

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



**“GEOLOGÍA Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA MINA 2-3-4  
SHOUGANG”**

**TESIS**

PRESENTADA POR:

**CÉSAR AGUSTO ROMERO MEJÍA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO GEÓLOGO**

**PUNO – PERÚ**

**2018**

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

**GEOLOGÍA Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA MINA 2, 3 Y 4  
SHOUGANG**

TESIS PRESENTADA POR:

**Bach. CÉSAR AGUSTO ROMERO MEJÍA**

TITULO PROFESIONAL:

**INGENIERO GEÓLOGO**



APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

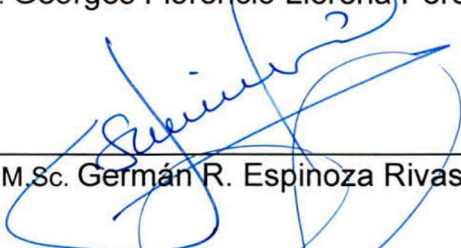
**PRESIDENTE**

:   
M.Sc. Leonel Palomino Ascencio

**PRIMER MIEMBRO**

:   
Ing. Georges Florencio Llerena Peredo

**SEGUNDO MIEMBRO**

:   
M.Sc. Germán R. Espinoza Rivas

**DIRECTOR / ASESOR**

:   
M.Sc. Valentín Fernández Valdivia

Área : Geotecnia

Tema : Geología y Estabilidad de Taludes en la Mina 2, 3 y 4 Shougang

Fecha de sustentación: 26-04-2018

## DEDICATORIA

### **A Dios**

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita misericordia.

### **A mi madre Susana**

Aunque haya partido de este mundo terrenal muy temprano, ella siempre estuvo presente en mí, siendo para mi alma consuelo y fortaleza en cada situación difícil de mi vida.

### **A mi padre César Bernardo**

Por su apoyo constante e incondicional, por ser ejemplo de superación, por ser padre y madre, inculcando en mi humildad, disciplina, perseverancia y coraje.

### **A mi hija Kitzia Micaela**

Por su infinito amor, por ser mi inspiración en el día a día, por enseñarme a tener un corazón bondadoso y ser paciente.

### **A mi esposa Deisy**

Por su amor y apoyo incondicional, por soportarme y estar siempre en los momentos más difíciles junto a mí.

### **A mi familia**

Por estar siempre conmigo y por el apoyo moral brindado en todo momento, siendo ellos: Verónica Romero Mejía, Yaneth Romero Mejía, Merling Romero Condori, José Romero Condori y Alida Romero Condori.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar doy gracias a Dios por bendecirme y permitirme cumplir este objetivo y hacer realidad este anhelado sueño. Asimismo agradezco a mi familia por todo el apoyo.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional del Altiplano, por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A mi director de tesis Msc. Valentín Fernández Valdivia, por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado que pueda terminar este presente trabajo.

De igual manera agradecer a mis docentes durante toda mi carrera profesional, porque todos han aportado su granito de arena en mi formación.

Finalmente agradezco a quienes fueron mis jefes de trabajo, Ing. David Vásquez, Ing. Walter Tinta, Ing. Hildebrando Ángles e Ing. José Malpica.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional, a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo, y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Sin importar donde se encuentren quiero darle mi gratitud por formar parte de mí y por todo lo que me han brindado.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	XI
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Justificación del proyecto.....	1
1.2. Hipótesis del trabajo.....	2
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	2
1.4. Ubicación y Acceso.....	2
CAPÍTULO II.....	4
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Antecedentes del proyecto.....	4
2.2 Marco geológico regional.....	5
2.2.1. Geomorfología regional.....	6
2.2.2. Estratigrafía regional.....	9
2.2.3. Tectónica.....	15
2.3 Marco geológico local.....	16
2.3.1. Morfología local.....	16
2.3.3. Marco estructural.....	23
2.4 Geología económica.....	26
2.4.1. Zonas de alteración mineral.....	27
2.4.2. Paragénesis y zoneamiento.....	27
2.4.3. Génesis.....	28
2.5 Identificación de zonas de riesgo.....	29
2.5.1. Análisis de riesgos geotécnicos.....	30
2.5.2. Principales peligros geológicos.....	31
2.5.3. Alternativas de solución.....	37
2.6 Sismicidad.....	37
CAPÍTULO III.....	39
MATERIALES Y MÉTODOS.....	39

