.0	30.7	27.9
EG-35 (Mina 10)	620	Hornfels	24.0	30.7	27.4
EG-36 (Mina 10)	594	Hornfels	27.0	30.7	28.9
EG-37 (Mina 10)	672	Hornfels	28.0	30.7	29.4
EG-38 (Mina 10)	646	Hornfels	28.0	30.7	29.4
EG-39 (Mina 10)	658	Magnetita	25.0	31.4	28.2
EG-40 (Mina 10)	624	Hornfels	30.0	30.7	30.4
EG-41 (Mina 10)	642	Hornfels	30.0	30.7	30.4
EG-42 (Mina 10)	581	Andesita Porfírica	25.0	30.8	27.9
EG-43 (Mina 10)	718	Hornfels Alterado	26.0	30.7	28.4
EG-44 (Mina 10)	715	Magnetita	25.0	31.4	28.2
EG-45 (Mina 10)	715	Zona de Óxidos	24.0	29.6	26.8
EG-46 (Mina 10)	620	Hornfels Alterado	26.0	30.7	28.4
EG-47 (Mina 10)	629	Hornfels Alterado	25.0	30.7	27.9
EG-48 (Mina 10)	668	Hornfels Alterado	24.0	30.7	27.4
EG-49 (Mina 10)	690	Hornfels Alterado	25.0	30.7	27.9

(*) Roca andesita, para el ángulo de fricción básico promedio solo se tomaron los resultados del ensayo del tilt test, ya que no se ejecutaron ensayos de corte directo en esta litología.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5 Ensayo de tomografía eléctrica

La Tomografía Eléctrica, es una técnica geofísica que consiste en determinar la distribución de la resistividad del suelo dentro de un ámbito espacial limitado, a partir de un número muy elevado de mediciones realizadas desde la superficie del terreno. Las profundidades de penetración de los métodos eléctricos están directamente relacionadas con la configuración geométrica de la adquisición, número y separación de los electrodos y depende de la resistividad del medio.

3.3.5.1 Etapa de campo

Se realizó el ensayo de tomografía eléctrica debido a que SHP registró presencia de agua en taladros de perforación en el fondo del tajo, por lo que es de interés conocer si el nivel de agua se encuentra próximo al fondo del tajo actual.



Durante la ejecución del estudio de actualización, se realizaron tres líneas de tomografía eléctrica en los niveles inferiores de la Mina 10, las cuales tuvieron una longitud de 150 m cada una. Para la ejecución del levantamiento de tomografía eléctrica, se ha utilizado un Resistivímetro de la marca IRIS, modelo SYSCAL PRO10CH, que permite la medida automática de la resistividad del suelo y cuyos parámetros de medida fueron:

- Configuración: Polo Dipolo.
- Espaciamiento: Correlativa.
- Stacks Min/Max.: 4 - 10.
- Quality Factor: 2
- Reading: Promedio
- Voltaje: Auto compensado
- Medición por lectura: 2 a 4

Para realizar el trabajo se han seguido las siguientes actividades:

Reconocer la zona de estudio: Consiste en realizar un análisis visual del terreno donde se va realizar el ensayo, evaluando la accesibilidad del terreno y los riesgos/peligros que puedan suscitarse. El resultado de este proceso es mejorar y hasta replantear la ubicación y dirección de las líneas de tomografía eléctrica.

Instalación de equipos y cables: Este procedimiento nos permite ubicar el equipo eléctrico, según el número de tendidos previamente ya planeado. Posteriormente, se procede a instalar los cables y electrodos de acuerdo con el método a realizar en campo, así como ubicar los puntos de fuente de energía eléctrica según sea el caso. Para el caso particular de la sísmica, los puntos de disparo podrán modificarse conforme se adquiere los datos con la intención de mejorar la adquisición y lograr los objetivos planeados.

Toma de datos: El operador del equipo, geofísico de campo, define y califica los datos conforme se van adquiriendo, indicando repeticiones, según sea conveniente o necesario. El resultado debe de ser la mejor calidad de la información.

Finalización de Toma de Datos: Culminada la labor, el operador del equipo de tomografía eléctrica, comunica al personal el recojo de todos los equipos para la movilización a otro punto. Cabe señalar que al finalizar el levantamiento el responsable de grupo verifica si todo el equipo fue recogido y si no hay restos contaminantes.



Figura 56. Vista de la línea de tomografía eléctrica TM-01 en Mina 9-10



Figura 57. Vista de la línea de tomografía eléctrica TM-03 en Mina 9-10

3.3.5.2 Etapa de gabinete

En este proceso se consideran los siguientes pasos:

Análisis de Datos: Esta etapa inicial consiste en calificar la información de las diversas pulsaciones de corriente (proceso que se realiza en campo); ya en las oficinas se verifica y se obtiene una base de datos final de acuerdo con los patrones de respuesta. Dicha calificación se hace para descartar aquellos datos dudosos o anómalos. Este proceso se realiza con el programa RES2DINV.

Procesamiento de Datos: Definida la base de datos aceptable, se procede a procesar y generar secciones de resistividad aparente (en ohm.m), seguidamente se define y califica



los datos de intensidad de corriente y voltaje (I y V_p en miliamperios y voltios respectivamente), durante este proceso se agrega para cada punto de medida la corrección topográfica con la necesidad de generar una tabla de datos y hacer uso del software de procesamiento de imágenes. Posteriormente, se obtiene la sección de resistividad “verdadera”, empleando el software de inversión de datos geoelectricos RES2DINV y aplicando algoritmos matemáticos. Estas secciones representan la distribución del parámetro de resistividad en el suelo, de acuerdo con sus propiedades físicas.

Consideración de Interpretación: De acuerdo con la literatura y la experiencia adquirida, para poder hacer una interpretación de las secciones de resistividad se debe tener en consideración algunos factores:

- Grado de saturación del terreno.
- Presencia de fracturas y/o fallas
- Porosidad y el tipo o forma de los poros
- La salinidad del fluido
- El tipo y composición de la roca
- La temperatura
- Los procesos geológicos que afectan a los materiales
- La presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico.

Se debe tener en cuenta que existe una directa relación entre la resistividad eléctrica y el grado de saturación del terreno, y que los valores pueden variar significativamente. En tal sentido, se debe tener claro el incremento o disminución de fluidos en el terreno ya sea en superficie o en profundidad, ya que se verán reflejados en las secciones de interpretación 2D.

3.3.5.3 Interpretación

Para la ejecución del levantamiento de tomografía eléctrica, se ha definido rangos de



resistividad, con la necesidad de delimitar el subsuelo e interpretar las secciones 2D realizadas, obteniéndose la siguiente nomenclatura mostrada en la **Tabla 26**.

Tabla 26: *Resultados del Ensayo de Tomografía Eléctrica*

Línea de Tomografía	Número de Zonas	Resistividad ($\Omega.m$)	Descripción
LM-01	Capa 1	50 - 2400	Material de alta resistividad, macizo rocoso fracturado y/o material que conforma los accesos, compacto por el paso de vehículos. Asociado a la presencia de roca hornfels de regular calidad geomecánica y a los diques de andesita presentes.
	Capa 2	6 - 50	Material de moderada resistividad, asociado al macizo rocoso fracturado, húmedo. Asociado a la presencia de roca hornfels de regular calidad geomecánica y a los diques de andesita presentes.
	Capa 3	0.30 - 6	Macizo rocoso, probablemente con presencia de agua. Este nivel se encontraría a los 5 o 6 respecto del fondo actual del tajo.
LM -02	Capa 1	50 - 150	Material de alta resistividad, macizo rocoso fracturado y/o material que conforma los accesos, compacto por el paso de vehículos. Asociado a la presencia de roca hornfels de regular calidad geomecánica y a los diques de andesita presentes.
	Capa 2	10 - 50	Material de moderada resistividad, asociado al macizo rocoso fracturado, húmedo. Asociado a la presencia de roca hornfels de regular calidad geomecánica y a los diques de andesita presentes.
	Capa 3	0.5 - 10	Macizo rocoso, probablemente con presencia de agua. Este nivel se encontraría a los 5 o 6 respecto del fondo actual del tajo.
LM -03	Capa 1	6 - 10	Material de moderada resistividad, macizo rocoso fracturado y/o material que conforma los accesos, compacto por el paso de vehículos. Asociado a la presencia de roca hornfels de regular calidad geomecánica y a los diques de andesita presentes.
	Capa 2	1 - 6	Material de moderada resistividad, asociado al macizo rocoso fracturado, húmedo. Asociado a la presencia de roca hornfels de regular calidad geomecánica y a los diques de andesita presentes.
	Capa 3	0.5 - 1	Macizo rocoso, probablemente con presencia de agua. Este nivel se encontraría a los 4 o 5 respecto del fondo actual del tajo.

Fuente: Elaboración propia

De este ensayo se concluye que el nivel de agua se encontraría a una profundidad de entre 5 y 7 m respecto del nivel del fondo actual del tajo. El procesamiento y resultados de los ensayos de tomografía eléctrica se presentan en el **Anexo A-5: Ensayos Geofísicos**, donde se presentan los perfiles tomográficos obtenidos del procesamiento de los datos de



campo. En el **Anexo A-5.7** se presenta un registro fotográfico de los trabajos de campo realizados

3.3.6 Ensayos de refracción sísmica

Los objetivos principales para el ensayo de refracción sísmica se presentan en los siguientes puntos:

- Estimación de los espesores de los estratos de suelos o rocas, en función de las velocidades de onda primarias o de compresión (V_p).
- Estimación de las características dinámicas de los estratos en función de las velocidades de ondas P (V_p).
- Estimación de los parámetros de deformación dinámica de los suelos.

3.3.6.1 Equipos a utilizar

El equipo utilizado es Sismógrafo Smartseis ST, se utiliza para realizar el trabajo de prospección sísmica, posee un sistema que almacenamiento de datos adquiridos en campo y posterior procesamiento en una computadora; las características técnicas del equipo se presentan en la **Tabla 27**.

Tabla 27: Componentes del Sismógrafo

Características	Valor Nominal
Marca / Modelo / de Canales	Geometrics / Se 24 Smartseis / 24
Resistencia de Salida	> 600 Ohmios
Rango de Frecuencia	10 - 400 Hz
Filtro de Frecuencias	10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz.
Base de Ruido	63x(24 O 36 Db) 2%
Tiempo de Registro	64, 128, 256, 512, 1024, 2000 S
Tiempo de Retardo De Registro	0 - 999 Ms.
Tiempo de Prearranque	90% Duración General
Filtros	High, Notch, Low, Pasa Bandas
Intervalo de Muestreo	0.0625, 0125, 025, 0.5, 1 Y 2 Ms
Tensión de Alimentación	12 V
Potencia de Consumo	48 W

Fuente: Geometrics Instruments, 2014.



3.3.6.2 Metodología del Ensayo

El ensayo de refracción sísmica consiste en medir los tiempos de viaje de las ondas de compresión (primarias) los cuales son generados por el impacto de una comba sobre el disco metálico ejecutado por el personal de apoyo. Los impactos son localizados a diferentes distancias a lo largo de una línea del eje sobre la superficie del suelo.

El inicio de la grabación está dado por un dispositivo, o switch, que marca el tiempo cero a partir del cual se evalúa el tiempo del recorrido. Finalmente, la energía es detectada, amplificada y registrada de tal manera que puede determinarse el tiempo de arribo en cada punto y de esta manera, las velocidades de las ondas. Estos datos de tiempo y distancia obtenidos, variando el punto de disparo o la aplicación de energía, permiten evaluar las velocidades de propagación de las ondas P a través de los diferentes suelos cuya estructura, geometría y continuidad son investigadas.

Para los análisis de los datos se utilizó el método de “Delay Time” pues permite manejar criterios que utilizan la suposición de la Ley de Snell en cuanto a la reflexión y a la refracción de las ondas P. Los espesores y velocidades de ondas P determinadas pueden ser correlacionadas con la densidad de los estratos.

3.3.6.3 Trabajos de campo

Los ensayos de campo para la refracción sísmica se utilizó la estación portátil de prospección sísmica SMARTSEIS ST de 24 canales de registro, geófonos magnéticos y una laptop para almacenar datos.

En total se realizaron ensayos en 24 líneas sísmicas con una longitud de 100m, con espaciamiento de 4m entre geófonos, para generar las ondas fue producida por el impacto de choque de una comba de 25 libras contra un plato metálico.



En la **Tabla 28** se presentan un resumen de los ensayos de refracción sísmica realizados en la Mina 9-10.

Tabla 28: *Resumen de Ensayos de Refracción Sísmica*

Línea Sísmica	Coordenadas UTM (PSAD 56)		Longitud (m)	Nivel
	Inicio	Fin		
LS-01 (Mina 9)	499 000 E, 8 319 870 N	490 097 E, 8 319 850 N	100	732
LS-02 (Mina 9)	489 969 E, 8 319 950 N	489 999 E, 8 319 854 N	100	734
LS-03 (Mina 9)	489 986 E, 8 319 918 N	490 083 E, 8 319 941 N	100	732
LS-04 (Mina 9)	490 070 E, 8 319 979 N	490 165 E, 8 320 012 N	100	725
LS-05 (Mina 9)	489 967 E, 8 320 040 N	490 064 E, 8 320 063 N	100	726
LS-06 (Mina 9)	490 059 E, 8 320 065 N	490 158 E, 8 320 077 N	100	725
LS-07 (Mina 9)	490 162 E, 8 320 074 N	490 260 E, 8 320 056 N	100	725
LS-08 (Mina 9)	490 266 E, 8 320 060 N	490 358 E, 8 320 099 N	100	727
LS-09 (Mina 9)	490 236 E, 8 319 966 N	490 280 E, 8 319 876 N	100	725
LS-10 (Mina 9)	490 421 E, 8 320 218 N	490 428 E, 8 320 118 N	100	726
LS-11(Mina 9)	490 399 E, 8 320 048 N	490 419 E, 8 319 950 N	100	717
LS-12 (Mina 9)	490 311 E, 8 320 051 N	490 411 E, 8 320 050 N	100	714
LS-13 (Mina 10)	490 940 E, 8 319 965 N	491 040 E, 8 319 974 N	100	745
LS-14 (Mina 10)	490 890 E, 8 320 490 N	490 983 E, 8 320 527 N	100	746
LS-15 (Mina 10)	490 760 E, 8 320 440 N	490 850 E, 8 320 483 N	100	743
LS-16 (Mina 10)	490 475 E, 8 320 308 N	490 563 E, 8 320 353 N	100	745
LS-17 (Mina 10)	490 463 E, 8 320 204 N	490 548 E, 8 320 255 N	100	678
LS-18 (Mina 10)	490 992 E, 8 320 430 N	490 087 E, 8 320 464 N	100	642
LS-19 (Mina 10)	491 275 E, 8 320 429 N	491 327 E, 8 320 345 N	100	702
LS-20 (Mina 10)	491 225 E, 8 320 230 N	491 316 E, 8 320 270 N	100	650
LS-21 (Mina 10)	491 002 E, 8 320 118 N	491 090 E, 8 320 164 N	100	656
LS-22 (Mina 10)	490 818 E, 8 319 914 N	490 900 E, 8 319 971 N	100	715
LS-23 (Mina 10)	490 902 E, 8 320 173 N	490 983 E, 8 320 231 N	100	582
LS-24 (Mina 10)	490 581 E, 8 319 957 N	490 678 E, 8 319 980 N	100	640

A pesar que la longitud física de las líneas de refracción sísmica en campo es de 96 m, es práctica común en este tipo de trabajos que durante el procesamiento de las señales sísmicas se extrapolen los resultados en 2 m en cada uno de los extremos de la línea, lo que hace un total de 100 m de línea, por este motivo los perfiles de ondas P presentados en el *Anexo F.3* se observa que tienen 100 m de longitud.

3.3.6.4 Procesamiento de datos y su Interpretación

Los perfiles sísmicos obtenidos y su interpretación se realizaron mediante el grupo



de programas PickWin y PlotRefra (SeisImager). El programa PickWin nos permitirá realizar las lecturas de los sismogramas y además las lecturas nos permitirá obtener el tiempo de llegada de la primera onda (esto se realiza para los cinco shots o golpes).

El programa PlotRefra nos permite obtener un perfil bidimensional de ondas P (V_p) a partir de los datos de entrada generado por el programa PickWin, creando el gráfico de las curvas dromocrónicas, el cual nos permite distinguir los cambios de pendientes que representan la variación de las velocidades de ondas P del suelo estudiado. El programa también calcula las velocidades de onda de los estratos mediante la técnica de mínimos cuadrados, usando el método de tiempo de retardo para estimar las profundidades y, finalmente, ajusta las profundidades de cada estrato por efecto de la superficie topográfica. Este último proceso se hace de forma iterativa hasta encontrar el modelo que se ajuste a la geología superficial del terreno investigado.

Para determinar y caracterizar el tipo de material en función de la velocidad de propagación de la onda sísmica (V_p), se recomienda usar las tablas que correlacionan el valor de la velocidad con el tipo de material. En la **Tablas 29, 30 y 31** se presentan las principales correlaciones propuestas por diferentes autores.

Tabla 29: *Velocidades de Ondas P en Suelos y Rocas*

3.3.6.4.1.1.1 Tipo de Suelo	V_p (m/s)
Suelos intemperizados	240 - 610
Grava o arena seca	460 - 915
Arena saturada	1220 - 1830
Arcilla saturada	910 - 2750
Agua	1430 - 1665
Agua de mar	1460 - 1525
Arenisca	1830 - 3960
Esquistos, arcillas esquistosas	2750 - 4270
Tiza	1830 - 3960
Caliza	2130 - 6100



3.3.6.4.1.1.1 Tipo de Suelo	Vp (m/s)
Granito	4575 – 5800
Roca metamórfica	3050 - 7000

Fuente: ASTM D577-95

Tabla 30: *Velocidades de Ondas P en Suelos y Rocas Según Hellberg*

Tipo de Suelo	Vp (m/s)
Suelos de cobertura	< 1000
Roca muy fracturada o aluvión compacto	1000 - 2000
Roca fracturada o aluvión muy compacto	2000 - 4000
Roca poco fracturada	4000 - 5000
Roca sana	> 5000

Fuente: Hellberg (1990)

Tabla 31: *Velocidades de Ondas P en Suelos y Rocas Según Curvich y Dobrin*

Tipo de Suelo	Vp (m/s)
Esquisto arcilloso	2700 - 4800
Grava arcillosa seca	300 - 900
Arena – arena húmeda	200 - 1800
Roca metamórfica	4500 - 6800

Fuente: Curvich (1975), Dobrin (1961).

De acuerdo con la experiencia previa adquirida en este tipo de estudios, se considera que el suelo de cobertura se califica como suelto para valores de V_p menores que 500 m/s, denso para valores de V_p entre 500 y 700 m/s, y muy denso para valores de V_p entre 700 y 1000 m/s.

En la **Tabla 32** Se aprecia el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de refracción sísmica, para cada una de las líneas sísmicas, se tuvo en cuenta las correlaciones presentadas en las tablas anteriores y su descripción litológica local de cada zona donde se realizado los ensayos.

Tabla 32: Resultado de los Ensayos de Refracción Sísmica

Línea Sísmica	Mina / Nivel	Estrato	Rango de V_P (m/s)	V_P (m/s)	Profundidad Promedio (m)	Tipo de Material (*)
LS-01 (MASW-01)	Mina 9 Nivel 732	1	400 - 1000	650	0.00 a 1.50	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1600	1.50 a 6.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	2800	6.00 a 19.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4800	4500	19.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-02 (MASW-02)	Mina 9 Nivel 734	1	400 - 1000	650	0.00 a 5.00	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1450	5.00 a 13.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 3600	2700	13.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-03	Mina 9 Nivel 732	1	400 - 1000	700	0.00 a 2.00	Cobertura muy densa
		2	1000 - 2000	1719	2.00 a 6.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3050	6.00 a 14.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4800	4500	14.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-04	Mina 9 Nivel 725	1	400 - 1000	710	0.00 a 4.00	Cobertura muy densa
		2	1000 - 2000	1600	4.00 a 10.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3000	10.00 a 23.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4600	4500	23.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-05	Mina 9 Nivel 726	1	400 - 1000	585	0.00 a 3.50	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1700	3.50 a 11.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	2900	11.00 a 25.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4600	4500	25.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-06 (MASW-04)	Mina 9 Nivel 725	1	400 - 1000	550	0.00 a 3.00	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1680	3.00 a 8.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3100	8.00 a 20.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4800	4400	20.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-07	Mina 9 Nivel 725	1	400 - 1000	653	0.00 a 2.00	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1800	2.00 a 6.50	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	2800	6.50 a 16.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4800	4500	16.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-08	Mina 9 Nivel 727	1	400 - 1000	622	0.00 a 1.50	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1659	1.50 a 5.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3560	5.00 a 17.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4800	4500	17.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-09 (MASW-03)	Mina 9 Nivel 725	1	400 - 1000	640	0.00 a 5.00	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1450	5.00 a 12.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 3600	2800	12.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-10	Mina 9 Nivel 726	1	400 - 1000	632	0.00 a 2.00	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1700	2.00 a 7.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3000	7.00 a 18.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4800	4500	18.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-11	Mina 9 Nivel 717	1	400 - 1000	639	0.00 a 2.00	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1840	2.00 a 7.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	2750	7.00 a 18.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4800	4500	18.00 a 30.00	Roca poco fracturada



Línea Sísmica	Mina / Nivel	Estrato	Rango de V_P (m/s)	V_P (m/s)	Profundidad Promedio (m)	Tipo de Material (*)
LS-12	Mina 9 Nivel 714	1	400 - 1000	645	0.00 a 2.00	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1790	2.00 a 7.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3000	7.00 a 18.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4800	4500	18.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-13 (MASW-05)	Mina 10 Nivel 745	1	400 - 1000	710	0.00 a 3.00	Cobertura muy densa
		2	1000 - 2000	1800	3.00 a 12.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	2900	12.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-14 (MASW-06)	Mina 10 Nivel 746	1	400 - 1000	700	0.00 a 4.00	Cobertura muy densa
		2	1000 - 2000	1680	4.00 a 9.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3100	9.00 a 23.50	Roca fracturada
		4	4000 - 4600	4400	23.50 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-15	Mina 10 Nivel 743	1	400 - 1000	532	0.00 a 3.00	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1670	3.00 a 8.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	2200	8.00 a 21.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4800	4200	23.50 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-16	Mina 10 Nivel 745	1	400 - 1000	680	0.00 a 4.00	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1620	4.00 a 18.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 3000	2450	18.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-17 (MASW-07)	Mina 10 Nivel 678	1	400 - 1000	710	0.00 a 3.00	Cobertura muy densa
		2	1000 - 2000	1680	3.00 a 7.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3200	7.00 a 20.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4200	4100	20.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-18	Mina 10 Nivel 642	1	200 - 1000	680	0.00 a 2.50	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1550	2.50 a 6.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3100	6.00 a 16.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4200	4100	16.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-19	Mina 10 Nivel 702	1	200 - 1000	732	0.00 a 4.00	Cobertura muy densa
		2	1000 - 2000	1620	4.00 a 8.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3000	8.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-20	Mina 10 Nivel 650	1	400 - 1000	710	0.00 a 1.00	Cobertura muy densa
		2	1000 - 2000	1700	1.00 a 3.50	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3100	3.50 a 10.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4200	4100	10.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-21 (MASW-08)	Mina 10 Nivel 656	1	600 - 1000	720	0.00 a 1.00	Cobertura muy densa
		2	1000 - 2000	1680	1.00 a 4.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3300	4.00 a 12.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4200	4100	12.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-22	Mina 10 Nivel 715	1	200 - 1000	662	0.00 a 5.00	Cobertura densa
		2	1000 - 2000	1700	5.00 a 10.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3200	10.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-23 (MASW-09)	Mina 10 Nivel 582	1	600 - 1000	742	0.00 a 1.00	Cobertura muy densa
		2	1000 - 2000	1770	1.00 a 2.50	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3400	2.50 a 30.00	Roca fracturada



Línea Sísmica	Mina / Nivel	Estrato	Rango de V_P (m/s)	V_P (m/s)	Profundidad Promedio (m)	Tipo de Material (*)
LS-24 (MASW-10)	Mina 10 Nivel 640	1	400 - 1000	732	0.00 a 1.00	Cobertura muy densa
		2	1000 - 2000	1650	1.00 a 3.00	Roca muy fracturada
		3	2000 - 4000	3200	3.00 a 7.00	Roca fracturada
		4	4000 - 4800	4400	7.00 a 30.00	Roca poco fracturada

(*) Para la definición del grado de fracturamiento del macizo rocoso (sana, poco fracturada, fracturada, muy fracturada), se tomó como referencia los valores presentados en la Tabla 26 (Hellberg).

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el procesamiento de los datos y resultados de cada uno de los ensayos de refracción sísmica se presenta en el Anexo A-5: Ensayos Geofísicos, donde en el Anexo A-5.1 donde presentamos los registros de llegada de las ondas sísmicas, en el Anexo A-5.2 se presentan las curvas dromocrónicas, y en el Anexo A-5.3 se presentan los perfiles sísmicos de ondas P y las velocidades promedio.

3.3.7 Mediciones de ondas de superficie en arreglos multicanales - masw

Los objetivos principales para estos ensayos de MASW son los siguientes:

- Estimación de los perfiles estratigráficos del suelo en función de las velocidades de onda de corte V_s .
- Estimación de las características dinámicas de los estratos en función de las velocidades de ondas de corte V_s .
- Estimación de los parámetros de deformación dinámica de los suelos.

3.3.7.1 Procedimiento del Ensayo

El ensayo de MASW consiste en medir los tiempos de viaje de las ondas de corte (V_s), generadas por el impacto de una comba de 25 libras contra un plato metálico. Hay una diferencia principal en cuanto al ensayo de refracción sísmica, radica que para este método se emplean geófonos de 4.5 Hz de frecuencia, además los puntos de golpe se ubican a 0.2 L y 0.4 L, a los extremos de la línea (L es la longitud de la línea sísmica).



Finalmente, la energía generada es detectada, amplificada y registrada de tal manera que puede determinarse el tiempo de arribo en cada punto y de esta manera, las velocidades de las ondas S (V_s). Estos datos de tiempo y distancia obtenidos, variando el punto de disparo o la aplicación de energía, permiten evaluar las velocidades de propagación de las ondas S a través de los diferentes suelos cuya estructura, geometría y continuidad son investigadas.

3.3.7.2 Trabajo de Campo

Se realizaron diez ensayos MASW en la Mina 9-10, ubicados en el punto medio de las líneas de refracción sísmica. El resumen de la ubicación de los ensayos MASW se presenta en la *Tabla 33*.

Tabla 33: Resumen del Ensayo MASW – Mina 9-10

Ensayo	Coordenadas UTM (PSAD 56)	Su Ubicación
MASW-01	490 048 E, 8 319 860 N	En la línea sísmica LS-01, Mina 9 - Nivel 732
MASW-02	489 984 E, 8 319 901 N	En la línea sísmica LS-02, Mina 9 - Nivel 734
MASW-03	490 257 E, 8 319 923 N	En la línea sísmica LS-09, Mina 9 - Nivel 725
MASW-04	490 108 E, 8 320 071 N	En la línea sísmica LS-06, Mina 9 - Nivel 725
MASW-05	490 990 E, 8 319 969 N	En la línea sísmica LS-13, Mina 10 - Nivel 745
MASW-06	490 936 E, 8 320 508 N	En la línea sísmica LS-14, Mina 10 - Nivel 746
MASW-07	490 506 E, 8 320 228 N	En la línea sísmica LS-17, Mina 10 - Nivel 678
MASW-08	491 046 E, 8 320 141 N	En la línea sísmica LS-21, Mina 10 - Nivel 656
MASW-09	490 943 E, 8 320 202 N	En la línea sísmica LS-23, Mina 10 - Nivel 582
MASW-10	490 630 E, 8 319 969 N	En la línea sísmica LS-24, Mina 10 - Nivel 640

Fuente: Elaboración propia.

3.3.7.3 Procesamiento e Interpretación

Para el procesamiento de los registros de campo, se realizó la inversión de velocidades de las ondas S mediante el análisis de la dispersión de las ondas de superficie. Esto se debe a que éstas cuentan con un 98% de componente de onda S y menos de 2% de onda P. Las ondas de superficie pierden velocidad de fase de manera significativa mientras

la frecuencia de las mismas aumenta. Por esto, la dispersión de la onda de superficie ocurre por lo general entre 5 y 30 Hz.

Se ha procesado la información haciendo uso de los programas Surface Wave Analysis Wizard y Wave Eq (Surface Wave Analysis) de SeisImager, el primer programa nos muestra el gráfico de distancia versus tiempo, que luego mediante la transformada de Fourier se obtiene las curvas de velocidad de fase versus frecuencia en donde se puede ver la tendencia de la onda de fase que define la velocidad de la onda S, el cual nos permite obtener la curva de dispersión en el modo fundamental generada en el ensayo. El segundo programa permite obtener la variación de las velocidades de onda S con la profundidad mediante el proceso de inversión de ondas lo cual se desarrolla por procesos iterativos.

Para clasificar el suelo se consideró la clasificación del Código IBC (2009), que define el tipo y nombre del suelo de acuerdo a la velocidad promedio de los 30 m más superficiales (V_{s30}), tal como se presenta en la **Tabla 34**.

Tabla 34: Clasificación de los Suelos Según el Código IBC

Tipo de Suelo	Nombre de Suelo	Propiedades Promedio en los 30 Primeros Metros	
		Velocidad de Onda de Corte V_s (m/s)	Resistencia a la Penetración Estándar, N_{SPT}
A	Roca muy dura	$V_s > 1500$	No aplica
B	Roca	$760 < V_s < 1500$	No aplica
C	Suelo muy denso o roca blanda	$360 < V_s < 760$	$N_{SPT} > 50$
D	Suelo rígido	$180 < V_s < 360$	$15 < N_{SPT} < 50$
E	Suelo blando	$V_s < 180$	$N_{SPT} < 15$

Fuente: IBC (International Building Code), 2009.

En la **Tabla 35** se aprecia el resumen de los resultados del ensayo MASW y la clasificación del terreno de acuerdo a la clasificación del IBC.

Tabla 35: Resultados del Ensayo MASW – Mina 9-10

Ensayo	Ubicación	Estrato	V _{S30} (m/s)	Profundidad (m)	Tipo de Suelo ^(*) (Clasificación)
MASW-01	LS-01 Mina 9 (Nivel 732)	1	480	0.00 a 6.00	Roca muy fracturada Roca blanda (IBC)
		2	760	6.00 a 19.00	Roca fracturada Roca (IBC)
		3	900	19.00 a 30.00	Roca poco fracturada Roca muy dura (IBC)
MASW-02	LS-02 Mina 9 (Nivel 734)	1	300	0.00 a 5.00	Cobertura densa Suelo rígido (IBC)
		2	550	5.00 a 13.00	Roca muy fracturada Roca blanda (IBC)
		3	850	13.00 a 30.00	Roca fracturada Roca (IBC)
MASW-03	LS-09 Mina 9 (Nivel 725)	1	220	0.00 a 5.00	Cobertura densa Suelo rígido (IBC)
		2	450	5.00 a 12.00	Roca muy fracturada Roca blanda (IBC)
		3	700	12.00 a 30.00	Roca fracturada Roca blanda (IBC)
MASW-04	LS-06 Mina 9 (Nivel 725)	1	380	0.00 a 3.00	Cobertura densa Roca blanda (IBC)
		2	750	3.00 a 8.00	Roca muy fracturada Roca blanda (IBC)
		3	1100	8.00 a 20.00	Roca fracturada Roca (IBC)
		4	1200	20.00 a 30.00	Roca poco fracturada Roca (IBC)
MASW-05	LS-13 Mina 10 (Nivel 745)	1	200	0.00 a 3.00	Cobertura muy densa Suelo rígido (IBC)
		2	400	3.00 a 12.00	Roca muy fracturada Roca blanda (IBC)
		3	700	12.00 a 30.00	Roca fracturada Roca blanda (IBC)
MASW-06	LS-14 Mina 10 (Nivel 746)	1	180	0.00 a 4.00	Cobertura muy densa Suelo rígido (IBC)
		2	420	4.00 a 9.00	Roca muy fracturada Roca blanda (IBC)
		3	800	9.00 a 23.50	Roca fracturada Roca (IBC)
		4	1100	23.50 a 30.00	Roca poco fracturada Roca (IBC)
MASW-07	LS-17 Mina 10 (Nivel 678)	1	700	0.00 a 7.00	Roca muy fracturada Roca blanda (IBC)
		2	1100	7.00 a 20.00	Roca fracturada Roca (IBC)
		3	1700	20.00 a 30.00	Roca poco fracturada Roca muy dura (IBC)
MASW-08	LS-21 Mina 10 (Nivel 656)	1	760	0.00 a 4.00	Roca muy fracturada Roca blanda (IBC)
		2	1100	4.00 a 12.00	Roca fracturada Roca (IBC)
		3	1700	12.00 a 30.00	Roca poco fracturada Roca muy dura (IBC)
MASW-09	LS-23 Mina 10	1	1350	0.00 a 2.50	Roca muy fracturada Roca (IBC)



Ensayo	Ubicación	Estrato	V _{S30} (m/s)	Profundidad (m)	Tipo de Suelo ^(*) (Clasificación)
	(Nivel 582)	2	1400	2.50 a 30.00	Roca fracturada Roca (IBC)
MASW-10	LS-24 Mina 10 (Nivel 640)	1	1400	0.00 a 7.00	Roca fracturada Roca (IBC)
		2	1600	7.00 a 30.00	Roca poco fracturada Roca muy dura (IBC)

(*) Para la definición de la clasificación del macizo rocoso en función de las velocidades de ondas de corte Vs se tomó como referencia los valores presentados en la Tabla 30 (Código IBC). Adicionalmente, debido a que los ensayos MASW se ejecutaron en el punto medio de las líneas de refracción sísmica se incluyó la descripción del macizo rocoso de acuerdo a la clasificación de ondas P.

Fuente: Elaboración propia.

Las curvas de dispersión para cada ensayo MASW se presentan en el *Anexo F.4*. Se observa una muy buena resolución para los ensayos MASW-05 y MASW-06, que son los ensayos que se han ejecutado en el nivel superior de la Mina 10. Probablemente esto se deba a las pocas perturbaciones externas que se tuvo al realizar estos ensayos.

En los ensayos MASW-01, MASW-02, MASW-03 y MASW-04, ubicados en la Mina 9, se ha obtenido una señal con cierto grado de perturbación, pero aceptable. En los ensayos MASW-07, MASW-08, MASW-09 y MASW-10 el grado de perturbación fue mayor, sin embargo, aún es posible distinguir la señal con cierta nitidez.

En el *Anexo A-11*, se presenta el *Plano PL-GG-016: Ubicación de Investigaciones Geotécnicas*, donde se presenta la ubicación de las líneas sísmicas y de los ensayos MASW ejecutados.

3.3.8 Parámetros de deformación

Con la estimación de los valores de velocidad obtenidos de la propagación de ondas Vp y Vs obtenidos por los ensayos geofísicos y la densidad del terreno, mediante el cual se determina el Coeficiente de Poisson (μ), el Módulo de Elasticidad Dinámico (E_d), el Módulo de Corte Dinámico (G_d) y el Módulo Volumétrico Dinámico (K_d) de los suelos o macizos rocosos de acuerdo con las correlaciones de la mecánica de medios continuos, las cuales se



desarrollan en los siguientes Items.

- **Coefficiente de Poisson**

El Coeficiente de Poisson es una constante que proporciona una medida del estrechamiento de sección de una partícula de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.

Si se toma un prisma mecánico fabricado en el material cuyo Coeficiente de Poisson pretendemos medir y se somete este prisma a una fuerza de tracción aplicada sobre sus bases superior e inferior, el coeficiente de Poisson se puede medir como: la razón entre el alargamiento longitudinal producido dividido por el acortamiento de una longitud situada en un plano perpendicular a la dirección de la carga aplicada. Este valor coincide igualmente con el cociente de deformaciones laterales y longitudinales.

El Coeficiente de Poisson puede calcularse con la siguiente correlación:

$$\mu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 \cdot \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$$

Los coeficientes de Poisson obtenidos a partir de la correlación anterior, a menudo dan como resultado valores más elevados que los esperados (aproximadamente en un 25%), o incluso valores negativos cuando las velocidades de las ondas P y S tienen un orden de magnitud similar. Cuando sucede esto, es recomendable caracterizar los materiales con coeficientes de Poisson representativos para el tipo de suelo y/o roca. Se considera para suelos finos de cobertura μ varía entre 0.40 y 0.45, para suelos granulares de cobertura μ varía entre 0.30 y 0.40, para roca moderadamente fracturada μ varía entre 0.25 y 0.30 y para roca con poco fracturamiento μ varía entre 0.15 y 0.25.



Es recomendable hacer este ajuste debido a que el Coeficiente de Poisson es un parámetro de entrada para el cálculo del Módulo de Elasticidad del macizo rocoso.

De acuerdo con el resultado del ensayo de propiedades elásticas ejecutado en una muestra de roca intacta de hornfels (roca predominante en Mina 9-10), se obtuvo $m = 0.28$ para la roca intacta, por lo que es lógico que para la roca muy fracturada m sea de mayor magnitud ($m = 0.30$), debido a que la presencia de las discontinuidades confiere al macizo rocoso mayor capacidad de deformación.

- **Módulo de corte**

El Módulo de Corte (G_d) para pequeñas deformaciones puede calcularse a partir de la velocidad de ondas S (V_s) y de la densidad del material (γ), haciendo uso de la siguiente correlación:

$$G_d = \gamma \cdot V_s^2$$

- **Módulo de elasticidad**

El Módulo de Elasticidad (E_d) para pequeñas deformaciones puede calcularse a partir del Módulo de Corte (G_d) y del Coeficiente de Poisson, haciendo uso de la siguiente correlación de la mecánica de medios continuos:

$$E_d = 2 \cdot G_d (1 + \mu)$$

De acuerdo con el resultado del ensayo de propiedades elásticas ejecutado en una muestra de roca intacta de hornfels (roca predominante en Mina 9-10), se obtuvo $E = 17.8$ GPa para la roca intacta, por lo que es lógico que para la roca fracturada sea de menor magnitud (entre 1 y 9 GPa según las correlaciones geofísicas), debido a que la presencia de las discontinuidades confiere al macizo rocoso mayor capacidad de deformación.

- **Modulo volumétrico**

El Módulo Volumétrico (K_d) para pequeñas deformaciones puede calcularse a partir del Módulo de Elasticidad (E_d) y del Coeficiente de Poisson, haciendo uso de la siguiente correlación de la mecánica de medios continuos:

$$K_d = \frac{E_d}{3.(1-2\mu)}$$

Mediante el uso de las formulaciones anteriores y los resultados de los ensayos de velocidades de las ondas primarias V_p y ondas de corte V_s obtenidos de los ensayos geofísicos (refracción sísmica y MASW) se obtienen los parámetros de deformación de los estratos, los cuales se presentan en la **Tabla 36**.

Tabla 36: Veta Resumen de los Parámetros Dinámicos

Líneas Sísmicas y MASW	Mina Nivel	Velocidades de Onda		Densidad (T/m^3)	Coeficiente de Poisson m	Módulo de Corte Dinámico	Módulo de Elasticidad Dinámico	Módulo de Elasticidad Estático	
		V_p (m/s)	V_s (m/s)			G_d (kN/m^2)	E_d (kN/m^2)	E_e (kN/m^2)	E_e (kg/cm^2)
LS-01 y MASW-01	Mina 9 Nivel 732	650	300(*)	1.80	0.33	162000	442150	29477	301
		1600	480	2.20	0.30	506880	1317888	87859	897
		2800	760	2.30	0.27	1328480	3374339	224956	2295
		4500	900	2.50	0.25	2025000	5062500	506250	5166
LS-02 y MASW-02	Mina 9 Nivel 734	650	300	1.80	0.36	162000	442150	29477	301
		1450	550	2.20	0.30	665500	1730300	115353	1177
		2700	850	2.30	0.27	1661750	4220845	281390	2871
LS-09 y MASW-03	Mina 9 Nivel 725	640	220	1.80	0.33	87120	231739	15449	158
		1450	450	2.20	0.30	445500	1158300	77220	788
		2800	700	2.30	0.27	1127000	2862580	190839	1947
LS-06 y MASW-04	Mina 9 Nivel 725	550	380	1.80	0.33	259920	691387	46092	470
		1680	750	2.20	0.30	1237500	3217500	214500	2189
		3100	1100	2.30	0.27	2783000	7068820	471255	4809
		4400	1200	2.50	0.25	3600000	9000000	900000	9184
LS-13 y MASW-05	Mina 10 Nivel 745	710	200	1.80	0.33	72000	191520	12768	130
		1800	400	2.20	0.30	352000	915200	61013	623
		2900	700	2.30	0.27	1127000	2862580	190839	1947
LS-14 y	Mina 10	700	180	1.80	0.33	58320	155131	10342	106
		1680	420	2.20	0.30	388080	1009008	67267	686



Líneas Sísmicas y MASW	Mina Nivel	Velocidades de Onda		Densidad (T/m ³)	Coeficiente de Poisson <i>m</i>	Módulo de Corte Dinámico	Módulo de Elasticidad Dinámico	Módulo de Elasticidad Estático	
		Vp (m/s)	Vs (m/s)			G _d (kN/m ²)	E _d (kN/m ²)	E _e (kN/m ²)	E _e (kg/cm ²)
MASW-06	Nivel 746	3100	800	2.30	0.27	1472000	3738880	249259	2543
		4400	1100	2.50	0.25	3025000	7562500	756250	7717
LS-17 y MASW-07	Mina 10 Nivel 678	710	300 ^(*)	1.80	0.33	162000	430920	28728	293
		1680	700	2.20	0.30	1078000	2802800	186853	1907
		3300	1100	2.30	0.27	2783000	7068820	471255	4809
		4100	1700	2.50	0.25	7225000	18062500	1806250	18431
LS-21 y MASW-08	Mina 10 Nivel 656	720	300 ^(*)	1.80	0.33	162000	430920	28728	293
		1680	760	2.20	0.30	1270720	3303872	220258	2248
		3300	1100	2.30	0.27	2783000	7068820	471255	4809
		4100	1700	2.50	0.25	7225000	18062500	1806250	18431
LS-23 y MASW-09	Mina 10 Nivel 582	742	300 ^(*)	1.80	0.33	162000	430920	28728	293
		1770	1350	2.20	0.30	4009500	10424700	694980	7092
		3400	1400	2.30	0.27	4508000	11450320	763355	7789
LS-24 y MASW-10	Mina 10 Nivel 640	732	300 ^(*)	1.80	0.33	162000	430920	28728	293
		1650	1400	2.20	0.30	4312000	11211200	747413	7627
		3200	1400	2.30	0.27	4508000	11450320	763355	7789
		4400	1600	2.50	0.25	6400000	16000000	1600000	16327

(*) Asumido para cálculo de parámetros dinámicos de los materiales de cobertura (suelo).

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de la densidad promedio han sido estimados conservadoramente de acuerdo con la experiencia obtenida en este tipo de materiales, debido a que se refiere a la densidad del macizo rocoso y no a la densidad de la roca intacta (por este motivo no se consideró los resultados de propiedades índice de las rocas).

Con la finalidad de calcular los parámetros dinámicos de los materiales (**Tabla 29**), se consideró el valor de $V_s=300$ m/s para el material de cobertura de acuerdo a valores típicos para este tipo de materiales. Debido a que el ensayo MASW es un ensayo puntual que proporciona un registro unidimensional de V_s en un punto dado, en algunos casos este material de cobertura no se aprecia claramente; sin embargo, este material se observa de manera más clara en los perfiles de V_p obtenidos del ensayo de refracción sísmica, ya que proporciona un perfil sísmico bidimensional.



Mediante la revisión literatura técnica disponible, al dividir los parámetros dinámicos (definidos para pequeñas deformaciones) entre una constante que varía entre 10 y 20, se obtienen los denominados “parámetros estáticos”. Este criterio toma en consideración las curvas de degradación del módulo de corte respecto con la deformación cortante, en donde para un nivel de deformaciones en el que el material empieza el proceso de plastificación se tiene que el módulo de corte se ha reducido a un 10 - 20% de su valor máximo.

En este informe se ha dividido las propiedades dinámicas de los estratos 1, 2 y 3 (cobertura densa, roca muy fracturada y roca fracturada respectivamente) entre 15 (valor promedio); y las propiedades dinámicas del estrato 4 (roca fracturada) entre 10, debido a este estrato al estar más confinado sus propiedades dinámicas serán de mayor magnitud al deformarse menos.

El procesamiento y resultados de los ensayos MASW se presenta en el **Anexo A-5: Ensayos Geofísicos**, donde en el **Anexo A-5.4** se presentan las curvas de dispersión, en el **Anexo F.5** se presentan los perfiles sísmicos de ondas S obtenidos y en el **Anexo A-5.6** se presentan los resultados del procesamiento de las propiedades dinámicas del terreno.

3.3.9 Ensayos de laboratorio de mecánica de rocas

Se realizó un muestreo representativo de rocas dependiendo a los tipos de litologías encontradas en el área de investigada, en cantidad suficiente para poder realizar los ensayos de caracterización y resistencia. Las muestras han sido almacenadas y transportadas al laboratorio con mucho cuidado, evitando su manipulación excesiva. Asimismo, han permanecido correctamente identificadas.

3.3.9.1 Carga Puntual (PLT)

Con la finalidad de determinar los parámetros físico - mecánicos de los macizos



rocosos, para conocer la resistencia a la compresión simple en la roca intacta por ende se realizó el ensayo de carga puntual. Las muestras para la carga puntual se extrajeron en cada estación geomecánica ejecutada.

Los ensayos están basados en la norma ASTM D-5731 el cual consiste en comprimir los testigos de roca entre dos puntos situados en generatrices opuestas, generando así la deformación y rotura de la roca. Con los resultados de estos ensayos se obtiene el índice de carga puntual corregido I_{50} con el cual se obtiene la resistencia a la compresión de la roca intacta. En las **Tablas 37 y 38** se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo.

Tabla 37: Resultados de cada Ensayo de Carga Puntual

Estación Geomecánica / Muestra	Litología	Nivel	Dureza de la Roca	Resultados de la Resistencia a la Compresión Simple (MPa)		
				Máximo	Mínimo	Promedio
EG-01' / M-1	Hornfels – Magnetita	569	R4 – R5	222.00	94.32	148.96
EG-02' / M-1	Magnetita – Hornfels	569	R4 – R5	194.88	58.32	123.36
EG-03' / M-1	Magnetita – Andesita	545	R4 – R5	118.80	79.68	98.32
EG-03' / M-2	Magnetita – Andesita	545	R4 – R5	200.16	82.80	139.02
EG-04' / M-1	Magnetita – Hornfels	545	R4 – R5 – R6	270.24	60.96	145.36
EG-04' / M-2	Magnetita – Hornfels	545	R4 – R5	187.44	63.36	110.40
EG-05' / M-1	Magnetita – Hornfels – Andesita	581	R5	186.00	120.00	147.20
EG-06' / M-1	Hornfels – Magnetita	581	R4 – R5	168.72	62.16	127.60
EG-06' / M-2	Hornfels – Magnetita	581	R4 – R5	182.16	52.08	116.16
EG-07' / M-1	Magnetita – Hornfels	569	R4 – R5	220.08	66.48	165.12
EG-08' / M-1	Magnetita – Hornfels	569	R4 – R5	151.92	98.40	121.84
EG-08' / M-2	Magnetita – Hornfels	569	R4 – R5 – R6	285.12	64.56	194.48

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 38: Resultados de cada Ensayo de Carga Puntual

Estación Geomecánica / Muestra / Mina	Litología	Nivel	Dureza de la Roca	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)		
				Máximo	Mínimo	Promedio
EG-01 / M-1 / Mina 9	Hornfels	725	R4 – R5	146.64	89.04	103.63
EG-01 / M-2 / Mina 9	Hornfels	725	R4 – R5	183.84	58.32	100.75
EG-02 / M-1 / Mina 9	Hornfels	725	R5	171.36	110.88	136.37
EG-02 / M-2 / Mina 9	Hornfels	725	R5	192.72	131.76	159.60
EG-03 / M-1 / Mina 9	Hornfels	725	R5 – R6	280.08	126.72	185.81
EG-04 / M-1 / Mina 9	Hornfels Alterado	713	R4 – R5	169.92	84.48	123.31
EG-05 / M-1 / Mina 9	Hornfels Alterado	713	R3 – R4	77.76	42.00	64.90
EG-05 / M-2 / Mina 9	Hornfels Alterado	713	R5	135.36	102.96	119.38
EG-06 / M-1 / Mina 10	Arenisca Poco Consolidada	725	R2 – R3	25.20	14.64	19.82
EG-07 / M-1 / Mina 9	Magnetita	732	R5 – R6	255.84	166.56	217.30
EG-07 / M-2 / Mina 9	Magnetita	732	R5	238.32	127.44	175.01
EG-08 / M-1 / Mina 10	Hornfels	701	R5	150.00	105.36	121.25
EG-09 / M-1 / Mina 10	Andesita Porfirítica	701	R5	241.44	192.24	216.48
EG-10 / M-1 / Mina 10	Hornfels	701	R4 – R5	142.08	91.20	124.27
EG-11 / M-1 / Mina 10	Andesita Porfirítica	629	R5	222.24	182.16	206.30
EG-12 / M-1 / Mina 10	Hornfels	629	R4 – R5	172.80	97.68	131.62
EG-13 / M-1 / Mina 10	Hornfels	629	R5	202.80	150.48	181.87
EG-14 / M-1 / Mina 10	Hornfels Alterado	701	R5	192.48	120.48	147.50
EG-15 / M-1 / Mina 10	Hornfels	701	R4 – R5	170.40	90.48	125.04
EG-15 / M-2 / Mina 10	Hornfels	701	R5	238.56	108.72	171.31
EG-16 / M-1 / Mina 10	Hornfels	701	R5	186.72	130.80	152.02
EG-16 / M-2 / Mina 10	Hornfels	701	R4 – R5	126.00	86.88	111.84
EG-17 / M-1 / Mina 10	Hornfels Alterado	677	R4	97.68	70.56	86.83
EG-18 / M-1 / Mina 10	Zona de Óxidos	677	R4	97.68	83.28	91.44
EG-19 / M-1 / Mina 10	Hornfels	677	R3	42.24	30.48	35.81
EG-20 / M-1 / Mina 10	Hornfels	677	R5	165.60	156.00	162.72
EG-21 / M-1 / Mina 10	Hornfels	677	R5	154.80	113.28	137.81
EG-22 / M-1 / Mina 10	Andesita Porfirítica	677	R4 – R5	136.56	89.76	112.37
EG-23 / M-1 / Mina 10	Hornfels	677	R4 – R5	113.52	67.68	96.19
EG-24 / M-1 / Mina 10	Hornfels	677	R4	95.28	72.00	85.15
EG-25 / M-1 / Mina 10	Hornfels	677	R5	141.84	119.76	125.33
EG-26 / M-1 / Mina 10	Hornfels	677	R5	189.60	123.84	155.81
EG-26 / M-2 / Mina 10	Hornfels	677	R2 – R3 – R4	63.60	24.00	42.34
EG-27 / M-1 / Mina 10	Zona de Óxidos	641	R4 – R5	176.64	72.24	146.93



Estación Geomecánica / Muestra / Mina	Litología	Nivel	Dureza de la Roca	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)		
				Máximo	Mínimo	Promedio
EG-28 / M-1/ Mina 10	Zona de Óxidos	677	R2 – R3	36.24	21.60	30.29
EG-28 / M-2/ Mina 10	Zona de Óxidos	677	R3	46.56	26.88	39.07
EG-29 / M-1/ Mina 10	Pórfido Andesítico	701	R2 – R3 – R4	84.48	20.16	47.76
EG-30 / M-1/ Mina 10	Zona de Óxidos	641	R5	125.76	100.56	115.58
EG-31 / M-1/ Mina 10	Hornfels	641	R5 – R6	318.48	224.16	261.41
EG-32 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	641	R4 – R5	156.72	81.36	110.54
EG-33 / M-1/ Mina 10	Hornfels	665	R5	140.64	109.20	128.21
EG-34 / M-1/ Mina 10	Hornfels	629	R4	99.84	64.32	86.11
EG-35 / M-1/ Mina 10	Hornfels	617	R5	240.24	130.80	195.65
EG-36 / M-1/ Mina 10	Hornfels	593	R4 – R5	102.48	66.48	88.22
EG-37 / M-1/ Mina 10	Hornfels	677	R3 – R4	63.36	42.96	52.46
EG-38 / M-1/ Mina 10	Hornfels	641	R4 – R5	157.44	84.72	113.28
EG-39 / M-1/ Mina 10	Magnetita	654	R5	189.36	112.56	139.06
EG-40 / M-1/ Mina 10	Hornfels	617	R4 – R5	147.12	60.72	88.61
EG-41 / M-1/ Mina 10	Hornfels	641	R4 – R5	115.44	68.40	95.71
EG-42 / M-1/ Mina 10	Andesita Porfirítica	581	R5	210.96	133.92	180.00
EG-43 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	718	R4 – R6	250.56	92.40	149.57
EG-44 / M-1/ Mina 10	Magnetita	715	R5	248.40	144.24	179.71
EG-45 / M-1/ Mina 10	Zona de Óxidos	715	R3 – R4	90.24	46.80	59.23
EG-46 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	620	R4	99.12	64.08	79.54
EG-47 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	629	R4 – R5	159.12	51.36	82.56
EG-48 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	668	R2 – R3	48.48	23.28	36.62
EG-49 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	690	R4	99.12	64.08	79.54

Fuente: Elaboración propia.

Los ensayos de carga puntual se realizaron en un laboratorio geotécnico.

3.3.9.2 Propiedades Índices de Roca

Con la recolección de muestras de roca adquiridas en cada estación geomecánica, se realizó la ejecutaron ensayos para determinar las propiedades índices de la roca, los cuales tenemos como: gravedad específica, absorción (ASTM C-9783) y densidad (ASTM D-2937). En las *Tablas 39 y 40* se presenta un resumen de los resultados obtenidos de estos ensayos.



Tabla 39: Resultado de los Ensayos de Propiedades Índice de Rocas

Estación Geomecánica - Muestra	Tipo de Litología	Nivel	Gravedad Específica (Gs)	Absorción (%)	Densidad (kN/m ³)
EG-01' / M-1	Hornfels - Magnetita	569	2.69	5.27	26.60
EG-02' / M-1	Magnetita - Hornfels	569	2.87	4.07	28.60
EG-03' / M-1	Magnetita - Andesita	545	4.44	2.39	44.40
EG-03' / M-2	Magnetita - Andesita	545	2.90	3.42	28.70
EG-04' / M-1	Magnetita - Hornfels	545	5.12	2.36	47.80
EG-04' / M-2	Magnetita - Hornfels	545	2.73	3.91	27.10
EG-05' / M-1	Magnetita - Hornfels - Andesita	581	2.84	3.67	28.20
EG-06' / M-1	Hornfels - Magnetita	581	2.84	5.16	28.30
EG-06' / M-2	Hornfels - Magnetita	581	2.71	7.08	26.90
EG-07' / M-1	Magnetita - Hornfels	569	4.37	5.10	43.40
EG-08' / M-1	Magnetita - Hornfels	569	4.40	3.31	43.90
EG-08' / M-2	Magnetita - Hornfels	569	3.94	6.77	39.20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40: Resultado de los Ensayos de Propiedades Índice de Rocas

Estación Geomecánica / Muestra / Mina	Litología	Nivel	Gravedad Específica (Gs)	Absorción (%)	Densidad (kN/m ³)
EG-01 / M-1 / Mina 9	Hornfels	725	2.63	0.24	26.20
EG-01 / M-2 / Mina 9	Hornfels	725	2.52	0.35	25.45
EG-02 / M-1 / Mina 9	Hornfels	725	2.80	0.32	26.33
EG-02 / M-2 / Mina 9	Hornfels	725	2.51	0.26	26.36
EG-03 / M-1 / Mina 9	Hornfels	725	2.53	0.26	26.36
EG-04 / M-1 / Mina 9	Hornfels Alterado	713	2.59	0.25	26.17
EG-05 / M-1 / Mina 9	Hornfels Alterado	713	2.95	0.39	27.28
EG-05 / M-2 / Mina 9	Hornfels Alterado	713	2.66	0.46	26.07
EG-06 / M-1 / Mina 10	Arenisca Poco Consolidada	725	2.65	0.24	26.30
EG-07 / M-1 / Mina 9	Magnetita	732	2.63	0.18	26.23
EG-07 / M-2 / Mina 9	Magnetita	732	4.08	1.98	40.96
EG-08 / M-1 / Mina 10	Hornfels	701	2.63	0.19	26.82
EG-09 / M-1 / Mina 10	Andesita Porfirítica	701	2.73	0.21	27.61
EG-10 / M-1 / Mina 10	Hornfels	701	2.54	0.35	27.05
EG-11 / M-1 / Mina 10	Andesita Porfirítica	629	2.55	0.46	26.63
EG-12 / M-1 / Mina 10	Hornfels	629	2.68	0.28	26.53



Estación Geomecánica / Muestra / Mina	Litología	Nivel	Gravedad Específica (Gs)	Absorción (%)	Densidad (kN/m³)
EG-13 / M-1/ Mina 10	Hornfels	629	2.62	0.30	26.23
EG-14 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	701	2.64	0.06	26.13
EG-15 / M-1/ Mina 10	Hornfels	701	2.56	0.80	26.20
EG-15 / M-2/ Mina 10	Hornfels	701	2.71	0.73	26.59
EG-16 / M-1/ Mina 10	Hornfels	701	2.72	0.23	26.43
EG-16 / M-2/ Mina 10	Hornfels	701	2.60	0.28	26.46
EG-17 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	677	3.04	2.28	29.30
EG-18 / M-1/ Mina 10	Zona de Óxidos	677	2.67	0.26	26.20
EG-19 / M-1/ Mina 10	Hornfels	677	2.61	0.42	25.84
EG-20 / M-1/ Mina 10	Hornfels	677	2.63	0.21	26.56
EG-21 / M-1/ Mina 10	Hornfels	677	2.68	0.57	26.49
EG-22 / M-1/ Mina 10	Andesita Porfírica	677	2.73	0.18	27.70
EG-23 / M-1/ Mina 10	Hornfels	677	2.69	0.24	26.30
EG-24 / M-1/ Mina 10	Hornfels	677	2.55	0.30	26.23
EG-25 / M-1/ Mina 10	Hornfels	677	2.67	0.29	26.13
EG-26 / M-1/ Mina 10	Hornfels	677	2.58	0.36	26.04
EG-26 / M-2/ Mina 10	Hornfels	677	2.82	0.94	29.47
EG-27 / M-1/ Mina 10	Zona de Óxidos	641	3.64	1.87	35.90
EG-28 / M-1/ Mina 10	Zona de Óxidos	677	3.53	3.37	28.06
EG-28 / M-2/ Mina 10	Zona de Óxidos	677	3.81	2.89	37.63
EG-29 / M-1/ Mina 10	Pórfido Andesítico	701	2.65	0.85	26.69
EG-30 / M-1/ Mina 10	Zona de Óxidos	641	3.56	3.48	37.60
EG-31 / M-1/ Mina 10	Hornfels	641	2.62	1.75	27.24
EG-32 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	641	2.44	0.26	26.03
EG-33 / M-1/ Mina 10	Hornfels	665	2.76	0.59	26.13
EG-34 / M-1/ Mina 10	Hornfels	629	2.65	0.85	26.69
EG-35 / M-1/ Mina 10	Hornfels	617	2.64	0.29	26.69
EG-36 / M-1/ Mina 10	Hornfels	593	2.69	0.26	26.07
EG-37 / M-1/ Mina 10	Hornfels	677	2.49	0.45	26.39
EG-38 / M-1/ Mina 10	Hornfels	641	2.66	0.29	26.20
EG-39 / M-1/ Mina 10	Magnetita	654	2.67	0.17	26.26
EG-40 / M-1/ Mina 10	Hornfels	617	2.44	0.64	25.68
EG-41 / M-1/ Mina 10	Hornfels	641	2.68	0.37	26.66
EG-42 / M-1/ Mina 10	Andesita Porfírica	581	2.44	0.50	26.56
EG-43 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	718	2.69	0.68	26.23
EG-44 / M-1/ Mina 10	Magnetita	715	2.77	0.83	26.98

Estación Geomecánica / Muestra / Mina	Litología	Nivel	Gravedad Específica (Gs)	Absorción (%)	Densidad (kN/m ³)
EG-45 / M-1/ Mina 10	Zona de Óxidos	715	2.73	0.96	26.43
EG-46 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	620	2.75	0.57	26.49
EG-47 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	629	2.78	1.76	26.79
EG-48 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	668	4.57	2.13	44.95
EG-49 / M-1/ Mina 10	Hornfels Alterado	690	3.92	4.10	36.62

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos de propiedades índice de roca se realizaron en un laboratorio geotécnico

3.3.9.3 Compresión Triaxial

Se ejecutaron los ensayos de compresión triaxial de acuerdo con la norma ASTM D-2664, se preparó tres especímenes para cada ensayo. Los resultados de este ensayo serán utilizados para definir la forma de la envolvente de rotura de Hoek y Brown (2002), con la finalidad de la evaluación de estabilidad global de los taludes de la Mina 10. En las **Tablas 41 y 42** se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo.

Tabla 41: Resultado de los Ensayos de Compresión Triaxial

Estación Geomecánica	Nivel	Litología	m _i	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción (°)
EG-03	545	Magnetita – Andesita	25.14	18.09	61.22
EG-04	545	Magnetita - Hornfels	21.98	17.28	59.54
EG-08	569	Magnetita - Hornfels	20.43	23.18	59.63

Fuente: Elaboración propia

Tabla 42: Resultado de los Ensayos de Compresión Triaxial

Estación Geomecánica / Mina	Nivel	Litología	m _i	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción (°)
EG-11 / Mina 10	629	Andesita Porfírica	23.53	26.62	55.94
EG-13 / Mina 10	581	Hornfels	20.73	17.12	52.67
EG-28 / Mina 10	677	Zona de Óxidos	13.98	8.92	44.26
EG-38 / Mina 10	641	Hornfels	22.66	21.32	54.12
Plat. de Perforación	629	Magnetita	26.26	15.17	55.04

Fuente: Elaboración propia



Se ejecutaron ensayos los cuales fueron realizados en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la UNI.

3.3.9.4 Corte Directo

Con el propósito de conocer los parámetros de resistencia al corte de las discontinuidades se ejecutaron ensayos de corte directo sobre las discontinuidades con caras paralelas a la dirección de corte, de acuerdo con la norma ASTM D-5607. Los ángulos de fricción básicos obtenidos de este ensayo serán utilizados para definir la resistencia al corte de las discontinuidades de acuerdo con el criterio de rotura de Barton y Choubey (1977), con la finalidad de la evaluación de estabilidad local a nivel de bancos de los taludes de la Mina 9-10. En las **Tablas 43** se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo.

Tabla 43: Resultado de los Ensayos de Corte Directo

Estación Geomecánica	Nivel	Litología	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción (°)
EG-02'/ Mina 10	569	Magnetita – Hornfels	0.138	30.15
EG-04'/ Mina 10	545	Magnetita – Hornfels	0.120	31.75
EG-06'/ Mina 10	581	Hornfels - Magnetita	0.098	30.04
EG-11 / Mina 10	629	Andesita Porfírica	0.105	30.83
EG-13 / Mina 10	581	Hornfels	0.108	30.00
EG-28 / Mina 10	677	Zona de Óxidos	0.090	29.58
EG-38 / Mina 10	641	Hornfels	0.101	31.51
EG-39 / Mina 10	654	Magnetita	0.123	31.43

Los ensayos de corte directo se obtuvieron de los ensayos realizados en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad Nacional de Ingeniería

3.3.9.5 Propiedades Elásticas

Con la finalidad de determinar los parámetros deformacionales de la roca intacta, tales como el Módulo de Young (E) y el Coeficiente de Poisson (ν), se realizaron ensayos de propiedades elásticas, según la norma ASTM D-7012-10. En las **Tablas 44** se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo.



Tabla 44: Resultado de los Ensayos de Propiedades Elásticas

Estación Geomecánica	Nivel	Litología	E (GPa)	<i>m</i>
EG-02	569	Magnetita – Hornfels	14.51	0.22
EG-04	545	Magnetita – Hornfels	15.43	0.24
EG-08	569	Magnetita - Hornfels	13.53	0.24
EG-38 / Mina 10	641	Hornfels	17.8	0.28
Plat. de Perforación	629	Magnetita	7.5	0.41

los ensayos de propiedades elásticas se presenta los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la UNI.

3.3.9.6 Tracción Indirecta (Ensayo Brasileño)

Con la finalidad de medir la resistencia a la tracción uniaxial de muestra en forma de una probeta de roca indirectamente, asumiendo que la rotura se produce por tracción cuando a roca se somete a un estado de esfuerzos biaxial, con un esfuerzo principal traccional y otro compresivo de magnitud no superior a 3 veces el esfuerzo traccional.

Se aplica una carga vertical compresiva sobre un disco o cilindro de roca, que se coloca en horizontal entre dos placas a través de las cuales se transmite la fuerza, hasta conseguir su rotura. Se pueden emplear placas planas o esféricas cóncavas para transmitir las cargas, que deberán ser perfectamente paralelas. La carga se aplica con un rango tal que se consiga la rotura de la roca en unos 15-30 s; la ISRM (1981) recomienda un rango de 200 N/s.

El valor de la resistencia a la tracción de la matriz rocosa suele variar entre el 5 y el 10% del valor de la resistencia a la compresión simple, aunque para algunas rocas sedimentarias es del 14 al 16% (Duncan, 1999). En la **Tabla 45** se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo.



Tabla 45: Resultados de los Ensayos de Tracción Indirecta o brasileño

Estación Geomecánica	Ubicación	Litología	Resistencia a la Tracción (MPa)
EG-01´	Nivel 569	Hornfels – Magnetita	8.78
EG-02´	Nivel 569	Magnetita – Hornfels	12.68
EG-07´	Nivel 569	Magnetita – Hornfels	18.38

los ensayos de tracción indirecta se realizaron en un laboratorio geotécnico

Fuente: Propia

3.3.10 Caracterización geomecánica del macizo rocoso

Consiste en la descripción de las características y propiedades de la matriz rocosa, de las juntas o discontinuidades existentes y de los parámetros del macizo rocoso, proporcionan los datos necesarios para la evaluación geomecánica del macizo rocoso del tajo.

Para caracterizar un macizo rocoso donde se está realizando cortes y/o se proyectará una excavación, es necesario conocer los parámetros de resistencia y deformación de la roca intacta y de las discontinuidades, así como la estructura del macizo rocoso (fracturamiento, número de familias, espaciamiento y las características básicas de las discontinuidades), lo cual es necesario para caracterizar el macizo rocoso de acuerdo a los criterios de Bieniawski (RMR, 1989).

A continuación, se presentan los parámetros necesarios para la caracterización geomecánica de los macizos rocosos de acuerdo a la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989).

3.3.10.1 Resistencia y Dureza

La resistencia y dureza está relacionado con la clasificación de las rocas según su resistencia a la compresión uniaxial, propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM, 1981). En la **Tabla 46** se presenta la clasificación de las rocas de acuerdo a su resistencia a la compresión uniaxial.



Tabla 46: *Clasificación de las Rocas Según su Resistencia Uniaxial*

Clasificación	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)
R0 : Roca extremadamente débil	0.25 - 1.0
R1 : Roca muy débil	1.0 - 5.0
R2 : Roca débil	5.0 - 25.0
R3 : Roca media	25.0 - 50.0
R4 : Roca dura	50.0 - 100.0
R5 : Roca muy dura	100.0 - 250.0
R6 : Roca extremadamente dura	> 250.0

Fuente: ISRM - (1981).

De acuerdo a lo considerando la clasificación presentada en la **Tabla 46** y los resultados de los ensayos de carga puntual (**Tabla 37 y 38**), se tiene la siguiente interpretación para los taludes de la Mina 9-10.

- La Zona Norte de Mina 9-10, en gran parte está conformada por roca dura y roca muy dura (R4 – R5), solo se identificó roca media (R3) en la parte media del talud de la pared NW.
- La Zona Sur de Mina 9-10, en su mayoría está conformada por roca dura y muy dura (R4 – R5), solo se identificó roca extremadamente dura (R6) en la parte media del talud de la pared SW.
- La Zona Este de Mina 9-10, en gran parte está conformada por roca muy dura (R5), solo se identificó roca media (R3) en la parte superior del talud de la pared SE.
- La Zona Oeste de Mina 9-10, en gran parte está conformada por roca dura y roca muy dura (R4 – R5), se identificó roca media (R3) en la parte media del talud de la pared SW, posiblemente por presencia de falla, y roca débil (R2) en la parte superior del talud de la pared NW probablemente por meteorización superficial.
- en los niveles inferiores de la Mina 10 la roca es clasificada en general como roca dura



a muy dura (R4 – R5).

3.3.10.2 Grado de Fracturamiento (Indice RQD)

Para conocer el grado de fracturamiento de la masa rocosa se expresa habitualmente por el valor del Indice RQD (Rock Quality Designation). partir de las mediciones de distancia registradas a lo largo de un recorrido lineal se base a su valor se clasifica la calidad del macizo rocoso de acuerdo con la **Tabla 47**.

Tabla 47: Cuadro de Calidad del Macizo Rcoso Según el Indice RQD

RQD (%)	Calidad
<25	Muy Mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Media
75 - 90	Buena
90 - 100	Muy Buena

Fuente: ISRM (1981).

Los valores de RQD pueden estimarse en afloramientos a partir de correlaciones empíricas como la de Palmstrom, 1975 (en ISRM, 1981):

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad \text{para } J_v > 4.5 \dots\dots\dots(\text{Ecuación 1})$$

$$RQD = 100 \quad \text{para } J_v \leq 4.5 \dots\dots\dots(\text{Ecuación 2})$$

Donde J_v representa el número total de discontinuidades que interceptan una unidad de volumen (1 m³) del macizo rocoso. Ante la dificultad de poder apreciar tridimensionalmente un afloramiento, el valor de J_v se suele estimar contando las discontinuidades de cada familia que interceptan una longitud determinada, midiendo perpendicularmente a la dirección de cada una de las familias:

$$J_v = \sum \frac{N^\circ \text{ discontinuidades}}{\text{longitud}} \dots\dots\dots(\text{Ecuación 3})$$



Por ejemplo, para un macizo rocoso de calidad aceptable con un RQD de 65, el valor correspondiente de J_v es de 15, mientras que, para un macizo rocoso de calidad pobre, con RQD de 30, J_v vale 26. La estimación del RQD puede también realizarse a partir de la frecuencia de las discontinuidades λ , mediante la expresión que proporciona el valor teórico mínimo del RQD:

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1) \dots\dots\dots(Ecuación 4)$$

Donde λ es la frecuencia media de discontinuidades por metro, la cual se define como:

$$\lambda = \frac{N^\circ \text{ discontinuidades}}{\text{longitud}} \dots\dots\dots(Ecuación 5)$$

En la **Tabla 48** y **49** se presenta el resumen de los índices RQD estimados con la ecuación 4 para cada estación geomecánica, donde se observa que el macizo rocoso presenta una calidad entre mala y buena (desde el punto de vista del fracturamiento). De acuerdo con el estudio los niveles inferiores de la Mina 10 la roca es clasificada como roca media ($50 < RQD < 75$).



Tabla 48: Rangos de Valoración según el Índice RQD en la Mina 9-10

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	RQD	Calidad
EG-01'	Hornfels – Magnetita	569	59	Media
EG-02'	Magnetita – Hornfels	569	62	Media
EG-03'	Magnetita – Andesita	545	52	Media
EG-04'	Magnetita – Hornfels	545	52	Media
EG-05'	Magnetita – Hornfels – Andesita	581	56	Media
EG-06'	Hornfels – Magnetita	581	59	Media
EG-07'	Magnetita – Hornfels	569	52	Media
EG-08'	Magnetita - Hornfels	569	66	Media

Tabla 49: Rangos de Valoración según el Índice RQD en la Mina 9-10

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	λ	RQD	Calidad
EG-01 (Mina 9)	Hornfels	725	15	57	Media
EG-02 (Mina 9)	Hornfels	724	15	56	Media
EG-03 (Mina 9)	Hornfels	726	14	58	Media
EG-04 (Mina 9)	Hornfels Alterado	715	16	51	Media
EG-05 (Mina 9)	Hornfels Alterado	714	17	50	Mala
EG-06 (Mina 10)	Arenisca Poco Consolidada	724	18	45	Mala
EG-07 (Mina 9)	Magnetita	734	14	58	Media
EG-08 (Mina 10)	Hornfels	702	15	57	Media
EG-09 (Mina 10)	Andesita Porfírica	703	12	67	Media
EG-10 (Mina 10)	Hornfels	701	15	56	Media
EG-11 (Mina 10)	Andesita Porfírica	629	13	64	Media
EG-12 (Mina 10)	Hornfels	628	15	55	Media
EG-13 (Mina 10)	Hornfels	629	16	54	Media
EG-14 (Mina 10)	Hornfels Alterado	702	18	47	Mala
EG-15 (Mina 10)	Hornfels	702	6	88	Buena
EG-16 (Mina 10)	Hornfels	701	16	53	Media
EG-17 (Mina 10)	Hornfels Alterado	677	16	53	Media
EG-18 (Mina 10)	Zona de Óxidos	678	18	47	Mala
EG-19 (Mina 10)	Hornfels	678	17	48	Mala
EG-20 (Mina 10)	Hornfels	677	15	55	Media
EG-21 (Mina 10)	Hornfels	678	15	57	Media
EG-22 (Mina 10)	Andesita Porfírica	677	13	63	Media
EG-23 (Mina 10)	Hornfels	679	16	54	Media



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	λ	RQD	Calidad
EG-24 (Mina 10)	Hornfels	678	15	57	Media
EG-25 (Mina 10)	Hornfels	676	15	55	Media
EG-26 (Mina 10)	Hornfels	677	16	53	Media
EG-27 (Mina 10)	Zona de Óxidos	641	19	45	Mala
EG-28 (Mina 10)	Zona de Óxidos	678	20	42	Mala
EG-29 (Mina 10)	Pórfido Andesítico	703	7	83	Buena
EG-30 (Mina 10)	Zona de Óxidos	642	16	51	Media
EG-31 (Mina 10)	Hornfels	640	16	53	Media
EG-32 (Mina 10)	Hornfels Alterado	642	16	52	Media
EG-33 (Mina 10)	Hornfels	678	15	56	Media
EG-34 (Mina 10)	Hornfels	626	14	58	Media
EG-35 (Mina 10)	Hornfels	620	16	54	Media
EG-36 (Mina 10)	Hornfels	594	16	53	Media
EG-37 (Mina 10)	Hornfels	672	15	55	Media
EG-38 (Mina 10)	Hornfels	646	16	54	Media
EG-39 (Mina 10)	Magnetita	658	8	81	Buena
EG-40 (Mina 10)	Hornfels	624	15	57	Media
EG-41 (Mina 10)	Hornfels	642	16	53	Media
EG-42 (Mina 10)	Andesita Porfírica	581	12	68	Media
EG-43 (Mina 10)	Hornfels Alterado	718	19	44	Mala
EG-44 (Mina 10)	Magnetita	715	12	65	Media
EG-45 (Mina 10)	Zona de Óxidos	715	14	61	Media
EG-46 (Mina 10)	Hornfels Alterado	620	23	33	Mala
EG-47 (Mina 10)	Hornfels Alterado	629	15	57	Media
EG-48 (Mina 10)	Hornfels Alterado	668	12	67	Media
EG-49 (Mina 10)	Hornfels Alterado	690	15	54	Media

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 58** se han graficado los valores de RQD presentados en la **Tabla 48** y **49**, donde se observa que el macizo rocoso presenta una calidad media en la Zona Norte, media en la Zona Sur, media a buena en la Zona Este, y mala en la Zona Oeste al ser su RQD menor que 50%. En este gráfico se han incluido las estaciones geomecánicas realizadas.

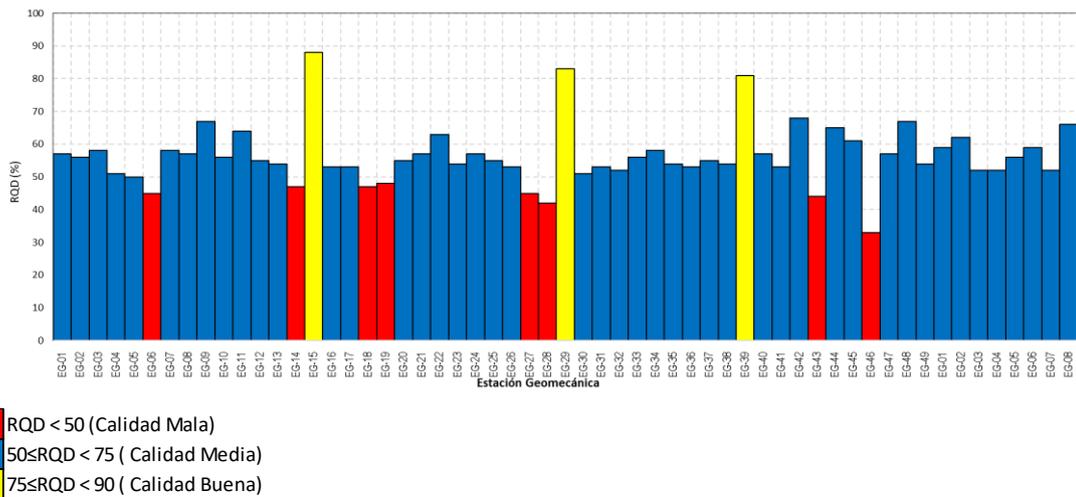


Figura 58. Gráfico Comparativo de Valores de RQD del Macizo Rocoso

3.3.10.3 Espaciamiento

El espaciamiento entre los planos de las discontinuidades condiciona el tamaño de los bloques de matriz rocosa y, por tanto, define el papel que esta tendrá en el comportamiento del macizo rocoso, y su importancia con respecto a la influencia de las discontinuidades. En macizos rocosos con espaciamientos grandes, de varios metros, en los procesos de deformación y rotura prevalecerán las propiedades de la matriz rocosa o de los planos de discontinuidad según la escala de trabajo considerada y la situación de la obra de ingeniería respecto a las discontinuidades, si los espaciamientos son menores, de varios decímetros o 1 o 2 m, el comportamiento del macizo lo determinaran los planos de debilidad. Por último, si el espaciamiento es muy pequeño, el macizo rocoso estará muy fracturado y presentará un comportamiento isótropo, controlado por las propiedades del conjunto de bloques más o menos uniformes. El espaciamiento se describe según los términos presentados en la **Tabla 45**.

Tabla 50: Descripción del Espaciamiento

Descripción	Espaciado
Extremadamente junto	< 0.02 m
Muy junto	0.02-0.06 m

Descripción	Espaciado
Junto	0.06-0.2 m
Moderadamente junto	0.2-0.6 m
Separado	0.6-2.0 m
Muy separado	2.0-6.0 m
Extremadamente separado	> 6.0 m

Fuente: ISRM (1981).

En general, de acuerdo con los resultados medidos del espaciado entre las discontinuidades del macizo rocoso que conforman los taludes de la Mina 9-10 (**Figura 59**), estas se clasifican como “discontinuidades juntas” a “moderadamente juntas”.

Los espaciados medidos en las estaciones geomecánicas varían entre 0.06 m y 0.6 m, con excepción de la estación EG-39 en la cual el espaciado es entre 0.6 m y 2.0 m (“discontinuidades separadas”). En este gráfico se han incluido las estaciones geomecánicas realizadas en los niveles más bajos, en donde se han medido espaciados clasificados como “discontinuidades juntas” a “moderadamente juntas”.

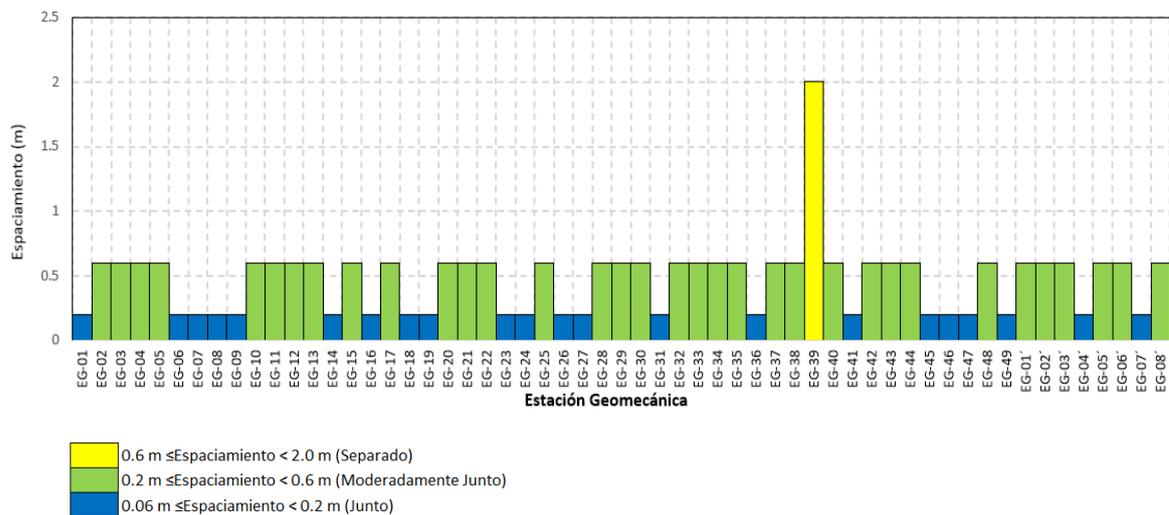


Figura 59. Gráfico Comparativo de Valores de RQD del Macizo Rocosos Gráfico Comparativo de Valores de Espaciado entre las Discontinuidades

3.3.10.4 Persistencia

La persistencia o continuidad de un plano de discontinuidad en un afloramiento superficial, se mide por la longitud según la dirección del plano y según su buzamiento. La descripción de la persistencia de las discontinuidades se presenta en la **Tabla 51**.

Tabla 51: Descripción de la 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: ISRM (1981).

En general, de acuerdo con los resultados medidos de la persistencia de las discontinuidades del macizo rocoso que conforman los taludes de la Mina 9-10 (**Figura 60**), estas se clasifican como de “baja continuidad” a “alta continuidad”. Los espaciamientos medidos en las estaciones geomecánicas varían entre 1 m y 20 m. En este gráfico se han incluido las estaciones geomecánicas realizadas en los niveles más bajos, en donde se han medido valores de persistencias clasificados como de continuidad “alta” a “muy alta”.

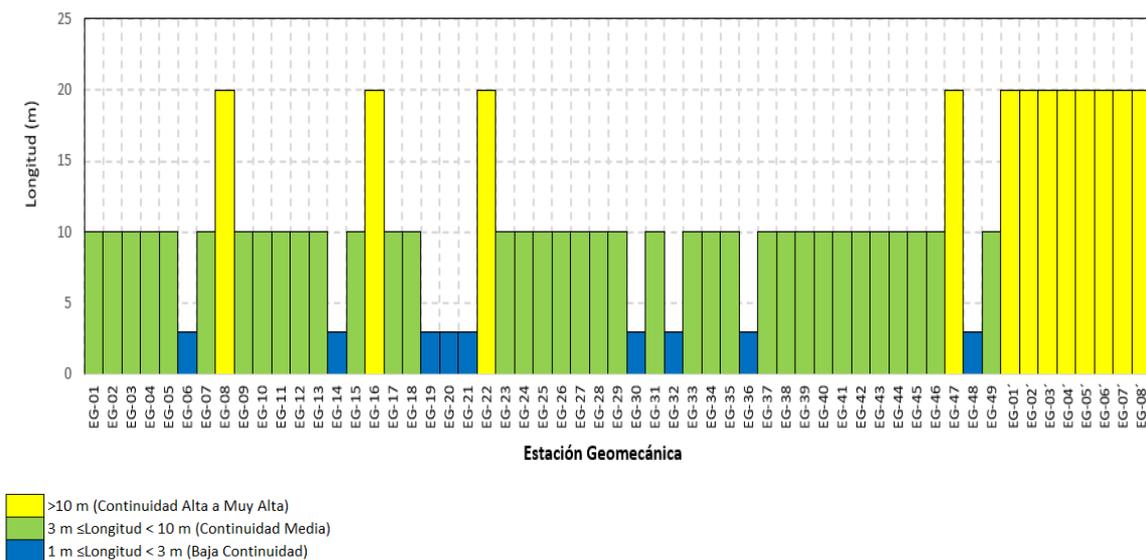


Figura 60. Gráfico Comparativo de Valores de Persistencia de las Discontinuidades

3.3.10.5 Abertura

La abertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. Este parámetro puede ser muy variable en diferentes zonas de un mismo macizo rocoso: mientras en la superficie la abertura puede ser alta, ésta se reduce con la profundidad, pudiendo llegar a cerrarse. La influencia de la abertura en la resistencia al corte de la discontinuidad es importante incluso en discontinuidades muy cerradas, al modificar los esfuerzos efectivos 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, según la terminología presentada en la **Tabla 52**. Las mediciones deben de realizarse para cada familia de discontinuidades, adoptando los valores medios más representativos de cada una de ellas.

Tabla 52: *Evaluación del Grado de Meteorización del Macizo Rocos*

Abertura	Descripción
<0.1 mm	Muy angosta
0.1-1.0 mm	Angosta
1.0-5.0 mm	Abierta
> 5.0 mm	Muy Abierta

Fuente: ISRM (1981).

En general, las discontinuidades del macizo rocoso de la Mina 9-10, presentan aberturas que varían entre 1 mm y 5 mm, clasificadas como “abiertas” (**Figura 61**). En este gráfico se han incluido las estaciones geomecánicas realizadas en los niveles más bajos, donde en general se han medido valores de abertura de discontinuidades clasificadas como “abiertas”

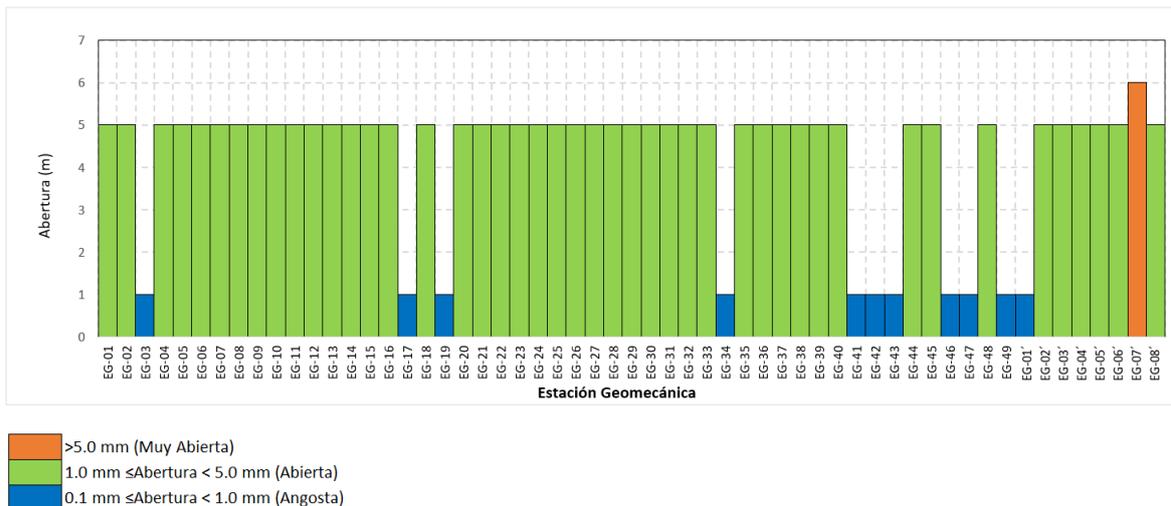


Figura 61. Gráfico Comparativo de Valores de Aberturas de las Discontinuidades

En el *Anexo -3.1* se presentan los registros de mapeo lineal de la Mina 9-10, en los cuales se detalla la abertura de las discontinuidades de cada estación geomecánica realizada en los niveles más bajos.

3.3.10.6 Rugosidad

Para realizar la medida de la rugosidad tiene como principal finalidad la evaluación de la resistencia al corte de los planos de las discontinuidades. La rugosidad aumenta la resistencia al corte, que decrece con el aumento de la abertura y, por lo general, con el espesor del relleno. En general, las discontinuidades del macizo rocoso de la Mina 9-10, presentan una rugosidad clasificada como “lisa” a “moderadamente rugosa”. En las estaciones geomecánicas realizadas en los niveles más bajos del tajo, se han medido valores de rugosidad clasificadas como “moderadamente rugosa”, para lo cual se ha utilizado directamente el Peine de Barton.

En el *Anexo A-3.1* se presentan los registros de mapeo lineal de la Mina 9-10, en los cuales se detalla la rugosidad de las discontinuidades de cada estación geomecánica. En el *Anexo A-2.4* se presentan las hojas de rugosidad obtenidas con el Peine de Barton y el registro fotográfico correspondiente



3.3.10.7 Relleno

Las discontinuidades pueden aparecer rellenas de un material de naturaleza distinta a la roca de las paredes. En general, las discontinuidades del macizo rocoso de la Mina 9-10, presentan relleno de limos, óxidos, panizo (roca fuertemente alterada y fracturada), en algunos casos están compuesto por mineralización, moscovita con alteración propilitica. En general, el espesor del relleno es menor que 5 mm. Las mismas características se han observado en las estaciones geomecánicas ubicadas en los niveles inferiores del tajo.

En el *Anexo A-3.1* se presentan los registros de mapeo lineal de la Mina 9-10, en los cuales se detalla la rugosidad de las discontinuidades de cada estación geomecánica

3.3.10.8 Número y Orientación de Familias de Discontinuidades

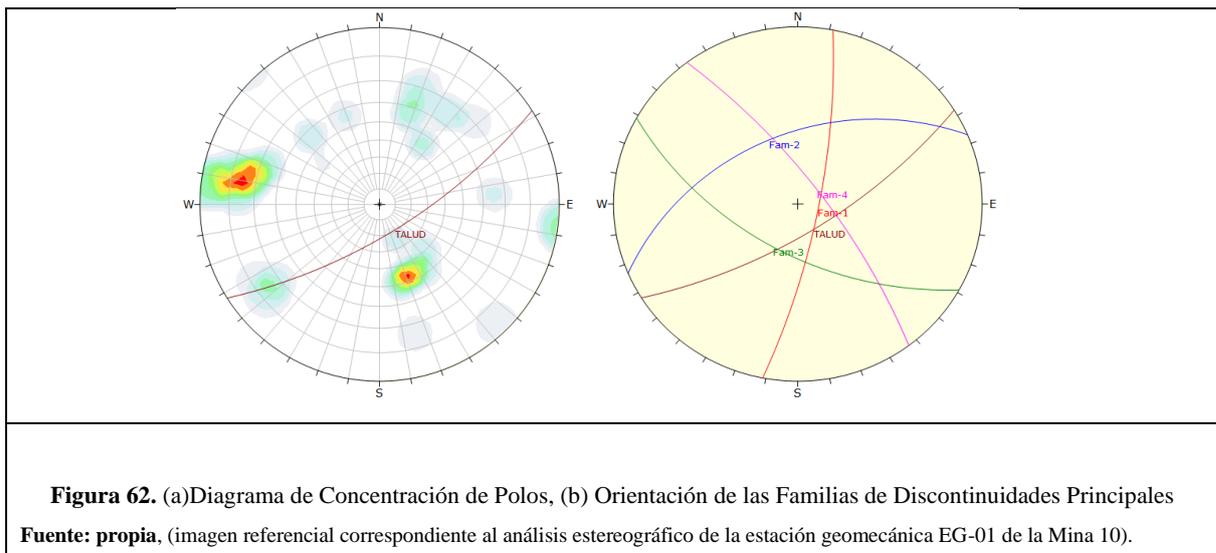
El comportamiento geomecánico del macizo rocoso, su modelo de deformación y sus mecanismos de rotura están condicionados por el número de familias de discontinuidades presentes. La orientación de las diferentes familias respecto a una obra o instalación sobre el terreno puede determinar la estabilidad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

La intensidad o grado de fracturamiento y el tamaño de los bloques de la matriz rocosa vienen dados por el número de familias de discontinuidades y por el espaciamiento 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.

En los reconocimientos de campo de los macizos rocosos deben ser registradas todas las familias presentes, y evaluar su grado de importancia relativa. Este grado puede expresarse mediante la asignación de números correlativos para las familias de menor a mayor importancia. Así, la familia principal (con mayor continuidad, menor espaciado, mayor abertura, etc.) sería la familia “número 1”.

La orientación media de una familia se evalúa mediante la proyección estereográfica, lo cual corresponde a un análisis estadístico de las discontinuidades mapeadas para definir los sets de discontinuidades más representativos, y posteriormente estimar su respectiva orientación (buzamiento y dirección de buzamiento).

Los datos de entrada para realizar el análisis mencionado son las mediciones tomadas en campo, las cuales se presentan en el registro de mapeo lineal (*Anexo D.1*). A manera de ejemplo en la *Figura 62 (a)* se presenta el diagrama de concentración de polos obtenido en la estación geomecánica EG-01, el cual se ha definido en base a las mediciones tomadas en campo en esta estación; a partir de este diagrama se han definido las orientaciones de las discontinuidades principales del macizo rocoso, tal como se observa en la *Figura 62(b)*.



En el registro de mapeo lineal (*Anexo A-3.1*), se incluyó un código de las discontinuidades medidas directamente en campo (J1, J2, etc.), las cuales son mediciones de campo, mas no las orientaciones promedio que son las que se determinan posteriormente con el programa Dips. En la hoja de cálculo del RMR (*Anexo A-4.1*), se ha incluido la orientación de las principales familias de discontinuidades obtenidas del análisis estereográfico (Dips), ya que estas son las orientaciones representativas del macizo rocoso y son con estas con las que se va a evaluar la estabilidad de taludes a nivel de bancos (análisis



de deslizamientos tipo planar y cuñas). En la **Tabla 53** y **54** se presenta el resumen de las familias de discontinuidades principales obtenidas con el programa Dips (Rocscience, 2012), en base a los datos tomados de campo (presentados en el registro lineal).

Tabla 53: *Orientación de las Principales Familias de Discontinuidades – mina 10*

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Familias	Orientación (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)
EG-01 (Mina 10)	Hornfels – Magnetita	569	4	1) 77°/101° 2) 47°/337° 3) 59°/209° 4) 75°/053°
EG-02 (Mina 10)	Magnetita – Hornfels	569	4	1) 78°/095° 2) 50°/093° 3) 80°/136° 4) 49°/337°
EG-03 (Mina 10)	Magnetita – Andesita	545	4	1) 67°/017° 2) 65°/159° 3) 76°/207° 4) 50°/059°
EG-04 (Mina 10)	Magnetita - Hornfels	545	2	1) 72°/093° 2) 77°/326°
EG-05 (Mina 10)	Magnetita – Hornfels – Andesita	581	6	1) 71°/074° 2) 69°/102° 3) 36°/328° 4) 82°/010° 5) 67°/042° 6) 63°/167°
EG-06 (Mina 10)	Hornfels – Magnetita	581	2	1) 69°/091° 2) 70°/355°
EG-07 (Mina 10)	Magnetita – Hornfels	569	3	1) 32°/347° 2) 78°/024° 3) 72°/117°
EG-08 (Mina 10)	Magnetita – Hornfels	569	4	1) 69°/082° 2) 54°/150° 3) 48°/110° 4) 64°/292°

Tabla 54: *Orientación de las Principales Familias de Discontinuidades – mina 9-10*

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Familias	Orientación (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)
EG-01 (Mina 9)	Hornfels	725	4	1) 82°/091° 2) 45°/181° 3) 75°/258° 4) 65°/223°
EG-02 (Mina 9)	Hornfels	724	5	1) 75°/060° 2) 76°/168° 3) 70°/325° 4) 72°/214° 5) 52°/249°



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Familias	Orientación (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)
EG-03 (Mina 9)	Hornfels	726	3	1) 76°/066° 2) 28°/206° 3) 41°/147°
EG-04 (Mina 9)	Hornfels Alterado	715	5	1) 72°/058° 2) 46°/096° 3) 43°/066° 4) 43°/138° 5) 31°/234°
EG-05 (Mina 9)	Hornfels Alterado	714	4	1) 51°/296° 2) 61°/056° 3) 49°/092° 4) 81°/335°
EG-06 (Mina 10)	Arenisca Poco Consolidada	724	4	1) 24°/004° 2) 59°/198° 3) 89°/183° 4) 56°/040°
EG-07 (Mina 9)	Magnetita	734	4	1) 81°/323° 2) 36°/259° 3) 64°/062° 4) 47°/325°
EG-08 (Mina 10)	Hornfels	702	4	1) 69°/084° 2) 62°/180° 3) 55°/301° 4) 82°/213°
EG-09 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	703	5	1) 76°/059° 2) 63°/140° 3) 75°/191° 4) 21°/162° 5) 84°/293°
EG-10 (Mina 10)	Hornfels	701	6	1) 68°/071° 2) 20°/164° 3) 71°/028° 4) 53°/149° 5) 38°/324° 6) 79°/344°
EG-11 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	629	5	1) 73°/067° 2) 55°/151° 3) 11°/314° 4) 45°/112° 5) 31°/254°
EG-12 (Mina 10)	Hornfels	628	5	1) 67°/084° 2) 33°/171° 3) 18°/357° 4) 71°/175° 5) 51°/353°
EG-13 (Mina 10)	Hornfels	629	4	1) 77°/077° 2) 90°/145° 3) 76°/010° 4) 39°/201°
EG-14 (Mina 10)	Hornfels Alterado	702	6	1) 73°/261° 2) 72°/096° 3) 58°/184° 4) 69°/064° 5) 20°/029° 6) 47°/131°



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Familias	Orientación (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)
EG-15 (Mina 10)	Hornfels	702	5	1) 71°/081° 2) 40°/197° 3) 84°/183° 4) 38°/325° 5) 26°/082°
EG-16 (Mina 10)	Hornfels	701	6	1) 75°/072° 2) 18°/172° 3) 64°/007° 4) 18°/352° 5) 53°/118° 6) 60°/242°
EG-17 (Mina 10)	Andesita Porfírica	677	5	1) 71°/063° 2) 59°/137° 3) 65°/100° 4) 57°/332° 5) 85°/207°
EG-18 (Mina 10)	Zona de Óxidos	678	5	1) 80°/059° 2) 47°/113° 3) 74°/360° 4) 52°/033° 5) 60°/298°
EG-19 (Mina 10)	Hornfels	678	4	1) 65°/070° 2) 44°/003° 3) 43°/158° 4) 64°/276°
EG-20 (Mina 10)	Hornfels	677	6	1) 72°/075° 2) 77°/120° 3) 40°/196° 4) 71°/200° 5) 33°/092° 6) 37°/240°
EG-21 (Mina 10)	Hornfels	678	3	1) 77°/071° 2) 59°/234° 3) 39°/179°
EG-22 (Mina 10)	Andesita Porfírica	677	3	1) 74°/056° 2) 38°/326° 3) 64°/174°
EG-23 (Mina 10)	Hornfels	679	4	1) 69°/060° 2) 34°/202° 3) 71°/320° 4) 67°/004°
EG-24 (Mina 10)	Hornfels	678	5	1) 77°/055° 2) 74°/155° 3) 70°/277° 4) 18°/323° 5) 60°/329°
EG-25 (Mina 10)	Hornfels	676	4	1) 82°/150° 2) 67°/060° 3) 40°/328° 4) 16°/252°
EG-26 (Mina 10)	Hornfels	677	6	1) 75°/134° 2) 57°/047° 3) 50°/174° 4) 17°/043° 5) 32°/341° 6) 32°/228°



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Familias	Orientación (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)
EG-27 (Mina 10)	Zona de Óxidos	641	6	1) 82°/002° 2) 81°/135° 3) 56°/260° 4) 11°/251° 5) 78°/047° 6) 79°/088°
EG-28 (Mina 10)	Zona de Óxidos	678	5	1) 76°/062° 2) 40°/075° 3) 81°/010° 4) 72°/156° 5) 16°/223°
EG-29 (Mina 10)	Pórfido Andesítico	703	5	1) 59°/156° 2) 56°/333° 3) 57°/298° 4) 27°/204° 5) 53°/259°
EG-30 (Mina 10)	Zona de Óxidos	642	5	1) 79°/036° 2) 56°/263° 3) 86°/109° 4) 40°/006° 5) 83°/324°
EG-31 (Mina 10)	Hornfels	640	4	1) 63°/116° 2) 58°/018° 3) 30°/179° 4) 67°/048°
EG-32 (Mina 10)	Hornfels Alterado	642	6	1) 70°/079° 2) 37°/310° 3) 35°/271° 4) 64°/111° 5) 43°/147° 6) 72°/006°
EG-33 (Mina 10)	Hornfels	678	5	1) 69°/077° 2) 35°/321° 3) 31°/055° 4) 34°/280° 5) 55°/139°
EG-34 (Mina 10)	Hornfels	626	4	1) 68°/077° 2) 63°/357° 3) 38°/165° 4) 82°/326°
EG-35 (Mina 10)	Hornfels	620	4	1) 67°/098° 2) 30°/331° 3) 26°/156° 4) 81°/266°
EG-36 (Mina 10)	Hornfels	594	3	1) 58°/097° 2) 30°/305° 3) 38°/168°
EG-37 (Mina 10)	Hornfels	672	4	1) 58°/348° 2) 73°/102° 3) 19°/160° 4) 30°/255°
EG-38 (Mina 10)	Hornfels	646	4	1) 32°/310° 2) 54°/141° 3) 78°/265° 4) 66°/095°



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Familias	Orientación (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)
EG-39 (Mina 10)	Magnetita	658	4	1) 57°/147° 2) 41°/254° 3) 58°/178° 4) 38°/093°
EG-40 (Mina 10)	Hornfels	624	4	1) 55°/174° 2) 73°/094° 3) 83°/024° 4) 65°/320°
EG-41 (Mina 10)	Hornfels	642	6	1) 77°/063° 2) 28°/222° 3) 31°/278° 4) 76°/192° 5) 86°/116° 6) 53°/008°
EG-42 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	581	3	1) 83°/038° 2) 29°/273° 3) 34°/117°
EG-43 (Mina 10)	Hornfels Alterado	718	5	1) 81°/048° 2) 88°/332° 3) 28°/315° 4) 70°/091° 5) 73°/008°
EG-44 (Mina 10)	Magnetita	715	3	1) 71°/074° 2) 14°/200° 3) 81°/338°
EG-45 (Mina 10)	Zona de Oxidos	715	3	1) 88°/278° 2) 81°/360° 3) 17°/308°
EG-46 (Mina 10)	Hornfels Alterado	620	6	1) 25°/164° 2) 38°/346° 3) 84°/160° 4) 79°/060° 5) 75°/087° 6) 42°/161°
EG-47 (Mina 10)	Hornfels Alterado	629	4	1) 78°/156° 2) 40°/359° 3) 72°/047° 4) 67°/084°
EG-48 (Mina 10)	Hornfels Alterado	668	5	1) 85°/259° 2) 19°/163° 3) 86°/351° 4) 37°/351° 5) 56°/164°
EG-49 (Mina 10)	Hornfels Alterado	690	5	1) 72°/139° 2) 34°/188° 3) 39°/006° 4) 67°/308° 5) 68°/069°

En el Anexo A-8.1 (Análisis de Estabilidad a Nivel de Bancos), se aprecian las salidas de la evaluación realizada con el software Dips, en donde se presentan las



orientaciones de las familias identificadas en cada estación geomecánica de la Mina 9-10.