3.1. Materiales .....	39
3.2. Métodos .....	39
3.2.1. Investigaciones Geotécnicas .....	40
3.2.2. Caracterización geomecánica del macizo rocoso .....	60
3.2.3. Zonificación geomecánica .....	70
3.2.3.1. Zonificación geomecánica del macizo rocoso de la mina 2-3-4 ....	71
CAPÍTULO IV.....	83
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	83
4.1. Características Geológicas.....	83
4.2. Características y condiciones geomecánicas del macizo rocoso .....	83
4.2.1. Análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos .....	83
4.2.2. Metodología utilizada.....	84
4.2.3. Verificación del diseño de los taludes de banco del tajo .....	85
4.2.4. Factores de seguridad mínimos admisibles .....	88
4.2.5. Condiciones de agua subterránea .....	88
4.2.6. Coeficiente sísmico utilizado.....	89
4.2.7. Propiedades de los materiales.....	89
4.2.8. Análisis cinemático del macizo rocoso .....	89
4.2.9. Análisis de estabilidad a nivel de bancos – Diseño existente .....	91
4.2.10. Análisis de estabilidad a nivel de bancos – Diseño Proyectado... 103	
4.2.11. Análisis de estabilidad global de los taludes del tajo.....	109
4.2.12. Modelamiento numérico de los taludes del tajo.....	119
4.2.13. Análisis retrospectivo (Back Analysis).....	128
CONCLUSIONES.....	134
RECOMENDACIONES .....	135
REFERENCIAS .....	136
ANEXOS .....	138

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura N° 1. 1:</b> Ubicación del proyecto .....	3
<b>Figura N° 2. 1:</b> Vista de la línea de costa y terrazas a lo largo del litoral marino .....	7
<b>Figura N° 2. 2:</b> Vista de cuerpos ígneos que forman la cordillera de la costa .....	8
<b>Figura N° 2. 3:</b> Zona geomorfológica peneplanicie pliocénica, ríos Yauca y Acarí .....	9
<b>Figura N° 2. 4:</b> Columna estratigráfica regional del área de estudio y alrededores .....	10
<b>Figura N° 2. 5:</b> Rocas intrusivas (Adamelita) del Batolito de San Nicolás. ....	15
<b>Figura N° 2. 6:</b> Vista de colina, afloramiento rocoso, área cercana a San Nicolás .....	16
<b>Figura N° 2. 7:</b> Vista de lomada .....	17
<b>Figura N° 2. 8:</b> Vista de terrazas marinas; ubicadas al occidente de las minas .....	18
<b>Figura N° 2. 9:</b> Depósitos conglomerádicos, que presentan estratificación cruzada ...	19
<b>Figura N° 2. 10:</b> Metasedimentos (Hornfels) moderadamente fracturados .....	20
<b>Figura N° 2. 11:</b> Contacto roca – mineral .....	21
<b>Figura N° 2. 12:</b> Vista de depósitos eólicos, alrededores de la mina 4 .....	22
<b>Figura N° 2. 13-</b> Vista de depósitos antrópicos, alrededores de la mina. ....	22
<b>Figura N° 2. 14:</b> Flanco Este de la mina 4, cuerpo ígneo – gabrodiorita. ....	23
<b>Figura N° 2. 15:</b> Principales dominios estructurales de la Mina 2-3-4. ....	25
<b>Figura N° 2. 16:</b> Geología de los alrededores de la zona de estudio .....	26
<b>Figura N° 2. 17:</b> Sección geológica de la zona de estudio. ....	27
<b>Figura N° 2. 18:</b> Sección geológica del cuerpo mineralizado en la Mina 4. ....	29
<b>Figura N° 2. 19:</b> Caracterización y clasificación de los riesgos. ....	31
<b>Figura N° 2. 20:</b> Análisis de caída de rocas de la Mina 2 – Talud Norte .....	32
<b>Figura N° 2. 21:</b> Análisis de caída de rocas de la Mina 2 – Talud Sur .....	32
<b>Figura N° 2. 22:</b> Análisis de caída de rocas de la Mina 3 – Talud Norte .....	33
<b>Figura N° 2. 23:</b> Análisis de caída de rocas de la Mina 3 – Talud Sur .....	33
<b>Figura N° 2. 24:</b> Análisis de caída de rocas de la Mina 4 – Talud Norte .....	33
<b>Figura N° 2. 25:</b> Análisis de caída de rocas de la Mina 4 – Talud Sur .....	34
<b>Figura N° 2. 26:</b> Zona de agrietamiento GR-03, nivel de riesgo medio. ....	35
<b>Figura N° 2. 27:</b> Zona de deslizamiento DZ-5, nivel de riesgo bajo. ....	36
<b>Figura N° 2. 28:</b> Zona de caída de rocas CR-11, nivel de riesgo alto. ....	36
<b>Figura N° 3. 1:</b> Vista de la EG-8, Nivel 653 – Mina 2. ....	42
<b>Figura N° 3. 2:</b> Vista de la EG-7, Nivel 689 – Mina 3. ....	43
<b>Figura N° 3. 3:</b> Vista de la EG-23, Nivel 749 – Mina 4. ....	43
<b>Figura N° 3. 4:</b> Índice de resistencia geológica (GSI). ....	65
<b>Figura N° 3. 5:</b> Perfiles normalizados propuestos por Barton y Choubey .....	69
<b>Figura N° 3. 6:</b> Perfiles de rugosidad y valores de JRC. ....	82