3.3.10.9 Grado de alteración

La estimación del grado de alteración del macizo rocoso se realiza mediante la observación directa del afloramiento y comparación con los índices estándar presentados en la **Tabla 55**. En algunos casos puede ser necesario fragmentar un trozo de roca para observar la alteración de la matriz rocosa.

Tabla 55: *Evaluación del Grado de Meteorización del Macizo Rocosó*

Grado de Meteorización	Tipo	Descripción
I	Fresco	No aparecen signos de alteración
II	Ligeramente Alterado	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por alteración.
III	Moderadamente Alterado	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 Alterado	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 Alterado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso
VI	Suelo Residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en suelo. Se ha destruido la estructura del macizo rocoso y la fábrica del material

Fuente: ISRM (1981).

Durante la evaluación del macizo rocoso, se estimó el grado de alteración de las familias de discontinuidades, lo cual se ha registrado en todas las estaciones geomecánicas ejecutadas en la Mina 9-10.

En general, el macizo rocoso que conforma los taludes de la Mina 9-10, se encuentra



“ligeramente meteorizado” a “moderadamente meteorizado”, y en algunos sectores se presenta “altamente meteorizado (Estaciones: EG-23, EG-27 y EG-31). En los niveles inferiores del tajo se ha observado la misma tendencia, en términos de alteración del macizo rocoso.

3.3.10.10 Condición de agua subterránea

En la etapa de evaluación de campo no se ha identificado la presencia de la napa freática ni zonas parcialmente saturadas, esto se debe a que en la zona de estudio las lluvias son mínimas y no hay riesgo de inundación. Debido a estas condiciones, en la caracterización geomecánica de los macizos rocosos de la Mina 9-10 se ha considerado la condición seca. Sin embargo, SHP registró presencia de agua en taladros de perforación de voladura en el fondo del tajo, el cual, de acuerdo con los resultados del ensayo de tomografía eléctrica, se encontraría a una profundidad comprendida entre 5 y 7 m (medido desde el fondo el tajo actual).

3.3.10.11 Calidad del Macizo Rcoso (Índice RMR89)

El sistema de clasificación RMR fue desarrollado por el profesor Bieniawski en el Consejo Sudafricano para la Investigación Científica e Industrial (CSIR) en 1973, fue actualizado en los años de 1976 y 1989. Esta clasificación tiene en cuenta seis parámetros básicos, cada uno de los cuales está subdividido en rangos de aplicaciones con sus puntuaciones respectivas, estos parámetros son:

- Resistencia de la roca intacta
- Grado de fracturamiento (RQD)
- Espaciamiento de las discontinuidades
- Condición de las discontinuidades
- Condición de agua subterránea
- Orientación relativa de las discontinuidades



El sistema de clasificación RMR₈₉, ha sido complementado con factores de reducción que dependen de la interrelación de los elementos de orientación de las discontinuidades con la obra de ingeniería, así como de los métodos de excavación. Así mismo, aplicando el sistema RMR₈₉, se estimará la calidad del macizo rocoso con fines de evaluación de estabilidad de taludes.

Hay que tener en cuenta que en la literatura técnica disponible existen dos versiones para la obtención del índice RMR, el RMR₇₆, del año 1976 y el RMR₈₉, del año 1989. La diferencia reside en los puntajes que se les asignan a los parámetros de presencia de agua subterránea, condición de las discontinuidades y RQD, conjuntamente con el espaciado de las discontinuidades. En la **Tabla 56** se muestra la diferencia entre valores que se le dan a los parámetros según la versión del RMR.

Tabla 56: *Diferencias de Puntajes entre RMR₇₆ y RMR₈₉*

Parámetro	RMR ₇₆	RMR ₈₉
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: Elaboración propia.

En la **Tabla 57** se presentan los rangos de valoración del macizo rocoso según su clasificación RMR₈₉, que es la versión que se ha utilizado para caracterizar los macizos rocosos de la Mina 9-10.

Tabla 57: *Sistema de Clasificación del Macizo Rcoso RMR₈₉*

Parámetros de Clasificación y sus Valoraciones							
Parámetro			Rango de valores				
1	Resistencia de la roca	Índice de carga puntual	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Para este rango bajo, es preferible el ensayo de compresión uniaxial



Parámetros de Clasificación y sus Valoraciones									
Parámetro		Rango de valores							
	intacta	Resistencia compresiva uniaxial	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	<25 MPa	<5 MPa	< 1 MPa
	Valoración		(15)	(12)	(7)	(4)	(2)	(1)	(0)
2	Calidad testigo de perforación RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%		
	Valoración		(20)	(17)	(13)	(8)	(3)		
3	Espaciamiento de discontinuidades		> 2 m	0.6 m – 2.0 m	0.2 m – 0.6 m	0.06 m – 0.2 m	< 0.06 m		
	Valoración		(20)	(15)	(10)	(8)	(5)		
Condiciones de las Discontinuidades									
4	Persistencia		< 1m	1 m – 3 m	3 m – 10 m	10 m – 20 m	> 20 m		
	Valoración		(6)	(4)	(2)	(1)	(0)		
	Apertura		Cerrada	< 0.1 mm	0.1– 1.0 mm	1 – 5mm	> 5mm		
	Valoración		(6)	(5)	(4)	(1)	(0)		
	Rugosidad		Muy rugosa	Rugosa	Lig. rugosa	Lisa	Espejo de falla		
	Valoración		(6)	(5)	(3)	(1)	(0)		
	Relleno		Ninguno	Duro<5mm	Duro>5mm	Suave<5mm	Suave > 5mm		
	Valoración		(6)	(4)	(2)	(2)	(0)		
	Alteración		Sana	Ligera	Moderada	Muy alterada	Descompuesta		
	Valoración		(6)	(5)	(3)	(1)	(0)		
Condiciones de Agua Subterránea									
5	Agua subterránea	Condición general	Completamente seco	Húmedo	Mojado	Goteo	Flujo		
		Valoración	15	10	7	4	0		

Fuente: Bieniawski (1989).

En la **Tabla 58** se presentan los rangos de valoración del macizo rocoso de acuerdo a su clasificación RMR_{89} .

Tabla 58: Rangos de Valoración según el Índice RMR_{89}

Índice RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0
Clase	I	II	III	IV	V
Descripción de la Roca	Muy Buena	Buena	Regular	Mala	Muy Mala

Fuente: Bieniawski (1989).

3.3.10.12 Calidad del Macizo Rcoso (Índice SMR)

El índice SMR se obtiene sumando al RMR básico un factor de ajuste F que depende de la orientación de las discontinuidades, y un factor de excavación F4 que es función del



método de excavación utilizado. A su vez, el factor F es el producto de tres sub - factores que consideran: la orientación relativa del rumbo del plano del talud con respecto al de las discontinuidades (F1), el buzamiento de las discontinuidades (F2) y la diferencia entre el buzamiento de las discontinuidades y del talud (F3). Finalmente, se tiene:

$$SMR = RMR + (F1 * F2 * F3) + F4$$

En la **Tabla 59** se presentan los rangos de valoración del macizo rocoso según su clasificación SMR.

Tabla 59: Rangos de Valoración según el Índice SMR

Clase	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 – 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Descripción	Muy Mala	Mala	Normal	Buena	Muy Buena
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente Estable	Estable	Totalmente Estable
Deslizamiento	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguno
Soporte	Re-excavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Fuente: Romana (1985).

Para la elección de la discontinuidad más desfavorable desde el punto de vista de la estabilidad, cuya definición es necesaria para determinar el índice SMR, se ha tomado en consideración los resultados de los análisis cinemáticos de deslizamientos tipo planar y cuñas (*Anexo A-8.2*), con la finalidad de determinar cuál es la familia de discontinuidades que es más perjudicial para la estabilidad del talud.

En las **Tablas 60 y 61** se presenta un resumen de la valoración del macizo rocoso de acuerdo a los índices RMR y SMR determinados para cada estación geomecánica de la Mina 9-10. La descripción de la estabilidad en base al SMR es coherente con los análisis de deslizamientos tipo planar y cuña realizados.



Tabla 60: Resumen de la Valoración RMR – SMR en la Mina 10

Estación Geomecánica	Litología	RMR ₈₉	RMR _{ajustado}	Tipo de Macizo Rocoso	SMR	Estabilidad (SMR)
EG-01	Hornfels – Magnetita	64	59	Regular (III A)	71	Buena / Estable
EG-02	Magnetita – Hornfels	61	56	Regular (III A)	69	Buena / Estable
EG-03	Magnetita – Andesita	56	51	Regular (III A)	58	Regular / Parc. Estable
EG-04	Magnetita – Hornfels	59	54	Regular (III A)	63	Buena / Estable
EG-05	Magnetita – Hornfels – Andesita	61	56	Regular (III A)	62	Buena / Estable
EG-06	Hornfels – Magnetita	61	56	Regular (III A)	66	Buena / Estable
EG-07	Magnetita – Hornfels	59	54	Regular (III A)	42	Regular / Parc. Estable
EG-08	Magnetita – Hornfels	61	56	Regular (III A)	44	Regular / Parc. Estable

Tabla 61: Resumen de la Valoración RMR – SMR en la Mina 9-10

Estación Geomecánica	Litología	RMR ₈₉ (Básico)	RMR ₈₉ (Ajustado)	Tipo de Macizo Rocoso	SMR	Estabilidad (SMR)
EG-01 (Mina 9)	Hornfels	59	34	Mala (IV A)	31	Mala / Inestable
EG-02 (Mina 9)	Hornfels	63	38	Mala (IV A)	62	Buena / Estable
EG-03 (Mina 9)	Hornfels	66	41	Regular (III B)	23	Mala / Inestable
EG-04 (Mina 9)	Hornfels Alterado	63	38	Mala (IV A)	27	Mala / Inestable
EG-05 (Mina 9)	Hornfels Alterado	62	37	Mala (IV A)	62	Buena / Estable
EG-06 (Mina 10)	Arenisca Poco Consolidada	46	41	Regular (III B)	47	Normal / Parcialmente Estable
EG-07 (Mina 9)	Magnetita	57	32	Mala (IV A)	61	Buena / Estable
EG-08 (Mina 10)	Hornfels	60	55	Regular (III A)	61	Buena / Estable
EG-09 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	59	54	Regular (III A)	63	Buena / Estable
EG-10 (Mina 10)	Hornfels	64	59	Regular (III A)	68	Buena / Estable
EG-11 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	59	54	Regular (III A)	17	Muy Mala / Totalmente Inestable
EG-12 (Mina 10)	Hornfels	59	54	Regular (III A)	31	Mala / Inestable
EG-13 (Mina 10)	Hornfels	65	40	Mala (IV A)	53	Buena / Estable
EG-14 (Mina 10)	Hornfels Alterado	56	31	Mala (IV A)	40	Mala / Inestable
EG-15 (Mina 10)	Hornfels	70	45	Regular (III B)	70	Buena / Estable
EG-16 (Mina 10)	Hornfels	60	35	Mala (IV A)	64	Buena / Estable
EG-17 (Mina 10)	Hornfels Alterado	59	34	Mala (IV A)	32	Mala / Inestable
EG-18 (Mina 10)	Zona de Óxidos	51	26	Mala (IV A)	35	Mala / Inestable
EG-19 (Mina 10)	Hornfels	53	28	Mala (IV A)	25	Mala / Inestable
EG-20 (Mina 10)	Hornfels	63	58	Regular (III A)	63	Buena / Estable
EG-21 (Mina 10)	Hornfels	63	38	Mala (IV A)	51	Normal / Parcialmente Estable
EG-22 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	60	55	Regular (III A)	48	Normal / Parcialmente Estable
EG-23 (Mina 10)	Hornfels	52	47	Regular (III B)	50	Normal / Parcialmente



Estación Geomecánica	Litología	RMR ₈₉ (Básico)	RMR ₈₉ (Ajustado)	Tipo de Macizo Rocoso	SMR	Estabilidad (SMR)
						Estable
EG-24 (Mina 10)	Hornfels	56	51	Regular (III A)	46	Normal / Parcialmente Estable
EG-25 (Mina 10)	Hornfels	64	59	Regular (III A)	68	Buena / Estable
EG-26 (Mina 10)	Hornfels	52	47	Regular (III B)	24	Mala / Inestable
EG-27 (Mina 10)	Zona de Óxidos	52	47	Regular (III B)	55	Buena / Estable
EG-28 (Mina 10)	Zona de Óxidos	51	46	Regular (III B)	23	Mala / Inestable
EG-29 (Mina 10)	Pórfido Andesítico	62	57	Regular (III A)	35	Mala / Inestable
EG-30 (Mina 10)	Zona de Óxidos	66	41	Regular (III B)	66	Buena / Estable
EG-31 (Mina 10)	Hornfels	60	55	Regular (III A)	59	Normal / Parcialmente Estable
EG-32 (Mina 10)	Hornfels Alterado	61	56	Regular (III A)	33	Mala / Inestable
EG-33 (Mina 10)	Hornfels	61	56	Regular (III A)	68	Buena / Estable
EG-34 (Mina 10)	Hornfels	57	52	Regular (III A)	65	Buena / Estable
EG-35 (Mina 10)	Hornfels	63	58	Regular (III A)	29	Mala / Inestable
EG-36 (Mina 10)	Hornfels	58	53	Regular (III A)	62	Buena / Estable
EG-37 (Mina 10)	Hornfels	58	53	Regular (III A)	60	Buena / Estable
EG-38 (Mina 10)	Hornfels	61	56	Regular (III A)	52	Normal / Parcialmente Estable
EG-39 (Mina 10)	Magnetita	70	45	Regular (III B)	35	Mala / Inestable
EG-40 (Mina 10)	Hornfels	54	49	Regular (III B)	56	Normal / Parcialmente Estable
EG-41 (Mina 10)	Hornfels	57	52	Regular (III A)	61	Buena / Estable
EG-42 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	64	59	Regular (III A)	68	Buena / Estable
EG-43 (Mina 10)	Hornfels Alterado	61	56	Regular (III A)	49	Normal / Parcialmente Estable
EG-44 (Mina 10)	Magnetita	63	58	Regular (III A)	71	Buena / Estable
EG-45 (Mina 10)	Zona de Óxidos	52	47	Regular (III B)	56	Normal / Parcialmente Estable
EG-46 (Mina 10)	Hornfels Alterado	52	47	Regular (III B)	60	Buena / Estable
EG-47 (Mina 10)	Hornfels Alterado	56	51	Regular (III A)	64	Buena / Estable
EG-48 (Mina 10)	Hornfels Alterado	58	53	Regular (III A)	66	Buena / Estable
EG-49 (Mina 10)	Hornfels Alterado	60	55	Regular (III A)	68	Buena / Estable

En el *Anexo A-4: Valoración del Macizo Rocoso*, se presentan los registros de valoración del macizo rocoso de acuerdo con las clasificaciones RMR y SMR (*Anexo A-4.1*).

En los *Planos PL-GG-017 y PL-GG-018: Zonificación Geomecánica, del Anexo N*, se presenta la zonificación de los macizos rocosos en base a su calidad geomecánica.



- **Descripción de los Taludes de Mina 9**

Los macizos rocosos son de mala calidad geomecánica, con un índice RMR que varía entre 32 y 40 (Tipo IVA) y una clasificación SMR que indica que la estabilidad de esta zona es de mala a regular. Los deslizamientos predominantes son del tipo planar, asociándose principalmente a la roca hornfels, la cual puede presentarse alterada.

- **Descripción de los Taludes de Mina 10**

Los macizos rocosos de la parte alta de las paredes NW y W son de mala calidad geomecánica, con un índice RMR que varía entre 26 y 40 (Tipo IVA) y una clasificación SMR que indica que la estabilidad de esta zona es de mala a regular, asociado principalmente a la roca hornfels, la cual puede presentarse alterada.

En la parte media – baja de la pared NW y en la pared SE el macizo rocoso presenta una calidad geomecánica regular, con un índice RMR que varía entre 51 y 60 (IIIA) y una clasificación SMR que indica que la estabilidad de esta zona es regular, asociado principalmente a la roca hornfels/hornfels alterado y a la andesita porfirítica. Los deslizamientos predominantes en esta zona son del tipo planar y/o cuña.

En las paredes NE y W el macizo rocoso presenta una calidad geomecánica regular, con un índice RMR que varía entre 41 y 50 (IIIB) y una clasificación SMR que indica que la estabilidad de esta zona es regular a buena, asociado principalmente a la roca hornfels/hornfels alterado y al mineral. Los deslizamientos predominantes en esta zona son del tipo planar y/o cuña. En los niveles inferiores del tajo la calidad geomecánica de todas las estaciones realizadas ha sido clasificada como regular (IIIA).

3.3.10.13 Índice de Resistencia Geológica (GSI)

La clasificación GSI se basa en una observación cuidadosa del macizo rocoso y, por

consecuente, es esencialmente cualitativa. La estimación del índice GSI de un macizo rocoso comprende la evaluación de dos aspectos: características estructurales (intertrabamiento, perturbación y sistemas de discontinuidades) y condiciones de las discontinuidades (características de las paredes de las discontinuidades, rugosidad, relleno, resistencia a la compresión uniaxial y alteración).

El índice GSI fue propuesto por Hoek et al (1995) debido a la falta de aplicación del RMR, en el criterio de resistencia Hoek y Brown para macizos altamente fracturados, y por sus continuos cambios del mismo. La estimación del índice GSI para el presente estudio se ha efectuado mediante el uso de tablas preestablecidas, las cuales comprenden los factores principales que influyen en la resistencia del macizo rocoso (estructura y condiciones superficiales). En la **Figura 63** se presenta la plantilla de cálculo del índice GSI para los macizos rocosos fracturados.

CARACTERÍSTICAS DEL MACIZO ROCOSO PARA EVALUAR SU RESISTENCIA		CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES				
<p>Basándose en la apariencia del afloramiento de roca, escoja la categoría que, según su criterio, mejor describe la condición 'típica' del macizo rocoso in situ en condición no perturbada. Note que superficies expuestas de roca que han sido generadas por tronadura pueden dar una impresión errónea de la calidad de la roca subyacente. Puede ser necesario considerar algún ajuste por tronadura, y un examen de testigos de sondeos y/o superficies definidas con picaporte o tronaduras amortiguadas puede ayudar en la definición de este ajuste. Es también importante entender que el criterio de Hoek-Brown solo debe aplicarse a macizos rocosos en que el tamaño del bloque 'típico' es pequeño con respecto al tamaño de la excavación considerada.</p>		EMPEORA LA CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES				
		MUY BUENA	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA
ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES				
DISMINUYE LA TRABAJAZÓN DE LOS BLOQUES DE ROCA		EMPEORA LA CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES				
<p>FRACTURADO EN BLOQUES (BLOCKY) MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR TRONCOS O BLOQUES DE ROCA BIEN TRABAJADOS, DE FORMA CÚBICA Y DEFINIDOS POR TRES SETS DE ESTRUCTURAS, ORTOGONALES ENTRE SI.</p>	FB/MB	FB/BE	FB/R	FB/M	FB/MM	
<p>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES (VERY BLOCKY) MACIZO ROCOSO ALGO PERTURBADO, CONFORMADO POR TRONCOS O BLOQUES DE ROCA TRABAJADOS, DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR CUATRO O MAS SETS DE ESTRUCTURAS.</p>	FF/MB	FF/BE	FF/R	FF/M	FF/MM	
<p>FRACTURADO Y PERTURBADO (BLOCKY / DISTURBED) MACIZO ROCOSO FUERTEMENTE TRABAJADO POR FALLAS, CONFORMADO POR TRONCOS O BLOQUES DE ROCA DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR LA INTERSECCIÓN DE NÚMEROS SETS DE ESTRUCTURAS.</p>	FP/MB	FP/BE	FP/R	FP/M	FP/MM	
<p>DESINTEGRADO (DISINTEGRATED) MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO Y QUEBRADO, CONFORMADO POR UN CONJUNTO FUERTEMENTE TRABAJADO DE BLOQUES Y TRONCOS DE ROCA, ANGULOSOS Y TAMBIÉN REDONDEADOS.</p>	D/MB	D/BE	D/R	D/M	D/MM	

INDICE GEOLOGICO DE RESISTENCIA		CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES						
<p>De los códigos de letra que describen la estructura del macizo rocoso y la condición de las discontinuidades (en Tabla 4), seleccione el cuadro apropiado en 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 38 a 42, es más realista que indicar un único valor, por ejemplo 38.</p>		EMPEORA LA CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES						
		MUY BUENA	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA		
ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO		CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES						
DISMINUYE LA TRABAJAZÓN DE LOS BLOQUES DE ROCA		EMPEORA LA CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES						
<p>FRACTURADO EN BLOQUES (BLOCKY) MACIZO ROCOSO CONFORMADO POR TRONCOS O BLOQUES DE ROCA BIEN TRABAJADOS, DE FORMA CÚBICA Y DEFINIDOS POR TRES SETS DE ESTRUCTURAS, ORTOGONALES ENTRE SI.</p>	80	70	60	50	40	30	20	10
<p>FUERTEMENTE FRACTURADO EN BLOQUES (VERY BLOCKY) MACIZO ROCOSO ALGO PERTURBADO, CONFORMADO POR TRONCOS O BLOQUES DE ROCA TRABAJADOS, DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR CUATRO O MAS SETS DE ESTRUCTURAS.</p>	80	70	60	50	40	30	20	10
<p>FRACTURADO Y PERTURBADO (BLOCKY / DISTURBED) MACIZO ROCOSO FUERTEMENTE TRABAJADO POR FALLAS, CONFORMADO POR TRONCOS O BLOQUES DE ROCA DE VARIAS CARAS, ANGULOSOS Y DEFINIDOS POR LA INTERSECCIÓN DE NÚMEROS SETS DE ESTRUCTURAS.</p>	80	70	60	50	40	30	20	10
<p>DESINTEGRADO (DISINTEGRATED) MACIZO ROCOSO MUY FRACTURADO Y QUEBRADO, CONFORMADO POR UN CONJUNTO FUERTEMENTE TRABAJADO DE BLOQUES Y TRONCOS DE ROCA, ANGULOSOS Y TAMBIÉN REDONDEADOS.</p>	80	70	60	50	40	30	20	10

Figura 63. Índice de Resistencia Geológica (GSI) Para Macizos Rocosos Fracturados.

Fuente: Hoek et al (1995).



De acuerdo a la plantilla anterior, las condiciones de las discontinuidades se clasifican como:

- Muy Buena: Superficies muy rugosas y sanas.
- Buena: Superficies rugosas, ligeramente meteorizadas y teñidas de óxido.
- Media: Superficies lisa y moderadamente meteorizadas y alteradas.
- Mala: Superficies con espejo de falla y altamente meteorizadas, con rellenos de fragmentos angulares o con recubrimientos compactos.
- Muy mala: Superficies con espejo de falla altamente meteorizadas con recubrimientos o rellenos de arcillas blandas.

la evaluación de los taludes y los datos de las estaciones geomecánicas, el macizo rocoso se encuentra fracturado, presentando muchos bloques, y además las discontinuidades presentan superficies lisas y moderadamente meteorizadas. El rango de valores de GSI para los macizos rocosos que conforman los taludes de la Mina 9-10, se encuentra entre 41 y 65. En los niveles inferiores del tajo, los índices GSI varían entre 51 y 59.

En la **Tabla 62** y **Tabla 63** se presenta un resumen de los índices GSI del macizo rocoso estimados en cada estación geomecánica de la Mina 9-10.

Tabla 62: (a) Resumen de la Valoración GSI en la Mina 10

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	GSI
EG-01	Hornfels – Magnetita	569	59
EG-02	Magnetita – Hornfels	569	56
EG-03	Magnetita – Andesita	545	51
EG-04	Magnetita – Hornfels	545	54
EG-05	Magnetita – Hornfels – Andesita	581	56
EG-06	Hornfels – Magnetita	581	56



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	GSI
EG-07	Magnetita – Hornfels	569	54
EG-08	Magnetita – Hornfels	569	56

Tabla 63: (a) *Resumen de la Valoración GSI en la Mina 9-10*

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	GSI
EG-01 (Mina 9)	Hornfels	725	54
EG-02 (Mina 9)	Hornfels	724	58
EG-03 (Mina 9)	Hornfels	726	61
EG-04 (Mina 9)	Hornfels Alterado	715	58
EG-05 (Mina 9)	Hornfels Alterado	714	57
EG-06 (Mina 10)	Arenisca Poco Consolidada	724	41
EG-07 (Mina 9)	Magnetita	734	52
EG-08 (Mina 10)	Hornfels	702	55
EG-09 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	703	54
EG-10 (Mina 10)	Hornfels	701	59
EG-11 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	629	54
EG-12 (Mina 10)	Hornfels	628	54
EG-13 (Mina 10)	Hornfels	629	60
EG-14 (Mina 10)	Hornfels Alterado	702	51
EG-15 (Mina 10)	Hornfels	702	65
EG-16 (Mina 10)	Hornfels	701	55
EG-17 (Mina 10)	Hornfels Alterado	677	54
EG-18 (Mina 10)	Zona de Óxidos	678	46
EG-19 (Mina 10)	Hornfels	678	48
EG-20 (Mina 10)	Hornfels	677	58
EG-21 (Mina 10)	Hornfels	678	58
EG-22 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	677	55
EG-23 (Mina 10)	Hornfels	679	47
EG-24 (Mina 10)	Hornfels	678	51
EG-25 (Mina 10)	Hornfels	676	59
EG-26 (Mina 10)	Hornfels	677	47
EG-27 (Mina 10)	Zona de Óxidos	641	47
EG-28 (Mina 10)	Zona de Óxidos	678	46
EG-29 (Mina 10)	Pórfido Andesítico	703	57
EG-30 (Mina 10)	Zona de Óxidos	642	61



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	GSI
EG-31 (Mina 10)	Hornfels	640	55
EG-32 (Mina 10)	Hornfels Alterado	642	56
EG-33 (Mina 10)	Hornfels	678	56
EG-34 (Mina 10)	Hornfels	626	52
EG-35 (Mina 10)	Hornfels	620	58
EG-36 (Mina 10)	Hornfels	594	53
EG-37 (Mina 10)	Hornfels	672	53
EG-38 (Mina 10)	Hornfels	646	56
EG-39 (Mina 10)	Magnetita	658	65
EG-40 (Mina 10)	Hornfels	624	49
EG-41 (Mina 10)	Hornfels	642	52
EG-42 (Mina 10)	Andesita Porfírica	581	59
EG-43 (Mina 10)	Hornfels Alterado	718	56
EG-44 (Mina 10)	Magnetita	715	58
EG-45 (Mina 10)	Zona de Óxidos	715	47
EG-46 (Mina 10)	Hornfels Alterado	620	47
EG-47 (Mina 10)	Hornfels Alterado	629	51
EG-48 (Mina 10)	Hornfels Alterado	668	53
EG-49 (Mina 10)	Hornfels Alterado	690	55

En el *Anexo A-4: Valoración del Macizo Rocoso*, se presenta la tabla detallada de Índice de Resistencia Geológica – GSI para cada estación geomecánica (*Anexo A-4.2*). Y en el *Anexo A-4.3* se presenta una tabla resumen de los índices de calidad estimados (RMR, SMR).

3.3.11 Zonificación geomecánica

La zonificación geomecánica de la Mina 9-10 se ha definido teniendo en cuenta parámetros como la calidad geomecánica, el grado de fracturamiento, el tipo de roca, la condición de las discontinuidades, la meteorización, la orientación de las discontinuidades y la condición de agua subterránea. Estos parámetros han sido discutidos con más detalle en el *ítem* 3.3.10. Para la zonificación geomecánica de los taludes de la Mina 9-10, se estableció un promedio de las mediciones obtenidas en las estaciones geomecánicas para establecer

zonas con propiedades similares de acuerdo a la calidad geomecánica del macizo rocoso, las cuales se describen a continuación. En la **Figura 64** se presenta la zonificación geomecánica de los macizos rocosos teniendo en consideración la resistencia de la roca intacta.

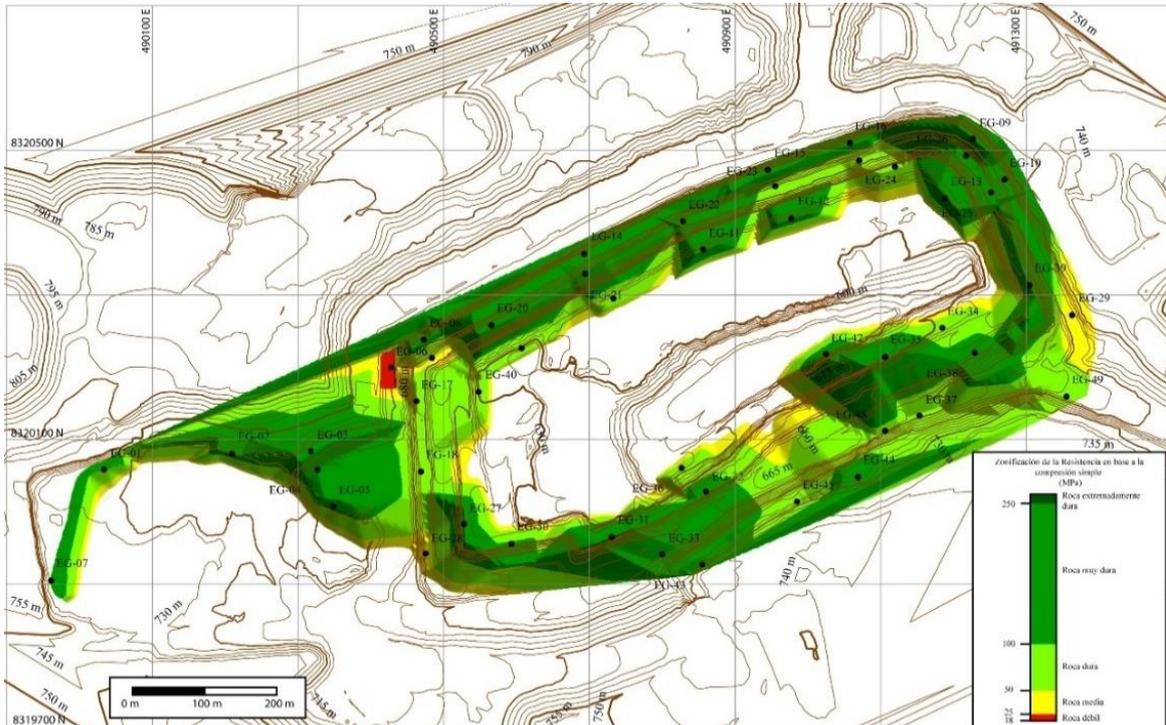


Figura 64. Zonificación de la Resistencia en Base a la Compresión Simple.

3.3.11.1 Definición de los dominios estructurales

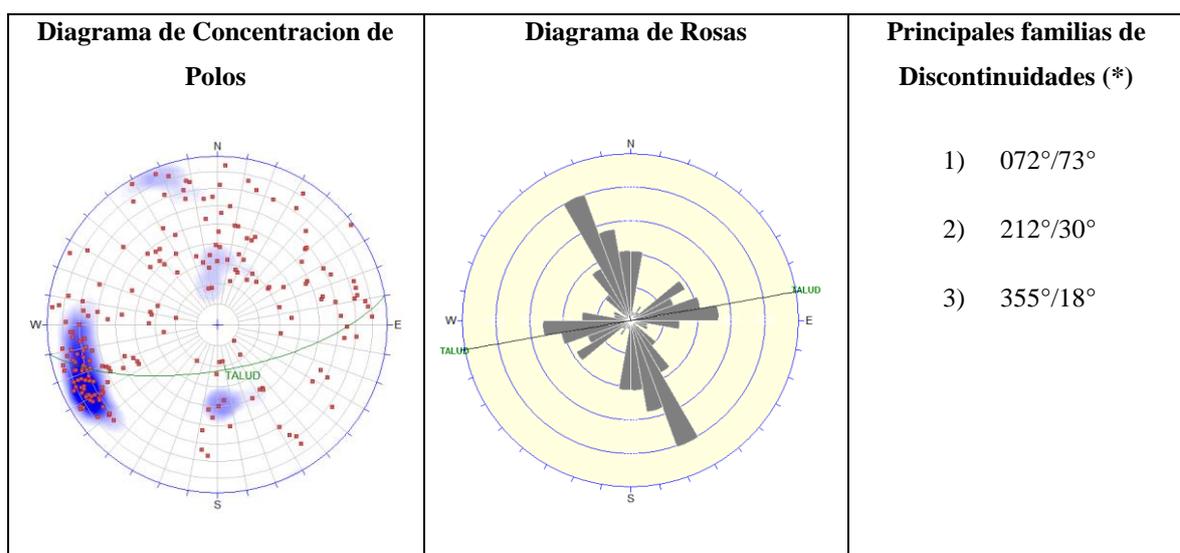
Los dominios estructurales generalmente están delimitados por estructuras geológicas y litología, dentro de la cual las estructuras presentan direcciones preferentemente similares. También las discordancias (fallas) o zonas de pliegues separan dominios estructurales diferentes.

En la Mina 9-10 se encuentran macizos rocosos conformados en su mayoría por hornfels (roca caja). Se observan zonas de intrusiones (diques de andesita) que se presentan de forma tabular y paralelas entre sí. En los niveles inferiores, se observan zonas de mineralización y magnetita masiva. Los macizos rocosos presentan fallas en los diferentes

frentes, las cuales están asociadas a la deformación tectónica. En el talud Este presentan intrusiones de cuerpos andesíticos y pórfidos andesíticos dentro de la roca caja (hornfels), y en el nivel inferior se encuentra el cuerpo mineralizado. En los niveles intermedio e inferior del talud oeste, el macizo rocoso presenta una alta alteración y fuerte fracturamiento, esto debido a una constante actividad tectónica, la cual genera abundantes cuñas inestables, las cuales con el proceso de excavación (voladura), podrían generar derrumbes y caída de rocas. A continuación, se describen los dominios geomecánicos que se han considerado.

3.3.11.1 Zona Norte

La Zona Norte de la Mina 9-10, está conformada por macizos rocosos de buena calidad (RMR=63-70) y de regular calidad (RMR=52-60). El macizo rocoso presenta tres orientaciones preferentes de fracturamiento, la principal con orientación N20°W, la segunda con orientación E-W y la tercera con orientación N60°W. En este sector la concentración de polos predominante se encuentra en el tercer cuadrante de la red estereográfica, lo que indica que para taludes con direcciones de buzamiento comprendida entre 0° y 90°, es más probable la formación de deslizamientos tipo cuñas y/o planares. Ver **Figura 65**.

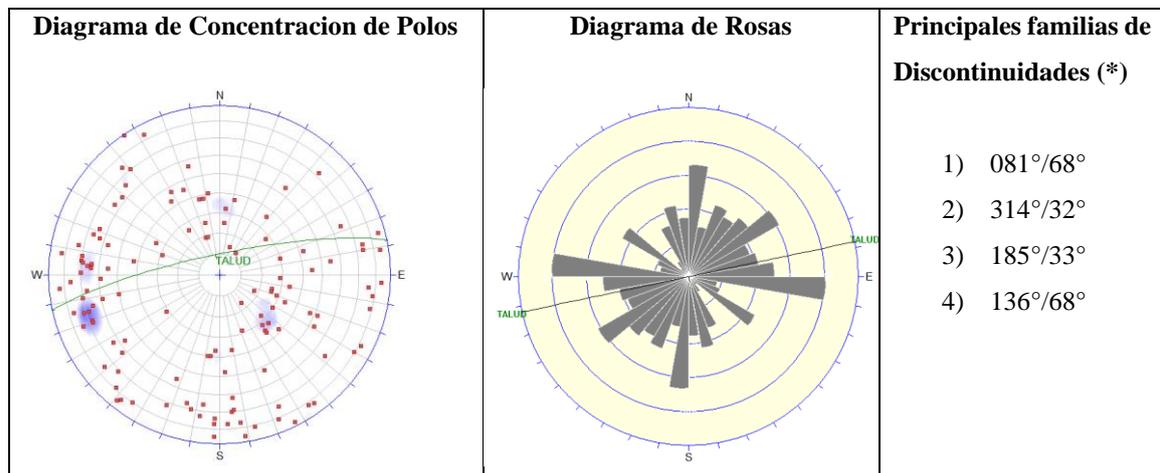


* Para los datos de buzamiento no se toman en consideración los cuadrantes de buzamiento, ya que los datos se han registrado usando la regla de mano derecha.

Figura 65. Cartografiado geológico superficial de canales de muestreo de estructuras mineralizadas.

3.3.11.1.2 Zona Sur

La Zona Sur de la Mina 9-10, en las partes laterales superiores está conformado por macizos rocosos de buena calidad (RMR=61-67); y macizos rocosos de regular calidad en parte media de los taludes (RMR=57-60). El macizo rocoso presenta tres orientaciones preferentes de fracturamiento, la principal con orientación N-S, la segunda con orientación N40°E y la tercera con orientación N70°E. En este sector, se observa una concentración de polos predominante en el hemisferio oeste de la red estereográfica, lo que indica que para taludes con direcciones de buzamiento comprendida entre 0° y 180°, es más probable la formación de deslizamientos tipo cuñas y/o planares. Ver **Figura 66**.



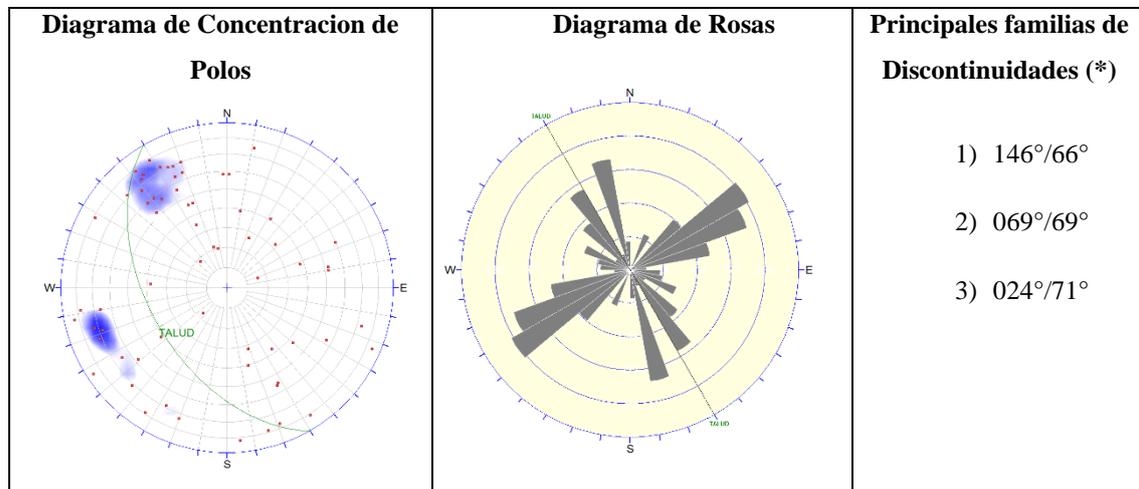
* Para los datos de buzamiento no se toman en consideración los cuadrantes de buzamiento, ya que los datos se han registrado usando la regla de mano derecha.

Figura 66. Diagrama de Contornos y Diagrama de Rosas Para la Determinación de las Principales Familias de Discontinuidades del Sector Sur Obtenidas del Mapeo de Bancos de la Mina 9-10

3.3.11.1.3 Zona Este

La Zona Este de la Mina 9-10, está conformada mayoritariamente por macizos rocosos de buena calidad (RMR=62-70); y macizos rocosos de regular calidad en la parte alta del talud NE (RMR=57-59). El macizo rocoso presenta tres orientaciones preferentes de fracturamiento, la principal con orientación N55°E, la segunda con orientación N20°W y la tercera con orientación N65°W. En este sector, se observa una concentración de polos

predominante en el cuarto cuadrante de la red estereográfica, lo que indica que para taludes con direcciones de buzamiento comprendida entre 90° y 180° , es más probable la formación de deslizamientos tipo cuñas y/o planares. Ver **Figura 67**.

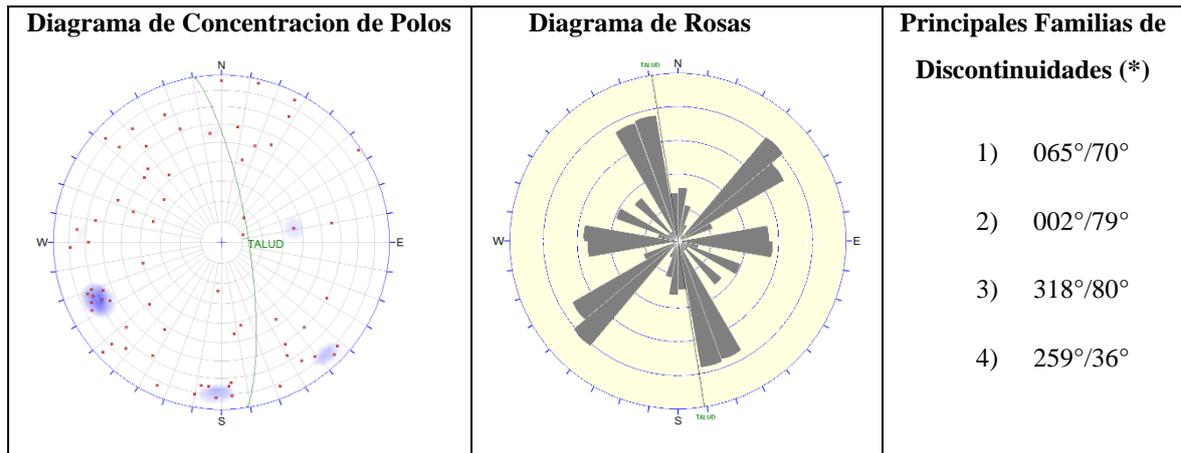


* Para los datos de buzamiento no se toman en consideración los cuadrantes de buzamiento, ya que los datos se han registrado usando la regla de mano derecha.

Figura 67. Diagrama de Contornos y Diagrama de Rosas Para la Determinación de las Principales Familias de Discontinuidades del Sector Este Obtenidas del Mapeo de Bancos de la Mina 9-10.

3.3.11.1.4 Zona Oeste

La Zona Oeste de la Mina 9-10, está conformada mayoritariamente por macizos rocosos de regular calidad geomecánica (RMR=46-59). El macizo rocoso presenta tres orientaciones preferentes de fracturamiento, la principal con orientación $N50^\circ E$, la segunda con orientación $N20^\circ W$ y la tercera con orientación $W-E$. En este sector, se observa una concentración de polos predominante en el tercer cuadrante de la red estereográfica, lo que indica que para taludes con direcciones de buzamiento comprendida entre 0° y 90° , es más probable la formación de deslizamientos tipo cuñas y/o planares. Ver **Figura 68**.



* Para los datos de buzamiento no se toman en consideración los cuadrantes de buzamiento, ya que los datos se han registrado usando la regla de mano derecha.

Figura 68. Diagrama de Contornos y Diagrama de Rosas Para la Determinación de las Principales Familias de Discontinuidades del Sector Oeste Obtenidas del Mapeo de Bancos de la Mina 9-10.

3.3.11.2 Estimación de las Propiedades de Resistencia y Deformación de los Macizos Rocosos de Acuerdo al Criterio de Rotura Generalizado de Hoek Y Brown (2002)

Para definir la resistencia al corte del macizo rocoso en el análisis de estabilidad global de los taludes de la Mina 9-10 se ha considerado el Criterio de Rotura Generalizado de Hoek y Brown (Hoek et al, 2002), el cual reúne todas las modificaciones en su formulación desde su origen hasta el año 2002, este criterio es expresado en términos de los esfuerzos efectivos principales mayor y menor, y la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa. Su versión más reciente (2002), corresponde a la siguiente formulación:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \times \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Dónde:

- σ_1' y σ_3' : Esfuerzos efectivos principales mayor y menor respectivamente en el momento de la rotura.
- σ_{ci} : Resistencia a la compresión uniaxial de la matriz rocosa.
- m_b : Parámetro relacionado con la naturaleza friccionante del macizo rocoso.
- s, a : Constantes que dependen de la naturaleza del macizo rocoso.

Los parámetros m_b, s y a del macizo rocoso han sido determinados mediante las siguientes



expresiones:

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

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

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

Dónde:

- m_i : Es un parámetro dependiente de la litología de la roca.
- GSI: Índice de Resistencia Geológica (Hoek et al, 1995).
- D: Factor de perturbación del macizo rocoso por efectos de voladura.

A continuación, se explica cómo se han estimado los valores de m_i , D y E.

3.3.11.2.1 Factor de Alteración (D)

El factor de perturbación D depende del efecto que puede causar el proceso de detonación durante las operaciones de excavación y alivio de tensiones; y varía de 0 (macizo rocoso no perturbado) a 1 (macizo rocoso muy perturbado). Para las condiciones proyectadas de excavación y de acuerdo a la calidad de la roca identificada en la Mina 9-10, conservadoramente se ha considerado utilizar un factor de perturbación D=1 (explotaciones mineras a cielo abierto).

3.3.11.2.2 Parámetro de la Litología (m_i)

La constante m_i es un parámetro dependiente de la litología de la roca, es determinada a través de ensayos de compresión triaxial. Valores referenciales de algunos tipos de roca fueron publicados en la literatura por Hoek y Brown (1997) y Hoek, Marinos y Benissi (1998), Hoek y Marinos (2000), y Marinos y Hoek (2000), los cuales se presentan en la

Tabla 64.

Tabla 64: Veta Valores de la Constante m_i Para la Matriz Rocosa

Sedimentarias Clásticas	Conglomerados	(22)	Lutita	4
	Areniscas	17±4	Grauvaca	(18)
	Limolita	9	-	-
Sedimentarias No Clásticas	Caliza margosa	7	Caliza micritica	8
	Brecha caliza	(20)	Yeso	16
	Caliza aspártica	(10)	Anhidrita	13
Metamórficas	Mármol	9	Milonita	6
	Hornfels	19±4	Gneiss(*)	33
	Cuarcita	24	Esquisto(*)	4-8
	Migmatita	(30)	Filita(*)	(10)
	Anfibolita	31	Pizarra(*)	9
Ígneas	Granito	33	Andesita	25±5
	Riolita	(16)	Gabro	27
	Obsidiana	(19)	Dolerita	(19)
	Granodiorita	29±3	Basalto	(17)
	Dacita	25±3	Norita	22
	Diorita	(28)		
Ígneas Extrusivas Piroclásticas	Aglomerado	(20)	Toba	(15)
	Brecha	(18)	-	-

Fuente: Hoek y Brown (1977). Notas: Los valores entre paréntesis son estimados. (*) Valores obtenidos de ensayos en matriz rocosa con dirección de aplicación de la carga normal a los planos de foliación. El valor de m_i , será significativamente diferente si la rotura ocurre a favor de los planos de debilidad.

En el presente estudio los valores de m_i se han obtenido de los ensayos triaxiales ejecutados en las muestras representativas de roca, tal como se explica a continuación:

- Para el caso del hornfels, que es la roca más importante desde el punto de vista de la estabilidad global, ya que sobre esta es que se desarrollan las superficies de deslizamiento. Se ha tomado el promedio de valores obtenidos de los ensayos triaxiales (estaciones EG-13 y EG-38), obteniéndose $m_i=21$, el valor utilizado es concordante con los valores promedio para el hornfels presentados en la **Tabla 64**.
- Para el caso de los diques de andesita y pórfido andesítico, se ha tomado el valor de $m_i=26$, teniendo en consideración los resultados del ensayo triaxial (estación EG-11).



- Para el caso de la zona de óxidos, se ha tomado el valor de $m_i=14$, teniendo en consideración los resultados del ensayo triaxial (estación EG-28).
- Para el caso de la magnetita, se ha tomado el valor de $m_i=26$, teniendo en consideración los resultados del ensayo triaxial (plataforma de perforación, Nivel 629).

3.3.11.2.3 Módulo de Deformación (E)

De acuerdo a la clasificación geomecánica, varios autores han propuesto criterios empíricos para estimar el módulo de deformación del macizo rocoso, tales como Bieniawski (1978), Serafim y Pereira (1983), Kulhawy y Goodman (1980), Hoek (1995), Grimstad y Barton (1993), Gokceoglu et al. (2003), etc. Recientemente, en base a una revisión de varios criterios, resultados de ensayos in situ en China y Taiwán, Hoek y Diederichs (2006) propusieron una relación para determinar el módulo de deformación del macizo rocoso (E_m) en función del GSI, módulo de elasticidad de la roca intacta (E_i) y el grado de perturbación del macizo (D) por causa de la detonación de las voladuras y alivio de tensiones. La relación se expresa por:

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

En la **Tabla 65** y **Tabla 66** se presenta un resumen de los parámetros de resistencia y deformación del macizo rocoso de acuerdo con el Criterio de Rotura de Hoek y Brown, los cuales han sido obtenidos con el programa Rocdata. En el caso de estaciones geomecánicas con más de una litología, se ha evaluado los parámetros de resistencia y deformación respetando el GSI del macizo rocoso, pero variando la resistencia a la compresión simple y el parámetro de la litología m_i .

En el **Anexo A-6: Parámetros de Resistencia del Macizo Rcoso**, se presentan las curvas de resistencia del macizo rocoso y sus correspondientes parámetros de resistencia al

corte y módulo de deformación obtenidos.

Tabla 65: Resumen de las Propiedades de Resistencia y Deformación del Macizo Rocoso - Mina 10

Estación Geomecánica	Litología Predominante	Nive I	GS I	m_i	Resistencia a la Compresión (MPa)	m_b	s	a	Módulo de Deformación E (MPa)
EG-01	Hornfels	569	59	21	148.96	1.123	0.0011	0.503	8394.02
	Magnetita	569	59	26	148.96	1.390	0.0011	0.503	8394.02
EG-02	Magnetita	569	56	26	123.36	1.122	0.0007	0.504	7062.69
	Hornfels	569	56	21	123.36	0.906	0.0007	0.504	7062.69
EG-03	Magnetita	545	51	26	118.67 ^(*)	0.785	0.0003	0.505	5296.27
	Andesita	545	51	26	118.67 ^(*)	0.785	0.0003	0.505	5296.27
EG-04	Magnetita	545	54	26	127.88 ^(*)	0.973	0.0005	0.504	6294.63
	Hornfels	545	54	21	127.88 ^(*)	0.786	0.0005	0.504	6294.63
EG-05	Magnetita	581	56	26	147.20	1.122	0.0007	0.504	7062.69
	Hornfels	581	56	21	147.20	0.906	0.0007	0.504	7062.69
	Andesita	581	56	26	147.20	1.122	0.0007	0.504	7062.69
EG-06	Hornfels	581	56	21	121.88 ^(*)	0.906	0.0007	0.504	7062.69
	Magnetita	581	56	26	121.88 ^(*)	1.122	0.0007	0.504	7062.69
EG-07	Magnetita	581	54	26	165.12	0.973	0.0005	0.504	6294.63
	Hornfels	569	54	21	165.12	0.786	0.0005	0.504	6294.63
EG-08	Magnetita	569	56	26	158.16 ^(*)	1.122	0.0007	0.504	7062.69
	Hornfels	569	56	21	158.16 ^(*)	0.906	0.0007	0.504	7062.69

Tabla 66: Resumen de las Propiedades de Resistencia y Deformación del Macizo Rocoso - Mina 9- 10

Estación Geomecánica	Litología Predominante	Nive I	GS I	m_i	Resistencia a la Compresión (MPa)	m_b	s	a	Módulo de Deformación E (MPa)
EG-01	Hornfels	725	54	21	102.19 ^(*)	0.786	0.0005	0.504	6294.63
EG-02	Hornfels	724	58	21	147.99 ^(*)	1.046	0.0009	0.503	7924.47
EG-03	Hornfels	726	61	21	185.81	1.295	0.0015	0.503	9418.25
EG-04	Hornfels Alterado	715	58	21	123.31	1.046	0.0009	0.503	7924.47
EG-05	Hornfels Alterado	714	57	21	92.14 ^(*)	0.973	0.0008	0.504	7181.15
EG-06	Arenisca Poco Consolidada	724	41	26	19.82	0.384	0.0001	0.511	1325.93
EG-07	Magnetita	734	52	26	196.16 ^(*)	0.843	0.0003	0.505	5610.09
EG-08	Hornfels	702	55	21	121.25	0.844	0.0006	0.504	6667.61



Estación Geomecánica	Litología Predominante	Nive l	GS I	mi	Resistencia a la Compresión (MPa)	m _b	s	a	Módulo de Deformación E (MPa)
EG-09	Andesita Porfírica	703	54	26	216.48	0.973	0.0005	0.504	6294.63
EG-10	Hornfels	701	59	21	124.27	1.123	0.0011	0.503	8394.02
EG-11	Andesita Porfírica	629	54	26	206.30	0.973	0.0005	0.504	6294.63
EG-12	Hornfels	628	54	21	131.62	0.786	0.0005	0.504	6294.63
EG-13	Hornfels	629	60	21	181.87	1.206	0.0013	0.503	8891.40
EG-14	Hornfels Alterado	702	51	21	147.50	0.634	0.0003	0.505	5296.27
EG-15	Hornfels	702	65	21	148.18 ^(*)	1.724	0.0029	0.502	11856.87
EG-16	Hornfels	701	55	21	131.93 ^(*)	0.844	0.0006	0.504	6667.61
EG-17	Hornfels Alterado	677	54	21	111.84	0.786	0.0005	0.504	6294.63
EG-18	Zona de Óxidos	678	46	14	86.83	0.296	0.0001	0.508	3700.88
EG-19	Hornfels	678	48	21	91.44	0.512	0.0002	0.507	4261.26
EG-20	Hornfels	677	58	21	35.81	1.046	0.0009	0.503	4742.12
EG-21	Hornfels	678	58	21	162.72	1.046	0.0009	0.503	7924.47
EG-22	Andesita Porfírica	677	55	26	137.81	1.045	0.0006	0.504	6667.61
EG-23	Hornfels	679	47	21	96.19	0.477	0.0001	0.507	4126.05
EG-24	Hornfels	678	51	21	85.15	0.634	0.0003	0.505	4887.22
EG-25	Hornfels	676	59	21	125.33	1.123	0.0011	0.503	8394.02
EG-26	Hornfels	677	47	21	99.08 ^(*)	0.477	0.0001	0.507	3992.86
EG-27	Zona de Óxidos	641	47	14	146.93	0.318	0.0001	0.507	4206.98
EG-28	Zona de Óxidos	678	46	14	39.07	0.296	0.0001	0.508	2482.51
EG-29	Pórfido Andesítico	703	57	26	47.76	1.205	0.0008	0.504	5170.14
EG-30	Zona de Óxidos	642	61	14	115.58	0.864	0.0015	0.503	9418.25
EG-31	Hornfels	640	55	21	261.41	0.844	0.0006	0.504	6667.61
EG-32	Hornfels Alterado	642	56	21	110.54	0.906	0.0007	0.504	7062.69
EG-33	Hornfels	678	56	21	128.21	0.906	0.0007	0.504	7062.69
EG-34	Hornfels	626	52	21	86.11	0.681	0.0003	0.505	5205.91
EG-35	Hornfels	620	58	21	195.65	1.046	0.0009	0.503	7924.47
EG-36	Hornfels	594	53	21	88.22	0.732	0.0004	0.505	5581.53
EG-37	Hornfels	672	53	21	52.46	0.732	0.0004	0.505	4304.12
EG-38	Hornfels	646	56	21	113.28	0.906	0.0007	0.504	7062.69
EG-39	Magnetita	658	65	26	139.06	2.134	0.0029	0.502	11856.87
EG-40	Hornfels	624	49	21	88.61	0.550	0.0002	0.506	4443.36
EG-41	Hornfels	642	52	21	95.71	0.681	0.0003	0.505	5488.44
EG-42	Andesita Porfírica	581	59	26	180.00	1.390	0.0011	0.503	8394.02



Estación Geomecánica	Litología Predominante	Nive l	GS I	mi	Resistencia a la Compresión (MPa)	m _b	s	a	Módulo de Deformación E (MPa)
EG-43	Hornfels Alterado	718	56	21	149.57	0.906	0.0007	0.504	7062.69
EG-44	Magnetita	715	58	26	179.71	1.294	0.0009	0.503	7294.47
EG-45	Zona de Óxidos	715	47	14	59.23	0.318	0.0001	0.507	3237.73
EG-46	Hornfels Alterado	620	47	21	79.54	0.477	0.0001	0.507	3572.00
EG-47	Hornfels Alterado	629	51	21	82.56	0.634	0.0003	0.505	4812.32
EG-48	Hornfels Alterado	668	53	21	36.62	0.732	0.0004	0.505	3596.08
EG-49	Hornfels Alterado	690	55	21	79.54	0.844	0.0006	0.504	5946.52

(*): Valores promedio

3.3.11.3 Estimación de los Parámetros de Resistencia al Corte de las Discontinuidades de Acuerdo al Criterio de Rotura de Barton y Choubey (1977)

El Criterio de Barton y Choubey es un criterio de rotura empírico, deducido a partir del análisis del comportamiento de las discontinuidades en ensayos de laboratorio, que permite estimar la resistencia al corte en discontinuidades rugosas. El criterio se expresa con la siguiente formulación:

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

Dónde:

- ϕ_r : Ángulo de fricción residual de la discontinuidad.
- JRC: Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (Joint Roughness Coefficient).
- JCS: Resistencia de la pared de la discontinuidad (Joint Wall Compression Strength).

De acuerdo con la expresión anterior la resistencia de la discontinuidad depende de tres componentes: una componente friccional (ϕ_r), una componente geométrica dada por el parámetro JRC, y una componente de aspereza controlada por la relación JCS/ σ_n .



A continuación, se presenta una explicación de la manera en que se han estimado los parámetros de resistencia al corte de las discontinuidades.

3.3.11.3.1 Angulo de Fricción Residual

En general la pared de la discontinuidad esta alterada y por lo tanto el ángulo de fricción residual (ϕ_r) será inferior al angulo de fricción básico (ϕ_b). Para su evaluación se aplica la formula:

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

Donde R es el valor del rebote del Martillo Schmidt, sobre una superficie de material sano y seco; r es el valor del rebote sobre la pared de la junta en estado natural, húmedo o seco; ϕ_b o es el ángulo de fricción básico.

Si las paredes de la discontinuidad están sanas, $\phi_r = \phi_b$. Los valores típicos de ϕ_b en discontinuidades planas sin meteorizar son del orden de 25° a 37° para rocas sedimentarias, de 29° a 38° en rocas ígneas y de 21° a 30° en rocas metamórficas.

En el Anexo A-7 (Parámetros de Resistencia de las Discontinuidades), se presentan las mediciones tomadas en campo sobre las familias de discontinuidades principales, de las cuales al calcular su promedio se obtiene el valor de r y R.

De acuerdo con la experiencia en este tipo de análisis, y debido a que en general las paredes de las discontinuidades se encuentran alteradas, se considera el mayor valor de las mediciones obtenidas en campo como valor de R. La anterior regla práctica no constituye una diferencia de error significativa en la estimación de la resistencia al corte de las discontinuidades.

En la *Tabla 67* y *Tabla 68* se presenta un resumen de los ángulos de fricción



calculados para cada estación geomecánica, de acuerdo a las consideraciones mencionadas anteriormente.

Tabla 67: Resumen de Ángulos de Fricción Básicos y Residuales

Estación Geomecánica	Nivel	Litología	Ángulo de Fricción Básico (Φ_b)	Ángulo de Fricción Residual (Φ_r)
EG-01	569	Hornfels – Magnetita	30.6	28.3 – 28.7
EG-02	569	Magnetita – Hornfels	29.1	26.2 – 27.4
EG-03	545	Magnetita – Andesita	30.2	28.5 – 28.7
EG-04	545	Magnetita – Hornfels	29.6	29.6
EG-05	581	Magnetita – Hornfels – Andesita	31.4	22.1 – 26.5
EG-06	581	Hornfels – Magnetita	28.8	24.0 – 24.8
EG-07	569	Magnetita – Hornfels	31.6	27.6 – 28.7
EG-08	569	Magnetita – Hornfels	30.0	24.8 – 29.2

Fuente: propio

Tabla 68: Resumen de Ángulos de Fricción Básicos y Residuales

Estación Geomecánica	Nivel	Litología	Ángulo de Fricción Básico (Φ_b)	Ángulo de Fricción Residual (Φ_r)
EG-01	725	Hornfels	31.7	28.5
EG-02	724	Hornfels	29.4	27.8
EG-03	726	Hornfels	28.9	27.6
EG-04	715	Hornfels Alterado	30.4	28.3
EG-05	714	Hornfels Alterado	31.9	28.7
EG-06	724	Arenisca Poco Consolidada	28.0	24.2
EG-07	734	Magnetita	29.2	27.7
EG-08	702	Hornfels	28.4	26.5
EG-09	703	Andesita Porfírica	29.4	27.4
EG-10	701	Hornfels	29.4	27.5
EG-11	629	Andesita Porfírica	29.4	27.2
EG-12	628	Hornfels	31.4	28.6
EG-13	629	Hornfels	29.4	27.8
EG-14	702	Hornfels Alterado	28.4	27.3
EG-15	702	Hornfels	27.4	25.4
EG-16	701	Hornfels	28.4	26.0
EG-17	677	Hornfels Alterado	31.4	27.6
EG-18	678	Zona de Óxidos	28.3	24.3
EG-19	678	Hornfels	28.4	23.4
EG-20	677	Hornfels	29.9	27.6
EG-21	678	Hornfels	26.9	22.9
EG-22	677	Andesita Porfírica	27.9	26.6
EG-23	679	Hornfels	27.4	23.7
EG-24	678	Hornfels	28.9	26.5



Estación Geomecánica	Nivel	Litología	Ángulo de Fricción Básico (Φ_b)	Ángulo de Fricción Residual (Φ_r)
EG-25	676	Hornfels	29.4	25.9
EG-26	677	Hornfels	28.9	26.1
EG-27	641	Zona de Óxidos	26.3	22.1
EG-28	678	Zona de Óxidos	25.8	21.6
EG-29	703	Pórfido Andesítico	29.4	26.9
EG-30	642	Zona de Óxidos	28.3	25.4
EG-31	640	Hornfels	26.9	23.6
EG-32	642	Hornfels Alterado	28.4	25.3
EG-33	678	Hornfels	28.9	26.3
EG-34	626	Hornfels	27.9	25.1
EG-35	620	Hornfels	27.4	25.1
EG-36	594	Hornfels	28.9	25.7
EG-37	672	Hornfels	29.4	25.0
EG-38	646	Hornfels	29.4	24.7
EG-39	658	Magnetita	28.2	24.8
EG-40	624	Hornfels	30.4	28.0
EG-41	642	Hornfels	30.4	27.7
EG-42	581	Andesita Porfírica	27.9	25.5
EG-43	718	Hornfels Alterado	28.4	27.5
EG-44	715	Magnetita	28.2	27.0
EG-45	715	Zona de Óxidos	26.8	25.6
EG-46	620	Hornfels Alterado	28.4	27.0
EG-47	629	Hornfels Alterado	27.9	26.5
EG-48	668	Hornfels Alterado	27.4	25.7
EG-49	690	Hornfels Alterado	27.9	27.3

Fuente: propio

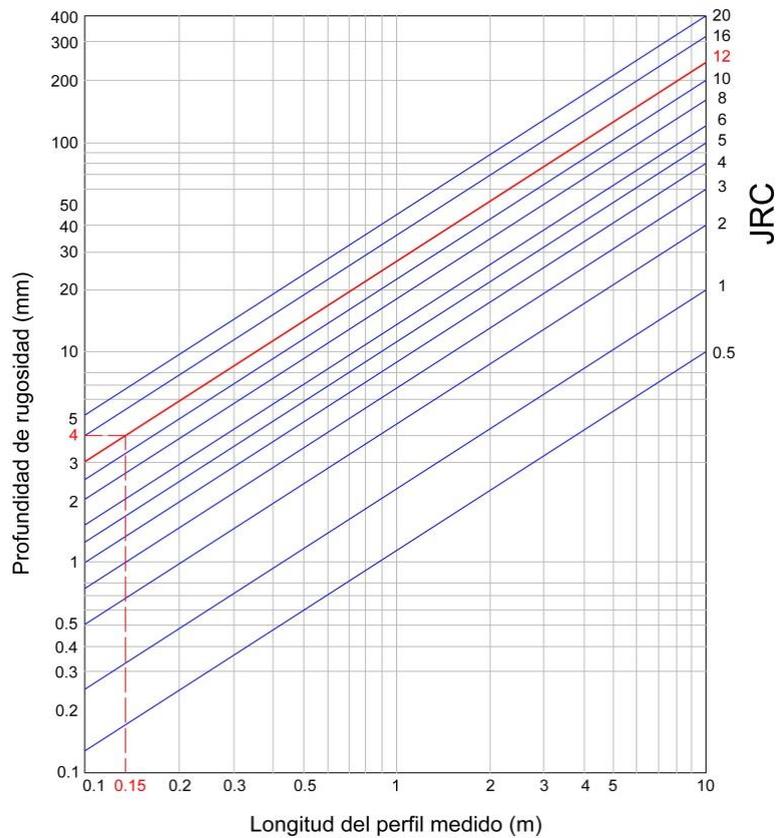
3.3.11.3.2 Coeficiente de rugosidad (JRC)

Con la finalidad de determinar los parámetros de rugosidad superficial de las discontinuidades principales, se ejecutaron mediciones con el Peine de Barton, con lo cual se obtuvo un perfil el cual se compara con una escala de perfiles propuesta por Barton. Cada perfil tiene asignado un número de clasificación JRC, que varía entre 0 y 20 (JRC = Coeficiente de Rugosidad de la Junta). Los perfiles normalizados propuestos por Barton y Choubey (1977), se presentan en la *Figura 69*.

PERFIL DE RUGOSIDAD	JRC	TIPO DE RUGOSIDAD
	0 - 2	Espejo de falla
	2 - 4	Lisa
	4 - 6	
	6 - 8	Ligeramente rugosa
	8 - 10	
	10 - 12	
	12 - 14	Rugosa
	14 - 16	
	16 - 18	Muy rugosa
	18 - 20	

Fuente: Barton (1977)

Figura 69. Perfiles de Rugosidad y Valores de JRC Propuestos por Barton y Choubey



Fuente: Barton (1977)

Figura 70. Ábaco de Barton



Para determinar directamente el valor de JRC, se ha utilizado el Peine de Barton (*Anexo A-2.4*), con el cual se obtiene un perfil de la discontinuidad a estudiar, el cual es comparado con los perfiles estándar presentados en la *Figura 69 y 70*, lo que permite obtener un valor representativo de JRC (*Tabla 69 y Tabla 70*).

Tabla 69: Valores de JRC

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Coefficiente de Rugosidad (JRC)
EG-01'	Hornfels – Magnetita	569	12
EG-02'	Magnetita – Hornfels	569	10
EG-03'	Magnetita – Andesita	545	8
EG-04'	Magnetita – Hornfels	545	12
EG-05'	Magnetita – Hornfels – Andesita	581	8
EG-06'	Hornfels – Magnetita	581	12
EG-07'	Magnetita – Hornfels	569	10
EG-08'	Magnetita – Hornfels	569	12

Tabla 70: Valores de JRC

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Coefficiente de Rugosidad (JRC)
EG-01	Hornfels	725	12
EG-02	Hornfels	724	4
EG-03	Hornfels	726	12
EG-04	Hornfels Alterado	715	12
EG-05	Hornfels Alterado	714	16
EG-06	Arenisca Poco Consolidada	724	12
EG-07	Magnetita	734	5
EG-08	Hornfels	702	5
EG-09	Andesita Porfírica	703	12
EG-10	Hornfels	701	20
EG-11	Andesita Porfírica	629	5
EG-12	Hornfels	628	2
EG-13	Hornfels	629	16
EG-14	Hornfels Alterado	702	4
EG-15	Hornfels	702	2
EG-16	Hornfels	701	8
EG-17	Hornfels Alterado	677	6
EG-18	Zona de Óxidos	678	12
EG-19	Hornfels	678	10



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Coefficiente de Rugosidad (JRC)
EG-20	Hornfels	677	4
EG-21	Hornfels	678	2
EG-22	Andesita Porfírica	677	12
EG-23	Hornfels	679	10
EG-24	Hornfels	678	16
EG-25	Hornfels	676	20
EG-26	Hornfels	677	2
EG-27	Zona de Óxidos	641	8
EG-28	Zona de Óxidos	678	5
EG-29	Pórfido Andesítico	703	6
EG-30	Zona de Óxidos	642	20
EG-31	Hornfels	640	10
EG-32	Hornfels Alterado	642	4
EG-33	Hornfels	678	8
EG-34	Hornfels	626	4
EG-35	Hornfels	620	10
EG-36	Hornfels	594	8
EG-37	Hornfels	672	10
EG-38	Hornfels	646	6
EG-39	Magnetita	658	5
EG-40	Hornfels	624	2
EG-41	Hornfels	642	10
EG-42	Andesita Porfírica	581	8
EG-43	Hornfels Alterado	718	10
EG-44	Magnetita	715	12
EG-45	Zona de Óxidos	715	10
EG-46	Hornfels Alterado	620	8
EG-47	Hornfels Alterado	629	6
EG-48	Hornfels Alterado	668	16
EG-49	Hornfels Alterado	690	16

El valor del parámetro JRC es reducido teniendo en cuenta el orden de magnitud real de las discontinuidades del macizo rocoso. Esto debido a que la rugosidad de las discontinuidades se evaluó a una escala de análisis pequeña (del orden de 10 cm – Peine de Barton), mientras que los bloques y/o cuñas se forman debido a la presencia de discontinuidades de longitud del orden de magnitud de metros, lo que implica que la rugosidad es menor al considerar discontinuidades de mayor longitud, lo explicado



anteriormente es un ejemplo de la aplicación del efecto escala en la evaluación de la resistencia al corte de las discontinuidades del macizo rocoso. Para realizar esta reducción del JRC se utiliza la siguiente expresión:

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02JRC_0}$$

Dónde:

- JRC_0 : Valor de JRC para muestras de laboratorio de tamaño 10 cm (L_0) .
- JRC_n : Valor de JRC in - situ para bloques de tamaño L_n .

Para la reducción de los valores de JRC se ha considerado conservadoramente que la longitud mínima de las discontinuidades es de 1 m (L_n), de acuerdo a las longitudes observadas en los macizos rocosos de las estaciones geomecánicas. Los valores obtenidos del JRC reducido se presentan en la **Tabla 71 y 72**, los cuales se encuentran en el intervalo de 2 a 8, lo que se interpreta como discontinuidades lisas a ligeramente rugosas.

Tabla 71: Valores de JRC Reducido

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Coefficiente de Rugosidad (JRC)
EG-01	Hornfels – Magnetita	569	7
EG-02	Magnetita – Hornfels	569	6
EG-03	Magnetita – Andesita	545	6
EG-04	Magnetita – Hornfels	545	7
EG-05	Magnetita – Hornfels – Andesita	581	6
EG-06	Hornfels – Magnetita	581	7
EG-07	Magnetita – Hornfels	569	6
EG-08	Magnetita – Hornfels	569	7

Tabla 72: Valores de JRC Reducido

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Coefficiente de Rugosidad (JRC)
EG-01	Hornfels	725	7
EG-02	Hornfels	724	3
EG-03	Hornfels	726	7
EG-04	Hornfels Alterado	715	7



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Coefficiente de Rugosidad (JRC)
EG-05	Hornfels Alterado	714	8
EG-06	Arenisca Poco Consolidada	724	7
EG-07	Magnetita	734	4
EG-08	Hornfels	702	4
EG-09	Andesita Porfírica	703	7
EG-10	Hornfels	701	8
EG-11	Andesita Porfírica	629	4
EG-12	Hornfels	628	2
EG-13	Hornfels	629	8
EG-14	Hornfels Alterado	702	3
EG-15	Hornfels	702	2
EG-16	Hornfels	701	6
EG-17	Hornfels Alterado	677	5
EG-18	Zona de Óxidos	678	7
EG-19	Hornfels	678	6
EG-20	Hornfels	677	3
EG-21	Hornfels	678	2
EG-22	Andesita Porfírica	677	7
EG-23	Hornfels	679	6
EG-24	Hornfels	678	8
EG-25	Hornfels	676	8
EG-26	Hornfels	677	2
EG-27	Zona de Óxidos	641	6
EG-28	Zona de Óxidos	678	4
EG-29	Pórfido Andesítico	703	5
EG-30	Zona de Óxidos	642	8
EG-31	Hornfels	640	6
EG-32	Hornfels Alterado	642	8
EG-33	Hornfels	678	6
EG-34	Hornfels	626	3
EG-35	Hornfels	620	6
EG-36	Hornfels	594	6
EG-37	Hornfels	672	6
EG-38	Hornfels	646	5
EG-39	Magnetita	658	4
EG-40	Hornfels	624	2
EG-41	Hornfels	642	6
EG-42	Andesita Porfírica	581	6
EG-43	Hornfels Alterado	718	6
EG-44	Magnetita	715	7
EG-45	Zona de Óxidos	715	6
EG-46	Hornfels Alterado	620	6



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Coefficiente de Rugosidad (JRC)
EG-47	Hornfels Alterado	629	5
EG-48	Hornfels Alterado	668	8
EG-49	Hornfels Alterado	690	8

3.3.11.3.3 Resistencia de la Pared de la Discontinuidad (JCS)

Si las paredes de la discontinuidad no están alteradas o meteorizadas JCS toma el valor de la resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa. Si la pared está alterada, como ocurre habitualmente, el valor de JCS puede obtenerse a partir de los resultados del Martillo Schmidt sobre la pared de la discontinuidad, mediante la expresión:

$$JCS = 10^{0.00088r+1.01}$$

Donde JCS esta expresado en MPa, g es el peso específico de la roca expresado en kN/m³ y r es rebote del Martillo Schmidt.

El peso específico de la roca fue obtenido del ensayo de propiedades físicas en las muestras obtenidas de cada estación geomecánica. Los valores de JCS calculados con la expresión anterior se presenta en la *Tabla 73* y *Tabla 74*.

Tabla 73: Valores de JCS

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	JCS _{min} (MPa)
EG-01	Hornfels – Magnetita	569	170.6
EG-02	Magnetita – Hornfels	569	165.2
EG-03	Magnetita – Andesita	545	81.1
EG-04	Magnetita – Hornfels	545	165.6
EG-05	Magnetita – Hornfels – Andesita	581	49.0
EG-06	Hornfels – Magnetita	581	58.5
EG-07	Magnetita – Hornfels	569	138.2
EG-08	Magnetita – Hornfels	569	117.2



Tabla 74: *Valores de JCS*

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	JCS_{min} (MPa)
EG-01	Hornfels	725	82.6
EG-02	Hornfels	724	151.4
EG-03	Hornfels	726	111.4
EG-04	Hornfels Alterado	715	96.4
EG-05	Hornfels Alterado	714	82.9
EG-06	Arenisca Poco Consolidada	724	19.7
EG-07	Magnetita	734	36.1
EG-08	Hornfels	702	78.5
EG-09	Andesita Porfírica	703	187.7
EG-10	Hornfels	701	116.7
EG-11	Andesita Porfírica	629	111.1
EG-12	Hornfels	628	92.2
EG-13	Hornfels	629	136.9
EG-14	Hornfels Alterado	702	89.9
EG-15	Hornfels	702	99.8
EG-16	Hornfels	701	103.5
EG-17	Hornfels Alterado	677	77.5
EG-18	Zona de Óxidos	678	59.5
EG-19	Hornfels	678	39.3
EG-20	Hornfels	677	40.8
EG-21	Hornfels	678	64.7
EG-22	Andesita Porfírica	677	122.0
EG-23	Hornfels	679	76.3
EG-24	Hornfels	678	83.5
EG-25	Hornfels	676	139.9
EG-26	Hornfels	677	113.5
EG-27	Zona de Óxidos	641	44.0
EG-28	Zona de Óxidos	678	40.5
EG-29	Pórfido Andesítico	703	88.0
EG-30	Zona de Óxidos	642	104.5
EG-31	Hornfels	640	84.5
EG-32	Hornfels Alterado	642	46.7
EG-33	Hornfels	678	91.1
EG-34	Hornfels	626	87.5
EG-35	Hornfels	620	104.1
EG-36	Hornfels	594	97.9
EG-37	Hornfels	672	86.0
EG-38	Hornfels	646	77.6
EG-39	Magnetita	658	50.0
EG-40	Hornfels	624	131.0
EG-41	Hornfels	642	98.9



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	JCS _{min} (MPa)
EG-42	Andesita Porfírica	581	181.2
EG-43	Hornfels Alterado	718	58.1
EG-44	Magnetita	715	49.9
EG-45	Zona de Óxidos	715	107.7
EG-46	Hornfels Alterado	620	62.0
EG-47	Hornfels Alterado	629	68.3
EG-48	Hornfels Alterado	668	261.1
EG-49	Hornfels Alterado	690	269.5

Para efectos de cálculo, el valor de JCS es reducido teniendo en cuenta la longitud real de las discontinuidades del macizo rocoso, para lo cual se utiliza la siguiente expresión:

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03JRC_0}$$

Dónde:

- JCS₀ : Valor de JCS para muestras de laboratorio de tamaño 10 cm (L₀) .
- JCS_n : Valor de JCS in - situ para bloques de tamaño L_n.

Debido a que los valores de JCS calculados son sensiblemente menores que los obtenidos del ensayo de carga puntual (debido a la meteorización de las paredes de la discontinuidad), se ha considerado el criterio de no hacer la corrección por longitud, debido a que los valores obtenidos serian de una magnitud muy pequeña, situación que es irreal de acuerdo a lo observado y a la experiencia previa obtenida para este tipo de materiales.

3.3.11.3.4 Linealización de la Envolvente de Rotura de Barton y Choubey

Debido a que muchos programas de cómputo están codificados en términos del Criterio de Rotura de Mohr - Coulomb, es necesario realizar la linealización de la envolvente de rotura de Barton y Choubey para obtener parámetros de cohesión y ángulo de fricción equivalentes.

Los parámetros de resistencia al corte para el análisis de estabilidad, se estiman

eligiendo un valor de esfuerzo normal promedio (σ_n) similar al que van a estar sometidas las discontinuidades.

Se han calculado los parámetros de resistencia al corte linealizados considerando un rango de niveles de esfuerzos normales a los que estarán sometidas las discontinuidades (10 m – 50 m), los cuales serán útiles para la evaluación de la estabilidad local a nivel de bancos.

Del análisis se observa que cuando mayor es el esfuerzo normal considerado, la cohesión se incrementa debido a que la envolvente linealizada tiende a tener una menor pendiente, por esta misma razón el ángulo de fricción linealizado disminuye.

Las fórmulas utilizadas para la linealización de la envolvente de rotura son las siguientes:

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} = \tan \left(\phi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) - \frac{\pi}{180} \times \frac{JRC}{\ln 10} \left[\tan^2 \left(\phi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) + 1 \right]$$
$$c_l = \tau - \sigma_n \tan \phi_l$$
$$\phi_l = \tan^{-1} \left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon \sigma_n} \right) \phi_t = \tan^{-1} \left(\frac{\delta_r}{\delta \sigma_n} \right)$$

Siendo las ecuaciones anteriores no válidas para los casos en que $\sigma_n=0$ o para

$$JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r > 70^\circ, JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b > 70$$

En el análisis de estabilidad a nivel de bancos se ha considerado, de manera conservadora, que los planos de discontinuidades sobre los que se podría producir los deslizamientos tipo planar y/o cuña, están sometidos a un esfuerzo normal entre 25 y 30 kN/m³, lo que equivale a considerar una profundidad de 10 m. De esta manera se está considerando la formación de cuñas de magnitudes de 1/3 a 1/2 de la altura del banco analizado.

En el *Anexo A-7: Parámetros de Resistencia de las Discontinuidades*, se presentan los ángulos de fricción y cohesión estimadas para las discontinuidades utilizando la



metodología presentada, los cuales se presentan resumidamente en la **Tabla 75** y **Tabla 76**.

Tabla 75: Resumen de Parámetros de Resistencia al Corte de las Discontinuidades

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Orientación de las Familias Principales (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)
EG-01 (Mina 9-10)	Hornfels – Magnetita	569	1) 77°/101° 2) 47°/337° 3) 59°/209° 4) 75°/053°	1) 3.2/45.2 2) 3.1/44.8 3) 3.2/45.2 4) 3.1/44.8
EG-02 (Mina 9-10)	Magnetita – Hornfels	569	1) 78°/095° 2) 50°/093° 3) 80°/136° 4) 49°/337°	1) 2.6/40.8 2) 2.7/41.9 3) 2.7/42.0 4) 2.7/42.3
EG-03 (Mina 9-10)	Magnetita – Andesita	545	1) 67°/017° 2) 65°/159° 3) 76°/207° 4) 50°/059°	1) 2.2/40.3 2) 2.2/39.5 3) 2.4/41.9 4) 2.3/41.7
EG-04 (Mina 9-10)	Magnetita - Hornfels	545	1) 72°/093° 2) 77°/326°	1) 3.2/44.7 2) 3.2/44.8
EG-05 (Mina 9-10)	Magnetita – Hornfels – Andesita	581	1) 71°/074° 2) 69°/102° 3) 36°/328° 4) 82°/010° 5) 67°/042° 6) 63°/167°	1) 1.9/35.2 2) 1.9/35.4 3) 1.8/32.5 4) 1.9/36.1 5) 1.9/36.1 6) 2.0/36.9
EG-06 (Mina 9-10)	Hornfels – Magnetita	581	1) 69°/091° 2) 70°/355°	1) 2.5/38.5 2) 2.4/37.0
EG-07 (Mina 9-10)	Magnetita – Hornfels	569	1) 32°/347° 2) 78°/024° 3) 72°/117°	1) 4.1/41.8 2) 4.1/41.5 3) 3.9/40.5
EG-08 (Mina 9-10)	Magnetita – Hornfels	569	1) 69°/082° 2) 54°/150° 3) 48°/110° 4) 64°/292°	1) 3.7/38.8 2) 4.3/43.1 3) 4.6/45.1 4) 4.1/41.8

Tabla 76: Resumen de Parámetros de Resistencia al Corte de las Discontinuidades

Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Orientación de las Familias Principales (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)
EG-01 (Mina 9)	Hornfels	725	1) 82°/091° 2) 45°/181° 3) 75°/258° 4) 65°/223°	1) 2.7/42.4 2) 2.9/44.2 3) 2.8/42.8 4) 2.9/44.2
EG-02 (Mina 9)	Hornfels	724	1) 75°/060° 2) 76°/168° 3) 70°/325° 4) 72°/214° 5) 52°/249°	1) 1.0/35.5 2) 1.0/35.5 3) 1.0/35.4 4) 1.0/35.7 5) 1.0/35.8



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Orientación de las Familias Principales (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)
EG-03 (Mina 9)	Hornfels	726	1) 76°/066° 2) 28°/206° 3) 41°/147°	1) 2.8/42.7 2) 2.9/43.0 3) 2.8/42.4
EG-04 (Mina 9)	Hornfels Alterado	715	1) 72°/058° 2) 46°/096° 3) 43°/066° 4) 43°/138° 5) 31°/234°	1) 3.0/44.7 2) 2.8/42.0 3) 3.2/45.7 4) 2.8/42.9 5) 2.9/43.2
EG-05 (Mina 9)	Hornfels Alterado	714	1) 51°/296° 2) 61°/056° 3) 49°/092° 4) 81°/335°	1) 3.7/46.5 2) 3.6/45.9 3) 3.1/42.1 4) 3.6/46.2
EG-06 (Mina 10)	Arenisca Poco Consolidada	724	1) 24°/004° 2) 59°/198° 3) 89°/183° 4) 56°/040°	1) 2.2/34.2 2) 2.2/35.1 3) 2.1/33.5 4) 2.2/35.2
EG-07 (Mina 9)	Magnetita	734	1) 81°/323° 2) 36°/259° 3) 64°/062° 4) 47°/325°	1) 2.0/36.2 2) 2.0/36.8 3) 2.0/36.3 4) 2.0/36.1
EG-08 (Mina 10)	Hornfels	702	1) 69°/084° 2) 62°/180° 3) 55°/301° 4) 82°/213°	1) 1.2/33.8 2) 1.3/36.4 3) 1.3/35.5 4) 1.3/36.2
EG-09 (Mina 10)	Andesita Porfírica	703	1) 76°/059° 2) 63°/140° 3) 75°/191° 4) 21°/162° 5) 84°/293°	1) 3.2/44.3 2) 3.1/44.1 3) 3.2/44.4 4) 3.2/44.3 5) 3.0/42.6
EG-10 (Mina 10)	Hornfels	701	1) 68°/071° 2) 20°/164° 3) 71°/028° 4) 53°/149° 5) 38°/324° 6) 79°/344°	1) 3.6/44.0 2) 3.9/46.2 3) 3.9/45.9 4) 3.9/46.0 5) 3.9/46.0 6) 4.1/47.2
EG-11 (Mina 10)	Andesita Porfírica	629	1) 73°/067° 2) 55°/151° 3) 11°/314° 4) 45°/112° 5) 31°/254°	1) 1.3/35.8 2) 1.3/36.7 3) 1.3/37.0 4) 1.3/35.7 5) 1.3/36.1
EG-12 (Mina 10)	Hornfels	628	1) 67°/084° 2) 33°/171° 3) 18°/357° 4) 71°/175° 5) 51°/353°	1) 0.5/31.8 2) 0.5/33.8 3) 0.5/33.0 4) 0.5/31.9 5) 0.5/33.1
EG-13 (Mina 10)	Hornfels	629	1) 77°/077° 2) 90°/145° 3) 76°/010° 4) 39°/201°	1) 3.7/46.5 2) 3.6/45.6 3) 3.5/45.3 4) 3.5/44.8
EG-14 (Mina 10)	Hornfels Alterado	702	1) 73°/261° 2) 72°/096° 3) 58°/184° 4) 69°/064° 5) 20°/029°	1) 1.0/34.0 2) 1.0/35.9 3) 1.0/35.1 4) 1.0/35.2 5) 1.0/35.4



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Orientación de las Familias Principales (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)
			6) 47°/131°	6) 1.0/35.1
EG-15 (Mina 10)	Hornfels	702	1) 71°/081° 2) 40°/197° 3) 84°/183° 4) 38°/325° 5) 26°/082°	1) 0.5/29.7 2) 0.5/28.9 3) 0.5/29.7 4) 0.5/29.2 5) 0.5/29.8
EG-16 (Mina 10)	Hornfels	701	1) 75°/072° 2) 18°/172° 3) 64°/007° 4) 18°/352° 5) 53°/118° 6) 60°/242°	1) 2.0/39.2 2) 2.0/38.8 3) 1.9/38.0 4) 2.0/39.9 5) 1.8/36.5 6) 2.0/39.2
EG-17 (Mina 10)	Hornfels Alterado	677	1) 71°/063° 2) 59°/137° 3) 65°/100° 4) 57°/332° 5) 85°/207°	1) 1.8/38.6 2) 1.7/38.0 3) 1.7/37.0 4) 1.6/35.7 5) 1.6/36.4
EG-18 (Mina 10)	Zona de Óxidos	678	1) 80°/059° 2) 47°/113° 3) 74°/360° 4) 52°/033° 5) 60°/298°	1) 2.5/39.7 2) 2.4/38.3 3) 2.3/36.7 4) 2.6/39.8 5) 2.4/37.6
EG-19 (Mina 10)	Hornfels	678	1) 65°/070° 2) 44°/003° 3) 43°/158° 4) 64°/276°	1) 1.9/32.5 2) 1.9/33.9 3) 2.1/36.3 4) 2.2/38.6
EG-20 (Mina 10)	Hornfels	677	1) 72°/075° 2) 77°/120° 3) 40°/196° 4) 71°/200° 5) 33°/092° 6) 37°/240°	1) 1.0/34.9 2) 1.1/37.0 3) 1.1/35.6 4) 1.1/35.6 5) 1.0/32.2 6) 1.0/34.9
EG-21 (Mina 10)	Hornfels	678	1) 77°/071° 2) 59°/234° 3) 39°/179°	1) 0.5/26.2 2) 0.5/27.2 3) 0.5/27.1
EG-22 (Mina 10)	Andesita Porfírica	677	1) 74°/056° 2) 38°/326° 3) 64°/174°	1) 2.8/40.9 2) 3.0/42.6 3) 2.9/42.3
EG-23 (Mina 10)	Hornfels	679	1) 69°/060° 2) 34°/202° 3) 71°/320° 4) 67°/004°	1) 2.1/36.4 2) 2.2/38.4 3) 2.2/37.5 4) 2.1/35.7
EG-24 (Mina 10)	Hornfels	678	1) 77°/055° 2) 74°/155° 3) 70°/277° 4) 18°/323° 5) 60°/329°	1) 3.1/41.7 2) 3.3/43.7 3) 3.2/43.2 4) 3.3/43.8 5) 3.2/43.2
EG-25 (Mina 10)	Hornfels	676	1) 82°/150° 2) 67°/060° 3) 40°/328° 4) 16°/252°	1) 3.5/44.2 2) 3.8/46.0 3) 4.0/47.4 4) 3.6/44.7



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Orientación de las Familias Principales (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)
EG-26 (Mina 10)	Hornfels	677	1) 75°/134° 2) 57°/047° 3) 50°/174° 4) 17°/043° 5) 32°/341° 6) 32°/228°	1) 0.5/30.3 2) 0.5/30.7 3) 0.5/30.0 4) 0.5/30.1 5) 0.5/30.5 6) 0.5/30.5
EG-27 (Mina 10)	Zona de Óxidos	641	1) 82°/002° 2) 81°/135° 3) 56°/260° 4) 11°/251° 5) 78°/047° 6) 79°/088°	1) 2.2/32.0 2) 2.2/31.6 3) 2.2/30.8 4) 2.3/32.8 5) 2.5/36.0 6) 2.5/36.0
EG-28 (Mina 10)	Zona de Óxidos	678	1) 76°/062° 2) 40°/075° 3) 81°/010° 4) 72°/156° 5) 16°/223°	1) 1.6/31.3 2) 1.5/28.1 3) 1.6/30.6 4) 1.5/27.5 5) 1.5/27.9
EG-29 (Mina 10)	Pórfido Andesítico	703	1) 59°/156° 2) 56°/333° 3) 57°/298° 4) 27°/204° 5) 53°/259°	1) 1.5/36.7 2) 1.5/37.1 3) 1.5/37.3 4) 1.6/37.7 5) 1.5/36.3
EG-30 (Mina 10)	Zona de Óxidos	642	1) 79°/036° 2) 56°/263° 3) 86°/109° 4) 40°/006° 5) 83°/324°	1) 5.4/45.8 2) 5.3/45.6 3) 4.6/41.4 4) 4.4/40.4 5) 5.1/44.6
EG-31 (Mina 10)	Hornfels	640	1) 63°/116° 2) 58°/018° 3) 30°/179° 4) 67°/048°	1) 2.2/36.8 2) 2.1/36.0 3) 2.2/36.9 4) 2.3/38.3
EG-32 (Mina 10)	Hornfels Alterado	642	1) 70°/079° 2) 37°/310° 3) 35°/271° 4) 64°/111° 5) 43°/147° 6) 72°/006°	1) 1.0/35.3 2) 1.0/34.7 3) 0.9/30.7 4) 0.9/29.3 5) 0.9/30.7 6) 0.9/30.7
EG-33 (Mina 10)	Hornfels	678	1) 58°/089° 2) 36°/219° 3) 82°/297° 4) 47°/150° 5) 77°/002°	1) 2.0/39.0 2) 2.0/39.3 3) 1.9/38.6 4) 1.9/37.8 5) 2.0/39.0
EG-34 (Mina 10)	Hornfels	626	1) 68°/077° 2) 63°/357° 3) 38°/165° 4) 82°/326°	1) 1.0/33.5 2) 1.0/33.3 3) 1.0/32.5 4) 1.0/31.7
EG-35 (Mina 10)	Hornfels	620	1) 67°/098° 2) 30°/331° 3) 26°/156° 4) 81°/266°	1) 2.4/40.2 2) 2.4/40.1 3) 2.4/40.2 4) 2.3/38.7
EG-36 (Mina 10)	Hornfels	594	1) 58°/097° 2) 30°/305° 3) 38°/168°	1) 2.0/39.7 2) 1.8/37.0 3) 1.8/37.1



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Orientación de las Familias Principales (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)
EG-37 (Mina 10)	Hornfels	672	1) 58°/348° 2) 73°/102° 3) 19°/160° 4) 30°/255°	1) 2.5/41.4 2) 2.5/41.3 3) 2.1/37.1 4) 2.4/40.2
EG-38 (Mina 10)	Hornfels	646	1) 32°/310° 2) 54°/141° 3) 78°/265° 4) 66°/094°	1) 1.3/32.8 2) 1.4/35.6 3) 1.4/35.3 4) 1.4/35.1
EG-39 (Mina 10)	Magnetita	658	1) 57°/147° 2) 41°/254° 3) 58°/178° 4) 38°/093°	1) 1.2/33.0 2) 1.1/31.8 3) 1.3/35.7 4) 1.1/31.0
EG-40 (Mina 10)	Hornfels	624	1) 55°/174° 2) 73°/094° 3) 83°/024° 4) 65°/320°	1) 0.5/32.1 2) 0.5/33.1 3) 0.5/31.7 4) 0.5/33.1
EG-41 (Mina 10)	Hornfels	642	1) 77°/063° 2) 28°/222° 3) 31°/278° 4) 76°/192° 5) 86°/116° 6) 53°/008°	1) 2.6/43.1 2) 2.5/41.4 3) 2.7/43.3 4) 2.8/45.1 5) 2.5/42.0 6) 2.5/42.0
EG-42 (Mina 10)	Andesita Porfírica	581	1) 83°/038° 2) 29°/273° 3) 34°/117°	1) 2.1/40.5 2) 2.0/39.7 3) 2.0/38.9
EG-43 (Mina 10)	Hornfels Alterado	718	1) 81°/048° 2) 88°/332° 3) 28°/315° 4) 70°/091° 5) 73°/008°	1) 2.3/39.1 2) 2.3/38.9 3) 2.3/39.3 4) 2.3/39.3 5) 2.4/40.5
EG-44 (Mina 10)	Magnetita	715	1) 71°/074° 2) 14°/200° 3) 81°/338°	1) 2.5/37.5 2) 2.7/40.2 3) 2.7/40.4
EG-45 (Mina 10)	Zona de Óxidos	715	1) 88°/278° 2) 81°/360° 3) 17°/308°	1) 2.3/38.9 2) 2.3/39.3 3) 2.3/39.4
EG-46 (Mina 10)	Hornfels Alterado	620	1) 25°/164° 2) 38°/346° 3) 84°/160° 4) 79°/060° 5) 75°/087° 6) 42°/161°	1) 1.8/35.2 2) 1.8/36.6 3) 2.1/40.3 4) 1.9/37.3 5) 1.8/36.7 6) 1.8/36.7
EG-47 (Mina 10)	Hornfels Alterado	629	1) 78°/156° 2) 40°/359° 3) 72°/047° 4) 67°/084°	1) 1.5/35.8 2) 1.4/34.3 3) 1.5/35.5 4) 1.5/36.0
EG-48 (Mina 10)	Hornfels Alterado	668	1) 85°/259° 2) 19°/163° 3) 86°/351° 4) 37°/351° 5) 56°/164°	1) 5.5/43.2 2) 5.7/43.6 3) 5.5/43.1 4) 5.5/42.8 5) 5.7/43.8
EG-49 (Mina 10)	Hornfels Alterado	690	1) 72°/139° 2) 34°/188° 3) 39°/006°	1) 4.9/45.3 2) 5.0/45.8 3) 5.0/45.6



Estación Geomecánica	Litología	Nivel	Orientación de las Familias Principales (Buzamiento/Dirección de Buzamiento)	Cohesión (T/m²)/ Fricción (°)
			4) 67°/308° 5) 68°/069°	4) 5.0/45.6 5) 5.1/46.3

CAPITULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

4.1 LOCALIZACION Y UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área investigada se ubica en el distrito minero de Marcona, provincia de Nazca, departamento de Ica, en la costa sur del Perú, aproximadamente 530 km al sur de Lima.

La accesibilidad a la zona de estudio desde Lima es a través de la carretera Panamericana Sur con dirección a Nazca y posteriormente tomando la dirección oeste, hacia la ciudad de San Juan de Marcona. Todas las vías por las que se circula para llegar a Marcona están asfaltadas. En el *Plano de Ubicación del Proyecto PL-GG-001* del *Anexo A-11* se presenta el plano de ubicación del proyecto. En la *Figura 45* se puede apreciar la localización y en la *Figura 71* se muestra la ubicación de la zona de estudio.

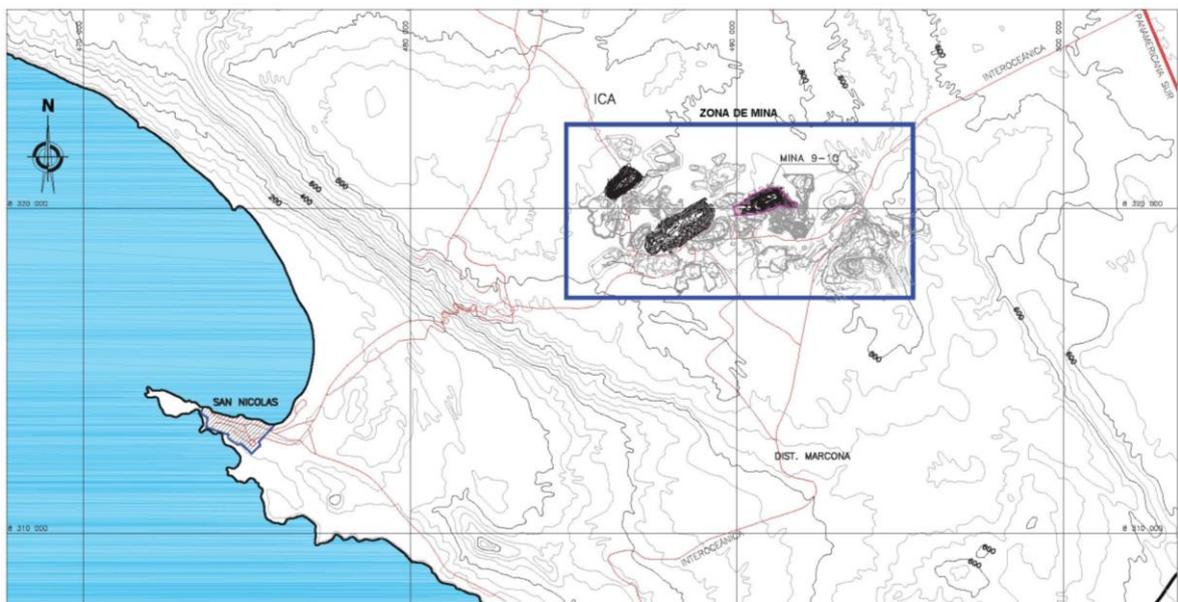


Figura 71. Localización del Proyecto

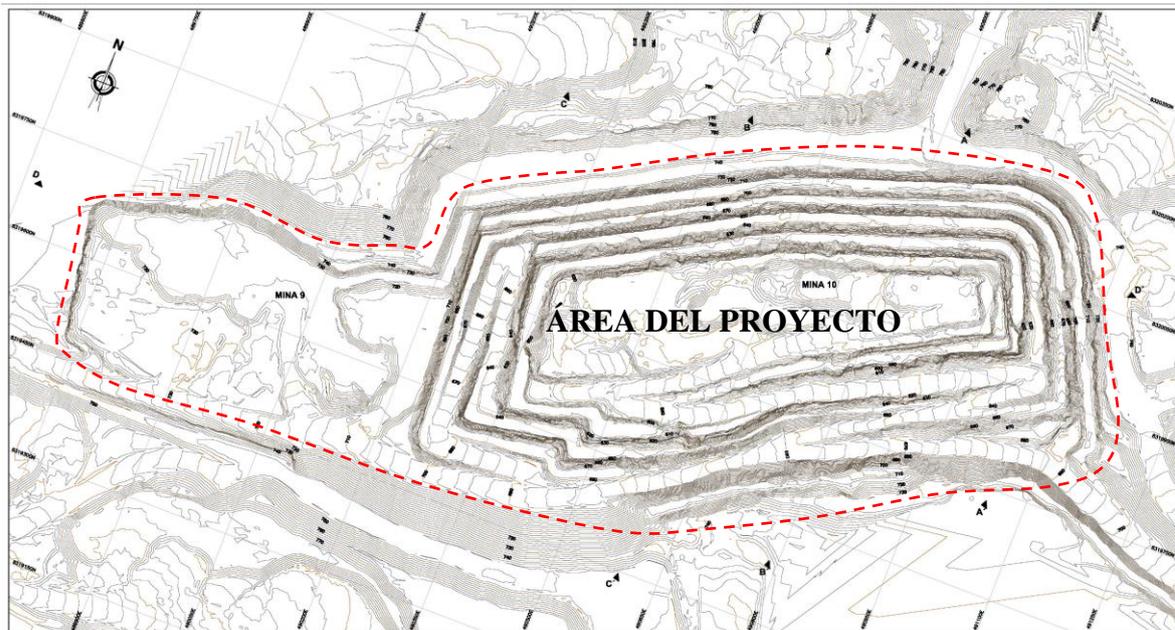


Figura 72. Ubicación del proyecto

4.2 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

En esta actividad se presenta la distribución de las unidades geológicas (tipos de litología/alteración) en la mina 9-10. En la presente investigación, se ha utilizado la descripción de las unidades litológicas como referencia para elaborar el plano geológico local.

4.2.1 Geomorfología local

Las principales unidades morfológicas ubicadas en los alrededores de la Mina 9-10, son típicas de zonas litorales desérticas, donde se pueden encontrar lomas y plataforma de abrasión. Durante la evaluación geológica local, se identificaron las principales unidades morfológicas dentro del área del tajo. A continuación, se describen las unidades morfológicas reconocidas en Mina 9-10 y sus alrededores:

4.2.1.1 Lomas

Esta unidad corresponde a sectores de menor altura, teniendo una superficie semi - ondulada a ondulada con pendientes bajas que van entre los 8° y 12°, está conformada por

una cobertura eólica, constituida por arena limosa con gravas en forma aislada, seco, no plástico, de compacidad suelta a media, de color pardo. Una vista de este rasgo geomorfológico se presenta la **Figura 73**.