<b>Figura N° 4. 1:</b> Ancho mínimo de berma de seguridad de la Mina 2-3-4.....	85
<b>Figura N° 4. 2:</b> Valores de la berma de seguridad en la Mina 2-3-4.....	86
<b>Figura N° 4. 3:</b> Verificación del diseño genérico de 36 m. de altura.....	87
<b>Figura N° 4. 4:</b> Verificación del diseño genérico de 48 m. de altura.....	87
<b>Figura N° 4. 5:</b> Configuración de los taludes de la Mina 2-3-4. ....	88
<b>Figura N° 4. 6:</b> Sección de análisis de estabilidad de la Mina 2 – Geometría actual. ....	110
<b>Figura N° 4. 7:</b> Sección de análisis de estabilidad de la Mina 3 – Geometría actual. ....	110
<b>Figura N° 4. 8:</b> Sección de análisis de estabilidad de la Mina 4 – Geometría actual. ....	110
<b>Figura N° 4. 9:</b> Sección de análisis de estabilidad de la Mina 2 – proyectada.....	111
<b>Figura N° 4. 10:</b> Sección de análisis de estabilidad de la Mina 3 – proyectada.....	111
<b>Figura N° 4. 11:</b> Sección de análisis de estabilidad de la Mina 4 – proyectada.....	112
<b>Figura N° 4. 12:</b> Curva de resistencia del macizo rocoso – Hornfels (Mina 2) .....	114
<b>Figura N° 4. 13:</b> Curva de resistencia del macizo rocoso – Hornfels (Mina 3) .....	114
<b>Figura N° 4. 14:</b> Curva de resistencia del macizo rocoso – Hornfels (Mina 4) .....	115
<b>Figura N° 4. 15:</b> Curva de resistencia del macizo rocoso – Andesita.....	115
<b>Figura N° 4. 16:</b> Curva de resistencia del macizo rocoso – Mineral (Mina 2) .....	116
<b>Figura N° 4. 17:</b> Curva de resistencia del macizo rocoso – Mineral (Mina 3) .....	116
<b>Figura N° 4. 18:</b> Curva de resistencia del macizo rocoso – Mineral (Mina 4) .....	117
<b>Figura N° 4. 19:</b> Sección de análisis numérico de la Mina 2 – Geometría actual .....	121
<b>Figura N° 4. 20:</b> Sección de análisis numérico de la Mina 3 – Geometría actual .....	121
<b>Figura N° 4. 21:</b> Sección de análisis numérico de la Mina 4 – Geometría actual .....	122
<b>Figura N° 4. 22:</b> Sección de análisis y fases de excavación de la Mina 2. ....	122
<b>Figura N° 4. 23:</b> Sección de análisis y fases de excavación de la Mina 3. ....	123
<b>Figura N° 4. 24:</b> Sección de análisis y fases de excavación de la Mina 4. ....	123
<b>Figura N° 4. 25:</b> Ejemplo de falla local en los taludes de la Mina 2 (Fase 1).....	125
<b>Figura N° 4. 26:</b> Ejemplo de falla global en los taludes de la Mina 2 (proyectada) ....	125
<b>Figura N° 4. 27:</b> Deslizamiento ocurrido en el talud Norte de la Mina 4 .....	129
<b>Figura N° 4. 28:</b> Análisis retrospectivos para RCS=40 MPa y GSI variable .....	130
<b>Figura N° 4. 29:</b> Modelamiento numérico para F.S.=1.0 (RCS=40 MPa y GSI=30) ..	131
<b>Figura N° 4. 30:</b> Análisis retrospectivos para RCS=50 MPa y GSI variable. ....	131
<b>Figura N° 4. 31:</b> Modelamiento numérico para F.S.=1.0 (RCS=50 MPa y GSI=28) ..	132
<b>Figura N° 4. 32:</b> Análisis retrospectivos para RCS=60 MPa y GSI variable. ....	132
<b>Figura N° 4. 33:</b> Modelamiento numérico para F.S.=1.0 (RCS=60 MPa y GSI=26). ..	133
<b>Figura N° 4. 34:</b> Combinación de los valores de RCS y GSI para F.S.=1.0 .....	133



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla N° 2. 1:</b> Zonas de mineralización y sus principales características.....	28
<b>Tabla N° 2. 2:</b> Resumen de los tipos de minerales .....	28
<b>Tabla N° 2. 3:</b> Resumen de los tipos de mineral primario (MP-O-PO).....	28
<b>Tabla N° 2. 4:</b> Resumen del análisis de riesgos geotécnicos en la mina 2-3-4.....	35
<b>Tabla N° 2. 5:</b> Sismos de los últimos 500 años en el Sur – Oeste peruano.....	38
<b>Tabla N° 3. 1:</b> Resumen de las estaciones geomecánicas ubicadas en la Mina 2 .....	40
<b>Tabla N° 3. 2:</b> Resumen de las estaciones geomecánicas ubicadas en la Mina 3 .....	41
<b>Tabla N° 3. 3:</b> Resumen de las estaciones geomecánicas ubicadas en la Mina 4 .....	41
<b>Tabla N° 3. 4:</b> Características del sismógrafo .....	44
<b>Tabla N° 3. 5:</b> Resumen de ensayos de refracción sísmica – Minas 2-3-4.....	46
<b>Tabla N° 3. 6:</b> Velocidades de ondas “P” en suelos y rocas.....	47
<b>Tabla N° 3. 7:</b> Velocidades de ondas “P” en suelos y rocas según Hellberg .....	47
<b>Tabla N° 3. 8:</b> Velocidades de ondas “P” en suelos y rocas según Curvich y Dobrin ..	47
<b>Tabla N° 3. 9:</b> Resultado de los ensayos de refracción sísmica – Mina 2-3-4 .....	48
<b>Tabla N° 3. 10:</b> Resumen del ensayo MASW – Minas 2-3-4 .....	50
<b>Tabla N° 3. 11:</b> Clasificación de los suelos según el código IBC.....	51
<b>Tabla N° 3. 12:</b> Resultados del ensayo MASW – Minas 2-3-4 .....	52
<b>Tabla N° 3. 13:</b> Resumen de los parámetros dinámicos – Minas 2-3-4 .....	53
<b>Tabla N° 3. 14:</b> Resultado de los ensayos de Carga Puntual – Mina 2 .....	55
<b>Tabla N° 3. 15:</b> Resultado de los ensayos de Carga Puntual – Mina 3 .....	55
<b>Tabla N° 3. 16:</b> Resultado de los ensayos de Carga Puntual – Mina 4 .....	56
<b>Tabla N° 3. 17:</b> Resultado de ensayos de propiedades índices de rocas – Mina 2 .....	57
<b>Tabla N° 3. 18:</b> Resultado de ensayos de propiedades índices de rocas – Mina 3 .....	57
<b>Tabla N° 3. 19:</b> Resultado de ensayos de propiedades índices de rocas – Mina 4 .....	58
<b>Tabla N° 3. 20:</b> Resultado de los ensayos de Compresión Triaxial .....	59
<b>Tabla N° 3. 21:</b> Resultado de los ensayos de Corte Directo.....	59
<b>Tabla N° 3. 22:</b> Clasificación de las rocas según su Resistencia Uniaxial.....	60
<b>Tabla N° 3. 23:</b> Rangos de valoración según el índice RMR.....	62
<b>Tabla N° 3. 24:</b> Resumen de la valoración RMR y SMR en la mina 2 .....	62
<b>Tabla N° 3. 25:</b> Resumen de la valoración RMR y SMR en la mina 3 .....	63
<b>Tabla N° 3. 26:</b> Resumen de la valoración RMR y SMR en la mina 4 .....	63
<b>Tabla N° 3. 27:</b> Resumen de la valoración GSI en la Mina 2.....	66
<b>Tabla N° 3. 28:</b> Resumen de la valoración GSI en la Mina 3.....	66
<b>Tabla N° 3. 29:</b> Resumen de la valoración GSI en la Mina 4.....	67
<b>Tabla N° 3. 30:</b> Valores de la constante “mi” para la matriz rocosa .....	76