Figura 73. Vista de la Cima y la Ladera de Loma

4.2.1.2 Plataforma de abrasión

Esta unidad corresponde a una antigua terraza marina de gran extensión, y es donde se ubica la Mina Shougang. Esta plataforma está caracterizada por presentar un área muy extensa, y relieve poco o nada accidentado, cortada solamente por quebradas secas y/o intermitentes y cadenas de cerros y lomas paralelos a la línea de costa (paleocosta).

En la zona de estudio se encuentra cubierta por depósitos clásticos de tipo eólico retrabajados y depósitos de desmonte por el acarreo de material estéril en los alrededores de la mina 9-10. Una vista de este rasgo geomorfológico se presenta la **Figura 74**.



Figura 74. Vista de la Cima y la Ladera de Loma

4.2.2 Litoestratigrafía local

El cartografiado geológico local del área de la Mina 9-10, realizado a escala 1:4000, fue correlacionados con información bibliográfica y mapas geológicos editados por INGEMMET (1998) y Chen (2010). Así mismo, se ha considerado como base el mapeo de las zonas de mineralización.

Cabe recalcar que los *Planos de Geología Local (Mina 9: PL-GG-010 y Mina10: PL-GG-010, del Anexo A-II*, presentan solamente las unidades del basamento rocoso (mapa litológico), mientras que las zonas de alteración (tipos de mineralización) se han generalizado, debido a que el objetivo del estudio es desarrollar el análisis de estabilidad física y no un mapeo de las zonas de mineralización. Las secciones geológicas representativas de la Mina 9-10 se presentan en los *Planos GG-012 y GG-013 del Anexo A-II*.

A continuación, se describen las unidades litológicas cartografiadas en el área de estudio:

4.2.2.1 Roca Hornfels (Metasedimentos)

Esta unidad constituye la roca encajonante de la Mina 9-10, se presenta de color gris claro a gris verdoso, textura clástica, de alta resistencia, moderadamente fracturada a muy fracturada, con presencia en algunos casos de nódulos de chert (ver *Figura 75*).

Los afloramientos de roca hornfels presentan un fuerte fracturamiento debido a la presencia de fallas locales de buena persistencia, cuyos planos de fracturas son ondulantes y escalonados. Para más detalle se presenta el *Anexo A-1: Estudio Petrográfico Macroscópico de Roca*.



Figura 75. Afloramiento de Hornfels Moderadamente Fracturado

Durante el desarrollo de estudio, esta unidad litológica se ha identificado principalmente en la zona Norte del tajo. Caracterizado por ser un macizo rocoso moderadamente resistente a resistente, encontrándose fracturado a muy fracturado, con presencia de fracturas planas ligeramente rugosas, y con relleno de pátinas de óxido.

Distribución de los sistemas de discontinuidades da lugar a la formación de cuñas y deslizamientos planares, este macizo es emplazado por diques de andesita y mineralización de magnetita como mena. Ver *Figura 76*.



Figura 76. Afloramiento de Hornfels fracturado en Mina 10, cara Norte, Nivel 569

4.2.2.2 Diques

En el área de estudio se presentan intrusiones de diques de composición andesítica de textura porfirítica, que forman enjambres de diques, así como diques microdioríticos (graníticos) en menor porcentaje. Estos diques presentan una orientación NNO-SSE y buzamiento entre 75° y 85° NO.

Los diques se presentan como estructuras de forma tabular, cuyo grosor y/o potencia es variable, de 15 a 35 m. Los diques andesíticos son color verde grisáceo oscuro, moderadamente fracturados y de resistencia media a alta. Los diques microdioríticos son de color rosado grisáceo claro, se presentan moderadamente fracturados y de resistencia media.

En la Mina 10 (cara Oeste), se encuentra un dique pórfido - andesítico de coloración verde - rosácea. Una vista de este tipo de rocas se presenta la **Figura 77**.

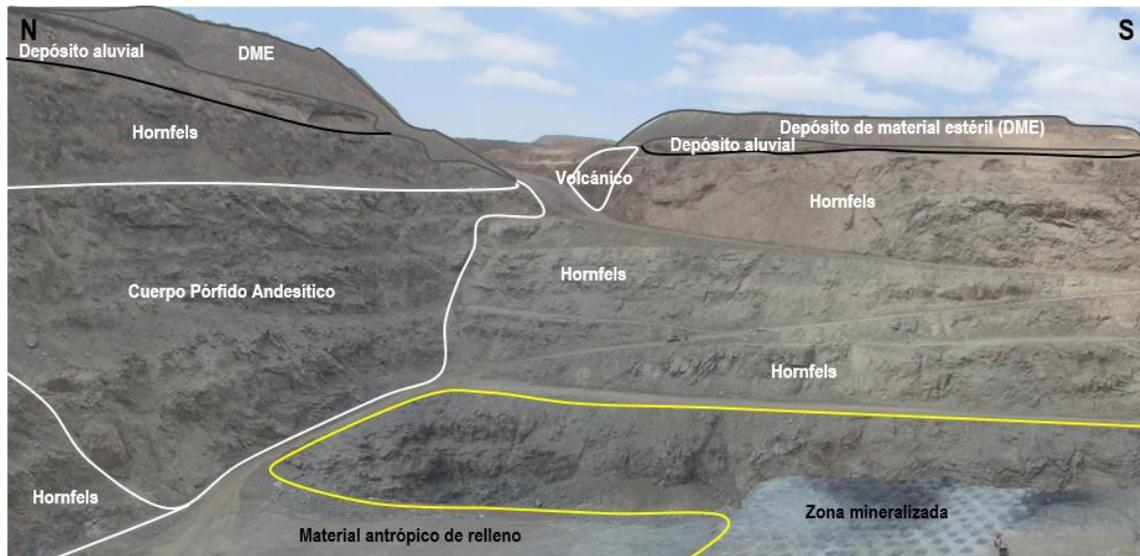


Figura 77. Afloramiento del Cuerpo Pórfido – Andesítico en la Mina 10 (Cara Oeste)

Durante el desarrollo del estudio, en la zona Sur y Norte del tajío, se ha registrado la presencia de diques andesíticos - porfíricos, los cuales se encuentran en contacto con la mineralización de magnetita y con la roca caja hornfels. Estos contactos se encuentran definidos por fallas locales. Por lo general, estos diques andesíticos se presentan poco fracturados a fracturados, siendo una roca resistente a muy resistente, con presencia de fracturas planas, ligeramente rugosas a rugosas, con relleno duro de sílice y sulfuros. Ver **Figura 78.**

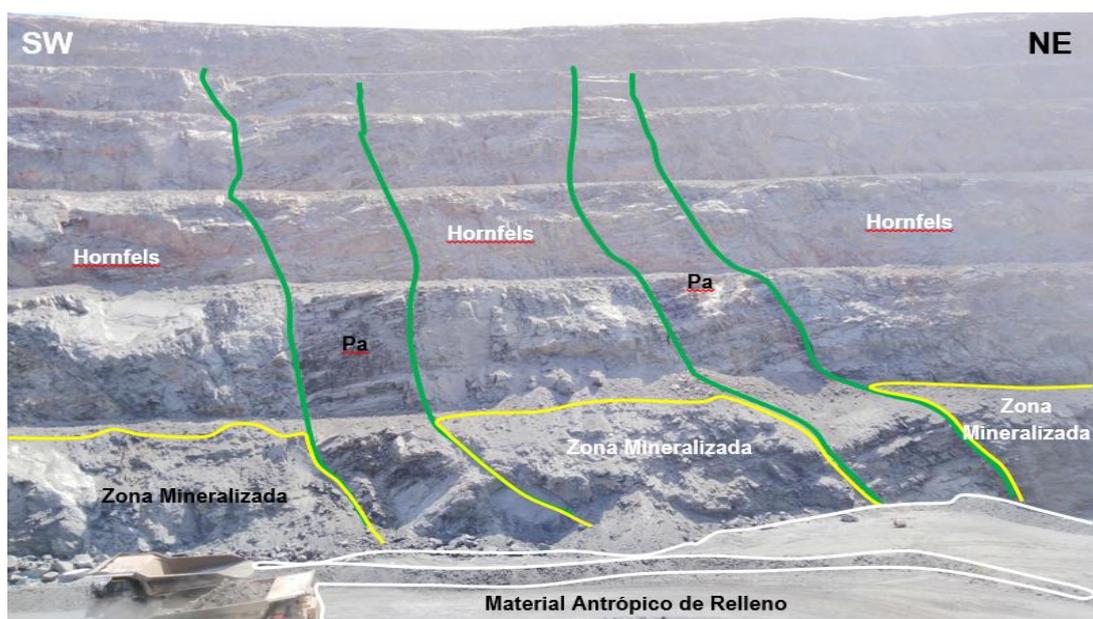


Figura 78. Afloramiento de Andesita Porfírica en Mina 10, Cara Norte, Niveles 569 y 545

4.2.2.3 Depósito Cuaternarios

Estos depósitos están constituidos por arena limosa con gravas esporádicas y algunos fragmentos de roca, asimismo se consideran aquellos materiales manipulados por el hombre (depósitos antrópicos), los cuales se encuentran en estado suelto. A continuación, se describen los depósitos cuaternarios presentes en el área de la Mina 9-10.

Debido al gran volumen y variedad de los depósitos cuaternarios. Para tal fin, se han levantado columnas sedimentológicas de los depósitos a escala 1:100, también se realizó un análisis de litofacies teniendo en cuenta la metodología de Miall (1996) con la finalidad de determinar los ambientes sedimentarios presentes. Para más detalle se presenta la clasificación de facies sedimentarias en la **Tabla 77**.

Tabla 77: *Afinidad de elementos de las fases principales que componen la Tierra.*

CÓDIGO	FACIES	ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS
Gmmc	Grava masiva soportada por una matriz con restos de conchas	Gradación Pobre
Gcmc	Grava masiva soportada por clastos con restos de conchas	No presenta
Gmg	Grava soportada por matriz	Gradación normal
Gmm	Grava masiva soportada por matriz	Gradación Pobre
Gcm	Grava masiva soportada por clasto	No presenta
Gh	Grava estratificada burdamente, soportada de clastos	Estratificación horizontal, imbricación
Gt	Grava estratificada	Estratificación cruzada
St	Arena fina a muy gruesa, pueden ser guijarros	Estratificación cruzada
Sb	Arena fina a muy gruesa, pueden ser guijarros	Masiva o laminación débil con bioturbación
Ss	Arena fina a muy gruesa, pueden ser guijarros	Estructuras de deformación
Sh	Arena fina a muy gruesa, pueden ser guijarros	Laminación horizontal
Sm	Arena fina a muy gruesa, pueden ser guijarros	Masiva o laminación débil
Cr	Cenizas retrasportadas compuestas por arena, fina a muy gruesa, pueden ser guijarros	Masiva o laminación débil

Fuente: Miall (1996)

a) Depósitos Marinos (Q-ma)

Se refiere a los materiales que han sido depositados por debajo del tren de olas, está constituido por gravas y arena fina limpia, se observa la presencia de precipitados químicos de carbonatos. Los primeros se depositan por gravedad, las arcillas por floculación y los carbonatos por precipitación. Una vista de los depósitos marinos se presenta en la **Figura 53**

Estos depósitos se encuentran distribuidos en la parte superior de área de estudio, están constituidos principalmente por arenas de grano fino a medio, y presenta intercalación de canales aluviales. En la base de estos depósitos se tiene un canal de cuatro metros que presenta bloques de arenas re-trabajados del nivel inferior. Teniendo en cuenta las facies presentes y las trazas biogénicas, el ambiente presente es marino somero de baja energía con aporte de depósitos aluviales de manera herrática.



Figura 79. Vista Panorámica de los Depósitos Marinos Ubicados en la Mina 9 (Cara Este), Indicando las Diferentes Litofacies Presentes en el Afloramiento.

Cabe mencionar que estos afloramientos se encuentran bioturbados. Las litofacies presentes en estos depósitos han sido adaptadas y modificadas de Miall (1996) y presentadas en la **Tabla 77**. La descripción de estas litofacies se presenta en los siguientes Items:

- **Facies de Arena con Laminación Horizontal (Sh)** - Estas facies se componen de arenas redondeadas a subredondeadas de grano medio a fino; la estructura sedimentaria presente son laminaciones horizontales, con presencia de fallas sin sedimentar y de trazas biogénicas horizontales. Como observación se tienen algunos niveles centímetros de ceniza re - transportada. Para más detalle se presenta la **Figura 80**.

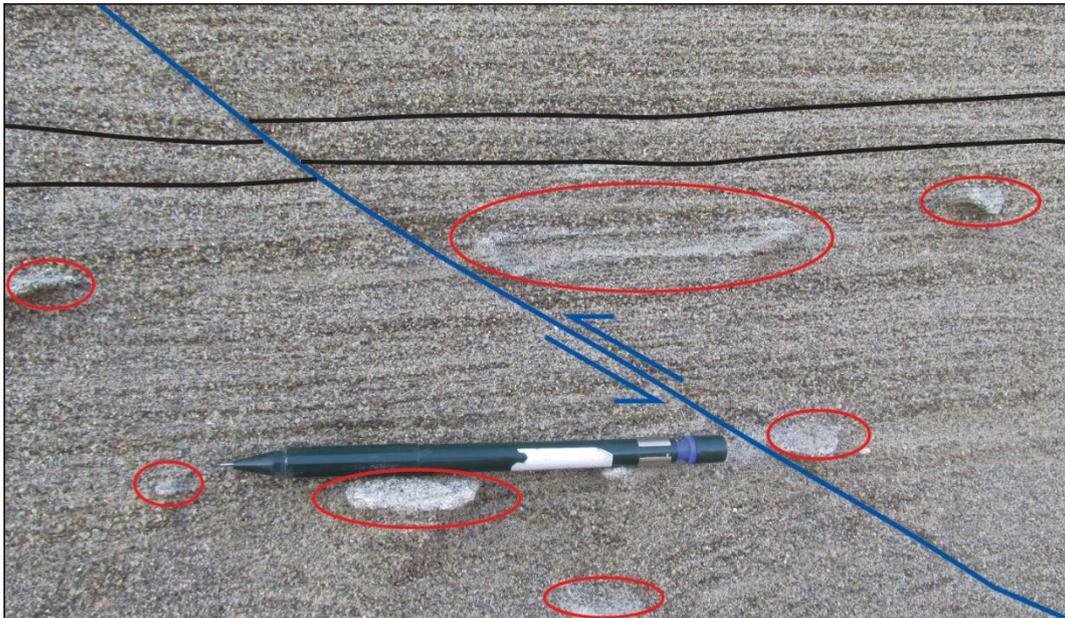


Figura 80. Facies de Arena con Laminación Horizontal (Líneas Negras), Donde se Puede Observar Tambien Trazas Biogénicas Horizontales (Elipsoides Rojos) y una Falla Inversa Sin Sedimentar de Desplazamiento Centimétrico (Línea Azul)

- **Facies de Arena con Deformación sin Sedimentar (Ss)**. - Facies de arenas con estructuras de sobrecarga sin sedimentar, sus granos son redondeados a subredondeados cuyo tamaño es de medio a fino. Hay presencia de trazas biogénicas horizontales. Como observación se tiene algunos niveles centímetros de ceniza re - transportada. Para más detalle se presenta la **Figura 81**.

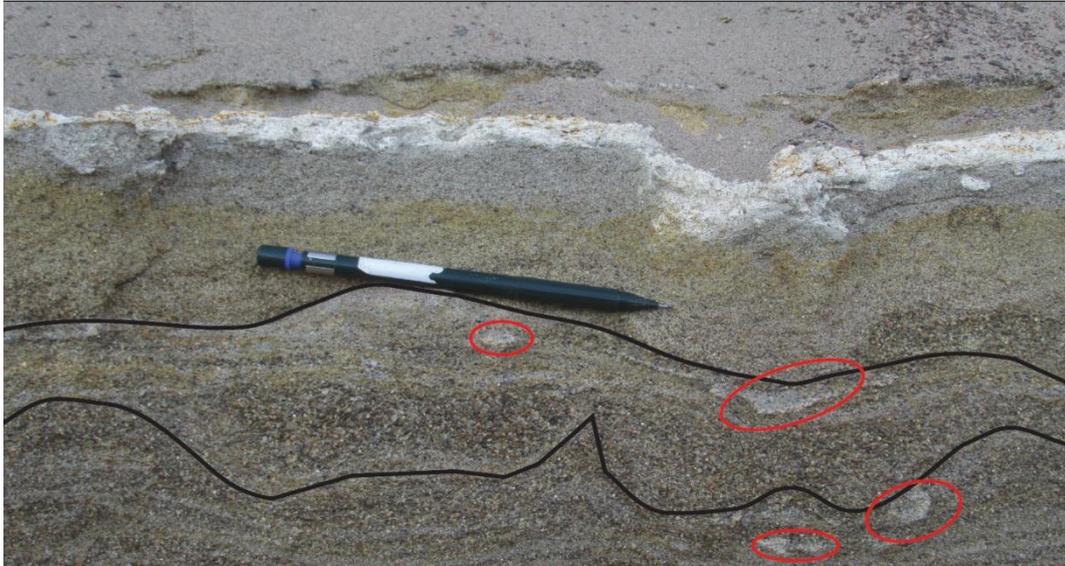


Figura 81. Facies de Arena con Deformación sin Sedimentar (Líneas Negras), Donde se Puede Observar También Trazas Biogénicas Horizontales Deformadas (Elipsoides Rojos) y una Capa Blanca de Ceniza Re - Transportada

- **Facies de Arena con Laminación Cruzada (St)** - Estas facies se componen de arenas redondeadas a subredondeadas de grano fino a grueso; la estructura sedimentaria presente son laminaciones cruzadas (laminación sesgada). Como observación se tiene algunos niveles centímetros de ceniza re-transportada. Para más detalle se presenta la *Figura 82*.



Figura 82. Facies de Arena con Laminación Cruzada (Líneas Azules)

- **Facies de Grava con Matriz Soportada (Gmg)** - Estas facies están compuestas de

gravas angulosas a subangulosas que llegan hasta 5 cm de diámetro, la matriz presente es arenosa a limo arenosa. Como observación estas facies están restringidas a canales de origen a aluvial. Para más detalle se presenta la **Figura 83**.



Figura 83. Facies de Gravas con Matriz Soportada Formando un Canal (Línea Azul)

- **Facies de Grava con Laminación Cruzada (Gt)** - Estas facies están compuestas de gravas angulosas a subangulosas que llegan hasta 5 cm de diámetro, la matriz presente es arenosa a limo arenosa, la estructura presente es laminación cruzada (laminación sesgada). Como observación estas facies están restringidas a canales de origen a aluvial y en algunos casos se observa costras de yeso. Para más detalle se presenta la **Figura 84**.



Figura 84. Facies de Gravas con Laminación Cruzada (Líneas Negras) Siendo Parte de un Canal (Línea Azul), Donde se Puede Observar una Costra de Yeso (Línea Amarilla)

- **Facies de Ceniza Re - Transportada (Cr)** - Estas facies están compuestas de cenizas re - transportadas con presencia de material arenoso en su composición. Para más detalle se presenta la **Figura 85**.



Figura 85. Facies de Ceniza Re - Transportada (Línea Amarilla)

b) Depósitos Fluviales

Estos depósitos están constituidos principalmente por gravas redondeadas a subredondeadas en una matriz arenosa y arenolimosa. Generalmente se encuentran formando canales. Una vista de estos depósitos se presenta en la **Figura 86**.

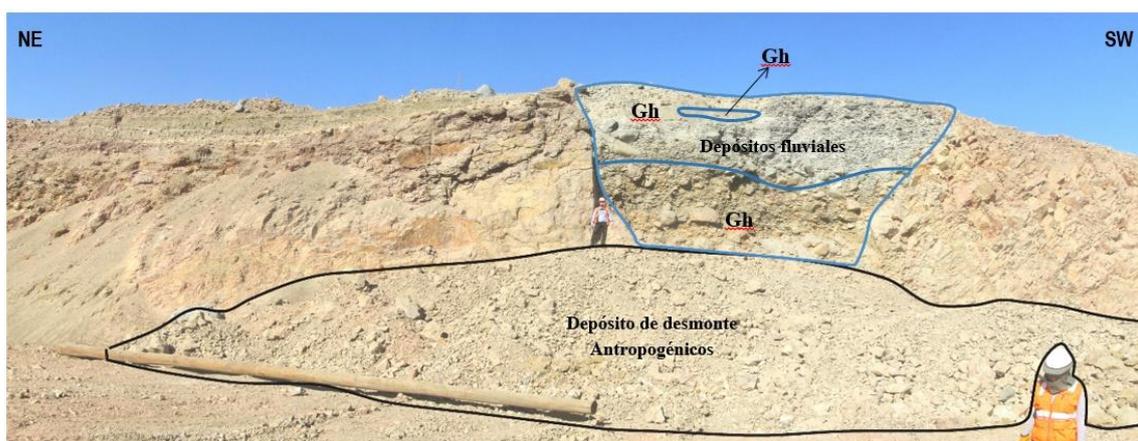


Figura 86. Vista Panorámica de los Depósitos Fluviales de la Mina, Indicando las Diferentes Litofacies Presentes en el Afloramiento.

Las litofacies presentes en estos depósitos han sido adaptadas y modificadas de Miall (1996) y presentadas en la **Tabla 77**. La descripción de estas litofacies se presenta en los

siguientes Items:

- **Facies de Arena Masivas (Sm)** - Estas facies se componen de arenas redondeadas a subredondeadas de grano medio a grueso con algunos guijarros; las estructuras sedimentarias presentes son laminaciones diversas pero débiles y en general son masivas. Una vista de estos depósitos se presenta en la **Figura 87**.



Figura 87. Depósitos Fluviales: Facies de Arenas Masivas

- **Facies de Arena con Laminación Horizontal (Sh)** - Estas facies se componen de arenas redondeadas a subredondeadas de grano medio a muy grueso; la estructura sedimentaria presente son laminaciones horizontales. Una vista de estos depósitos se presenta en la **Figura 88**.



Figura 88. Vista de la Facies de Arenas con Laminación Horizontal (Líneas Negras)

- **Facies de Arena con Laminación Cruzada (St)** - Estas facies se componen de arenas redondeadas a subredondeadas de grano fino a grueso con algunos guijarros; la estructura sedimentaria presente son laminaciones cruzada (laminación sesgada). Como observación se presentan en canales y lentes. Una vista de estos depósitos se presenta en la *Figura 89*.



Figura 89. Facies de Arena con Laminación Cruzada (Líneas Azules), Siendo Parte de un Lente de Arena (Línea Negra)

- **Facies de Gravas Soportada por Clastos (Gh)** - Estas facies están compuestas de gravas redondeadas a subredondeadas hasta subangulosas, que llegan hasta 50 cm de diámetro, la matriz presente es arenosa a limo - arenosa. Estas facies se encuentran formando canales. Una vista de estos depósitos se presenta en la *Figura 90*.

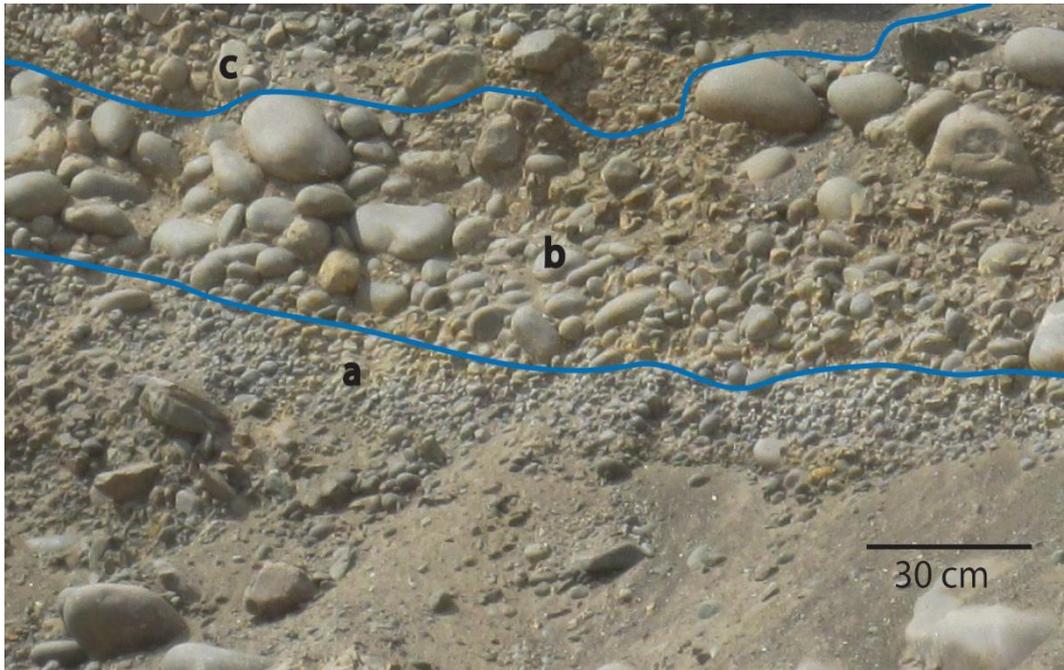


Figura 90. Facies de Gravas Soportadas por Clastos en Donde se Pueden ver hasta la Superposición de Tres Canales (Líneas Azules). En el Canal (a) la Matriz es Arenosa y los Clastos Llegan hasta 5 cm de diámetro, en el canal (b) la matriz es arenosa limosa y los clastos llegan hasta 15 cm de Diámetro, y en el Canal (c) la Matriz es Limo - Arenosa y los Clastos Llegan hasta 10 cm de Diámetro

c) Depósitos Aluviales

Estos depósitos se encuentran distribuidos en toda el área de la Mina 9-10, están constituidos principalmente por arenas de grano fino a medio, clastos angulosos a subagulosos y en algunos casos hasta subredondeados; las arenas presentan bioturbación. Cabe mencionar que estos afloramientos se encuentran intercalados con depósitos fluviales efímeros. Teniendo en cuenta las facies presentes y trazas biogénicas el ambiente es aluvial con aporte de depósitos fluviales de manera herrática. Una vista de estos depósitos se presenta en la *Figura 91*.

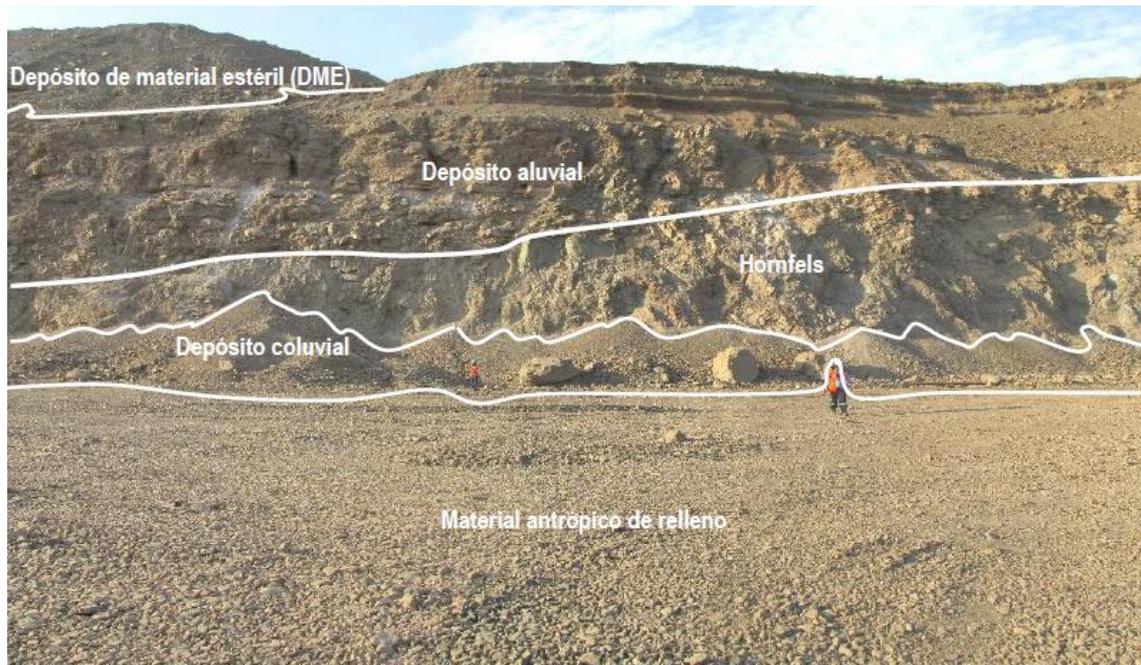


Figura 91. Vista panorámica de la Mina 9 (cara norte), donde se aprecia los depósitos aluviales, depósitos coluviales, afloramiento rocoso de hornfels, depósito de material estéril (DME) y material antrópico de relleno, en ello se observaron las Diferentes Litofacies Presentes en el Afloramiento.

Las litofacies presentes en estos depósitos han sido adaptadas y modificadas de Miall (1996) y presentadas en la **Tabla 77**. La descripción de estas litofacies se presenta en los siguientes Items:

- **Facies de Arenas Masivas (Sm)** - Estas facies se componen de arenas redondeadas a subredondeadas de grano medio a fino con algunos guijarros y presencia de limos; las estructuras sedimentarias presentes son laminaciones diversas pero débiles y en general son masivas. Como observación se tienen fallas sin sedimentar de hasta 1.50 m por sobrecarga de sedimentos en la Cara Sureste y estos depósitos presenta trazas biogénicas verticales a subverticales. Una vista de estos depósitos se presenta en la **Figura 92**.



Figura 92. Facies de Arenas Masivas Donde se Puede Observar Trazas Biogenicas Verticales a Subverticales (Elipsoides Rojos)

- **Facies de Arenas bioturbadas (Sb)** - Estas facies se componen de arenas redondeadas a subredondeadas de grano medio a fino con algunos guijarros y presencia de limos; las estructuras sedimentarias presentes son laminaciones diversas pero débiles y en general son masivas. Estos depósitos presentan abundantes trazas biogénicas y restos de conchas re-transportadas. Una vista de estos depósitos se presenta en la **Figura 93**.



Figura 93. Facies de Arenas Bioturbadas (Elipsoides Rojos) Donde se Observan Restos de conchas Re-Transportadas (Elipsoides Amarillos)

- **Facies de Gravas Soportada por Matriz (Gmg)** - Estas facies están compuestas de gravas angulosas a subangulosas hasta subredondeadas que llegan hasta 10 cm de diámetro, la matriz presente es arenosa a limo - arenosa. La característica de esta facie es que presenta una gradación normal. Una vista de estos depósitos se presenta en la **Figura 94**.



Figura 94. Facies de Gravas Soportadas por Matriz, Donde la Matriz es Limo - Arenosa. En la Imagen se Observa el Nivel de Estas Facie entre Líneas Azules

- **Facies de Gravas Masivas Soportada por Matriz (Gmm)** - Estas facies están compuestas de gravas angulosas a subangulosas hasta subredondeadas que llegan hasta 10 cm de diámetro, la matriz presente es arenosa a limo - arenosa. Una vista de estos depósitos se presenta en la **Figura 95**.



Figura 95. Facies de Gravas Masivas Soportadas por Matriz, Donde la Matriz es Limo – Arenosa

- **Facies de Gravas Masivas Soportada por Clastos (Gcm)** - Estas facies están

compuestas de gravas angulosas a subangulosas hasta subredondeadas que llegan hasta 20 cm de diámetro, la matriz presente es arenosa a limo - arenosa. En algunos casos estas facies se encuentran formando canales. Una vista de estos depósitos se presenta en la **Figura 96**.



Figura 96. Facies de Gravas Masivas Soportadas por Matriz, Donde la Matriz es Arenosa y se Encuentra en ese Caso Siendo Parte de un Canal. En la Foto se Observa el Nivel de Esta Facie Entre Líneas Azules

- **Facies de Gravas con Matriz Soportada con Laminación Cruzada (Gt)** - Estas facies están compuestas de gravas angulosas a subangulosas que llegan hasta 5 cm de diámetro, la matriz presente es arenosa a limo - arenosa, la estructura presente es laminación cruzada (laminación sesgada). Como observación, estas facies están restringidas a canales y lentes. En algunos casos estas facies se encuentran formando canales. Una vista de estos depósitos se presenta en la **Figura 97**.



Figura 97. Facies de Gravas con Matriz Soportada con Laminación Cruzada (Líneas Azules)

- **Facies de Gravas Soportada por Matriz y Restos de Conchas (Gmmc)** - Estas facies están compuestas de gravas angulosas a subangulosas que llegan hasta 20 cm de diámetro, la matriz presente es arenosa a limo - arenosa. Como observación estas facies presentan abundantes restos de conchas re - transportadas. Una vista de estos depósitos se presenta en la *Figura 98*.



Figura 98. Facies de Gravas Soportadas por Matriz que Presenta Abundantes Restos de Conchas Re-Transportadas

- **Facies de Gravas Masivas Soportada por Clastos y Restos de Conchas (Gcmc) -**

Estas facies están compuestas de gravas angulosas a subangulosas que llegan hasta 20 cm de diámetro, la matriz presente es arenosa a limo - arenosa. Como observación estas facies presentan restos de conchas re - transportadas y en algunos casos estas facies se encuentran formando canales. Una vista de estos depósitos se presenta en la **Figura 99**.



Figura 99. Facies de Gravas Soportadas por Clastos que Presenta Restos de Conchas Re-Transportadas (Elipsoides Amarillos)

- **Facies de Ceniza Re - Transportada (Cr) -** Estas facies están compuestas de cenizas re - transportadas y presenta material arenoso en su composición y algunos guijarros. Una vista de estos depósitos se presenta en la **Figura 100**.



Figura 100. Facies de Ceniza Re - Transportada (Nivel Blanco) en Donde en su Parte Superior se Observa un Depósito Fluvial. En la Foto se Observa el Nivel de Esta Facie Entre Líneas Amarillas

d) Depósitos Coluviales (Q-co)

Estos depósitos están conformados por materiales recientes que tienen poco transporte por acción de la gravedad; están constituido por arena, gravas subredondeadas a subangulosas y bloques subredondeados a angulosos. Una vista de los depósitos coluviales se presenta en la **Figura 101**.



Figura 101. Vista de los Depósitos Coluviales Ubicados en la Mina 9 (Cara Este)

e) Depósitos Antrópicos (Q-ant-re)

Estos depósitos están conformados por materiales recientes que han sido producto de la acción del hombre, es decir que han sido desplazados y depositados producto de las labores de la mina. Una vista de los depósitos antrópicos se presenta en la **Figura 102**.

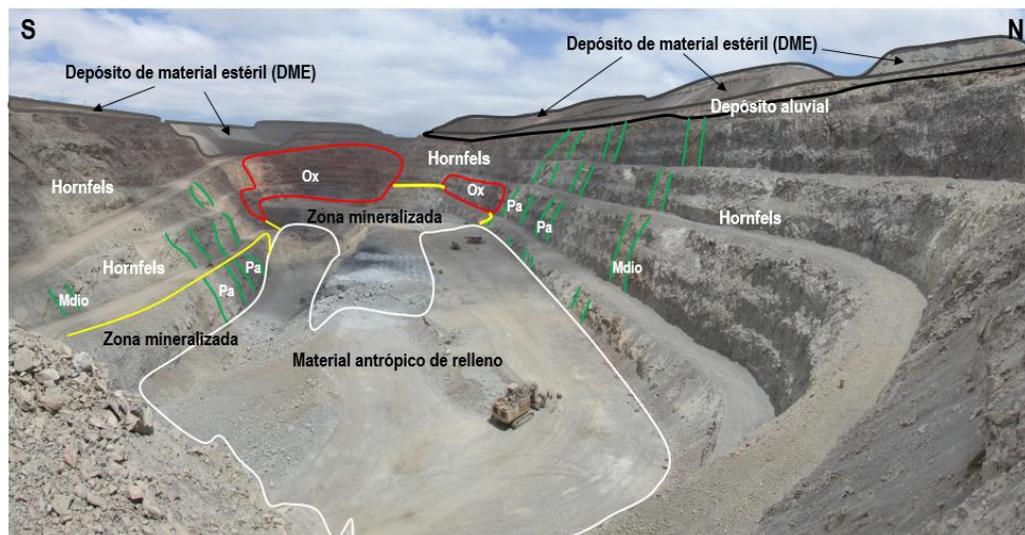


Figura 102. Vista de los Depósitos Antrópicos Ubicados en el Fondo de la Mina 10

En los niveles más bajos del tajo se han observado depósitos cuaternarios de material

antrópico. Una vista de los depósitos antrópicos se presenta en la **Figura 103**.

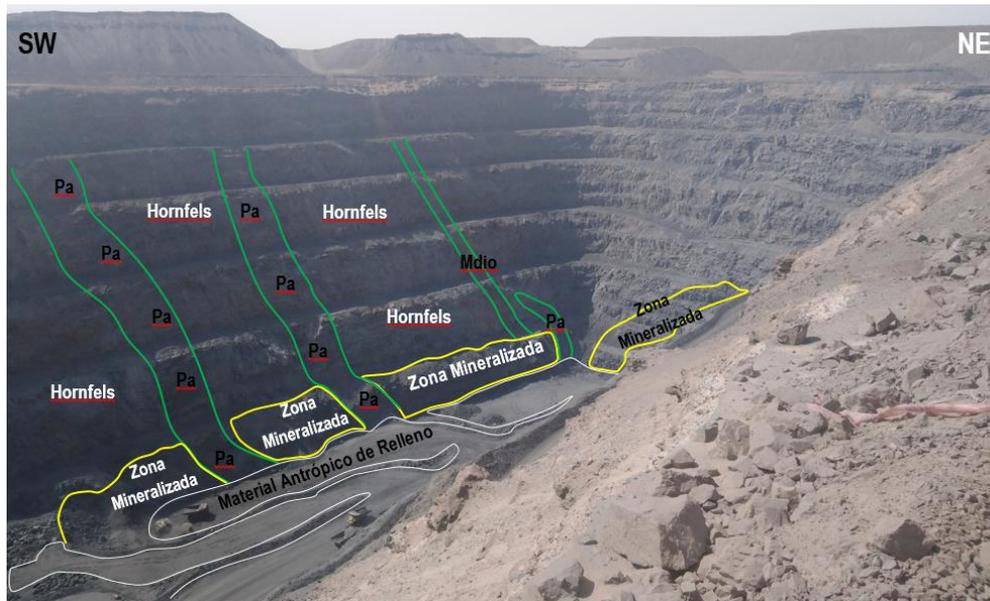


Figura 103. Vista de los Depósitos Antrópicos Ubicados en el Fondo de la Mina 10

f) Depósitos de Material Estéril (DME)

Están conformados principalmente por material proveniente de la excavación del tajo Mina 10, están constituidos por hornfels y rocas volcánicas, material suelto, gravas y bloques de rocas de tamaño variable desde 5” hasta 25”. Una vista de los depósitos de material estéril se presenta la **Figura 104**.

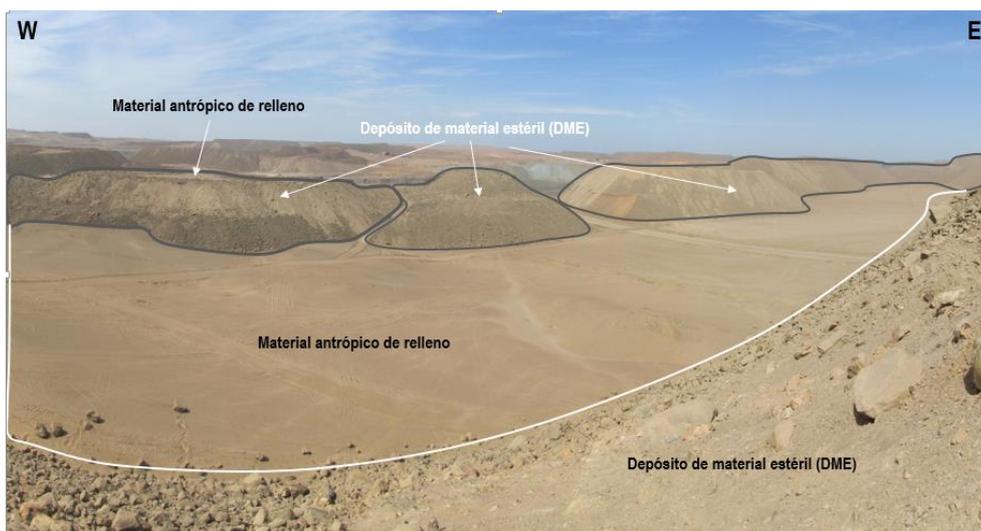


Figura 104. Vista de los Depósitos de Material Estéril (DME) en la Parte Alta de la Mina 10 (Cara Sur)

4.2.2.4 Secuencia sedimentaria



En la Mina 9-10 se tiene dos secuencias sedimentarias importantes, las cuales se describen a continuación:

a) Primera Secuencia

Está conformada en la base por depósitos marinos someros de baja energía, como lo evidencian las trazas biogénicas horizontales y las laminaciones horizontales presentes en esos niveles.

Posteriormente se tienen depósitos fluviales con arenas gruesas redondeadas a subredondeadas que nos indican facies fluviales distales; por último, se tiene una secuencia de depósitos aluviales con clastos angulosos a subangulosos en una matriz arenosa y limo - arenosa principalmente.

b) Segunda Secuencia

Esta en discordancia con la primera secuencia, y está conformada en sus niveles inferiores por depósitos fluviales con gravas redondeadas a subredondeadas principalmente hasta 50 cm de diámetro, y en la parte superior se tienen depósitos aluviales distales de alta energía debido a la presencia de trazas biogénicas verticales y presencia de conchas retrasportadas. En la *Figura 105* se presenta la columna generalizada de depósitos sedimentarios.

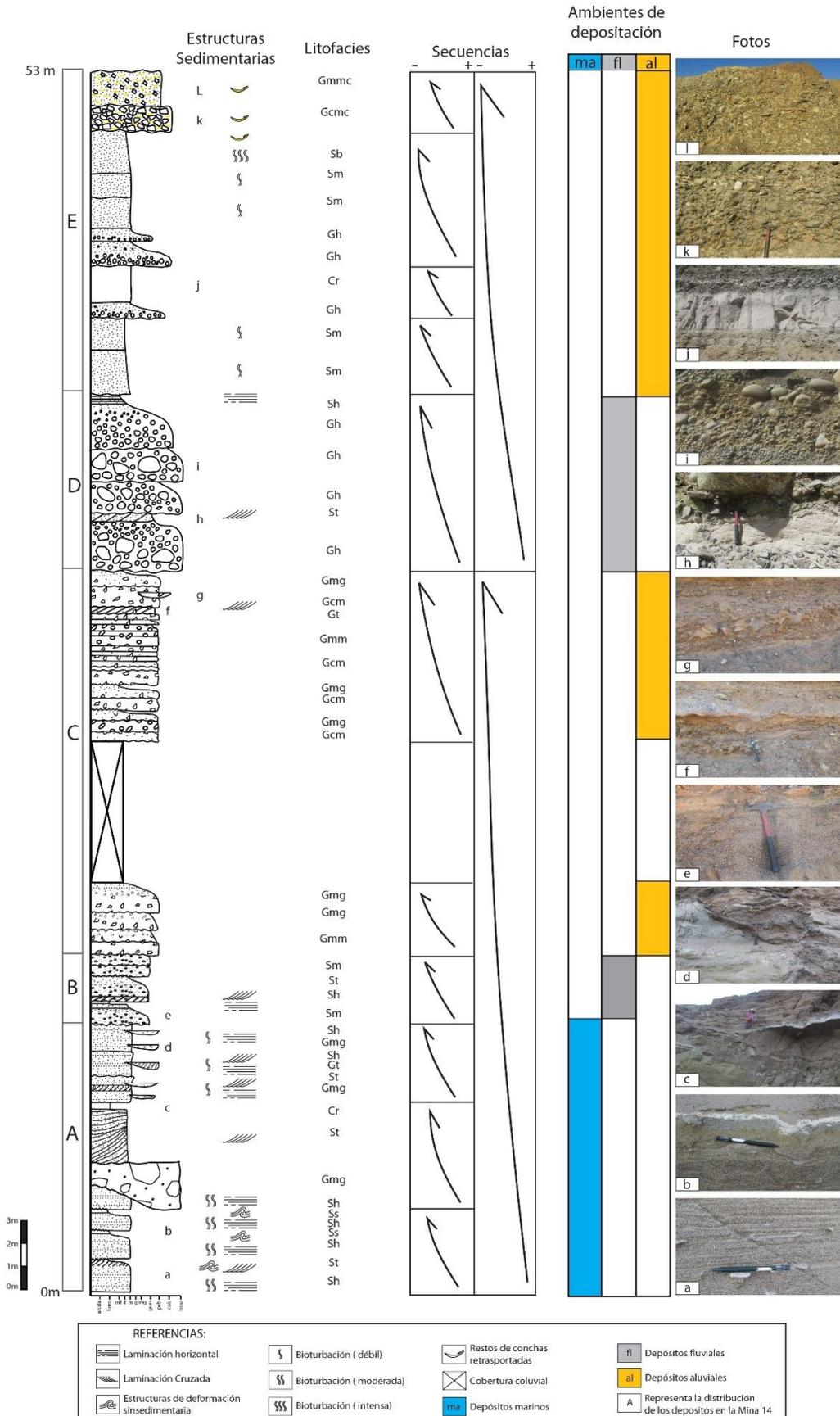


Figura 105. Columna Sedimentaria de los Depósitos Cuaternarios de la Mina

4.2.3 Marco geológico estructural

4.2.3.1 Geología estructural

Los afloramientos de rocas identificados en la Mina 9-10 corresponden a paquetes de origen volcánico - sedimentario y metavolcánico, los cuales presentan un fracturamiento de moderado a fuerte, con presencia de fallas, como resultado de la distribución de esfuerzos en el interior del macizo rocoso.

4.2.3.2 Procedimiento de Toma de Datos Estructurales

Para la toma de datos estructurales del macizo rocoso se consideraron los siguientes procedimientos de campo:

- **Método de Contacto** – Este método se utilizó para el mapeo de discontinuidades en superficies uniformes y lisas (ver *Figura 106*).

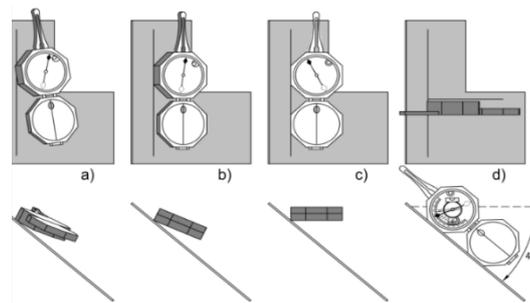


Figura 106. Método de Contacto

- **Método a Distancia** – Este método se utilizó para el mapeo de discontinuidades en superficies desiguales o a las cuales no se pudo acceder directamente (ver *Figura 107*).

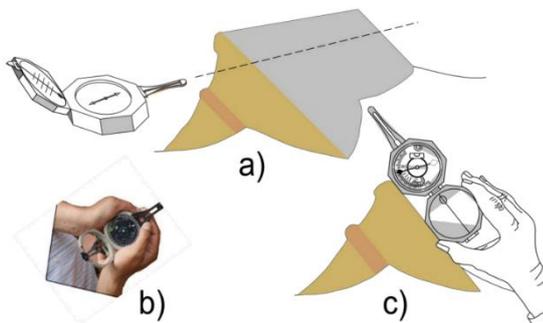


Figura 107. Método a Distancia

4.2.3.3 Fallas Locales



Las fallas locales originadas en el área de estudio fueron el resultado de una fuerte deformación del macizo rocoso generada por la acción de la deformación que ha sufrido el macizo rocoso hasta la actualidad.

En la Mina 9-10, se presentan fallas de comportamiento regional, las cuales han sido cartografiadas por el INGEMMET (Cuadrángulo de San Juan 31-m), estas fallas son de desplazamiento dextral y paralelas con rumbo N60°O; como se mencionó anteriormente la distribución de los esfuerzos en el interior del macizo rocoso han generado un fracturamiento de moderado a fuerte, y a su vez un diaclasamiento del macizo rocoso, cuyas orientaciones son longitudinales al eje del talud.

Durante el cartografiado geológico - estructural realizado en los diferentes niveles de la Mina 9-10, se pudo apreciar rocas moderadamente fracturadas a fuertemente fracturadas, espejos de falla y brechas de falla, los cuales cortan de manera transversal y longitudinal a los taludes de los bancos.

En la Mina 9-10 se presenta principalmente un sistema de fallas de desgarre, estas fallas son paralelas a las fallas regionales (INGEMMET) y a las fallas identificadas por Shougang. Cabe mencionar que la mayoría de fallas que se encuentran en la Mina 9-10 presentan desplazamiento cortos y escasas zonas de brecha de falla; se caracterizan porque sus planos son ondulados y no muy persistentes.

El arreglo estructural de la zona, consiste en diques con una orientación NNO-SSE y buzamiento entre 75° y 85° NO. El mapeo estructural de las fallas locales de la zona se representa en los *Plano de Geología Estructural (Mina 9: PL-GG-04) y (Mina 10: PL-GG-005)) del Anexo A-11*. En el *Anexo A-2* se presenta un registro fotográfico de las estructuras geológicas más representativas de la zona de estudio (fallas, contactos, etc.). En las fotografías del anexo mencionado se encuentra la descripción de todas las fallas encontradas en la Mina 9-10, en algunas fotografías pueden observarse más de una falla, las cuales están



correctamente codificadas.

En la *Tabla 78* y *Tabla 79* se presenta un resumen de las fallas que se identificaron durante los trabajos de campo. se han identificado fallas locales en los niveles inferiores del tajo, las cuales en su mayoría son fallas que continúan de los bancos superiores, también se han observado fallas locales en la base del tajo.