<b>Tabla N° 3. 31:</b> Propiedades de resistencia y deformación – Mina 2 .....	78
<b>Tabla N° 3. 32:</b> Propiedades de resistencia y deformación – Mina 3 .....	79
<b>Tabla N° 3. 33:</b> Propiedades de resistencia y deformación – Mina 4 .....	80
<b>Tabla N° 4. 1:</b> Dimensiones actuales y proyectadas de las Minas 2-3-4 .....	84
<b>Tabla N° 4. 2:</b> Análisis de estabilidad a nivel de bancos (D. existente – Mina 2).....	93
<b>Tabla N° 4. 3:</b> Análisis de estabilidad a nivel de bancos (D. existente – Mina 3).....	96
<b>Tabla N° 4. 4:</b> Análisis de estabilidad a nivel de bancos (D. existente – Mina 4).....	98
<b>Tabla N° 4. 5:</b> Análisis de estabilidad a nivel de bancos (D. proyectado – Mina 2) ...	104
<b>Tabla N° 4. 6:</b> Análisis de estabilidad a nivel de bancos (D. proyectado – Mina 3) ...	106
<b>Tabla N° 4. 7:</b> Análisis de estabilidad a nivel de bancos (D. proyectado – Mina 4) ...	107
<b>Tabla N° 4. 8:</b> Parámetros a usar en el análisis de estabilidad – Mina 2.....	113
<b>Tabla N° 4. 9:</b> Parámetros a usar en el análisis de estabilidad – Mina 3.....	113
<b>Tabla N° 4. 10:</b> Parámetros a usar en el análisis de estabilidad–Mina 4 .....	113
<b>Tabla N° 4. 11:</b> Resultado de análisis de estabilidad global e interrampa .....	118
<b>Tabla N° 4. 12:</b> Parámetros deformacionales – Mina 2.....	124
<b>Tabla N° 4. 13:</b> Parámetros deformacionales – Mina 3.....	124
<b>Tabla N° 4. 14:</b> Parámetros deformacionales – Mina 4.....	124
<b>Tabla N° 4. 15:</b> Resultado del modelamiento numérico – Mina 2-3-4.....	126
<b>Tabla N° 4. 16:</b> Modelamiento numérico con fases de excavación – Mina 2.....	127
<b>Tabla N° 4. 17:</b> Modelamiento numérico con fases de excavación – Mina 3.....	127
<b>Tabla N° 4. 18:</b> Modelamiento numérico con fases de excavación – Mina 4.....	127

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ASTM	American Society for Testing and 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
N°	Número
NE	Noreste
NW	Noroeste
O	Oeste
Pe-gr/Pe-gn	Precámbrico 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 área de estudio está localizado en el distrito de Marcona sobre una terraza marina y cordillera de la costa sur del Perú; el método de explotación que se utiliza en la mina 2, 3 y 4 de Shougang, es a cielo abierto, donde el cuerpo mineralizado de hierro y minerales secundarios como el cobre, plata y oro, se emplaza en un macizo rocoso, compuesto por un conjunto metamórfico, unidades volcánicas sedimentarias y por una secuencia calcárea pre-mesozoica, que forman un monoclinal de orientación NE que buza  $40^\circ$  al N-NW, donde estas estructuras se complican con fallas e intrusiones menores. Se han realizado investigaciones geotécnicas, evaluación geológica y evaluación geomecánica; de estas investigaciones en campo, se indica que el área de estudio carece de homogeneidad del macizo rocoso que conforman los taludes, existe una variabilidad de unidades litológicas y características geomecánicas del macizo, además de saber que el macizo rocoso está sujeto a diferentes procesos geológicos y procesos de deformación, que pueden afectar la estabilidad de taludes durante las operaciones mineras de explotación.

Para determinar el análisis de estabilidad a nivel de bancos y taludes del tajo, se ha considerado todos los parámetros obtenidos de las investigaciones en campo, del procesamiento de datos mediante software e interpretación de resultados de los mismos; para el análisis a nivel de bancos se ha realizado análisis cinemático, asimismo se ha obtenido factores de seguridad mayores al mínimo admisible, en condición estática ( $FS \geq 1.5$ ) y pseudo-estático ( $FS \geq 1.1$ ), a nivel de bancos los que condicionan la estabilidad, son el grado de diaclasamiento, propiedades de la roca y condiciones de la junta; finalmente para en análisis de estabilidad a nivel de taludes del tajo se han obtenido factores de seguridad superiores al mínimo admisible, en condición estática ( $FS \geq 1.5$ ) y pseudo-estático ( $FS \geq 1.1$ ), llegando a determinar que los taludes en la mina 2, 3 y 4 son estables en condiciones geométricas actuales y proyectadas, considerando la geometría de reposo del talud de  $51^\circ$  a  $55^\circ$  de inclinación, y para los bancos de los taludes con una inclinación promedio de  $70^\circ$ .