Tabla 78: Resumen de las Fallas Ubicadas en la Mina 9-10

Falla	Este	Norte	Azimut (°)	Dirección de Buzamiento (°)	Buzamiento (°)
F - 01	490 450	8 320 229	N 076	166	84
F - 02	490 451	8 320 236	N 119	080	53
F - 03	490 465	8 320 239	N 350	209	55
F - 04	490 489	8 320 263	N 346	076	69
F - 05	490 527	8 320 272	N 050	140	81
F - 06	490 530	8 320 270	N 035	125	70
F - 07	490 579	8 320 304	N 046	136	67
F - 08	490 615	8 320 317	N 050	140	66
F - 09	490 637	8 320 336	N 148	238	63
F - 10	490 692	8 320 359	N 047	137	78
F - 11	490 752	8 320 393	N 341	071	60
F - 12	490 813	8 320 429	N 286	016	66
F - 13	490 867	8 320 449	N 023	113	85
F - 14	490 887	8 320 459	N 337	067	68
F - 15	490 983	8 320 486	N 280	010	49
F - 16	490 983	8 320 486	N 037	127	74
F - 17	491 044	8 320 513	N 340	070	73
F - 18	491 059	8 320 513	N 316	046	65
F - 19	491 061	8 320 522	N 026	116	67
F - 20	491 116	8 320 532	N 356	086	80
F - 21	491 116	8 320 532	N 240	330	71
F - 22	491 170	8 320 542	N 293	023	66
F - 23	491 207	8 320 531	N 336	066	88
F - 24	490 491	8 320 214	N 119	209	55
F - 25	490 481	8 320 220	N 069	159	80
F - 26	490 499	8 320 230	N 346	076	69
F - 27	490 605	8 320 286	N 339	069	64
F - 28	490 633	8 320 306	N 069	159	82
F - 29	490 727	8 320 351	N 335	065	54
F - 30	490 851	8 320 418	N 005	095	70
F - 31	490 883	8 320 427	N 351	081	74
F - 32	490 957	8 320 454	N 062	152	74



Falla	Este	Norte	Azimut (°)	Dirección de Buzamiento (°)	Buzamiento (°)
F - 33	490 983	8 320 461	N 235	325	73
F - 34	490 994	8 320 464	N 026	116	75
F - 35	491 015	8 320 473	N 332	062	43
F - 36	491 054	8 320 486	N 258	348	70
F - 37	491 097	8 320 501	N 005	095	72
F - 38	490 576	8 320 239	N 052	142	77
F - 39	490 610	8 320 255	N 006	096	67
F - 40	490 689	8 320 302	N 347	077	62
F - 41	490 689	8 320 302	N 060	150	77
F - 42	490 742	8 320 332	N 039	129	81
F - 43	490 782	8 320 354	N 335	065	54
F - 44	490 804	8 320 364	N 032	122	75
F - 45	490 983	8 320 433	N 037	127	69
F - 46	490 983	8 320 433	N 072	162	75
F - 47	491 088	8 320 459	N 302	032	23
F - 48	491 088	8 320 459	N 006	096	63
F - 49	490 449	8 320 227	N 072	162	84
F - 50	490 446	8 320 220	N 213	303	81
F - 51	490 454	8 320 166	N 073	163	80
F - 52	490 455	8 320 141	N 116	206	47
F - 53	490 458	8 320 110	N 103	299	49
F - 54	490 458	8 320 110	N 209	193	37
F - 55	490 458	8 320 085	N 077	167	51
F - 56	490 462	8 320 038	N 240	330	62
F - 57	490 471	8 319 962	N 360	090	72
F - 58	490 525	8 319 949	N 267	357	75
F - 59	490 542	8 320 188	N 346	076	72
F - 60	491 240	8 320 505	N 235	325	61
F - 61	491 264	8 320 471	N 256	346	72
F - 62	491 275	8 320 458	N 252	342	73
F - 63	491 362	8 320 262	N 058	148	30
F - 64	491 248	8 320 455	N 267	357	75
F - 65	491 187	8 320 479	N 097	187	80
F - 66	491 207	8 320 450	N 253	343	73
F - 67	491 225	8 320 438	N 357	087	65
F - 68	491 284	8 320 295	N 232	322	78
F - 69	491 392	8 320 135	N 085	175	52
F - 70	491 354	8 320 154	N 275	005	74
F - 71	491 308	8 320 176	N 260	350	70
F - 72	490 982	8 320 060	N 247	337	80
F - 73	490 982	8 320 060	N 042	132	54
F - 74	490 485	8 319 891	N 295	025	75



Falla	Este	Norte	Azimut (°)	Dirección de Buzamiento (°)	Buzamiento (°)
F - 75	490 485	8 319 891	N 295	025	75
F - 76	490 525	8 319 949	N 360	090	72
F - 77	490 625	8 319 964	N 255	345	72
F - 78	490 742	8 319 974	N 272	002	81
F - 79	490 878	8 320 091	N 075	165	75
F - 80	490 932	8 320 132	N 188	278	86
F - 81	490 953	8 320 153	N 233	323	72
F - 82	491 192	8 320 265	N 224	314	71
F - 83	490 913	8 320 223	N 306	036	74
F - 84	490 948	8 320 238	N 043	133	81
F - 85	490 637	8 320 329	N 220	310	66
F - 86	490 774	8 320 406	N 050	140	76
F - 87	491 073	8 320 205	N 269	359	71
F - 88	491 014	8 320 222	N 284	014	75
F - 89	491 004	8 320 216	N 330	060	74
F - 90	489 950	8 319 928	N 230	320	59
F - 91	489 950	8 319 928	N 134	224	72
F - 92	490 028	8 320 067	N 333	063	79
F - 93	490 184	8 320 089	N 130	210	70
F - 94	490 207	8 320 082	N 080	170	68
F - 95	490 223	8 320 077	N 094	184	74
F - 96	490 322	8 320 098	N 068	158	60
F - 97	490 295	8 320 056	N 051	141	49
F - 98	490 324	8 319 692	N 007	097	40
F - 99	490 330	8 319 991	N 355	085	35
F - 100	490 354	8 319 999	N 215	305	64
F - 101	490 368	8 320 002	N 325	055	61
F - 102	490 372	8 319 899	N 080	170	79
F - 103	490 906	8 319 975	N 051°	141	60
F - 104	490 944	8 320 004	N 290°	020	64
F - 105	490 944	8 320 004	N 54°	144	59
F - 106	490 974	8 320 002	N 008°	098	60
F - 107	490 990	8 320 020	N 251°	341	77
F - 108	491 019	8 320 034	N 016°	106	65
F - 109	491 061	8 320 053	N 240°	330	74
F - 110	490 565	8 320 208	N 035°	125	64
F - 111	490 606	8 320 232	N 068°	158	64
F - 112	490 619	8 320 242	N 008°	098	75
F - 113	490 648	8 320 247	N 342°	072	75
F - 114	490 749	8 320 302	N 079°	169	74

Fuente: propia

Tabla 79: Resumen de las Fallas Ubicadas en la Mina 10

Falla	Coordenadas (WGS - 84)		Litología Predominante	Nivel	Azimut (°)	Dirección de Buzamiento (°)	Buzamiento (°)
	Este	Norte					
F – 01'	490 470	8 319 867	Mineral y Hornfels	569	N 335	65	72
F – 02'	490 507	8 319 884	Hornfels	569	N 015	105	56
F – 03'	490 527	8 319 896	Hornfels	569	N 010	100	60
F – 04'	490 573	8 319 920	Hornfels	569	N 017	107	83
F – 05'	490 362	8 319 734	Hornfels	569	N 185	95	48
F – 06'	490 429	8 319 685	Mineral	569	N 225	135	68
F – 07'	490 857	8 319 871	Hornfels	581	N 215	125	61
F – 08'	490 867	8 319 877	Hornfels	581	N 191	281	79
F – 09'	490 879	8 319 889	Hornfels	581	N 184	274	82
F – 10'	490 963	8 319 928	Mineral y Hornfels	581	N 220	310	84
F – 11'	490 921	8 319 908	Mineral y Hornfels	581	N 198	108	64
F – 12'	490 918	8 319 907	Hornfels con óxido	581	N 240	150	87
F – 13'	490 809	8 319 853	Andesita y Mineral	581	N 330	60	70
F – 14'	490 765	8 319 825	Andesita y Mineral	581	N 358	88	88
F – 15'	490 725	8 319 805	Andesita y Mineral	581	N 355	85	72
F – 16'	490 641	8 319 930	Mineral	545	N 09	99	86
F – 17'	490 647	8 319 930	Mineral	545	N 024	114	40
F – 18'	490 750	8 319 968	Andesita y Mineral	545	N 154	64	72
F – 19'	490 786	8 319 980	Andesita y Mineral	545	N 147	57	77
F – 20'	490 885	8 319 925	Mineral y Hornfels	545	N 200	290	72
F – 21'	490 868	8 320 012	Mineral	545	N 195	285	69
F – 22'	490 412	8 319 832	Hornfels	569	N 240	150	64

Fuente: propia

4.2.3.4 Fracturas y Diaclasas

El grado de fracturamiento de un macizo rocoso está estrechamente relacionado con las deformaciones del macizo rocoso generada por esfuerzos de tracción y compresión, por los sistemas de falla principales.

En esta fase del estudio, se realizó el análisis en conjunto de los datos estructurales de mapeo de bancos, datos de las fallas regionales y el registro de los sistemas de diaclasas,



realizándose un análisis estadístico de toda la información mediante la utilización de software Dips v6.0 (Rocscience, 2012). Este software ha permitido realizar análisis estadísticos de la totalidad de datos estructurales, permitiendo visualizar diagramas de concentración de polos, planos de discontinuidades principales, contornos de isodensidades y diagrama de rosas. En el *Anexo A-8.1* se presentan los estereogramas obtenidos para cada estación geomecánica realizada en los niveles más bajos de la Mina 9-10.

Todos los estereogramas presentados en el *Anexo A-8.1.*, se han elaborado a partir de los datos de los registros de mapeo lineal de los bancos más bajos, los cuales se presentan en el *Anexo A-8.1*. En la columna “observaciones” de este registro se indica el número de repeticiones que presenta cada discontinuidad (por ejemplo “17FT” indica que esa orientación se repite 17 veces), la cual coincide con la columna de número de datos ingresada en el programa Dips (columna “Quantity”). Es por este motivo que en todos los estereogramas aparece una mayor cantidad de polos que de datos de entrada.

4.2.3.5 Definición de Dominios Estructurales

Para definir los dominios estructurales de la Mina 9-10 se consideró la información levantada en campo, en primer lugar, se mapearon los contactos litológicos, los cuales se utilizaron como límites preliminares. Posteriormente se registraron los datos estructurales mediante el método de líneas de detalle para cada tipo de litología, procurando mapear los rasgos más característicos de cada litología (fallas locales, zonas de cizalla, diaclasas, etc.). Finalmente se agruparon las litologías cuyas estructuras presentan similares características estructurales. Los límites de los dominios estructurales finalmente son determinados, donde las orientaciones preferentes de las estructuras geológicas cambian, es decir, las estructuras presentan orientaciones diferentes.

Mediante la interpretación de la data estructural, los datos evaluados se obtuvieron mediante el uso del estereograma equiareal de Schmidt, los cuales se representa



adecuadamente la distribución espacial de todos los datos registrados, tanto como fallas regionales y locales, así como los sistemas de discontinuidades obtenidas en el mapeo de bancos.

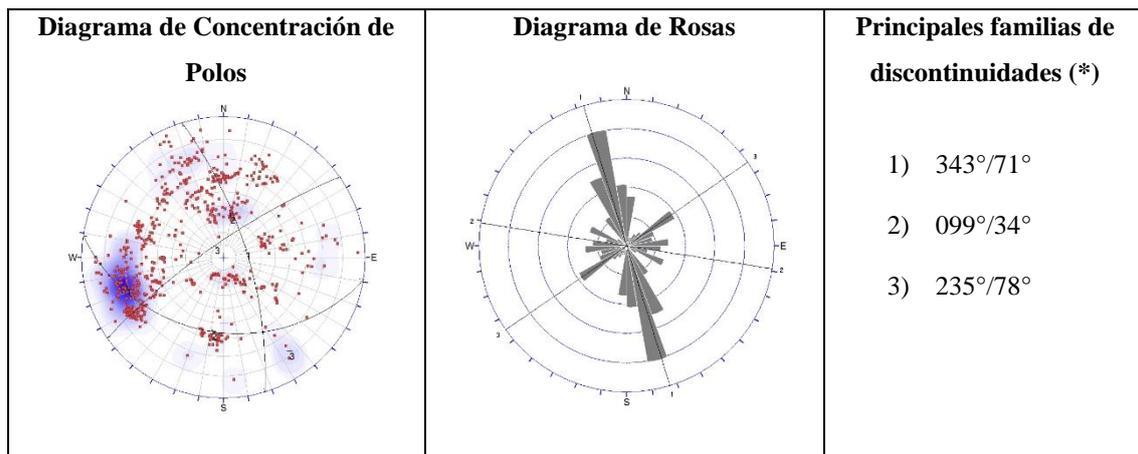
Las características de los sistemas de fracturamiento de los dominios estructurales han tenido en consideración la información obtenida en superficie como los mapeos geomecánicos y estructurales.

Del análisis e interpretación de los datos de campo evaluados, se han identificado seis (06) dominios estructurales bien diferenciados. En los *Planos de Dominios Estructurales - PL-GG-009*, del *Anexo A-11*, se presentan los dominios estructurales definidos para la Mina 9-10. En este último plano, también se presentan los *planos de sistemas de fracturamiento - PL-GG-006, 007 y 008* del *Anexo A-11*.

Los dominios estructurales presentan las siguientes características:

- **Cara Norte de la Mina 9-10** - Litológicamente está constituido por hornfels, cortados por una secuencia de diques andesíticos de textura porfírica, de distribución tabular, formando cuerpos paralelos, y en un área menor se muestralan zonas de mineralización (óxidos). Presenta un sistema de fracturamiento principal NW-SE con buzamiento de alto ángulo ($N343^{\circ}/71^{\circ}$), paralelo a la tectónica andina asociado al fallamiento regional andino, y un segundo sistema de discontinuidades con dirección E-W de baja inclinación ($N099^{\circ}/34^{\circ}$).

Para la Cara Norte de la Mina 9-10, se ha considerado los sistemas de fracturamiento (joints set) tomados del cartografiado estructural y de las estaciones geomecánicas: EG-11, EG-12, EG-13, EG-14, EG-15, EG-19, EG-20, EG-21, EG-23 y EG-24. También las estaciones geomecánicas EG-01', EG-02' y EG-03' en este sector. En la *Figura 108* se presenta el análisis estereográfico y el diagrama de rosas del sistema de fracturamiento para este dominio estructural.



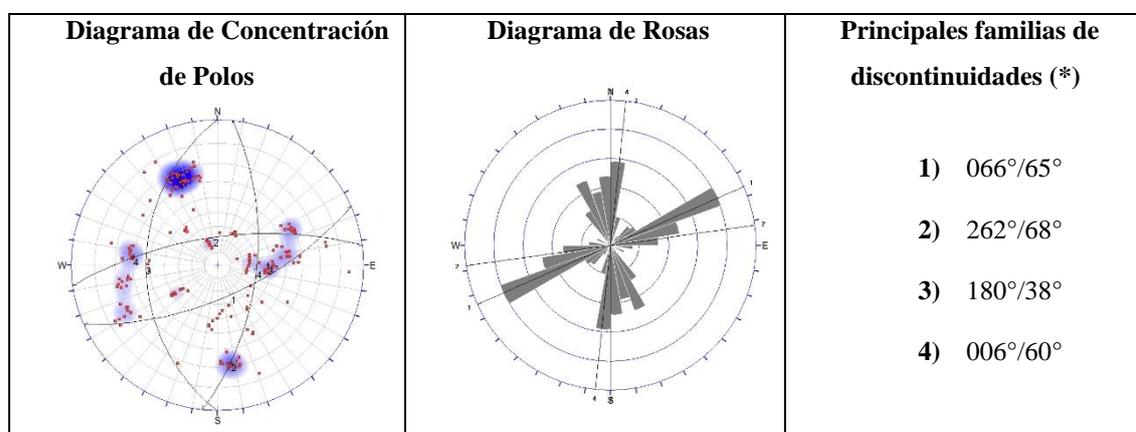
(*) Para los datos de buzamiento no se toman en consideración los cuadrantes de buzamiento, ya que los datos se han registrado usando la regla de mano derecha.

Figura 108. Principales Dominios Estructurales de la Mina 9 y 10 – Cara Norte

- **Cara Sureste de la Mina 10** - Este sector, litológicamente está constituido por hornfels, cortados por un porfírido andesítico en la Cara Este. Se observo un sistema principal de fracturamiento NE-SW con buzamiento de alto ángulo (N066°/65°), y un segundo sistema de familias de discontinuidades con dirección N-S de alta inclinación (N262°/68°).

Para la Cara Sureste de la Mina 10, se ha considerado los sistemas de fracturamiento (joints set) tomados del cartografiado estructural y de las estaciones geomecánicas: EG-25, EG-29, EG-37 y EG-38 y de la estación geomecánica EG-04' en este sector.

Para más detalle ver la **Figura 109**.

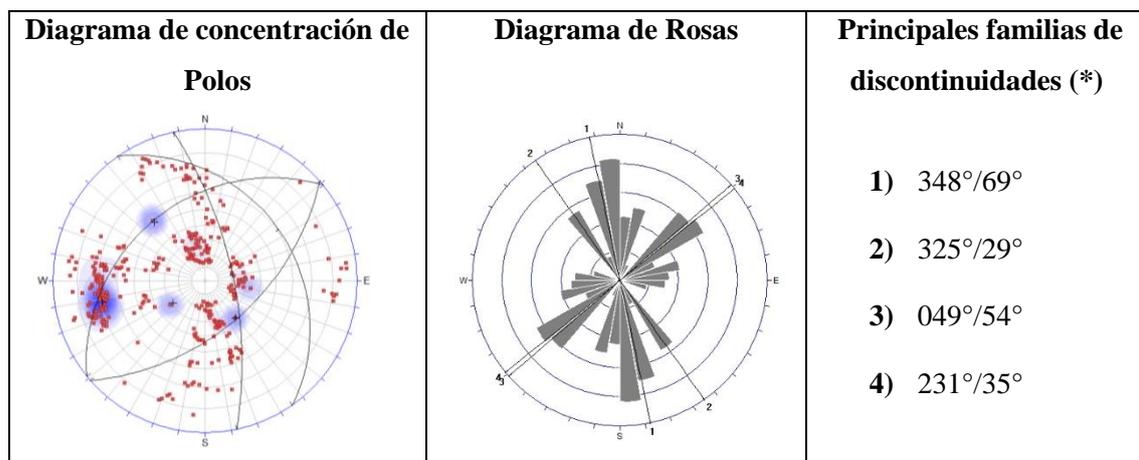


(*) Para los datos de buzamiento no se toman en consideración los cuadrantes de buzamiento, ya que los datos se han registrado usando la regla de mano derecha.

Figura 109. Principales Dominios Estructurales de la Mina 10 – Cara Sureste

- **Cara Sur de la Mina 10** - Litológicamente está constituido por hornfels cortados por una secuencia de diques andesíticos de textura porfírica y de distribución tabular, formando cuerpos paralelos, además presenta áreas de mineralización (óxidos). Se observó un sistema principal de fracturamiento NW-SE con buzamiento de alto ángulo ($N348^{\circ}/69^{\circ}$), paralelo a la tectónica andina asociado al fallamiento regional andino, y un segundo sistema de discontinuidades con dirección NW-SE de baja inclinación ($N325^{\circ}/29^{\circ}$).

Para la Cara Sur de la Mina 10, se ha considerado los sistemas de fracturamiento (joints set) tomados del cartografiado estructural y de la estación geomecánica EG-33 y de las estaciones geomecánicas EG-05', EG-06' y EG-07' en este sector. Para más detalle ver la **Figura 110**.

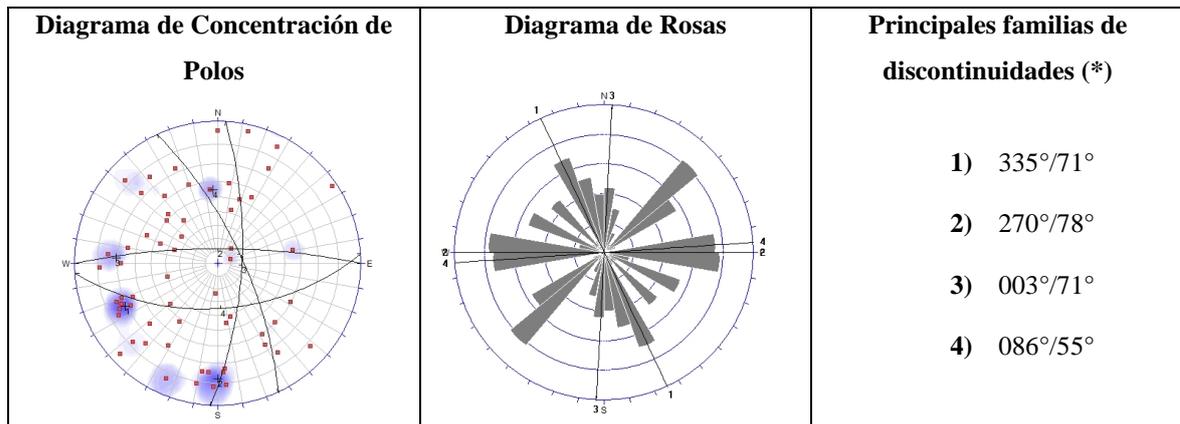


(*) Para los datos de buzamiento no se toman en consideración los cuadrantes de buzamiento, ya que los datos se han registrado usando la regla de mano derecha.

Figura 110. Principales Dominios Estructurales de la Mina 10 – Cara Sur

- **Cara Oeste de la Mina 10** - Litológicamente está constituido por hornfels y zonas de mineralización (óxidos). Presenta un sistema principal de fracturamiento NW-SE con buzamiento de alto ángulo ($N335^{\circ}/71^{\circ}$), paralelo a la tectónica andina asociado al fallamiento regional andino, y un segundo sistema de discontinuidades con dirección E-W de alta inclinación ($N270^{\circ}/78^{\circ}$).

Para la Cara Oeste de la Mina 10 se ha considerado los sistemas de fracturamiento (joints set) tomados de las estaciones geomecánicas: EG-06, EG-17, EG-18, EG-27, EG-28 y EG-40 y de estación geomecánica EG-08' en este sector. Para más detalle ver la **Figura 111**.

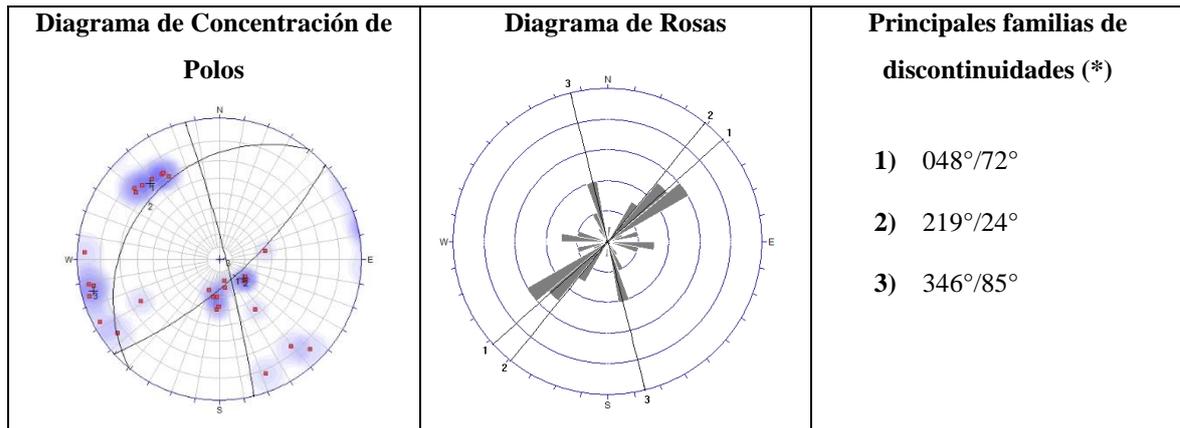


(*) Para los datos de buzamiento no se toman en consideración los cuadrantes de buzamiento, ya que los datos se han registrado usando la regla de mano derecha.

Figura 111. Principales Dominios Estructurales de la Mina 10 – Cara Oeste

- **Cara Oeste de la Mina 9** - Litológicamente están constituido por óxidos. Presenta un sistema principal de fracturamiento NE-SW con buzamiento de alto ángulo (N048°/72°), y un segundo sistema de discontinuidades con dirección NW-SW de baja inclinación (N219°/24°).

Para la Cara Oeste de la Mina 9 se ha considerado los sistemas de fracturamiento (joints set) tomados del cartografiado estructural y de la estación geomecánica EG-07. En el estudio de actualización no se realizaron estaciones geomecánicas adicionales en la Mina 9. Para más detalle ver la **Figura 112**.



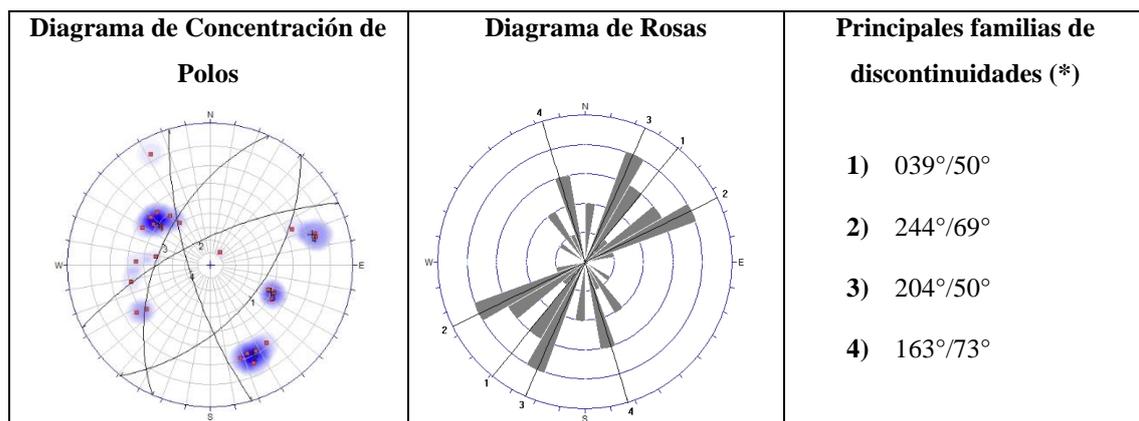
(*) Para los datos de buzamiento no se toman en consideración los cuadrantes de buzamiento, ya que los datos se han registrado usando la regla de mano derecha.

Figura 112. Principales Dominios Estructurales de la Mina 9 – Cara Oeste

- **Cara Este de la Mina 9** - Litológicamente están constituídos por depósitos aluviales.

Presenta un sistema principal de fracturamiento NE-SW con buzamiento de alto ángulo (N039°/50°), y un segundo sistema de discontinuidades con dirección NE-SW de alta inclinación (N244°/69°).

Para la Cara Este de la Mina 9, se ha considerado los sistemas de fracturamiento (joints set) tomados del cartografiado estructural y la estación geomecánica EG-05. En el estudio de actualización no se realizaron estaciones geomecánicas adicionales en la Mina 9. Para más detalle ver la **Figura 113**.



(*) Para los datos de buzamiento no se toman en consideración los cuadrantes de buzamiento, ya que los datos se han registrado usando la regla de mano derecha.

Figura 113. Principales Dominios Estructurales de la Mina 9 – Cara Este



CAPITULO V

EXPOSICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

Para el desarrollo del presente estudio, de la evaluación litológica local se determinó que los aspectos litológicos más característicos relacionados a la geología local del área de estudio, se presenta con detalle la descripción de las unidades aflorantes en el área de la Mina 9-10, tales como: roca hornfels (metasedimentos), que conforman la roca encajonante y enjambre de diques andesíticos y dacíticos formando principalmente estructuras tipo sills, depósitos cuaternarios (aluviales y coluviales), depósitos antrópicos y depósitos de material estéril.

El arreglo estructural de las Minas 9-10, consiste en diques con una orientación NNO-SSE y buzamiento entre 75° y 85° NO.

En el cartografiado geológico realizado a lo largo de los taludes, se ha observado que las rocas están dominadas por fallas mayores que las cortan de manera transversal. Estas fallas son de desplazamiento dextral y paralelas con rumbo $N60^\circ O$; la distribución de los esfuerzos en el interior del macizo rocoso ha generado un fracturamiento de moderado a fuerte, y a su vez un diaclasamiento del macizo rocoso, cuyas orientaciones son longitudinales al eje del talud.

5.2 CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO

5.2.1 Análisis De Estabilidad De Taludes A Nivel De Bancos

Con la finalidad el estado de tensiones de los taludes hay que tener en cuenta las propiedades y características del macizo rocoso donde se ejecutan las excavaciones. Si se



trata de una masa rocosa con gran resistencia en conjunto, pero fracturado o con fallas, son las discontinuidades son las que controlan el tipo de rotura. Si, por el contrario, la resistencia del macizo rocoso es baja, la rotura viene condicionada por su resistencia al corte. Además, existen otros factores que pueden condicionar la rotura, como la presencia de agua, los efectos vibratorios provocados por voladuras, los sismos, etc.

Para realizar la evaluación de la estabilidad de taludes a nivel de bancos se ha seguido una metodología:

- Realización de una campaña de investigación geológica - geotécnica.
- Investigación de las características resistentes y deformacionales de la roca intacta y de las discontinuidades, mediante ensayos de campo y de laboratorio.
- Determinación de los criterios de rotura más adecuados para explicar los comportamientos observados en los macizos rocosos.
- Análisis cinemático de tipos de deslizamientos o fallas.
- Análisis de la estabilidad de los taludes del macizo rocoso utilizando métodos de equilibrio límite.

Continuación se observará todas las definiciones de los criterios de cálculo y el análisis cinemático de los deslizamientos.

5.2.2 Verificación del diseño de los taludes de banco del tajo

5.2.2.1 Verificación del Ancho Mínimo de la Berma de Seguridad

Para un diseño de la berma de seguridad consiste principalmente en mantener seguros al personal y a la maquinaria de la caída de rocas que podría producirse cuando estos trabajan cerca a la cara de los bancos. Ritchie (1960). propuso una fórmula para calcular el ancho mínimo de una berma de seguridad en función de su altura, sin embargo, esta fórmula es considerada muy conservadora para bermas de bancos de menos de 30 m de altura. Crouse (2008) ha propuesto una curva modificada, que sigue la fórmula de Ritchie para bermas de

bancos de más de 30 m de altura, pero que considera anchos mínimos menores para bermas de bancos de menos de 30 m de altura, en la **Figura 114** se presenta esta curva, la cual es usada para la estimación de los anchos mínimos de la berma de seguridad.

Se ha respetado la altura de los bancos considerados en el desarrollo y proyección de la Mina 9-10, las cuales son de 36 m y 48 m. Con estos valores se calculó el ancho mínimo de la berma de seguridad, resultando 12 m y 14.1 m para los bancos de 36 m y 48 m respectivamente (ver **Figura 114**).

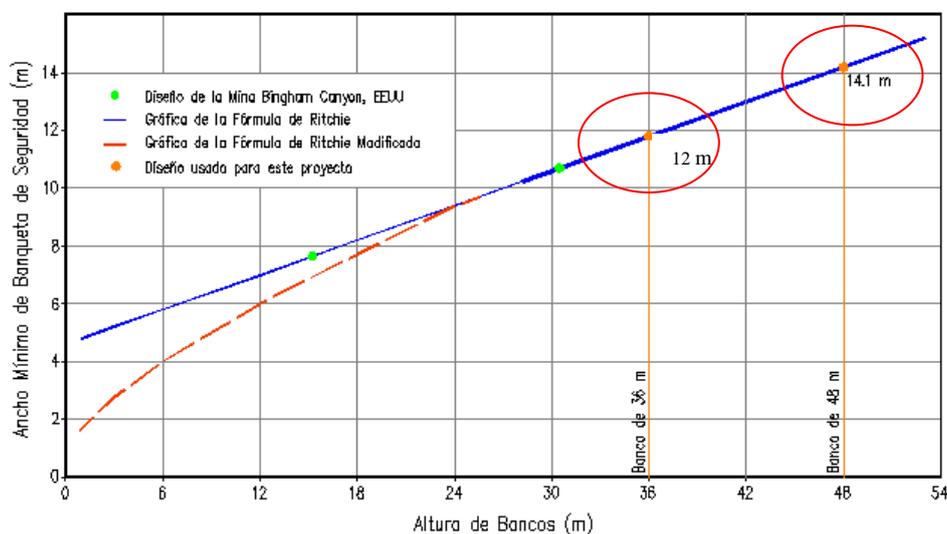


Figura 114. Verificación del Ancho Mínimo de la Berma de Seguridad de la Mina 9-10

Fuente: Crouse (2008)

5.2.3 Consideraciones geotécnicas generales

Para el análisis del estado de tensiones de los taludes globales se han considerado las secciones más pertinentes y zonas más críticas y representativas de los taludes de Mina, las cuales han sido analizadas de acuerdo con la topografía existente.

5.2.3.1 Modelo Geológico - Geotécnico

Para la realización del modelo geológico - geotécnico, se ha tomado en cuenta la información geológica levantada en campo y de las secciones geológicas e interpretación de las perforaciones existentes para la elaboración de las secciones.

El ancho de la berma de seguridad considerado en el desarrollo de la Mina 9-10 (*Figura 115 a Figura 118*), es aproximadamente de 15 m, lo cual es mayor que los valores obtenidos de la aplicación de la fórmula de Ritchie modificada, por lo que su diseño se considera adecuado.

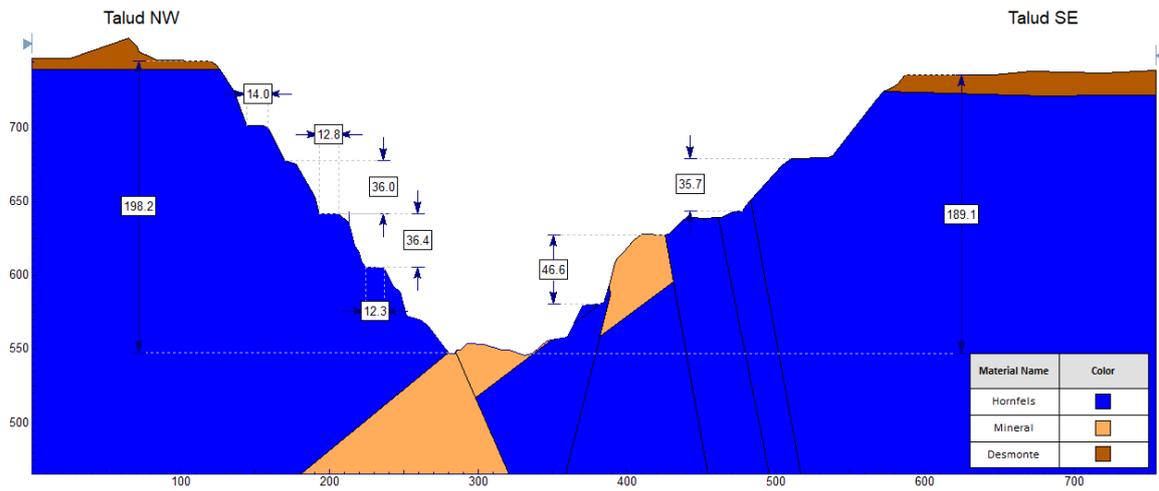


Figura 115. Valores de la Berma de Seguridad y Altura de Bancos en la Mina 10 – Sección A-A

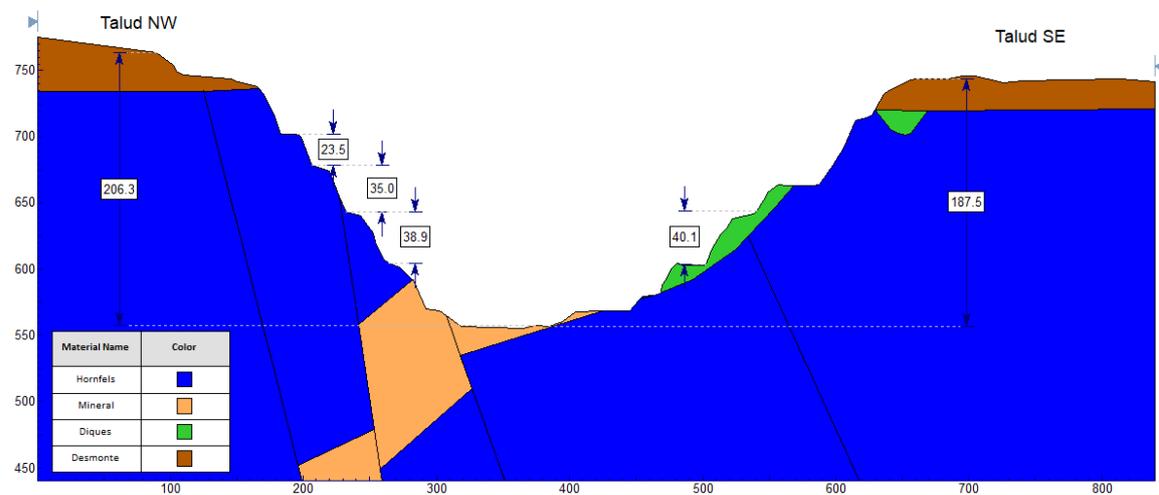


Figura 116. Valores de la Berma de Seguridad y Altura de Bancos en la Mina 10 – Sección B-B

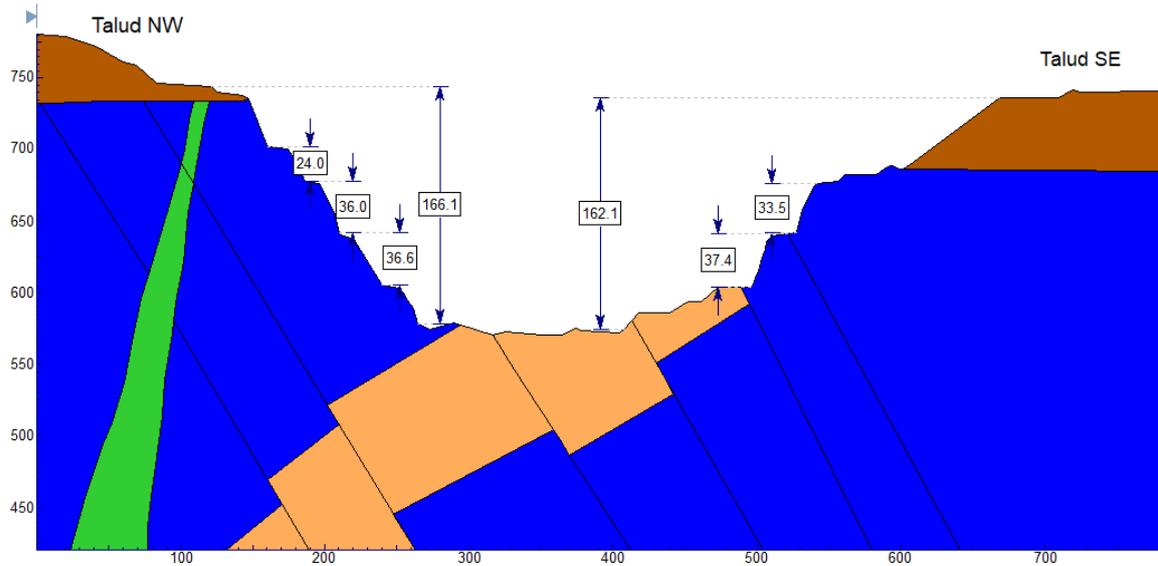


Figura 117. Valores de la Berma de Seguridad y Altura de Bancos en la Mina 10 – Sección C-C

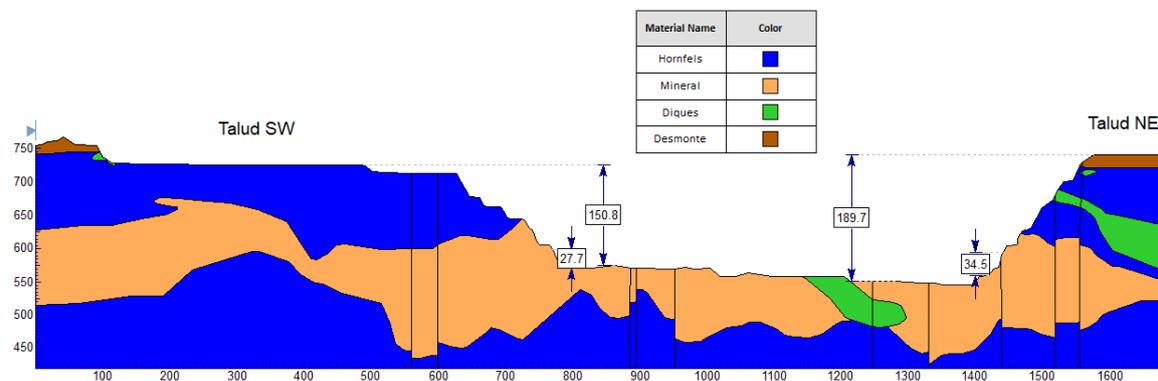


Figura 118. Valores de la Berma de Seguridad y Altura de Bancos en la Mina 10 – Sección D-D

5.2.3.2 Verificación del Ángulo de la Cara de los Bancos

Es práctica habitual que, dependiendo del equipo usado y del tipo de roca, el ángulo de la cara del banco excavado en tajo abierto sea de 65° a 70° . No se debe usar el ángulo de la cara del banco excavado para el diseño de la berma de seguridad, debido a que siempre hay pérdida de cresta debido a las roturas planas y cuñas, lo que ocasiona que el ángulo de banco excavado disminuya.

El ángulo de cara del banco que debe ser usado en el diseño de la berma de seguridad es el ángulo que produce un ancho mínimo de la berma de seguridad aceptable para la confiabilidad deseada después de la excavación convencional.

Para estimar el ángulo de la cara del banco, se asumió un valor fijo de pérdida de cresta a partir de un ángulo inicial de 70° . A pesar de que se tiene bermas que han tenido pérdidas de hasta 3 m, debido al criterio estadístico de confiabilidad, se ha elegido como valor referencial de pérdida de cresta 0.80 m, debido a que el 80% de los valores de espaciamiento de discontinuidades mapeados en las estaciones geomecánicas de la Mina 9-10 era menor que 0.80 m (clasificado como moderadamente junto a separado), respecto a niveles de riesgos moderados a bajos, por lo consiguiente en presentado en los resultados del evaluación de riesgos geológicos.

La disminución o caída asumida en la cresta de un banco de los taludes, en combinación con el ancho mínimo de la berma de seguridad determinado con la fórmula de Ritchie modificada, controló el ángulo interrampa obtenido para configuraciones de bancos, tal como se ilustra en el diseño genérico de los bancos de 36 m y 48 m de altura presentados en las *Figuras 119 y 120*.

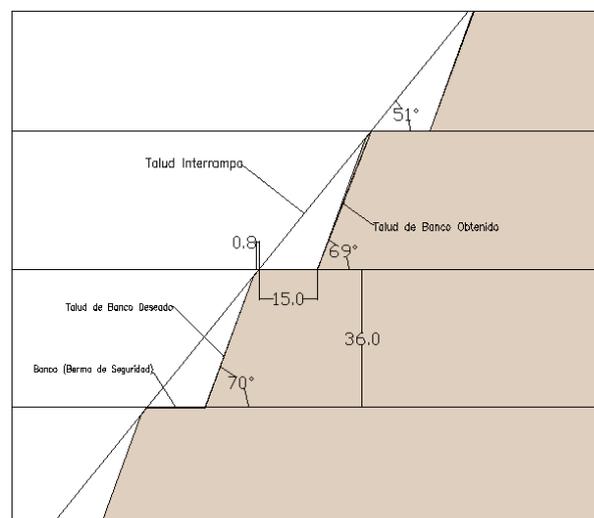


Figura 119. Verificación del Diseño Genérico de Bancos de 36 m de altura

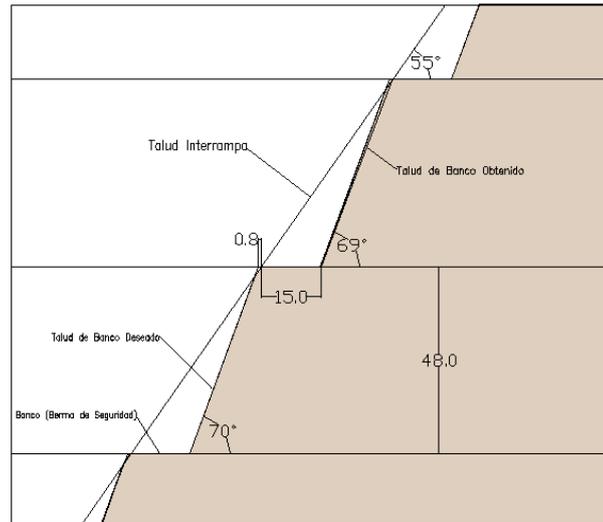


Figura 120. Verificación del Diseño Genérico de Bancos de 48 m de altura

Con el diseño de los bancos genéricos, se evaluó y estimó un ángulo confiable de banco de 69° , y es la inclinación que se ha considerado durante las operaciones de la Mina 9-10, por lo tanto, el diseño es adecuado.

Los ángulos máximos de interrampa recomendado varía entre 51° a 55° de acuerdo a la altura de bancos y considerando la ausencia de rampas o accesos. En la **Figura 121** se presenta la configuración de los bancos de la Mina 10, donde se observa que de acuerdo a los cálculos geométricos presentados el diseño es adecuado (ver **Figura 121**).

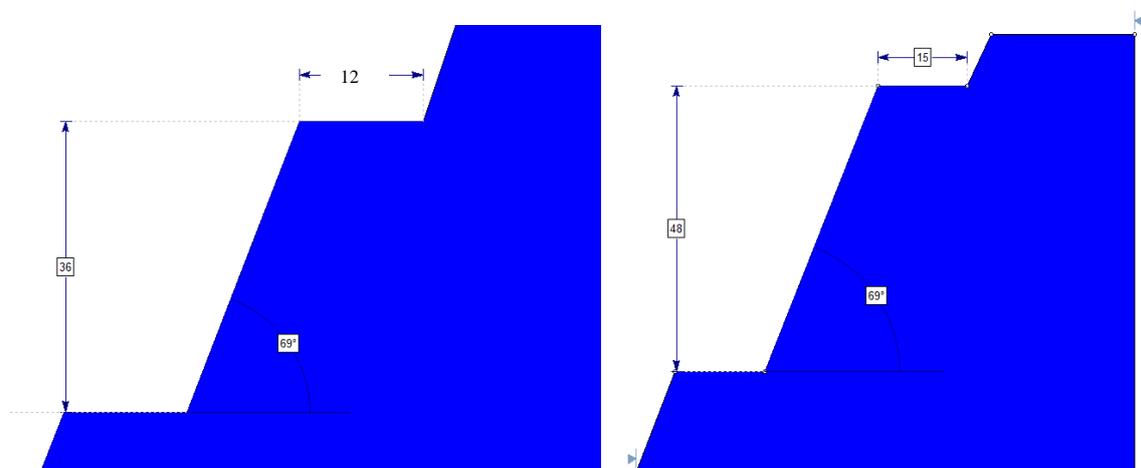


Figura 121. Configuración de Bancos de los Taludes de la Mina 9-10. (a) Bancos de 36 m de altura y (b) Bancos de 48 m de altura



5.2.4 Factores de seguridad mínimos admisibles

Para el análisis de estabilidad de taludes, el Ministerio de Energía y Minas (MEM), recomienda los siguientes factores de seguridad mínimos admisibles:

- Condición estática (taludes locales), FS = 1.3.
- Condición pseudo - estática (taludes locales), FS = 1.0.

5.2.5 Coeficiente sísmico utilizado

Para los análisis en condición pseudo - estática se recomienda emplear un coeficiente sísmico igual a 1/2 de la aceleración máxima - PGA (Hynes y Franklin, 1984), por lo que se ha usado un valor de coeficiente sísmico para roca (Tipo B) de 0.19 g determinado en el Estudio de Peligro Sísmico realizado para la zona de estudio.

5.2.6 Propiedades de los materiales

En el *Anexo A-7: Parámetros de Resistencia de las Discontinuidades*, se han presentado los parámetros de resistencia al corte de los principales sistemas de discontinuidades, estimados según la metodología de Barton y Choubey (1977). Se han presentado los resultados obtenidos de resistencia al corte en términos de la cohesión y del ángulo de fricción de las discontinuidades, los cuales son datos de entrada para los programas Rocplane y Swedge. Para el cálculo de los ángulos de fricción básicos y residuales se han considerado los datos obtenidos del Martillo Schmidt (r, R), Peine de Barton (JRC), ensayos de corte directo (Φ_b) y Tilt Test (Φ_b). Un resumen de los valores obtenidos se presenta en la *Tabla 80*.



Tabla 80: Resumen de Ángulos de Fricción Básicos y Residuales

Estación Geomecánica	Nivel	Litología	Φ_b (°) (Tilt Test)	Φ_b (°) (Corte Directo)	Φ_b (°) (Promedio)	Φ_r (°)
EG-01	725	Hornfels	32.6	30.7	31.7	28.5
EG-02	724	Hornfels	28.0	30.7	29.4	27.8
EG-03	726	Hornfels	27.0	30.7	28.9	27.6
EG-04	715	Hornfels Alterado	30.0	30.7	30.4	28.3
EG-05	714	Hornfels Alterado	33.0	30.7	31.9	28.7
EG-06 ^(*)	724	Arenisca Poco Consolidada	28.0	-	28.0	24.2
EG-07	734	Magnetita	27.0	31.4	29.2	27.7
EG-08	702	Hornfels	26.0	30.7	28.4	26.5
EG-09	703	Andesita Porfírica	28.0	30.8	29.4	27.4
EG-10	701	Hornfels	28.0	30.7	29.4	27.5
EG-11	629	Andesita Porfírica	28.0	30.8	29.4	27.2
EG-12	628	Hornfels	32.0	30.7	31.4	28.6
EG-13	629	Hornfels	28.0	30.7	29.4	27.8
EG-14	702	Hornfels Alterado	26.0	30.7	28.4	27.3
EG-15	702	Hornfels	24.0	30.7	27.4	25.4
EG-16	701	Hornfels	26.0	30.7	28.4	26.0
EG-17	677	Hornfels Alterado	32.0	30.7	31.4	27.6
EG-18	678	Zona de Óxidos	27.0	29.6	28.3	24.3
EG-19	678	Hornfels	26.0	30.7	28.4	23.4
EG-20	677	Hornfels	29.0	30.7	29.9	27.6
EG-21	678	Hornfels	23.0	30.7	26.9	22.9
EG-22	677	Andesita Porfírica	25.0	30.8	27.9	26.6
EG-23	679	Hornfels	24.0	30.7	27.4	23.7
EG-24	678	Hornfels	27.0	30.7	28.9	26.5
EG-25	676	Hornfels	28.0	30.7	29.4	25.9
EG-26	677	Hornfels	27.0	30.7	28.9	26.1
EG-27	641	Zona de Óxidos	23.0	29.6	26.3	22.1
EG-28	678	Zona de Óxidos	22.0	29.6	25.8	21.6
EG-29	703	Pórfido Andesítico	28.0	30.8	29.4	26.9
EG-30	642	Zona de Óxidos	27.0	29.6	28.3	25.4
EG-31	640	Hornfels	23.0	30.7	26.9	23.6
EG-32	642	Hornfels Alterado	26.0	30.7	28.4	25.3
EG-33	678	Hornfels	27.0	30.7	28.9	26.3
EG-34	626	Hornfels	25.0	30.7	27.9	25.1



EG-35	620	Hornfels	24.0	30.7	27.4	25.1
EG-36	594	Hornfels	27.0	30.7	28.9	25.7
EG-37	672	Hornfels	28.0	30.7	29.4	25.0
EG-38	646	Hornfels	28.0	30.7	29.4	24.7
EG-39	658	Magnetita	25.0	31.4	28.2	24.8
EG-40	624	Hornfels	30.0	30.7	30.4	28.0
EG-41	642	Hornfels	30.0	30.7	30.4	27.7
EG-42	581	Andesita Porfírica	25.0	30.8	27.9	25.5
EG-43	718	Hornfels Alterado	26.0	30.7	28.4	27.5
EG-44	715	Magnetita	25.0	31.4	28.2	27.0
EG-45	715	Zona de Óxidos	24.0	29.6	26.8	25.6
EG-46	620	Hornfels Alterado	26.0	30.7	28.4	27.0
EG-47	629	Hornfels Alterado	25.0	30.7	27.9	26.5
EG-48	668	Hornfels Alterado	24.0	30.7	27.4	25.7
EG-49	690	Hornfels Alterado	25.0	30.7	27.9	27.3

(*) Roca arenisca, solo se consideran los resultados del ensayo del tilt test, ya que no se ejecutaron ensayos de corte directo en esta litología.

5.2.7 Análisis cinemático del macizo rocoso

Para corroborar el estado de tensiones se ha evaluado la estabilidad de los taludes de bancos existentes, se ha realizado la evaluación geomecánica de los macizos rocosos, se han identificado las principales familias de discontinuidades, se ha evaluado el grado de fracturamiento (RQD), la orientación, espaciamiento entre discontinuidades, persistencia y otros aspectos relevantes.

De acuerdo con la escala de análisis del problema, el análisis cinemático del macizo rocoso se utilizará para la evaluación de la estabilidad a nivel de bancos, donde la resistencia al corte de las discontinuidades es más importante que la resistencia al corte del macizo rocoso.