**Palabras clave:** Análisis de estabilidad, características geomecánicas, macizo rocoso, taludes.

## ABSTRACT

The study area is located in the district of Marcona on a marine terrace and mountain range of the southern coast of Peru; The exploitation method used in Shougang mines 2, 3 and 4 is open pit, where the mineralized body of iron and secondary minerals such as copper, silver and gold, is located in a rock mass, consisting of a metamorphic set, sedimentary volcanic units and a pre-mesozoic calcareous sequence, forming an NE-oriented monoclinical that doubles  $40^\circ$  to N-NW, where these structures are complicated by minor faults and intrusions. Geotechnical investigations, geological evaluation and geomechanical evaluation have been carried out; of these investigations in the field, it is indicated that the study area lacks homogeneity of the rock mass that make up the slopes, there is a variability of lithological units and geomechanical characteristics of the massif, besides knowing that the rock mass is subject to different geological processes and deformation processes, which can affect slope stability during mining operations.

To determine the analysis of stability at the level of banks and slopes of the pit, we have considered all the parameters obtained from field investigations, data processing by software and interpretation of results thereof; for the analysis at the bank level, kinematic analysis has been carried out, and safety factors greater than the minimum admissible have been obtained, in static ( $FS \geq 1.5$ ) and pseudo-static ( $FS \geq 1.1$ ) conditions, at the level of banks which condition the stability, are the degree of diaclasamiento, properties of the rock and conditions of the board; Finally, for the analysis of stability at the level of slopes of the pit, safety factors above the admissible minimum have been obtained, in static ( $FS \geq 1.5$ ) and pseudo-static ( $FS \geq 1.1$ ) conditions, reaching to determine that the slopes in the mine 2, 3 and 4 are stable under current and projected geometric conditions, considering the resting geometry of the slope from  $51^\circ$  to  $55^\circ$  inclination, and for the banks of the slopes with an average inclination of  $70^\circ$ .

**Keywords:** Stability analysis, geomechanical characteristics, rock mass, slopes.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El presente estudio contiene los resultados de la evaluación geológica - geotécnica con fines de analizar la estabilidad de taludes, evaluar los peligros geológicos e identificar los riesgos geotécnicos, en el área de los tajos de las Minas 2-3-4 de Shougang.

En esta investigación se presentan los resultados de la evaluación geológica (geología regional, local, estructural, geomorfología y geodinámica externa), evaluación geotécnica (mapeo geomecánico en superficie, ensayos de campo y de laboratorio), evaluación geomecánica (caracterización de los macizos rocosos, zonificación geomecánica) y el análisis de estabilidad a nivel de bancos y a nivel global de los taludes del tajo.

### 1.1. Justificación del proyecto

Es necesario determinar el factor de seguridad para la estabilidad de taludes a nivel de bancos y a nivel global en los tajos, además de la identificación de peligros geológicos de cada banco, porque el área mineralizada se encuentra dentro de un grueso paquete de rocas metamórficas, sedimentarias y volcánicas del Paleozoico y Mesozoico, que forman un monoclinial de orientación NE que buza  $40^\circ$  al N-NW; esta estructura básicamente simple, se complica con fallas e intrusiones menores, estando limitado al norte por espesos derrames volcánicos del Terciario y al sur por el batolito granodiorítico de San Nicolás. Se requiere determinar la estabilidad de taludes de las minas 2, 3 y 4, para la explotación de cuerpos mineralizados de hierro y como subproductos del cobre, plata y oro, donde la principal mena de hierro consiste en magnetita.

## 1.2. Hipótesis del trabajo

El conocimiento de las características geológicas y el comportamiento geomecánico del macizo rocoso, permite definir la estabilidad de los taludes en mina 2, 3 y 4.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Determinar las características geológicas y evaluar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso de mina 2, 3 y 4 de Shougang.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las características geológicas que presentan los taludes de corte en mina 2, 3 y 4 Shougang.
- Conocer y evaluar las condiciones geomecánicas del macizo rocoso para determinar la estabilidad de taludes actuales y proyectados frente a la explotación minera.