Por consiguiente, se realizó el análisis cinemático de las familias de discontinuidades con la finalidad de estimar el tipo de falla más probable que puede ocurrir considerando el talud de corte existente. Una vez determinado el tipo de deslizamiento, se analiza la



estabilidad para cada caso, mediante el método de equilibrio límite, utilizando el programa de cómputo Swedge (Rocscience, 2012) para el deslizamiento tipo cuña y Rocplane (Rocscience, 2012) para el deslizamiento tipo planar.

Las redes estereográficas nos permiten analizar tridimensionalmente las discontinuidades de un macizo rocoso, esto permitirá la identificación de las familias de discontinuidades que tienen orientación desfavorable respecto a un talud existente; este procedimiento se denomina análisis cinemático. La probabilidad que ocurra los deslizamientos de tipo plano, en cuña y por vuelco de estratos pueden identificarse con esta metodología.

Por medio del análisis de la proyección estereográfica con el software Dips es posible predecir el tipo de deslizamiento existente en un macizo rocoso, con el control estructural de acuerdo a la ubicación relativa de los planos de las familias de discontinuidades principales respecto a la orientación de la cara del talud. Esta técnica permite ilustrar los planos de discontinuidades en términos de su buzamiento y su dirección de buzamiento.

De las principales familias de discontinuidades se obtiene sus a partir de un diagrama de concentración de polos. Generalmente se obtienen tres familias principales de discontinuidades del macizo rocoso y el resto se considera como secundarias.

Los resultados obtenidos presentan en el *Anexo A-7.1 (Parámetros de Resistencia de las Discontinuidades)*, el ángulo de fricción residual de las discontinuidades varía entre 22.1° y 28.7° . En los niveles inferiores del tajo, el ángulo de fricción básico varía entre 28.8° y 31.6° , debido a que los resultados del ángulo de fricción básico obtenido a partir del Tilt Test es ligeramente menor que el obtenido del ensayo de corte directo, se ha considerado de manera conservadora utilizar el ángulo de fricción básico del Tilt Test para obtener el ángulo de fricción residual, el cual ha sido utilizado en los análisis cinemáticos presentados.

En el *Anexo A-8.1 (Análisis Estereográfico)*, se presentan unos ejemplos de los

diagramas de rosas, diagramas de concentración de polos y las principales orientaciones de las familias de discontinuidades obtenidas de cada estación geomecánica de la Mina 9-10, que han servido de base para el análisis cinemático del macizo rocoso, el cual se presenta en el *Anexo A-8.2 (Análisis Cinemático)*.

5.2.7.1 Deslizamiento de Tipo Planar

El deslizamiento tipo planar se produce a favor de una superficie de discontinuidad pre - existente, que podría darse desde una estratificación, una junta tectónica, una falla geológica local, etc. Su condición más básica es la presencia de juntas buzando a favor del talud, y que tenga casi la misma dirección que el talud y un buzamiento mayor que el ángulo de fricción de las discontinuidades. En taludes excavados paralelos a la estratificación, pueden tener lugar roturas planas por deslizamiento de los estratos. Un ejemplo de este tipo de rotura se presenta en la *Figura 122*.

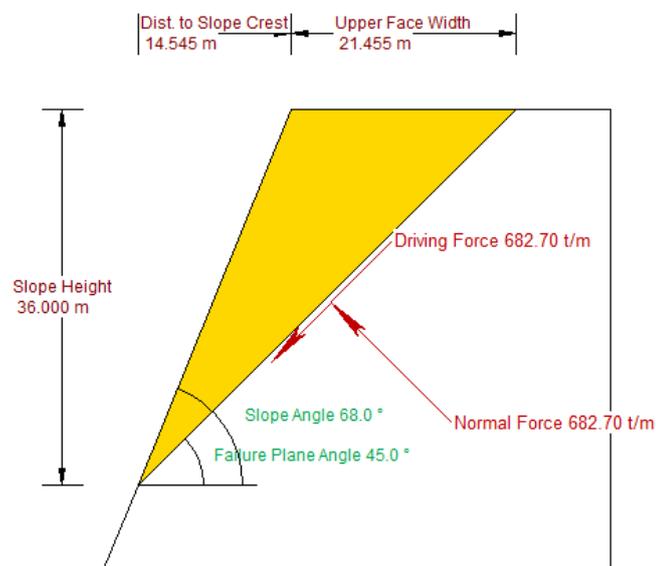


Figura 122. Ejemplo de Análisis de Deslizamiento Tipo Planar (EG-01)

5.2.7.2 Deslizamiento Tipo Cuña

El tipo de fallas corresponde de un bloque en forma de cuña, el primer paso en el

análisis de deslizamiento por cuña es graficar la orientación de la cara del banco en la red estereográfica. El segundo paso es dibujar un círculo para el ángulo de fricción. El área que contiene las ubicaciones adversas de los polos de fractura estará dentro del círculo, pero fuera del área sombreada, este tipo de deslizamiento es ocasionado por dos planos de discontinuidad, a favor de la línea de su intersección. Para que se de este tipo de rotura, los dos planos deben aflorar en la superficie del talud, y se deben cumplir iguales condiciones cinemáticas que para la rotura plana.

Para poder obtener el factor de seguridad es más compleja que en el caso de rotura planar debido a que el cálculo debe hacerse en tres dimensiones, entrando en la caracterización geométrica del problema, lo cual implica un número mucho mayor de variables angulares. Un ejemplo de este tipo de rotura se presenta en la **Figura 123**.

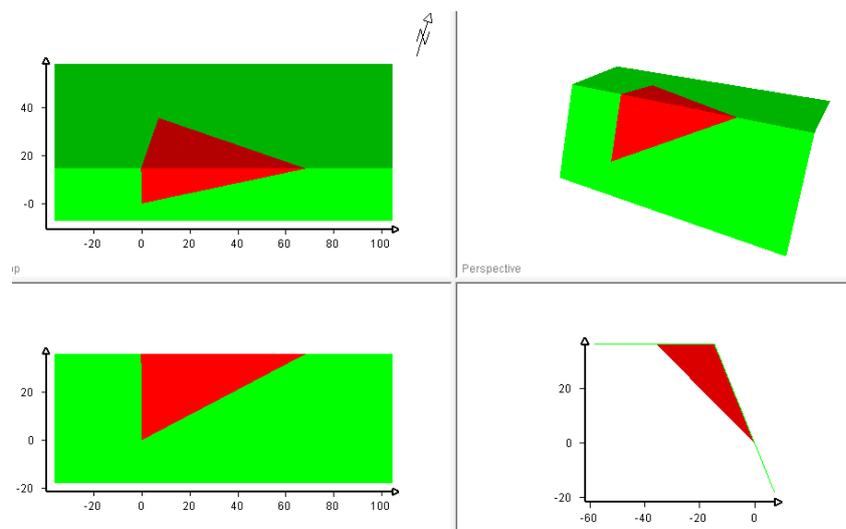


Figura 123. Ejemplo de Analisis de Deslizamiento Tipo Cuña (EG-01)

5.2.7.3 Deslizamiento por Vuelco de Estratos (Toppling)

Se producen en taludes de macizos rocosos donde los estratos presentan buzamiento contrario a la inclinación del talud y dirección paralela o sub - paralela al mismo. En general, los estratos aparecen fracturados en bloques a favor de sistemas de discontinuidades ortogonales entre sí. Este tipo de rotura implica un movimiento de rotación de los bloques y

la estabilidad no está únicamente condicionada por su resistencia al corte. Un ejemplo de este tipo de rotura se presenta en la **Figura 124**.

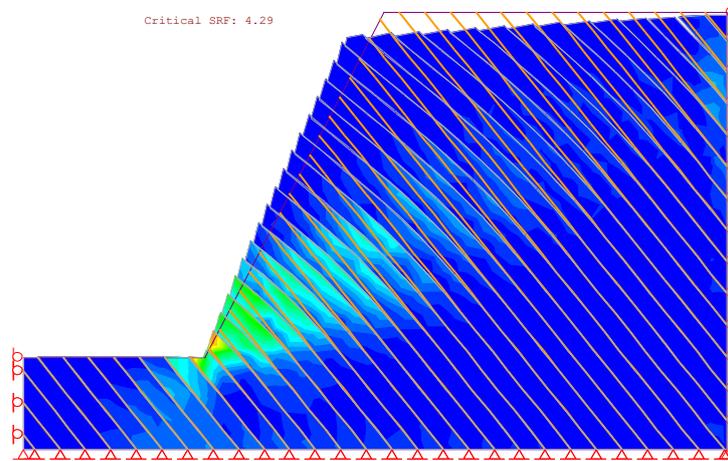


Figura 124. Ejemplo de Analisis de Deslizamiento Tipo Vuelco de Estratos (EG-16)

En los *Anexos A-8.2, A-8.3 y A-8.4*, se presentan los análisis cinemáticos para deslizamientos planos, en cuña y por vuelco de estratos para las condiciones actuales, se evaluaron en cada estación geomecánica en la Mina 9-10, y que han servido de base para el posterior análisis del macizo roco y su estabilidad local.

5.2.8 Análisis de estabilidad a nivel de bancos

Una vez evaluado e identificado el tipo de falla que puede ocurrir, lo siguiente es estimar el factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudo - estáticas. Para los análisis de estabilidad se utilizó los programas Rocplane, Swedge y Phase² (Rocscience), considerando deslizamientos tipo planar, cuña y vuelco de estratos, respectivamente

En la **Tabla 81 y 82** se observa el resumen de los factores de seguridad obtenidos mediante el análisis de estabilidad a nivel de bancos de los taludes del rajo existente, en donde se ha resaltado las familias de discontinuidades que afectan en mayor medida la estabilidad del talud.

Tabla 81: Resumen de Análisis de Estabilidad de Taludes a Nivel de Bancos

Estación Geomecánica	Litología	Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²) / Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento		Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático																					
						Planar	Cuña	Planar	Cuña	Planar	Cuña																				
EG-01 (Mina 9-10)	Hornfels – Magnetita	4	1) 77°/101° 2) 47°/337° 3) 59°/209° 4) 75°/053°	71°/148°	1) 3.2/45.2 2) 3.1/44.8 3) 3.2/45.2 4) 3.1/44.8	-	F1/F3		1.8		1.3																				
												EG-02 (Mina 9-10)	Magnetita – Hornfels	4	1) 78°/095° 2) 50°/093° 3) 80°/136° 4) 49°/337°	66°/150°	1) 2.6/40.8 2) 2.7/41.9 3) 2.7/42.0 4) 2.7/42.3	-													
																						EG-03 (Mina 9-10)	Magnetita – Andesita	4	1) 67°/017° 2) 65°/159° 3) 76°/207° 4) 50°/059°	72°/159°	1) 2.2/40.3 2) 2.2/39.5 3) 2.4/41.9 4) 2.3/41.7	F2	1.0	0.7	0.9
EG-05 (Mina 9-10)	Magnetita – Hornfels – Andesita	6	1) 71°/074° 2) 69°/102° 3) 36°/328° 4) 82°/010° 5) 67°/042° 6) 63°/167°	73°/333°	1) 1.9/35.2 2) 1.9/35.4 3) 1.8/32.5 4) 1.9/36.1 5) 1.9/36.1 6) 2.0/36.9	F3	F1/F3 F3/F5	1.5	1.4 1.0	1.0 0.7																					
											EG-06 (Mina 9-10)	Hornfels – Magnetita	2	1) 69°/091° 2) 70°/355°	68°/324°	1) 2.5/38.5 2) 2.4/37.0	-														

Estación Geomecánica	Litología	Familias Principales	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²) / Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento		Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático									
						Planar	Cuña	Planar	Cuña	Planar	Cuña								
EG-07 (Mina 9-10)	Magnetita – Hornfels	3	1) 32°/347° 2) 78°/024° 3) 72°/117°	69°/338°	1) 4.1/41.8 2) 4.1/41.5 3) 3.9/40.5	F1		2.2	1.5										
												F1	F1/F2 F1/F3 F1/F4 F2/F3	1.6 1.9 2.4 1.4	1.3 0.8				
EG-08 (Mina 9-10)	Magnetita – Hornfels	4	1) 69°/082° 2) 54°/150° 3) 48°/110° 4) 64°/292°	74°/84°	1) 3.7/38.8 2) 4.3/43.1 3) 4.6/45.1 4) 4.1/41.8	F1		1.1	0.8		1.3 1.4 2.3 1.0								
												F1	F1/F2 F1/F3 F1/F4 F2/F3	1.6 1.9 2.4 1.4	1.3 0.8				
																F1	F1/F2 F1/F3 F1/F4 F2/F3	1.6 1.9 2.4 1.4	1.3 0.8

Tabla 82: Resumen de Análisis de Estabilidad de Taludes a Nivel de Bancos

Estación Geomecánica	Litología	Familias Principales	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²) / Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento			Factor de Seguridad Estático			Factor de Seguridad Pseudo - Estático													
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo											
EG-01 (Mina 9)	Hornfels	4	1) 82°/091° 2) 45°/181° 3) 75°/258° 4) 65°/223°	68°/162°	1) 2.7/42.4 2) 2.9/44.2 3) 2.8/42.8 4) 2.9/44.2	F2		1.3	1.4	1.0		1.0	5.8	1.7	1.0										
																F2	F1/F2 F1/F3 F1/F4 F2/F3 F2/F4	1.4 8.5 2.3 1.3 2.3	0.9	1.0					
																					F2	F1/F2 F1/F3 F1/F4 F2/F3 F2/F4	1.4 8.5 2.3 1.3 2.3	0.9	1.0
EG-02 (Mina 9)	Hornfels	5	1) 75°/060° 2) 76°/168° 3) 70°/325° 4) 72°/214° 5) 52°/249°	64°/194°	1) 1.0/35.5 2) 1.0/35.5 3) 1.0/35.4 4) 1.0/35.7 5) 1.0/35.8	-		3.2 3.6 1.5	2.3 2.5 1.2		2.3 2.5 1.2														
												-	F1/F4 F2/F3 F2/F5	3.2 3.6 1.5	2.3 2.5 1.2										
																-	F1/F4 F2/F3 F2/F5	3.2 3.6 1.5	2.3 2.5 1.2						
																				-	F1/F4 F2/F3 F2/F5	3.2 3.6 1.5	2.3 2.5 1.2		

Estación Geomecánica	Litología	Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento			Factor de Seguridad Estático			Factor de Seguridad Pseudo - Estático			
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	
EG-03 (Mina 9)	Hornfels	3	1) 76°/066° 2) 28°/206° 3) 41°/147°	64°/147°	1) 2.8/42.7 2) 2.9/43.0 3) 2.8/42.4	F2	F1/F3	-	2.1	1.4		1.4	1.0		
						F3	F2/F3		1.4	1.4		1.0	1.1		
EG-04 (Mina 9)	Hornfels Alterado	5	1) 72°/058° 2) 46°/096° 3) 43°/066° 4) 43°/138° 5) 31°/234°	60°/146°	1) 3.0/44.7 2) 2.8/42.0 3) 3.2/45.7 4) 2.8/42.9 5) 2.9/43.2	F2	F1/F2		1.3	3.2		0.9	2.3		
						F4	F1/F4	-	1.4	1.4		1.0	1.0		
							F2/F4		1.4	1.5		1.0	1.1		
							F3/F4		1.4	1.5		1.0	1.2		
EG-05 (Mina 9)	Hornfels Alterado	4	1) 51°/296° 2) 61°/056° 3) 49°/092° 4) 81°/335°	58°/018°	1) 3.7/46.5 2) 3.6/45.9 3) 3.1/42.1 4) 3.6/46.2	-	F1/F2	-		2.8			2.0		
							F3/F4			3.1			2.3		
EG-06 (Mina 10)	Arenisca Poco Consolidada	4	1) 24°/004° 2) 59°/198° 3) 89°/183° 4) 56°/040°	57°/092°	1) 2.2/34.2 2) 2.2/35.1 3) 2.1/33.5 4) 2.2/35.2	-	F3/F4	-		2.5			1.8		
EG-07 (Mina 9)	Magnetita	4	1) 81°/323° 2) 36°/259° 3) 64°/062° 4) 47°/325°	60°/082°	1) 2.0/36.2 2) 2.0/36.8 3) 2.0/36.3 4) 2.0/36.1	-		-							
EG-08 (Mina 10)	Hornfels	4	1) 69°/084° 2) 62°/180° 3) 55°/301°	66°/149°	1) 1.2/33.8 2) 1.3/36.4 3) 1.3/35.5	F2	F1/F2	-	0.9	1.0		0.7	0.7		
							F1/F4	-		1.6		0.7	1.2		
							F2/F4			2.0			1.5		

Estación Geomecánica	Litología	Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento			Factor de Seguridad Estático			Factor de Seguridad Pseudo - Estático		
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo
EG-09 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	5	4) 82°/213° 1) 76°/059° 2) 63°/140° 3) 75°/191° 4) 21°/162° 5) 84°/293°	62°/221°	4) 1.3/36.2 1) 3.2/44.3 2) 3.1/44.1 3) 3.2/44.4 4) 3.2/44.3 5) 3.0/42.6	-	F2/F5	F1		4.4	2.2		3.1	1.8
EG-10 (Mina 10)	Hornfels	6	1) 68°/071° 2) 20°/164° 3) 71°/028° 4) 53°/149° 5) 38°/324° 6) 79°/344°	64°/239°	1) 3.6/44.0 2) 3.9/46.2 3) 3.9/45.9 4) 3.9/46.0 5) 3.9/46.0 6) 4.1/47.2	-	-	F1			5.0			3.3
EG-11 (Mina 10)	Andesita Porfirítica	5	1) 73°/067° 2) 55°/151° 3) 11°/314° 4) 45°/112° 5) 31°/254°	59°/154°	1) 1.3/35.8 2) 1.3/36.7 3) 1.3/37.0 4) 1.3/35.7 5) 1.3/36.1	F2 F4	F1/F2 F1/F4	-	1.0 1.0	1.3 1.8		0.8 0.7	1.0 1.3	
EG-12 (Mina 10)	Hornfels	5	1) 67°/084° 2) 33°/171° 3) 18°/357° 4) 71°/175°	65°/163°	1) 0.5/31.8 2) 0.5/33.8 3) 0.5/33.0 4) 0.5/31.9	F2	F1/F2	-	1.2	1.2		0.8	0.8	

Estación Geomecánica	Litología	Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento			Factor de Seguridad Estático			Factor de Seguridad Pseudo - Estático			
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	
			5) 51°/353°		5) 0.5/33.1										
EG-13 (Mina 10)	Hornfels	4	1) 77°/077° 2) 90°/145° 3) 76°/010° 4) 39°/201°	61°/227°	1) 3.7/46.5 2) 3.6/45.6 3) 3.5/45.3 4) 3.5/44.8	F4	F1/F4 F2/F4	F1	1.6	3.8 2.7	6.3	1.2	3.0 1.9	5.0	
EG-14 (Mina 10)	Hornfels Alterado	6	1) 73°/261° 2) 72°/096° 3) 58°/184° 4) 69°/064° 5) 20°/029° 6) 47°/131°	63°/152°	1) 1.0/34.0 2) 1.0/35.9 3) 1.0/35.1 4) 1.0/35.2 5) 1.0/35.4 6) 1.0/35.1	F3 F6	F1/F6 F2/F3 F2/F6 F3/F4 F3/F6 F4/F6	-	0.8 0.8	2.1 1.3 0.8 0.8		0.6 0.6	1.2 0.7 1.5 0.9 0.6 0.6		
EG-15 (Mina 10)	Hornfels	5	1) 71°/081° 2) 40°/197° 3) 84°/183° 4) 38°/325° 5) 26°/082°	68°/162°	1) 0.5/29.7 2) 0.5/28.9 3) 0.5/29.7 4) 0.5/29.2 5) 0.5/29.8	F2	F1/F2	-	0.8	1.2		0.6	0.8		
EG-16 (Mina 10)	Hornfels	6	1) 75°/072° 2) 18°/172° 3) 64°/007° 4) 18°/352° 5) 53°/118°	64°/163°	1) 2.0/39.2 2) 2.0/38.8 3) 1.9/38.0 4) 2.0/39.9 5) 1.8/36.5	F5	F1/F5 F5/F6	F3	0.9	1.9 1.9	4.5	0.6	1.4 1.3	4.3	

Estación Geomecánica	Litología	Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento			Factor de Seguridad Estático			Factor de Seguridad Pseudo - Estático		
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo
EG-17 (Mina 10)	Hornfels Alterado	5	6) 60°/242°		6) 2.0/39.2									
			1) 71°/063°		1) 1.8/38.6	F1/F2		1.4			1.1			
			2) 59°/137°		2) 1.7/38.0	F1/F3		2.6			2.2			
			3) 65°/100°		3) 1.7/37.0	F3	-	1.5	1.2		1.9			
			4) 57°/332°		4) 1.6/35.7	F2/F5		2.5			2.1			
EG-18 (Mina 10)	Zona de Óxidos	5	5) 85°/207°		5) 1.6/36.4	F3/F4			2.0				1.5	
			1) 80°/059°		1) 2.5/39.7	F1/F2		1.4			1.1			
			2) 47°/113°		2) 2.4/38.3	F2/F3		1.6			1.2			
			3) 74°/360°		3) 2.3/36.7	F2	F5	1.1	0.8		1.0	2.6		
			4) 52°/033°		4) 2.6/39.8	F2/F4		1.4			1.0			
EG-19 (Mina 10)	Hornfels	4	5) 60°/298°		5) 2.4/37.6	F3/F4			2.9				2.2	
			1) 65°/070°		1) 1.9/32.5	F3								
			2) 44°/003°		2) 1.9/33.9	F1/F3		1.3			1.0			
			3) 43°/158°		3) 2.1/36.3	F3/F4	-	1.2	0.8		1.8			
EG-20 (Mina 10)	Hornfels	6	4) 64°/276°		4) 2.2/38.6									
			1) 72°/075°		1) 1.0/34.9	F1/F3		1.7			1.2			
			2) 77°/120°		2) 1.1/37.0	F1/F4		1.5			1.1			
			3) 40°/196°		3) 1.1/35.6	F3		1.0	0.7		0.7			
			4) 71°/200°		4) 1.1/35.6	F5	-	1.2	0.8		0.8			
			5) 33°/092°		5) 1.0/32.2	F2/F6		1.9			1.3			
6) 37°/240°		6) 1.0/34.9	F4/F5		1.6			1.0						

Estación Geomecánica	Litología	Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento			Factor de Seguridad Estático			Factor de Seguridad Pseudo - Estático							
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo					
EG-21 (Mina 10)	Hornfels	3	1) 77°/071° 2) 59°/234° 3) 39°/179°	59°/150°	1) 0.5/26.2 2) 0.5/27.2 3) 0.5/27.1	F3	F1/F3 F2/F3	-	0.8	0.9 0.9		0.5	0.7 0.6						
						F3	F1/F3	-	2.4	2.0		2.0	1.5						
						F2			1.5			1.0		1.7 2.0					
EG-23 (Mina 10)	Hornfels	4	1) 69°/060° 2) 34°/202° 3) 71°/320° 4) 67°/004°	68°/162°	1) 2.1/36.4 2) 2.2/38.4 3) 2.2/37.5 4) 2.1/35.7	F2	-	F3 F4	1.5			1.0			2.8				
EG-24 (Mina 10)	Hornfels	5	1) 77°/055° 2) 74°/155° 3) 70°/277° 4) 18°/323° 5) 60°/329°	63°/165°	1) 3.1/41.7 2) 3.3/43.7 3) 3.2/43.2 4) 3.3/43.8 5) 3.2/43.2	-	-	F5							3.0				
EG-25 (Mina 10)	Hornfels	4	1) 82°/150° 2) 67°/060° 3) 40°/328° 4) 16°/252°	55°/240°	1) 3.5/44.2 2) 3.8/46.0 3) 4.0/47.4 4) 3.6/44.7	-	-	F2							3.0				
EG-26 (Mina 10)	Hornfels	6	1) 75°/134° 2) 57°/047° 3) 50°/174° 4) 17°/043°	65°/220°	1) 0.5/30.3 2) 0.5/30.7 3) 0.5/30.0 4) 0.5/30.1	F3 F6	F1/F3 F1/F6 F3/F6	F2	0.6 1.1	1.3 1.1 1.1		0.4 0.8	0.9 0.8 0.8		2.8				

Estación Geomecánica	Litología	Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento			Factor de Seguridad Estático			Factor de Seguridad Pseudo - Estático			
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	
EG-27 (Mina 10)	Zona de Óxidos	6	5) 32°/341° 6) 32°/228° 1) 82°/002° 2) 81°/135° 3) 56°/260° 4) 11°/251° 5) 78°/047° 6) 79°/088°	64°/090°	5) 0.5/30.5 6) 0.5/30.5	-	-	F3							2.8
EG-28 (Mina 10)	Zona de Óxidos	5	1) 76°/062° 2) 40°/075° 3) 81°/010° 4) 72°/156° 5) 16°/223°	65°/087°	1) 1.6/31.3 2) 1.5/28.1 3) 1.6/30.6 4) 1.5/27.5 5) 1.5/27.9	F2	F2/F3 F2/F4 F3/F4	-	0.9	1.1 0.9 1.9	0.6	0.8 0.6 1.4			
EG-29 (Mina 10)	Pórfido Andesítico	5	1) 59°/156° 2) 56°/333° 3) 57°/298° 4) 27°/204° 5) 53°/259°	55°/242°	1) 1.5/36.7 2) 1.5/37.1 3) 1.5/37.3 4) 1.6/37.7 5) 1.5/36.3	F4 F5	F1/F5	-	1.8 1.6	1.5	1.2 1.3	1.1			
EG-30 (Mina 10)	Zona de Óxidos	5	1) 79°/036° 2) 56°/263° 3) 86°/109° 4) 40°/006°	66°/350°	1) 5.4/45.8 2) 5.3/45.6 3) 4.6/41.4 4) 4.4/40.4	F4	F1/F2 F2/F4 F3/F4	-	1.5	3.5 2.3 1.5	1.0	2.6 1.6 1.1			

Estación Geomecánica	Litología	Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento			Factor de Seguridad Estático			Factor de Seguridad Pseudo - Estático			
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	
			5) 83°/324°		5) 5.1/44.6										
EG-31 (Mina 10)	Hornfels	4	1) 63°/116° 2) 58°/018° 3) 30°/179° 4) 67°/048°	69°/337°	1) 2.2/36.8 2) 2.1/36.0 3) 2.2/36.9 4) 2.3/38.3	F2	F2/F4	-	0.8	2.4		0.6	1.9		
EG-32 (Mina 10)	Hornfels Alterado	6	1) 70°/079° 2) 37°/310° 3) 35°/271° 4) 64°/111° 5) 43°/147° 6) 72°/006°	65°/329°	1) 1.0/35.3 2) 1.0/34.7 3) 0.9/30.7 4) 0.9/29.3 5) 0.9/30.7 6) 0.9/30.7	F2 F3	F1/F2 F2/F3 F2/F6 F3/F6	-	1.1 1.0	2.1 1.1 1.0 1.2		0.8 0.7	1.4 0.8 0.7 0.8		
EG-33 (Mina 10)	Hornfels	5	1) 58°/089° 2) 36°/219° 3) 82°/297° 4) 47°/150° 5) 77°/002°	55°/328°	1) 2.0/39.0 2) 2.0/39.3 3) 1.9/38.6 4) 1.9/37.8 5) 2.0/39.0	-	F1/F3	-		4.6		7.0	3.2		
EG-34 (Mina 10)	Hornfels	4	1) 68°/077° 2) 63°/357° 3) 38°/165° 4) 82°/326°	52°/332°	1) 1.0/33.5 2) 1.0/33.3 3) 1.0/32.5 4) 1.0/31.7	-		-							

Estación Geomecánica	Litología	Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento			Factor de Seguridad Estático			Factor de Seguridad Pseudo - Estático		
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo
EG-35 (Mina 10)	Hornfels	4	1) 67°/098° 2) 30°/331° 3) 26°/156° 4) 81°/266°	61°/335°	1) 2.4/40.2 2) 2.4/40.1 3) 2.4/40.2 4) 2.3/38.7	F2	F2/F4	-	1.8	2.2		1.2	1.5	
EG-36 (Mina 10)	Hornfels	3	1) 58°/097° 2) 30°/305° 3) 38°/168°	56°/332°	1) 2.0/39.7 2) 1.8/37.0 3) 1.8/37.1	F2		-	1.6			1.1		
EG-37 (Mina 10)	Hornfels	4	1) 58°/348° 2) 73°/102° 3) 19°/160° 4) 30°/255°	56°/344°	1) 2.5/41.4 2) 2.5/41.3 3) 2.1/37.1 4) 2.4/40.2	-		-						
EG-38 (Mina 10)	Hornfels	4	1) 32°/310° 2) 54°/141° 3) 78°/265° 4) 66°/094°	48°/332°	1) 1.3/32.8 2) 1.4/35.6 3) 1.4/35.3 4) 1.4/35.1	F1		-	1.3			0.9		
EG-39 (Mina 10)	Magnetita	4	1) 57°/147° 2) 41°/254° 3) 58°/178° 4) 38°/093°	63°/246°	1) 1.2/33.0 2) 1.1/31.8 3) 1.3/35.7 4) 1.1/31.0	F2	F1/F2 F2/F3	-	0.9	1.3 1.0		0.6 0.7	0.9 0.7	
EG-40 (Mina 10)	Hornfels	4	1) 55°/174° 2) 73°/094° 3) 83°/024° 4) 65°/320°	65°/090°	1) 0.5/32.1 2) 0.5/33.1 3) 0.5/31.7 4) 0.5/33.1	-	F1/F3	-		2.4			1.6	

Estación Geomecánica	Litología	Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento			Factor de Seguridad Estático			Factor de Seguridad Pseudo - Estático			
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	
EG-41 (Mina 10)	Hornfels	6	1) 77°/063°	67°/164°	1) 2.6/43.1 2) 2.5/41.4 3) 2.7/43.3 4) 2.8/45.1 5) 2.5/42.0 6) 2.5/42.0	F2	F1/F4	-	2.0	6.7	1.3	5.7			
			2) 28°/222°												
			3) 31°/278°												
			4) 76°/192°												
			5) 86°/116°												
			6) 53°/008°												
EG-42 (Mina 10)	Andesita Porfírica	3	1) 83°/038°	68°/331°	1) 2.1/40.5 2) 2.0/39.7 3) 2.0/38.9	F2		-	1.8		1.2				
			2) 29°/273°												
			3) 34°/117°												
EG-43 (Mina 10)	Hornfels Alterado	5	1) 81°/048°	57°/324°	1) 2.3/39.1 2) 2.3/38.9 3) 2.3/39.3 4) 2.3/39.3 5) 2.4/40.5	-	-	-							
			2) 88°/332°												
			3) 28°/315°												
			4) 70°/091°												
			5) 73°/008°												
EG-44 (Mina 10)	Magnetita	3	1) 71°/074°	68°/336°	1) 2.5/37.5 2) 2.7/40.2 3) 2.7/40.4	-	-	-							
			2) 14°/200°												
			3) 81°/338°												
EG-45 (Mina 10)	Zona de óxidos	3	1) 88°/278°	54°/332°	1) 2.3/38.9 2) 2.3/39.3 3) 2.3/39.4	-	-	-							
			2) 81°/360°												
			3) 17°/308°												
EG-46 (Mina 10)	Hornfels Alterado	6	1) 25°/164°	53°/150°	1) 1.8/35.2 2) 1.8/36.6 3) 2.1/40.3	F6	F4/F6 F5/F6	-	1.2	1.5 1.2	0.8	1.1 0.9			
			2) 38°/346°												
			3) 84°/160°												

Estación Geomecánica	Litología	Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m ²)/ Fricción (°)	Tipo de Deslizamiento			Factor de Seguridad Estático			Factor de Seguridad Pseudo - Estático		
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Volteo
EG-47 (Mina 10)	Hornfels Alterado	4	4) 79°/060° 5) 75°/087° 6) 42°/161°		4) 1.9/37.3 5) 1.8/36.7 6) 1.8/36.7									
EG-48 (Mina 10)	Hornfels Alterado	5	1) 78°/156° 2) 40°/359° 3) 72°/047° 4) 67°/084° 1) 85°/259° 2) 19°/163° 3) 86°/351° 4) 37°/351° 5) 56°/164°	55°/150° 66°/332°	1) 1.5/35.8 2) 1.4/34.3 3) 1.5/35.5 4) 1.5/36.0 1) 5.5/43.2 2) 5.7/43.6 3) 5.5/43.1 4) 5.5/42.8 5) 5.7/43.8	-	F4	F5	1.7	2.0	6.1	1.2	1.4	5.0
EG-49 (Mina 10)	Hornfels Alterado	5	1) 72°/139° 2) 34°/188° 3) 39°/006° 4) 67°/308° 5) 68°/069°	60°/021°	1) 4.9/45.3 2) 5.0/45.8 3) 5.0/45.6 4) 5.0/45.6 5) 5.1/46.3	F3	F3/F4 F3/F5 F4/F5	-	1.8	1.9 3.4	1.8	1.3	1.4 2.7	



De estos resultados presentados en las tablas anteriores, se concluye que en los bancos inferiores de la Mina 9-10 hay algunas zonas con factores de seguridad menores que los mínimos permisibles, por lo que se recomienda que para esos sectores realizar el desquinche selectivo y/o limpieza de bancos, esto es con la finalidad de eliminar los bloques de roca que están a punto de caer y/o deslizar. Las estaciones que presentan estas características son: **EG-03 y EG-08**, EG-01, EG-04, EG-08, EG-11, EG-12, EG-14, EG-15, EG-16, EG-18, EG-19, EG-20, EG-21, EG-26, EG-28, EG-31, EG-32, EG-39 y EG-46.

En los **Anexos A-8.3 y A-8.4**, se presenta algunas de las salidas gráficas obtenidas durante la evaluación con los programas Rocplane y Swedge en el análisis de estabilidad de deslizamientos en bloque y cuña respectivamente.

5.2.9 Análisis de estabilidad a nivel global de los taludes de la mina

Tomando en cuenta los tipos de falla, la estabilidad de los taludes de los macizos rocosos se puede evaluar desde dos puntos de vista:

- Roturas controladas por las estructuras, que generan fallas tipo bloque y/o cuña. Este tipo de deslizamiento ha sido estudiado y analizado en el análisis de estabilidad a nivel de bancos presentado en el ítem 5.2.7.
- Rotura por corte a través del macizo rocoso, que generan fundamentalmente deslizamientos traslacionales masivos y rotacionales. Este tipo de deslizamiento debe ser estudiado mediante el análisis de estabilidad global, el cual es presentado en este capítulo.

5.2.9.1 Consideraciones geotécnicas generales

Para la evaluación del estado de tensiones de la estabilidad global se han considerado las secciones geológicas de las zonas más críticas y representativas de los taludes de Mina 9-10, las cuales han sido analizadas de acuerdo con la topografía existente.

5.2.9.1.1 Modelo geológico - geotécnico

Para el desarrollo del modelo geológico - geotécnico, se tomó en cuenta la información litológica de las secciones geológicas de la mina 9-10.

En las *Figuras 125, 126, 127 y 128* se presentan las secciones de análisis de acuerdo a la geometría de los taludes del tajo

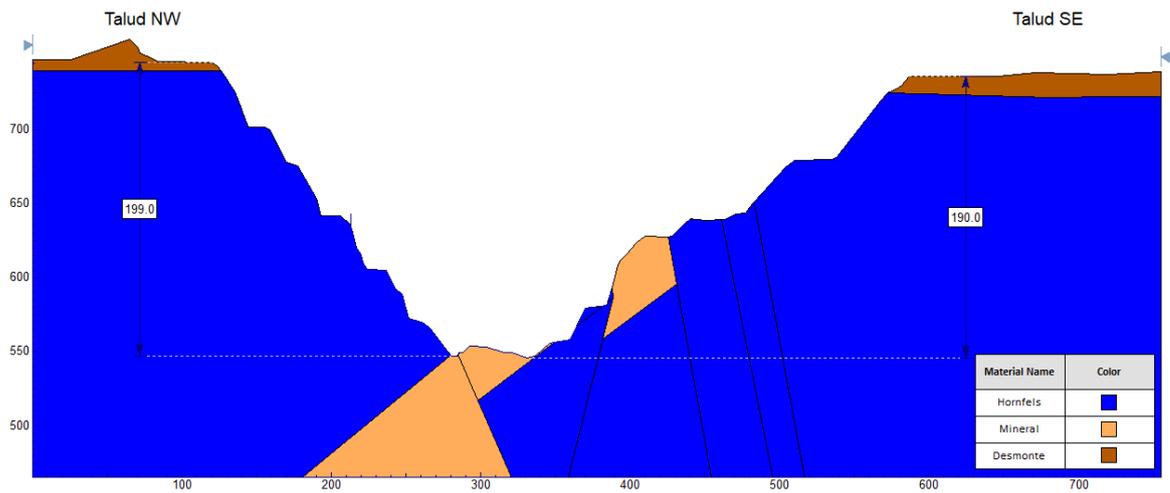


Figura 125. Sección de Análisis de Estabilidad A-A

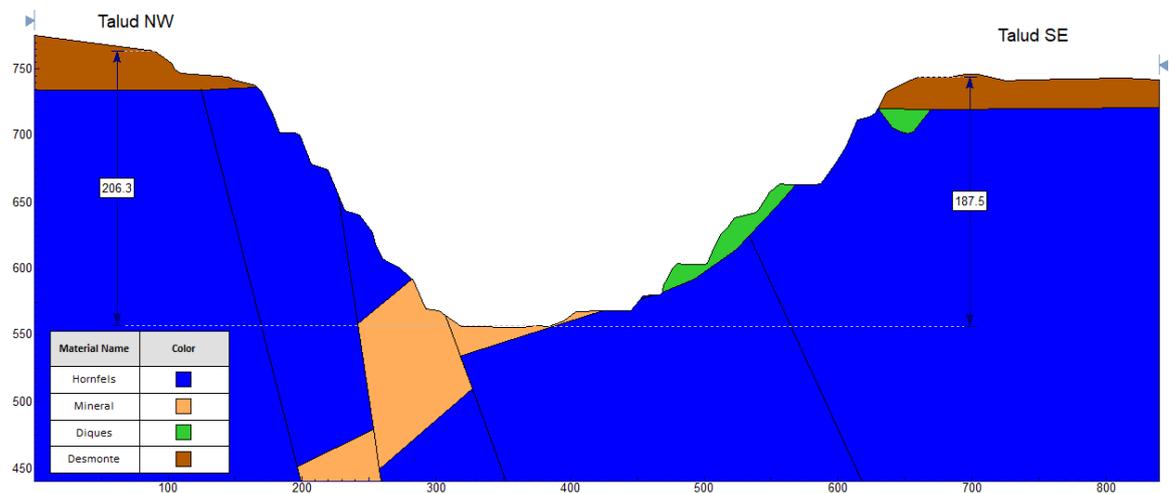


Figura 126. Sección de Análisis de Estabilidad B-B

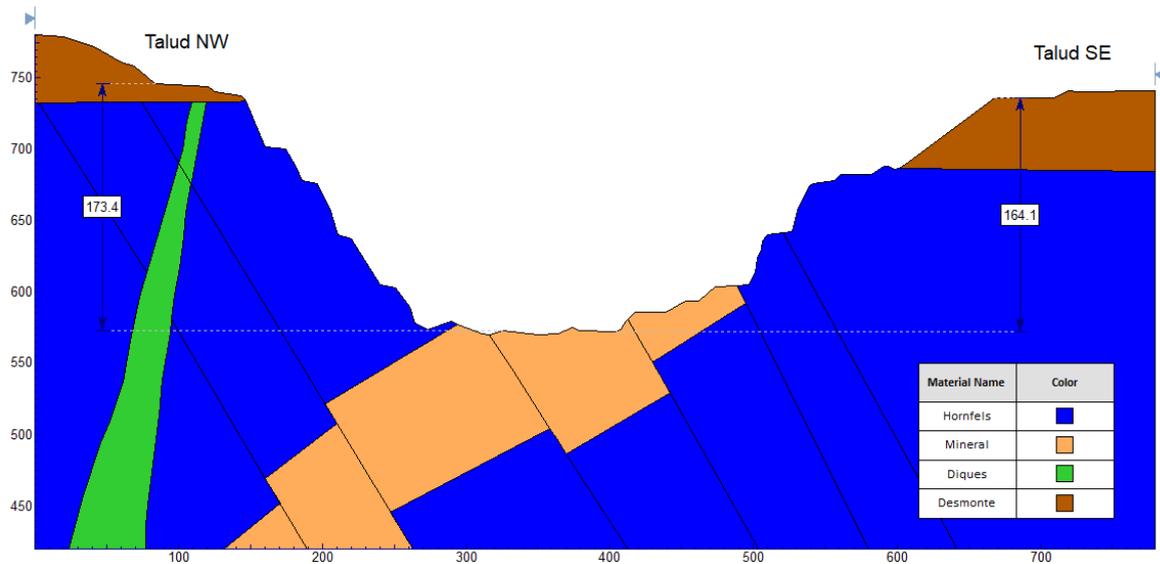


Figura 127. Sección de Análisis de Estabilidad C-C

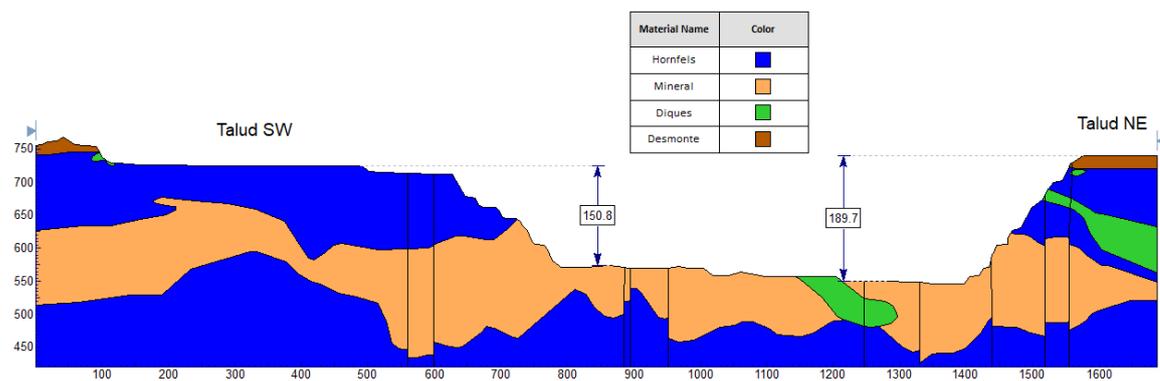


Figura 128. Sección de Análisis de Estabilidad D-D

En los *Planos PL-GG-014 y PL-GG-015 del Anexo A-11*, se presentan las secciones de análisis considerando las áreas críticas.

5.2.9.1.2 Propiedades de los materiales

Con el modelo geológico – geotécnico presentado, los parámetros de los materiales utilizado en el análisis de estabilidad han sido estimados a partir de los ensayos triaxiales en el caso de la roca intacta, y para el macizo rocoso en conjunto se ha considerado el índice GSI determinado en la valoración del macizo rocoso, además se ha asumido el factor de perturbación de la roca $D = 1$.

Con el fin de definir los parámetros de resistencia al corte de los macizos rocosos,

se han considerado las propiedades de las estaciones geomecánicas que están cercanas a las secciones propuestas para el análisis. Previamente se ha realizado el análisis de las curvas de resistencia del macizo rocoso con el programa Rocdata (considerando la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, el índice GSI, la constante de la matriz rocosa y el factor de perturbación), los cuales han sido presentados en el **Anexo A-6.1: Parámetros de Resistencia del Macizo Rocosó**.

Se observa en las secciones de análisis de estabilidad la presencia de material de desmonte en la parte superior de los tajos, de manera referencial se ha tomado un ángulo de fricción promedio de 40° , cohesión de 5 kPa y peso específico de 21 kN/m^3 , de acuerdo con el “Estudio Geotécnico y Diseño de los Depósitos de Desmonte C-26/C-40, C-43 y C-71”

De esta manera en las siguientes tablas se presenta el resumen de las propiedades de los macizos rocosos para cada sección de análisis.

- **Sección A-A** - Para estimar las propiedades de los macizos rocosos de la Sección A-A, se ha considerado la información promedio obtenida de las estaciones geomecánicas cercanas a la sección de análisis (en una franja de 100 m). En la **Tabla 83** se observa los parámetros de resistencia de los macizos rocosos usados en el análisis de estabilidad de taludes.

Tabla 83: *Parámetros de los Materiales a Usar en el Análisis de Estabilidad – Sección A-A*

Litología	Densidad (kN/m ³)	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	m_i	GSI	D
Hornfels (Talud - NW)	26.4	125.0	21	55	1
Hornfels (Talud - SE)	26.4	100.0	21	54	1
Mineral	30.1	178.0	26	56	1

En las **Figuras 129, 130 y 131** se presentan las curvas de resistencia promedio de los macizos rocosos que conforman los taludes de la Mina 9-10 (Sección A-A). Las curvas han sido obtenidas de acuerdo al criterio de rotura generalizado de Hoek y Brown implementado en el programa Rocdata de Rocscience, considerando los datos de las estaciones geomecánicas cercanas a las secciones de análisis consideradas.

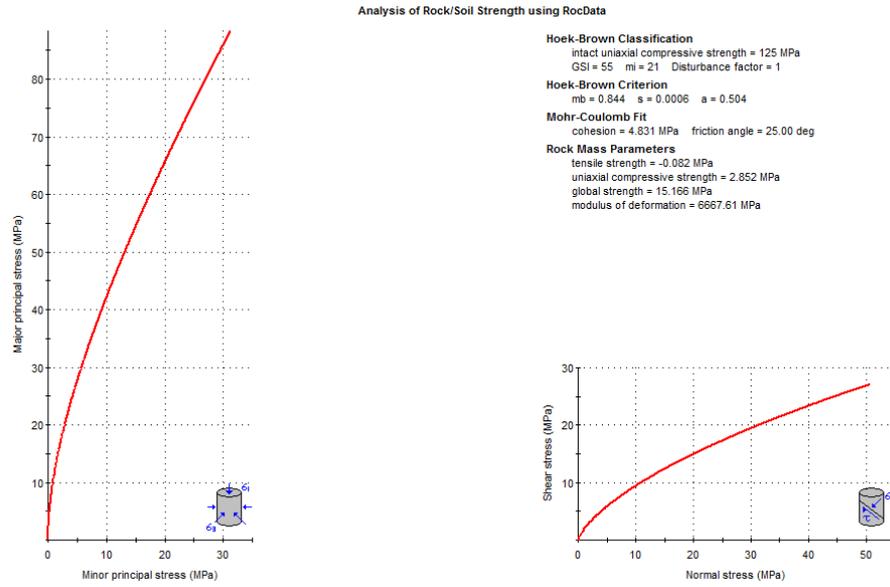


Figura 129. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Hornfels (Sección A-A, Talud NW)

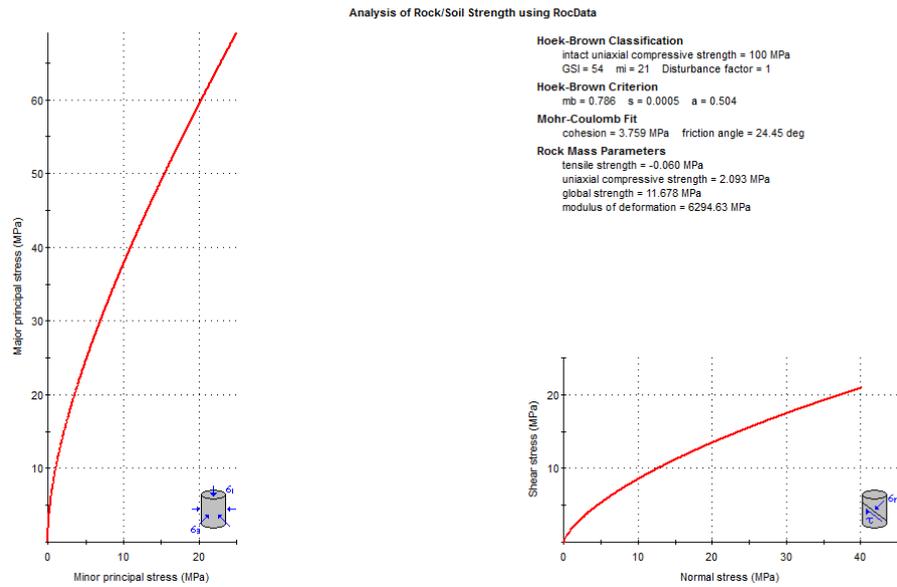


Figura 130. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Hornfels (Sección A-A, Talud SE)

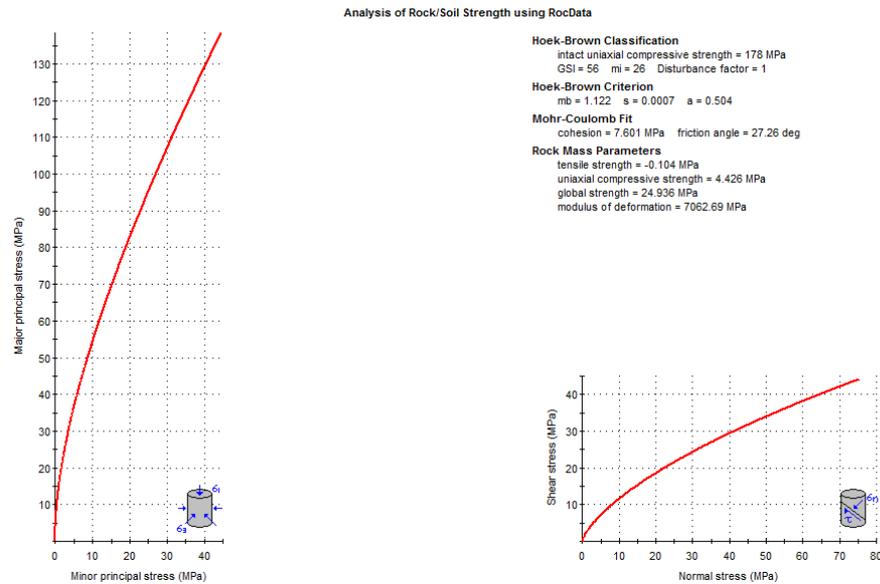


Figura 131. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Mineral (Sección A-A)

Sección B-B - Para estimar las propiedades de los macizos rocosos de la Sección B-B, se ha considerado la información promedio obtenida de las estaciones geomecánicas cercanas a la sección de análisis (en una franja de 100 m). En la **Tabla 84** se presentan los parámetros de resistencia de los macizos rocosos usados en la evaluación de estabilidad de taludes.

Tabla 84: *Parámetros de los Materiales a Usar en el Análisis de Estabilidad – Sección B-B.*

Tipo de Litología	Densidad (kN/m ³)	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	m _i	GSI	D
Hornfels (Talud - NW)	26.4	127.0	21	57	1
Hornfels (Talud - SE)	26.1	100.0	21	55	1
Mineral	30.1	178.0	26	56	1
Diques	27.2	159.0	26	55	1

En las **Figuras 132, 133, 134 y 135** se presentan las curvas de resistencia promedio de los macizos rocosos que conforman los taludes de la Mina 9-10 (Sección B-B). Estas curvas han sido obtenidas de acuerdo al criterio de rotura generalizado de Hoek y Brown realizado en el programa Rocdata de Rocscience, considerando los datos de las estaciones geomecánicas cercanas a las secciones de análisis consideradas.

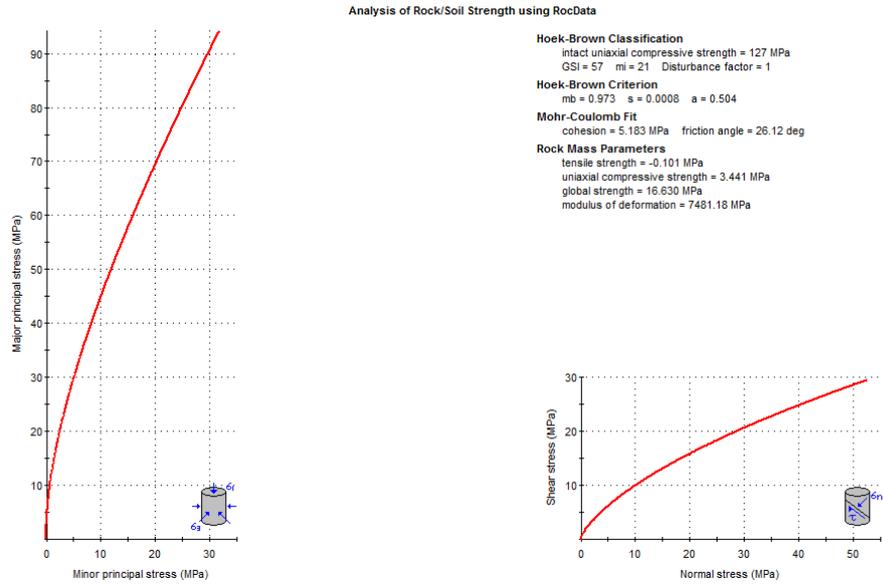


Figura 132. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Hornfels (Sección B-B, Talud NW)

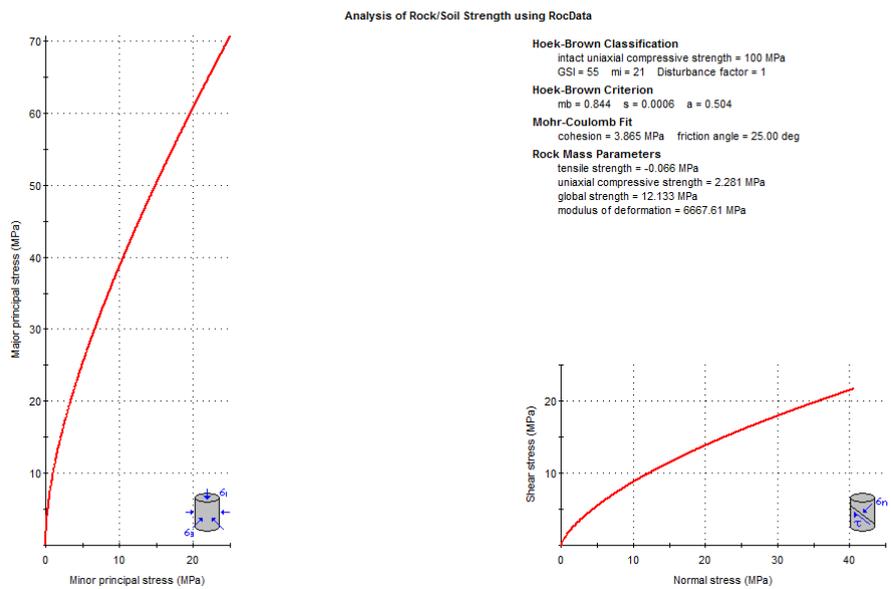


Figura 133. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Hornfels (Sección B-B, Talud SE)

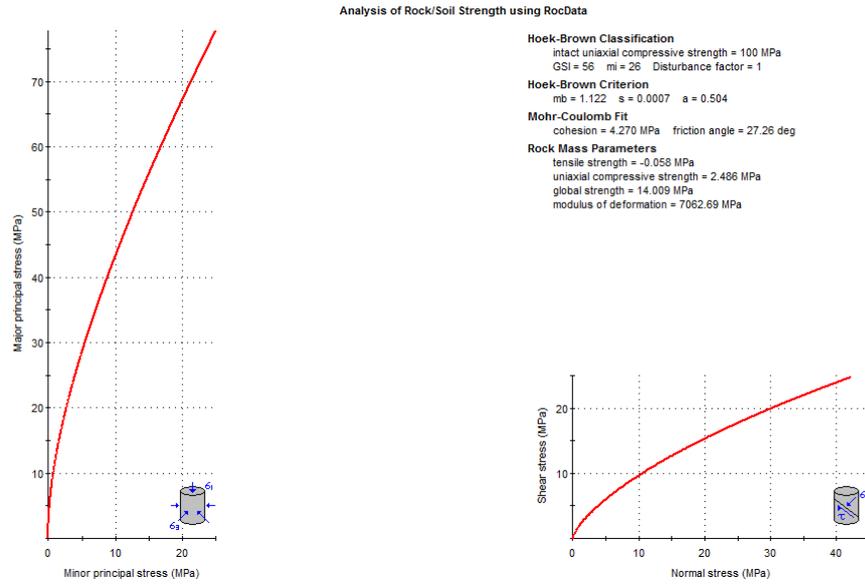


Figura 134. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Mineral (Sección B-B)

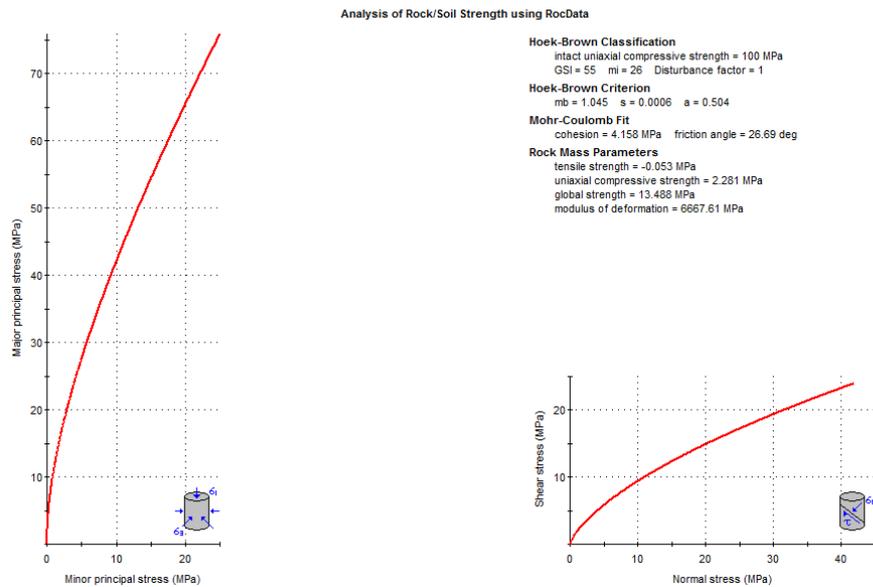


Figura 135. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Diques (Sección B-B)

- Seccion C-C** - Para estimar las propiedades de los macizos rocosos de la Seccion C-C, se ha considerado la información promedio obtenida de las estaciones geomecánicas cercanas a la sección de análisis (en una franja de 100 m). Se presentan en la **Tabla 85** los parámetros de resistencia de los macizos rocosos usados en el análisis de estabilidad de taludes.

Tabla 85: *Parámetros de los Materiales a Usar en el Análisis de Estabilidad – Sección C-C*

Litología	Densidad (kN/m ³)	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	m _i	GSI	D
Hornfels (Talud - NW)	26.5	121.0	21	58	1
Hornfels (Talud - SE)	26.5	180.0	21	55	1
Mineral	30.1	178.0	26	56	1
Diques	27.1	179.0	26	56	1

En las **Figuras 136, 137, 138 y 139** se presentan las curvas de resistencia promedio de los macizos rocosos que conforman los taludes de la Mina 9-10 (Sección C-C). Estas curvas han sido obtenidas de acuerdo al criterio de rotura generalizado de Hoek y Brown implementado en el programa Rocdata de Rocscience, considerando los datos de las estaciones geomecánicas cercanas a las secciones de análisis consideradas.

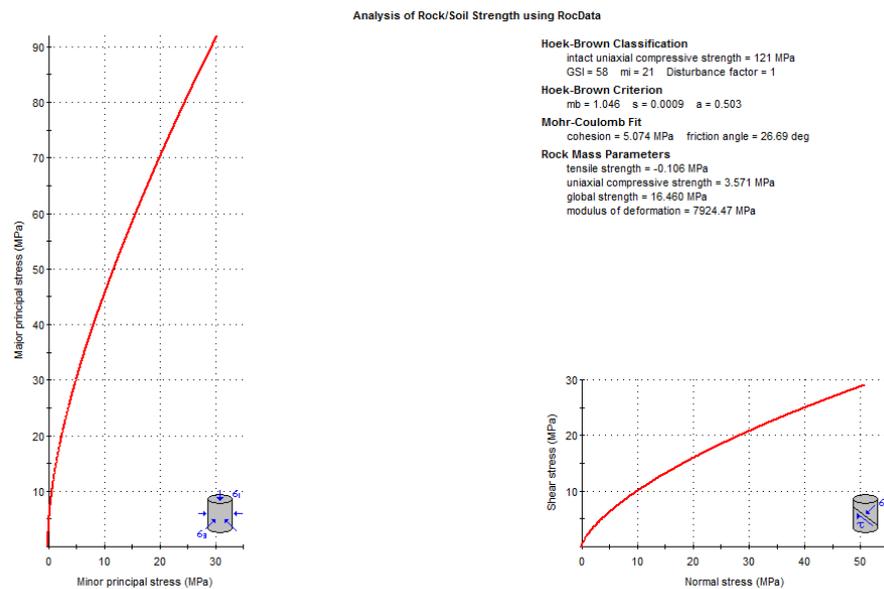


Figura 136. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Hornfels (Sección C-C, Talud NW)

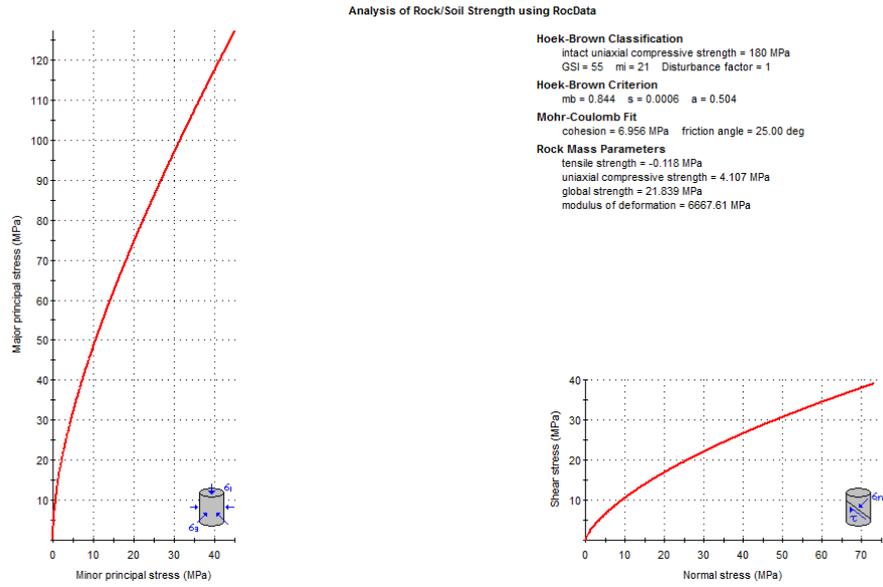


Figura 137. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Hornfels (Sección C-C, Talud SE)

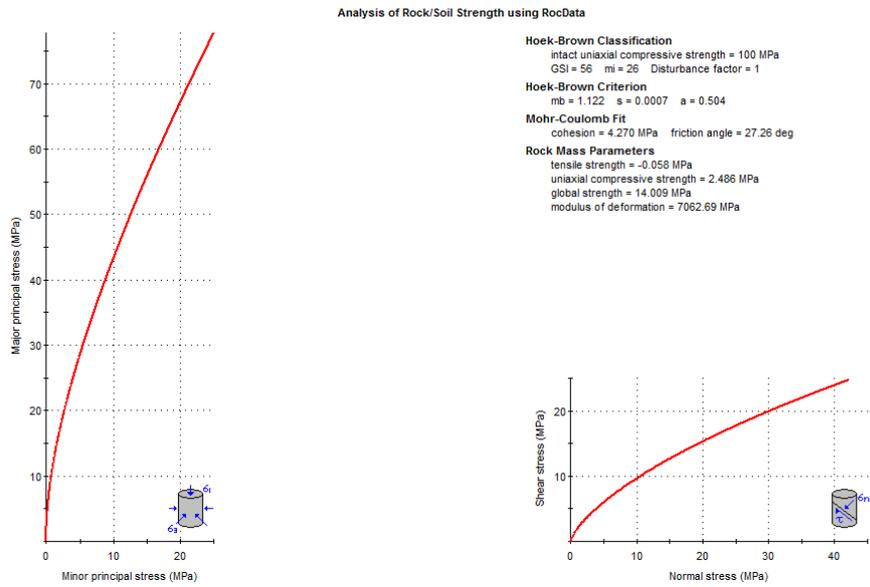


Figura 138. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Mineral (Sección C-C)

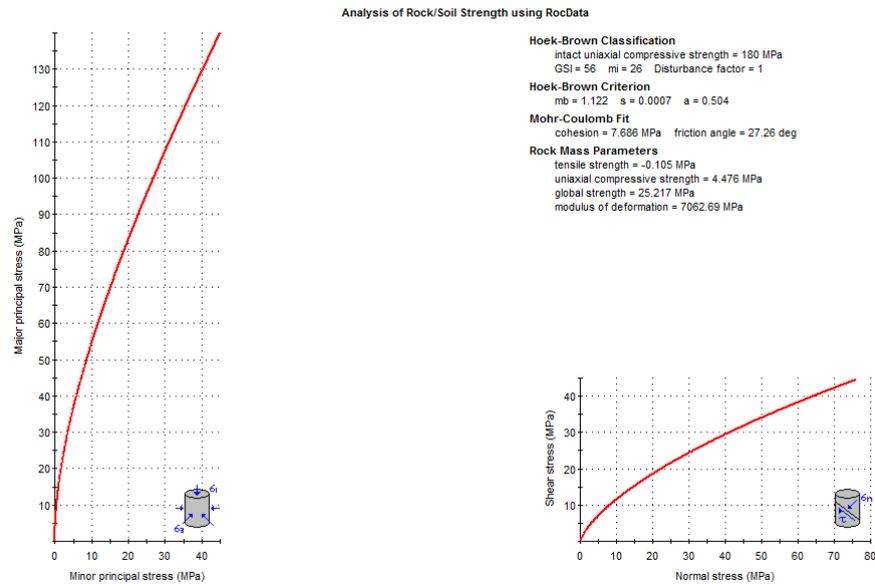


Figura 139. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Diques (Sección C-C)

- **Sección D-D** - Para estimar las propiedades de los macizos rocosos de la Sección D-D, se ha considerado la información promedio obtenida de las estaciones geomecánicas cercanas a la sección de análisis (en una franja de 100 m). Los parámetros de resistencia de los macizos rocosos usados en el análisis de estabilidad de taludes se presentan en la **Tabla 86**.

Tabla 86: *Parámetros de los Materiales a Usar en el Análisis de Estabilidad – Sección D-D*

Litología	Densidad (kN/m ³)	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	m _i	GSI	D
Hornfels (SW)	26.5	135.0	21	52	1
Hornfels (NE)	27.9	79.0	21	48	1
Mineral	30.1	178.0	26	56	1
Diques	27.6	216.5	26	54	1

En las **Figuras 140 a la Figura 143** se presentan las curvas de resistencia promedio de los macizos rocosos que conforman los taludes de la Mina 9-10 (Sección D-D). Estas curvas han sido obtenidas de acuerdo al criterio de rotura generalizado de Hoek y Brown implementado en el programa Rocdata de Rocscience, considerando los datos de las estaciones geomecánicas cercanas a las secciones de análisis consideradas.

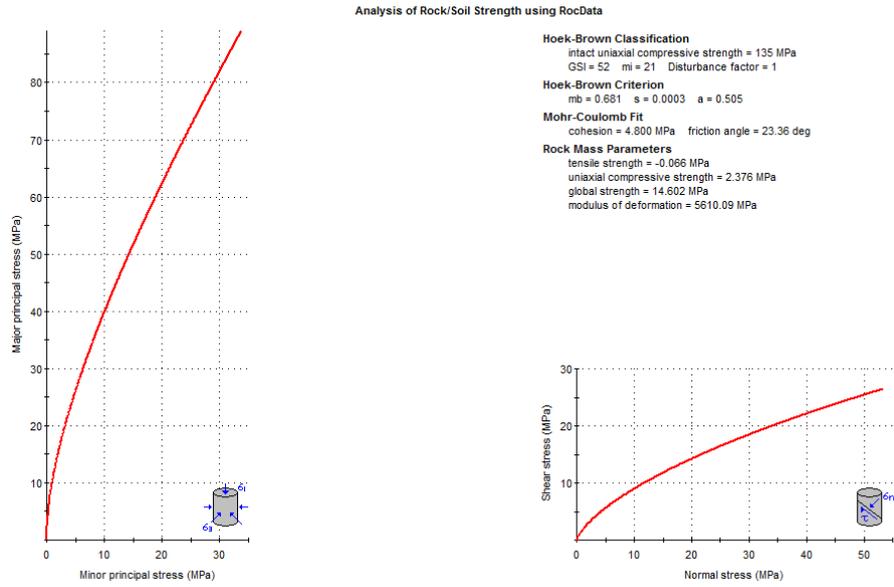


Figura 140. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Hornfels (Sección D-D, Talud SW)

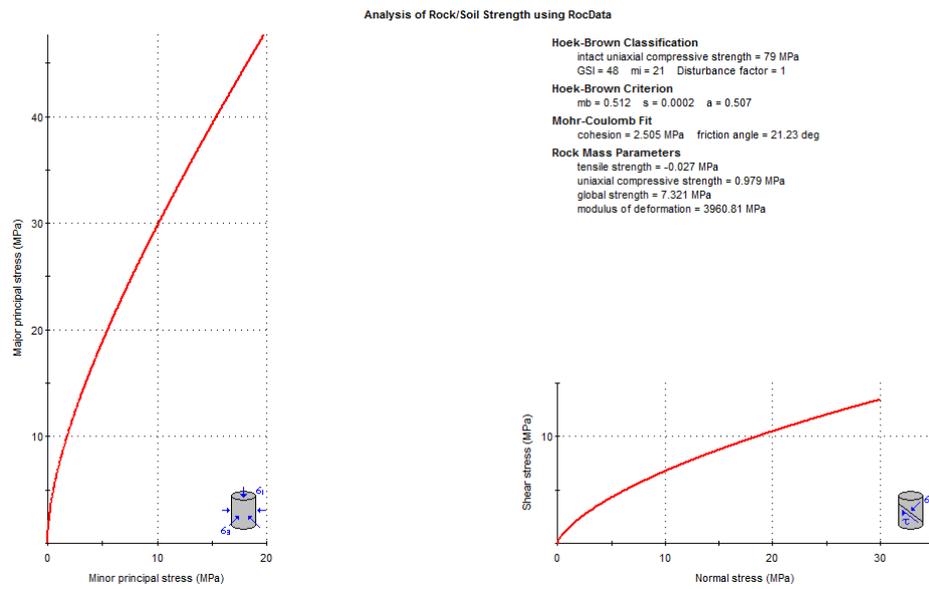


Figura 141. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Hornfels (Sección D-D, Talud NE)

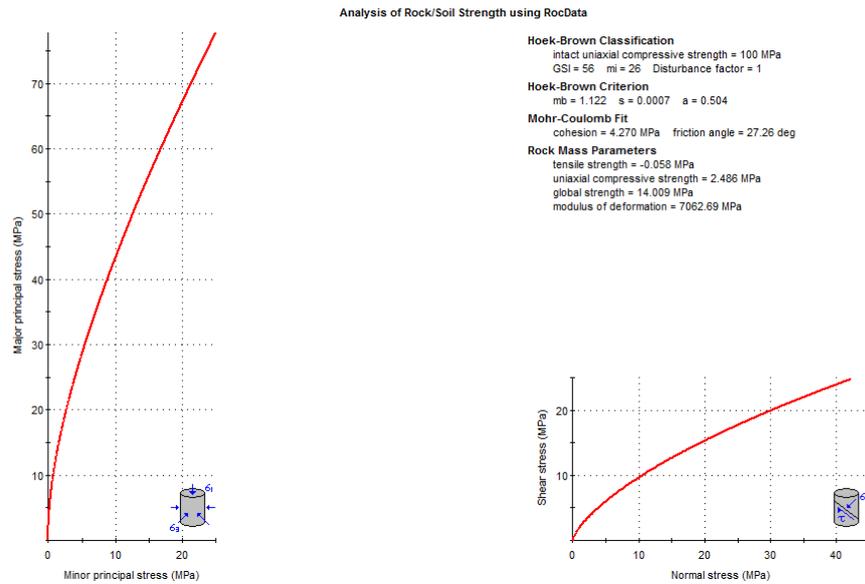


Figura 142. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Mineral (Sección D-D)

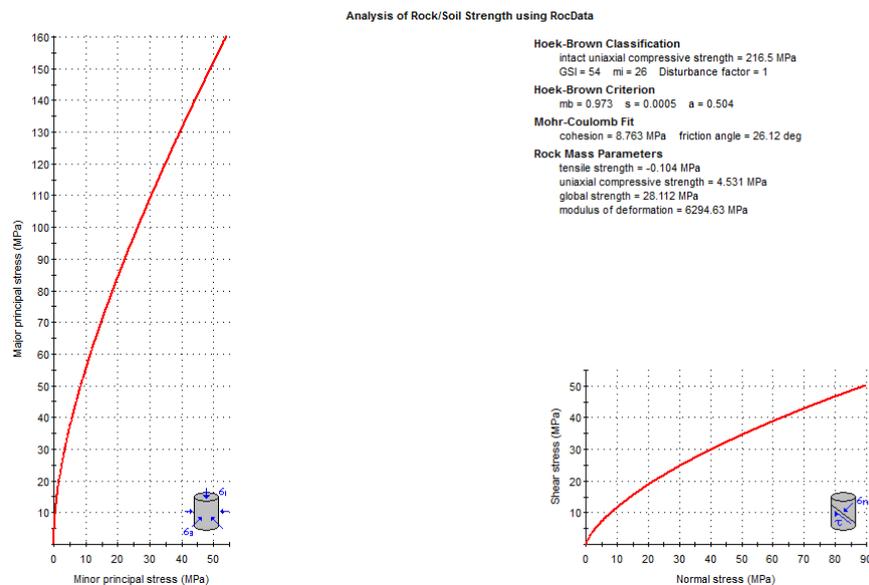


Figura 143. Curva de Resistencia del Macizo Rocoso – Diques (Sección D-D)

5.2.9.1.3 Condiciones hidrogeológicas

Dado que durante la etapa de evaluación de campo no se ha identificado la presencia de la capa freática y teniendo en cuenta que en el área de estudio las lluvias son esporádicas y no hay riesgo de inundación, para el análisis de estabilidad no se ha considerado la presión hidrostática.

Se ha identificado humedad en perforaciones realizadas en el fondo del tajo por



SHP, y de acuerdo a los resultados del ensayo de tomografía eléctrica, el nivel de agua se encontraría a 5 -7 m de profundidad desde el fondo del tajo actual, sin embargo, para las condiciones actuales las cargas hidrostáticas no afectan la estabilidad global de los taludes.

5.2.9.2 Condiciones de análisis

Para el análisis de estabilidad de taludes el Ministerio de Energía y Minas (MEM) recomienda los siguientes factores de seguridad (F.S.) mínimos admisibles:

- Condición estática (taludes globales), FS = 1.5.
- Condición pseudo - estática (taludes globales), FS = 1.1.

5.2.9.3 Software empleado para el análisis de estabilidad global

Para el análisis de estabilidad global se ha utilizado el programa Slide v.6.0 (Rocscience, 2012), este programa realiza los análisis de estabilidad utilizando el método de equilibrio límite bidimensional y calcula el factor de seguridad de un talud con varios estratos empleando el Criterio de Rotura Generalizado de Hoek y Brown (2002). El programa permite analizar la estabilidad considerando el criterio de superficies de rotura no circulares, con el método de Morgenstern – Price y Spencer. Para los cálculos realizados en el presente proyecto de investigación, se han considerado 200 círculos de rotura por cada análisis. Se obtiene en si el mínimo factor de seguridad, graficando las superficies de deslizamiento que corresponden a factores de seguridad mínimos.

5.2.9.4 resultados obtenidos

En la **Tabla 87** se presenta un resumen de los resultados obtenidos del análisis de estabilidad de los taludes globales de la Mina 9-10, tanto para las condiciones actuales.

Tabla 87: Resultado del Análisis de Estabilidad Global de los Taludes de Mina

Sección	Talud	Estático	Pseudo Estático
A-A	NW	2.4	1.9
	SE	3.4	2.5
B-B	NW	2.7	2.1
	SE	3.5	2.6
C-C	NW	2.8	2.2
	SE	3.7	2.7
D-D	SW	3.9	2.8
	NE	2.7	2.2

De los análisis de estabilidad se concluye que los taludes globales de la Mina 9-10 hasta el momento son estables, ya que todos los factores de seguridad resultaron mayores que los mínimos permisibles, tanto para los cálculos en condiciones estáticas como para condiciones pseudo - estáticas.

En el *Anexo A-9: Análisis de Estabilidad Global*, se presentan las salidas gráficas del programa Slide para cada sección de análisis.

5.2.10 Modelamiento numérico de los taludes del tajo para el análisis de esfuerzos

Los métodos de equilibrio límite pueden considerarse idóneos para la mayoría de aplicaciones de mecánica de suelos, pero es considerado demasiado simplista para muchas aplicaciones en mecánica de rocas. Para aplicar un mejor método de análisis que se ajuste más a la realidad, se han desarrollado programas de modelamiento numérico (Plaxis, Phase², etc.), los cuales permiten elaborar una malla numérica en dos o tres dimensiones, asignándose a cada elemento las propiedades del macizo rocoso como densidad, ángulo de fricción, Módulo de Poisson, etc.

En este capítulo se realizó el modelamiento numérico de los taludes de la Mina 9-10 utilizando el Método matemáticos de Elementos Finitos y calculando el factor de seguridad por métodos numéricos a través de la metodología de reducción de la



resistencia al corte del macizo rocoso hasta ocasionar la rotura del talud (Método SSR).

5.2.10.1 Condiciones de Análisis

Para realizar el modelamiento numérico se adoptaron algunas condiciones en los taludes de la Mina 9-10 se detallan a continuación:

- **Software geotécnico utilizado:** Phase² v 8.0 (Rocscience, 2012).
- **Método de análisis:** Método de Elementos Finitos, el cual ha sido utilizado conjuntamente con el análisis de reducción de los parámetros de resistencia al corte (SSR), con la finalidad de obtener el factor de seguridad por medio del análisis numérico (SRF).
- **Modelo constitutivo:** El modelo constitutivo elegido es el elasto - plástico junto con el criterio de rotura generalizado de Hoek y Brown (2002).
- **Condiciones de contorno:** Se han restringido los movimientos de la frontera inferior y los movimientos verticales en las fronteras laterales del modelo, y en la superficie superior donde se realiza la excavación se ha permitido el libre movimiento.
- **Condicionantes externos:** No se consideró presencia de nivel freático, ni condiciones pseudo -estáticas.
- **Forma de los elementos finitos:** Se han considerado elementos finitos triangulares de 6 nodos.
- **Tipo de análisis:** Deformación plana.
- **Número de iteraciones:** 500 con una tolerancia de 0.001.
- **Ley de fluencia:** Se ha optado por una ley de fluencia no asociada considerando la dilatación nula, la razón es porque es difícil conocer la dilatación en un macizo rocoso y, como señalan Griffiths y Lane (1999), las diferencias son prácticamente nulas en el factor de seguridad calculado.

- **Módulo elástico y coeficiente de Poisson:** Se ha utilizado el módulo elástico recomendado por Hoek (2002) y un coeficiente de Poisson promedio de $\nu=0.26$ tomado de los ensayos geofísicos de refracción sísmica y MASW. Los valores del módulo elástico obtenidos por Hoek son mayores que los obtenidos de la geofísica, debido a que en estos últimos al estar más superficiales (hasta 30 m de profundidad) las deformaciones son mayores; y en el caso de Hoek, se considera que el macizo se encuentra con un mayor confinamiento, lo que equivale a tener menores deformaciones y por lo tanto módulos elásticos mayores.
- **Equilibrio:** En los análisis realizados, para obtener el estado de equilibrio límite se ha ido reduciendo progresivamente los parámetros de resistencia al corte del macizo rocoso, pasando de una situación estable a una situación inestable donde no se alcanza la convergencia del sistema, de esta manera se obtiene el factor de seguridad mediante la metodología SSR.
- **Factor de seguridad:** Se considera un factor de seguridad mínimo de 1.5 para garantizar la estabilidad en condiciones estáticas.
- **Mecanismo de rotura:** El mecanismo de rotura de los taludes se obtiene a partir de los contornos de desplazamientos totales o por los contornos de máximas deformaciones por esfuerzos de corte obtenidos con el programa Phase².

5.2.10.2 Secciones de Análisis

En la *Figura 144* hasta la *Figura 147* se presenta la geometría de los taludes de la Mina 9-10 en sus formas actuales, en donde se puede apreciar las mallas de elementos finitos y las condiciones de contorno del modelo numérico.

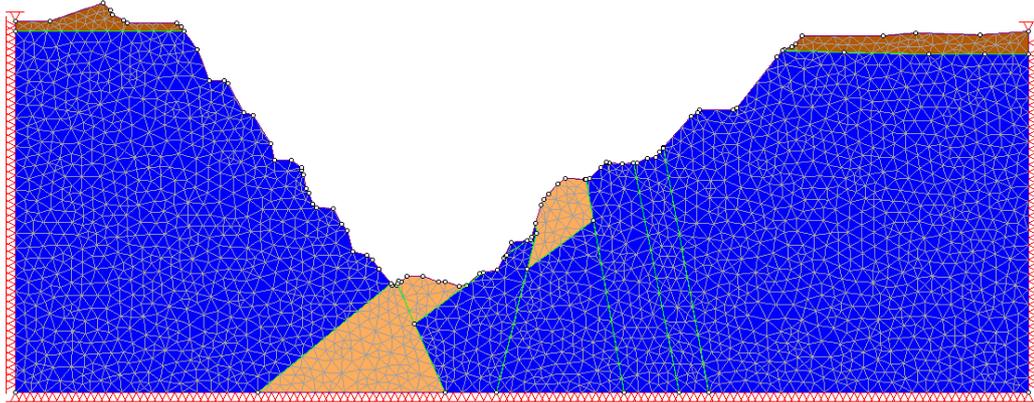


Figura 144. Sección de Análisis Numérico A-A

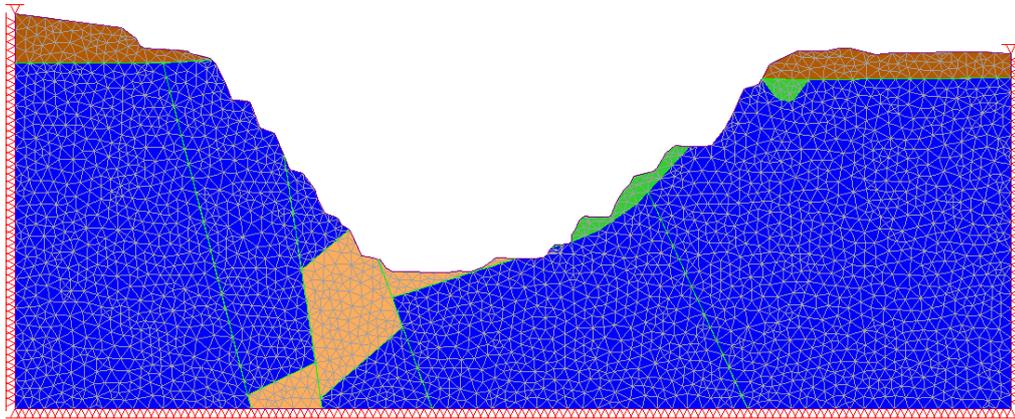


Figura 145. Sección de Análisis Numérico B-B

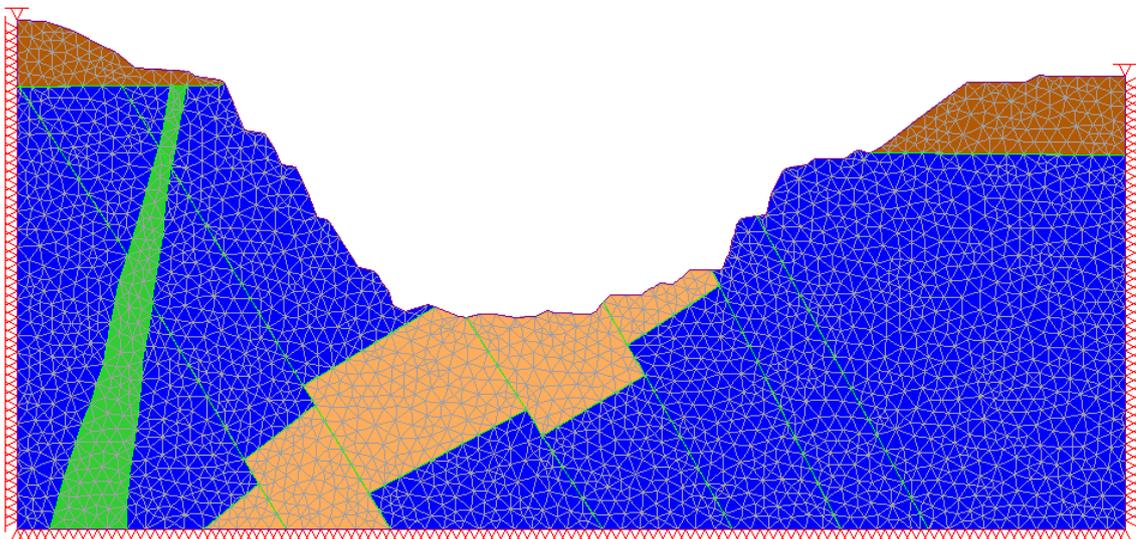


Figura 146. Sección de Análisis Numérico C-C

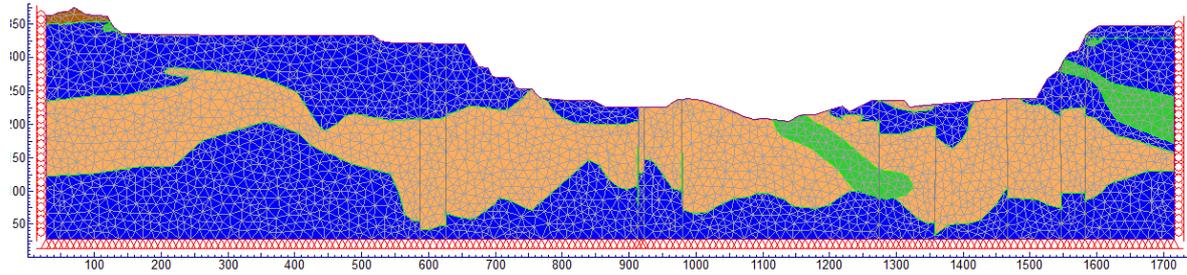


Figura 147. Sección de Análisis Numérico D-D

5.2.10.3 propiedades de los materiales

Para determinar los parámetros de deformacionales de los macizos rocosos, se han considerado las propiedades de las estaciones geomecánicas que pasan cerca de las secciones de análisis. Preliminarmente se ha realizado el análisis de las curvas de resistencia del macizo rocoso con el programa Rocdata de Roscscience (considerando la resistencia a la compresión simple de la roca intacta, el índice GSI, la constante de la matriz rocosa y el factor de perturbación).

Los parámetros deformacionales de los macizos rocosos usados en el análisis esfuerzo - deformación se presentan en la *Tablas 88, 89, 90 y 91*.

Tabla 88: *Parámetros Deformationales – Sección A-A*

Litología	Densidad (kN/m ³)	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	m _i	GSI	D	E (MPa)	□
Hornfels (Talud NW)	26.4	125.0	21	55	1	6667.61	0.26
Hornfels (Talud SE)	26.4	100.0	21	54	1	6294.63	0.26
Mineral	30.1	178.0	26	56	1	7062.69	0.26

Tabla 89: *Parámetros Deformationales – Sección B-B*

Litología	Densidad (kN/m ³)	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	m _i	GSI	D	E (MPa)	□
Hornfels (Talud NW)	26.4	127.0	21	57	1	7481.18	0.26
Hornfels (Talud SE)	26.1	100.0	21	55	1	6667.61	0.26
Mineral	30.1	178.0	26	56	1	7062.69	0.26
Diques	27.2	159.0	26	55	1	6667.61	0.26

Tabla 90: *Parámetros Deformationales – Sección C-C*

Litología	Densidad (kN/m ³)	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	m _i	GSI	D	E (MPa)	□
Hornfels (Talud NW)	26.5	121.0	21	58	1	7924.47	0.26
Hornfels (Talud SE)	26.5	180.0	21	55	1	6667.61	0.26
Mineral	30.1	178.0	26	56	1	7062.69	0.26
Diques	27.1	179.0	26	56	1	7062.69	0.26

Tabla 91: *Parámetros Deformationales – Sección D-D*

Litología	Densidad (kN/m ³)	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	m _i	GSI	D	E (MPa)	□
Hornfels (SW)	26.5	135.0	21	52	1	5610.10	0.26
Hornfels (NE)	27.9	79.0	21	48	1	3960.81	0.26
Mineral	30.1	178.0	26	56	1	7062.69	0.26
Diques	27.6	216.5	26	54	1	6294.63	0.26

5.2.10.4 Resultados del Análisis

Mediante el mecanismo de rotura de los taludes se ha identificado a partir de los contornos de desplazamientos totales obtenidos con el programa Phase².

En el análisis de estabilidad a nivel de bancos, las discontinuidades son más influyentes que las propiedades de la roca intacta, la rotura está controlada por los sistemas de discontinuidades debido a que su espaciamiento y persistencia son del mismo orden de magnitud que la altura del talud, por lo que se producen roturas planas o cuñas; esto es evidente en el análisis de estabilidad considerando algunos bancos de excavación, donde se nota la influencia de las discontinuidades.

El resumen de los factores de seguridad se presenta en la **Tabla 92**, en todos los casos los taludes son estables, ya que los factores de seguridad obtenidos son mayores que los mínimos permisibles. Estos resultados son coherentes con los obtenidos de la aplicación de los métodos de equilibrio límite.

Tabla 92: *Resultados del Modelamiento Numérico*

Sección	Talud	SRF
A-A	NW	2.46
	SE	3.40
B-B	NW	2.16
	SE	2.00
C-C	NW	2.78
	SE	3.79
D-D	SW	3.43
	NE	2.19

Los mecanismos de rotura obtenidos son presentados en el **Anexo A-10: Modelamiento Numérico**.



VI. CONCLUSIONES

- Regionalmente se exponen diferentes unidades litológicas: sedimentarias, metamórficas e ígneas, con edades que van desde precambrianas hasta recientes, tales como: Complejo Basal de la Costa, Formación San Juan, Formación Marcona, Formación Rio Grande, Formación Jahuay, Formación Pisco, Volcánico Sencca, Depósitos Cuaternarios (Terrazas Marinas, Depósitos Aluviales, Depósitos Eólicos) y Rocas Intrusivas. Los aspectos litológicos locales son característicos relacionados a la geología local del área de estudio, son los afloramientos meta - sedimentarios denominados hornfels, que conforman la roca encajonante, y el enjambre de diques andesíticos formando principalmente estructuras tipo sills.
- Se determinaron las características geomecánicas del basamento rocoso según la clasificación RMR, donde se obtuvo la calidad del macizo rocoso mediante los parámetros de resistencia y deformación de la roca intacta y de las discontinuidades, presentado valores de RMR, En la Zona Norte como una roca de buena calidad (RMR=63-70) y de regular calidad (RMR=52-60). Zona Sur de buena calidad (RMR=61-67) y de regular calidad (RMR=57-60). La Zona Este, de buena calidad (RMR=62-70); y regular calidad (RMR=57-59). La Zona Oeste como regular calidad (RMR=46-59).
- Se determino una estimación la resistencia y dureza de la matriz rocosa y mediante esta relación se clasifico según su resistencia, en la **Zona Norte** de la mina 9-10, en su mayoría está conformada por roca dura y roca muy dura (R4 – R5), solo se identificó roca media (R3) en la parte media del talud de la pared NW. **La Zona Sur** de la mina 9-10, en su mayoría está conformada por roca dura y muy dura (R4 – R5), solo se identificó roca extremadamente dura (R6) en la parte media del talud de la



pared SW. **La Zona Este** de la mina 9-10, en su mayoría está conformada por roca muy dura (R5), solo se identificó roca media (R3) en la parte superior del talud de la pared SE. **La Zona Oeste** de la mina 9-10, en su mayoría está conformada por roca dura y roca muy dura (R4 – R5), se identificó roca media (R3) en la parte media del talud de la pared SW, posiblemente por presencia de falla, y roca débil (R2) en la parte superior del talud de la pared NW probablemente por meteorización superficial.

- El rango de valores de GSI para el macizo rocoso que conforma los taludes de se encuentra entre 41 y 65, siendo de calidad mala a buena y los rangos de valores de GSI en estos niveles está entre 51 y 59, siendo de calidad regular a buena. Las discontinuidades principales presentan una condición regular respecto a la orientación del talud de corte, se ha identificado la condición desfavorable en la parte media de la pared N.
- Mediante el análisis cinemático a nivel de bancos se identificaron algunos deslizamientos tipo planar y tipo cuña con factores de seguridad pseudo - estáticos menores que 1.0, en estas zonas se recomienda una eliminación de los bloques de rocas sueltas en forma selectiva con la finalidad de eliminar los bloques de roca que están a punto de caer y/o deslizarse. No se ha identificado vuelco de estratos inestables. Las estaciones que presentan estas características son: EG-03' y EG-08'
- Según el análisis estabilidad global, los factores de seguridad son mayores que los mínimos requeridos, por lo que taludes del tajo son estables, de la comparación de resultados entre el factor de seguridad obtenido con métodos numéricos y el obtenido con métodos de equilibrio limite se observa que los obtenidos con Phase2 son ligeramente menores que los obtenidos con Slide. Con ambos análisis los taludes son estables.



VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar el monitoreo continuo de fallas de orientación desfavorable respecto a la orientación de los taludes del tajo, ya que estas podrían generar y dar lugar a agrietamientos de manera progresiva debido a las constantes vibraciones que se generan principalmente por efectos de voladura. Al profundizar los taludes del tajo, los esfuerzos también se incrementan, en consecuencia, al existir la presencia de fallas paralelas o desfavorables respecto a los taludes se generaría un peligro geológico, por lo que es necesario el monitoreo.
- Cuando se realice la caracterización geomecánica del macizo rocoso se recomienda realizar una corroboración, mediante un segundo mapeo geomecánico para a si comprara y valide ambos resultados geomecánicos.
- Para las grietas y fisuras se recomienda monitorear mediante cintas extensométricas, para luego de la interpretación, diseñar el sistema de soporte requerido.
- Se recomienda la instalación de inclinómetros en las zonas donde se ha detectado movimiento en el talud mediante la Interferometría de Radar.
- Al realizarse los mapeos geomecánicos ya sean celdas estructurales o línea de detalle esto nos limita a caracterizar un área menor de un talud pronunciado, y en otras ocasiones hay taludes o bancos inaccesibles, por ende, en próximas evaluaciones geomecánicas se recomienda aplicar métodos más modernos, como el uso de 3D laser scanner y la fotogrametría digital con los drones, cámaras fotográficas de alta calidad, para cartografiar una superficie en 3D, debidamente georreferenciada, estos equipos nos brindaran una información de la geometría y ángulo de las discontinuidades para así tener una mejor información geomecánica de macizo rocoso.



VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, H. C. (2017). *Caracterización y Exploración Geológica del Proyecto Crucero – Puno, Tesis de grado de ingeniero, Universidad Nacional del Altiplano de Puno.* <http://repositorio.unap.edu.pe>.
- Ahrens, L. H. (1957), *The lognormal distribution of the elements--a fundamental law of geochemistry: Geochim. et Cosmochim. Acta, vol. 11.*
- Abramson L. W., Lee T. S., Sharma S., Boyce G. M., 2002. *Slope Stability and Stabilization Methods. John Wiley & Sons Inc., p.314.*
- Atchley, F., 1956. *Geology of the Marcona iron deposits, Peru: Unpublished Ph.D. thesis, Palo Alto, California, Stanford University, 150 p.*
- Barton, N. y Choubey, V., 1977. *The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. Rock Mechanics.*
- Bernaola Alonso, J.; Castilla Gómez, J; Herrera Herbert, J., 2013. *Perforación y Voladura de Rocas en Minería.*
- Bieniawski, Z. T., 1989, *Engineering Classification of Rock. Jonh Wiley & Sons, New York.*
- Bureau de Recherches Geologigues et Minieres (BRGM), 1975. *Anexo B: Estudio de la Estabilidad de los Taludes.*
- Cesel S.A., 2006. *Investigaciones Geológicas Geotécnicas para la Elaboración del Plan de Cierre de Minas Shougang Hierro Perú.*
- Chen, H.Y., Clark, A.H., Kyser, T.K., Ullrich, T.D., Baxter, R., Chen, Y.M., Moody, T.C., 2010, *Evolution of the giant Marcona-Mina Justa iron oxide copper gold district, south-central Perú: ECONOMIC GEOLOGY, p. 155–185.*
- Famesa Explosivos, 2015. *Pruebas Técnicas con Emulsion Matriz – Mina Shougang.*
- Gonzales de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. y Oteo, C., 2012. *Ingeniería Geológica. Prentice Hall.*
- Hanna T. H., 1985. *Field Instrumentación in Geotechnical Engineering.*
- Hawkes, N., Clark, A.H., and Moody, T.C., 2002, *Marcona and Pampa de Pongo: Giant Mesozoic Fe-(Cu, Au) deposits in the Peruvian coastal belt, in Porter, T.M., ed., Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective: Adelaide, Porter Geoscience Consultancy Publishing, v. 2, p. 115–130.*



- Hoek, E. y Brown, E.T., 1980. *Empirical Strength Criterion for Rock Masses. Journal of the Geotechnical Engineering Division.*
- Hoek E. & Brown E. T., 1997, *Practical Estimatives of Rock Mass Strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 34, 8, 1165-1186.*
- Hoek, E., Kaiser, P.K. y Bawden, W.F., 1995. *Support of Underground Excavation in Hard Rock. Balkema, Rotterdam.*
- Hoek, E., Carranza - Torres, C.T. y Corkum, B., 2002. *Hoek-Brown Failure Criterion-2002 Edition.*
- Hynes, M. E. y Franklin, A. G., 1984. *Rationalizing the Seismic Coefficient Method. U.S. Department of the Army. Waterways Experiment Station. U.S. Army Corps of Engineers (USACE). Miscellaneous Paper GL-84-13.*
- INCITEMI, 1976. *Estudio de Estabilidad de Taludes de las Minas Marcona*
- INGEMMET, 1978., Caldas, J. *Geología de los cuadrángulos de San Juan, Acarí y Yauca: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú, Lima, Perú, Boletín 30.*
- INGEMMET, 1998. Cuadrángulo Geológico de San Juan, hoja 31-m. *Actualizado en 1998.*
- Johnson, R. W., 1998. *Risk Management by Risk Magnitudes. Chemical Health & Safety Volumen 5 No.5 (setiembre-octubre).*
- Rocscience. Dips Version 6.0, 2012. *Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data.*
- Rocscience. Slide Version 6.0, 2012. *Limit Equilibrium Slope Stability Analysis. Toronto.*
- Rocscience. Phase2 Version 8.0, 2012. *Finite Element Slope Stability Analysis. Toronto.*
- Zer Geosystem Perú S.A.C., 2012. *Estudio Básico de Peligro Sísmico para el Depósito de Relaves Choclón 2.*
- Hernández S, fernández c., y amp; baptista p. (2003). *Metodología de la investigación, México: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V*
- Soto M. T. (2008). *Manual de Geología del Perú.*
- Soto M. T. (2005). *Texto Universitario de Petrología.*
- Nina Barraqueta, N. B. (2014). *Estudio Geológico – Geotécnico del Proyecto Túnel de Desvió Rio Asana – Quellaveco – Moquegua.*
- Mamani Larico, R. R. (2016). *desarrolla su tesis de pre grado denominado Análisis de la estabilidad de taludes en macizo rocoso de la carretera sina yanahuaya tramo III - sub tramo 02, a partir de la caracterización geológica y resistencia a la*



compresión simple.

- Tupa Ruiz, P. (2017). *Evaluación geológica - geotécnica para la estabilidad de taludes en la carretera Muñani - Saytococho tramo km. 14+700 al 30+00*
- Herrera Carranza, E. (2020). *Caracterización geomecánica del macizo rocoso aplicado al análisis de estabilidad de taludes en el yacimiento Jésica, Ocuwiri - Lampa - Puno - 2015 – 2016.*
- Ale Véliz, J. (2012). *Influencia de la alteración hidrotermal en la calidad del macizo rocoso en taludes de tajos abiertos*
- Rodríguez Malaver, J. V. (2019). *Estudio geotécnico para tajo, Proyecto Coroccohuayco - Cusco – Perú*
- Cooper, S. (2017). *Estudio de la estabilidad de los taludes en una mina operativa excavada en suelos duro /roca blanda (Doctoral dissertation, ETSI_Energia)*
- Parra, M., & Andrés, i. (2020). *Análisis de estabilidad de taludes de roca mediante el método de elementos finitos.*



ANEXOS

Anexo A-1 ESTUDIO PETROGRÁFICO MACROSCÓPICO DE LA ROCA

Anexo A-2 REGISTRO FOTOGRÁFICO

Anexo A-2.1 FOTOS GEOLOGÍA LOCAL

Anexo A-2.2 FOTOS GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Anexo A-2.3 FOTOS RIESGO GEOLÓGICO

Anexo A-2.4 FOTOS PEINE DE BARTON

Anexo A-3 REGISTROS DE MAPEO GEOMECÁNICO

Anexo A-3.1 REGISTROS DE MAPEO LINEAL

Anexo A-4 VALORACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

Anexo A-4.1 REGISTROS DE RMR

Anexo A-4.2 REGISTROS DE GSI

Anexo A-4.3 RESUMEN DE VALORIZACIÓN GEOMECÁNICA

Anexo A-5 ENSAYOS GEOFISICOS

Anexo A-5.1 REGISTROS DE ONDAS SISMICAS

Anexo A-5.2 ANEXO F.2_CURVAS DROMOCRONICAS

Anexo A-5.3 PERFILES DE ONDAS P

Anexo A-5.4 CURVAS DE DISPERSION

Anexo A-5.5 PERFILES DE ONDAS S

Anexo A-5.6 PARAMETROS DINAMICOS

Anexo A-5.7 PERFILES DE TOMOGRAFIA ELECTRICA

Anexo A-6 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

Anexo A-7 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LAS DISCONTINUIDADES

Anexo A-8 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD A NIVEL DE BANCOS

Anexo A-8.1 ANÁLISIS ESTEREOGRÁFICO

Anexo A-8.2 ANÁLISIS CINEMÁTICO

Anexo A-8.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – DESLIZAMIENTO PLANAR

Anexo A-8.4 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – DESLIZAMIENTO EN CUÑA

Anexo A-9 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GLOBAL

Anexo A-10 MODELAMIENTO NUMÉRICO

Anexo A-11 PLANOS