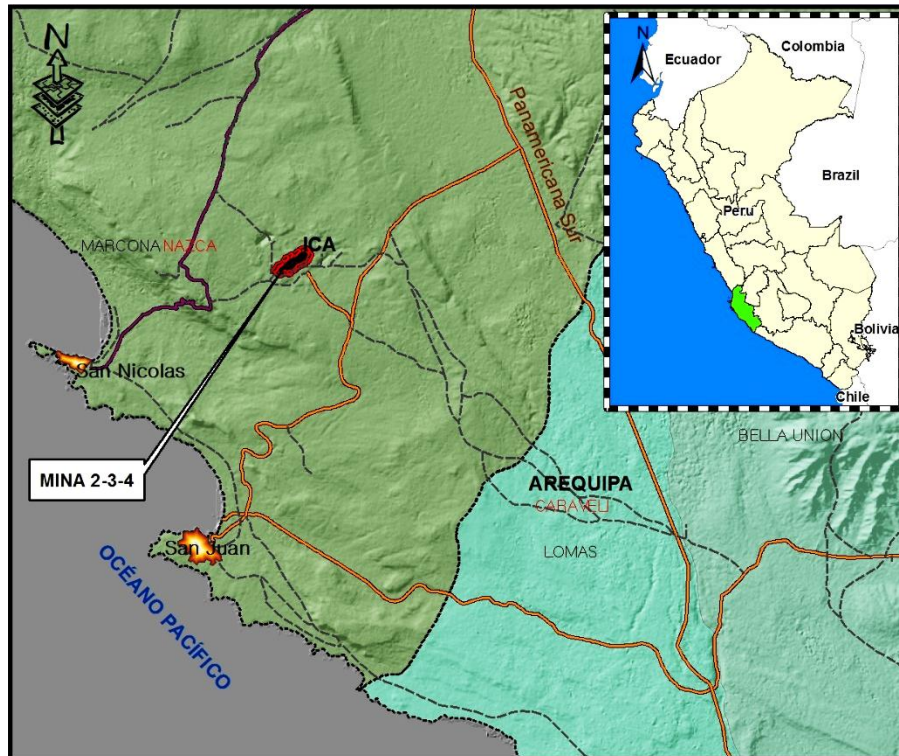
## 1.4. Ubicación y Acceso

El área de estudio se encuentra ubicada políticamente en el distrito de Marcona, provincia de Nazca, departamento de Ica, en la costa sur del Perú, aproximadamente 530 Km. al sur de Lima.

El acceso 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. Ver Figura N° 1. 1.

En el Anexo I, plano GG-001-01: Mapa de Ubicación del Proyecto, se presenta la ubicación del área de estudio.





**Figura N° 1. 1:** Ubicación del proyecto  
(Fuente: Elaboración propia)

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

La evaluación geológica, estructural y geodinámica fue realizada en la zona de Mina a nivel regional y a nivel local en los tajos de las Minas 2-3-4 con fines de evaluar la estabilidad física de los taludes.

En este capítulo se detallan las características de la geología regional y local, donde incluye geomorfología, estratigrafía, litología, geología estructural y procesos de geodinámica externa.

Para la elaboración del presente estudio, se realizó la evaluación en campo, complementándose con la información del Boletín N° 30: Geología de los Cuadrángulos de San Juan, Acarí y Yauca (INGEMMET, 1978), el Cuadrángulo Geológico de San Juan, hoja 31-m (INGEMMET, 1998) y Chen (2010) en lo que se refiere a la descripción del yacimiento, cabe indicar que también se han revisado estudios anteriores.

#### 2.1 Antecedentes del proyecto

- **Investigaciones Geológicas – Geotécnicas para la elaboración del Plan de Cierre de Minas Shougang Hierro Perú, 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 las ubicaciones de las canchas de desmontes y presa de relaves, y para la evaluación de los tajos 2, 3, 4, 5, 7, 9 y 10 se realizó siete estaciones geomecánicas cuyo resultados indican la presencia de mecanismos de falla planar y por cuña, en el análisis de estabilidad de las fallas indican factores de seguridad superior a la unidad, por lo que, se descarta el colapso en condiciones estáticas, sin embargo se recomienda para la etapa de cierre realizar trabajos de desquinche.

Des las estaciones geomecánicas realizadas en los tajos descritos líneas arriba, solo han realizado una estación geomecánica por cada mina (7 en total), sin embargo es insuficiente para la magnitud y/o tamaño de los tajos en cada mina.

- **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 indicado líneas arriba se recomienda un valor de coeficiente sísmico para roca (Tipo B) de 0,19 g.

## 2.2 Marco geológico regional

El área de estudio se ubica en la zona denominada Meseta de Marcona, comprendida en la Cordillera de la Costa, en el lado oeste de la Cordillera Occidental de los Andes; hacia el oeste se presenta terrazas marinas que descienden al mar.

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; esta estructura básicamente simple, se complica con fallas e intrusiones menores, estando

limitado al norte por espesos derrames volcánicos del Terciario y al sur por el batolito granodiorítico de San Nicolás.

Los afloramientos de rocas son limitados por la cobertura de depósitos cuaternarios.

### **2.2.1. Geomorfología regional**

Regionalmente se presenta un relieve variado, que se extiende desde la línea litoral hasta las estribaciones andinas, sus cotas alcanzan los 2230 msnm sobresalen tres unidades geomorfológicas principales, dispuestas en franjas contiguas y parcialmente superpuestas, las que se describen a continuación. Para más detalle en el Anexo I se presenta el plano GE-002-01: Mapa Geomorfológico Regional.

#### **2.2.1.1. Terrazas marinas**

Las terrazas marinas son testigos inobjetables de la acción combinada de la abrasión con el levantamiento andino. Las mejores exposiciones de estas superficies de abrasión se encuentran en el área de San Juan de Marcona, donde pueden distinguirse relieves escalonados en el flanco occidental de la Cordillera de la Costa quedando solo tramos discontinuos debido a su destrucción parcial por la erosión fluvial que actuó en condiciones climáticas muy diferentes a las actuales. Lo que ha quedado de todos estos rasgos geomorfológicos son las superficies de abrasión. Las terrazas de deposición se hallan mayormente destruidas, labor que ha sido facilitada por la topografía abrupta de este sector, para mejor detalle ver Figura N° 2. 1.



**Figura N° 2. 1:** Vista de la línea de costa y terrazas a lo largo del litoral marino  
(Fuente: Elaboración propia)

#### **2.2.1.2. Cordillera de la costa**

Se conoce bajo esta denominación a una cadena de montañas de baja elevación que ocupa el borde continental entre Ilo y la Península de Paracas. Geológicamente, está compuesto por rocas del basamento cristalino y granitos rojos antiguos cubiertos por una costra sedimentaria paleozoica.

Cerca de la zona de Mina se observa un rasgo geomorfológico sumergido en el mar, gran parte del cual se trata de terrazas marinas labradas sobre este macizo, de modo que constituye un relieve escalonado e inclinado hacia el Pacífico cruzado por torrenteras y pequeñas quebradas actualmente secas. Para una mejor vista de este rasgo geomorfológico ver Figura N° 2. 2.



**Figura N° 2. 2:** Vista de cuerpos ígneos que forman la cordillera de la costa  
(Fuente: Elaboración propia)

### 2.2.1.3. Peneplanicie pliocénica

Sobre las estribaciones andinas, se ha labrado una peneplanicie de abrasión, la que actualmente se encuentra por los cañones de los ríos Yauca, Acarí y quebrada Carbonera con sus respectivos afluentes, dicha superficie cubre una extensa área, comprendida entre Mollendo y las cercanías del departamento de Ica., para mejor detalle ver Figura N° 2. 3.

En el área estudiada solo se distingue un sector, ya que en gran parte está cubierta por tufos, presenta una leve inclinación hacia el occidente, siendo más notoria al oeste de los cerros Copara, donde se hunde en la depresión pre andina. En este lugar se encuentran conglomerados y areniscas con fósiles marinos, lo que atestigua una abrasión marina.



**Figura N° 2. 3:** Zona geomorfológica peneplanicie pliocénica, ríos Yauca y Acari  
(Fuente: Elaboración propia)

### 2.2.2. Estratigrafía regional

La estratigrafía regional del área de estudio, delimitada en el plano GE-002-02: Mapa Geológico Regional (Anexo I), muestra las formaciones geológicas en las que sobreyacen, desde la formación más antigua a la más reciente. Está constituida por rocas metamórficas regionales del Complejo Basal de la Costa (Precambrianas), rocas metasedimentarias de la Formación San Juan (Precambriano Superior – Paleozoico Inferior), rocas de la Formación Marcona, Formación Río Grande, rocas sedimentarias de la Formación Pisco (Terciario Superior) y los depósitos cuaternarios de origen aluvial, residual y eólicos – residuales; estos últimos cubriendo en algunos lugares a las rocas intrusivas del Batolito de San Nicolás (Paleozoico Inferior). Todas estas unidades formacionales se presentan en la columna estratigráfica regional. Ver Figura N° 2. 4.

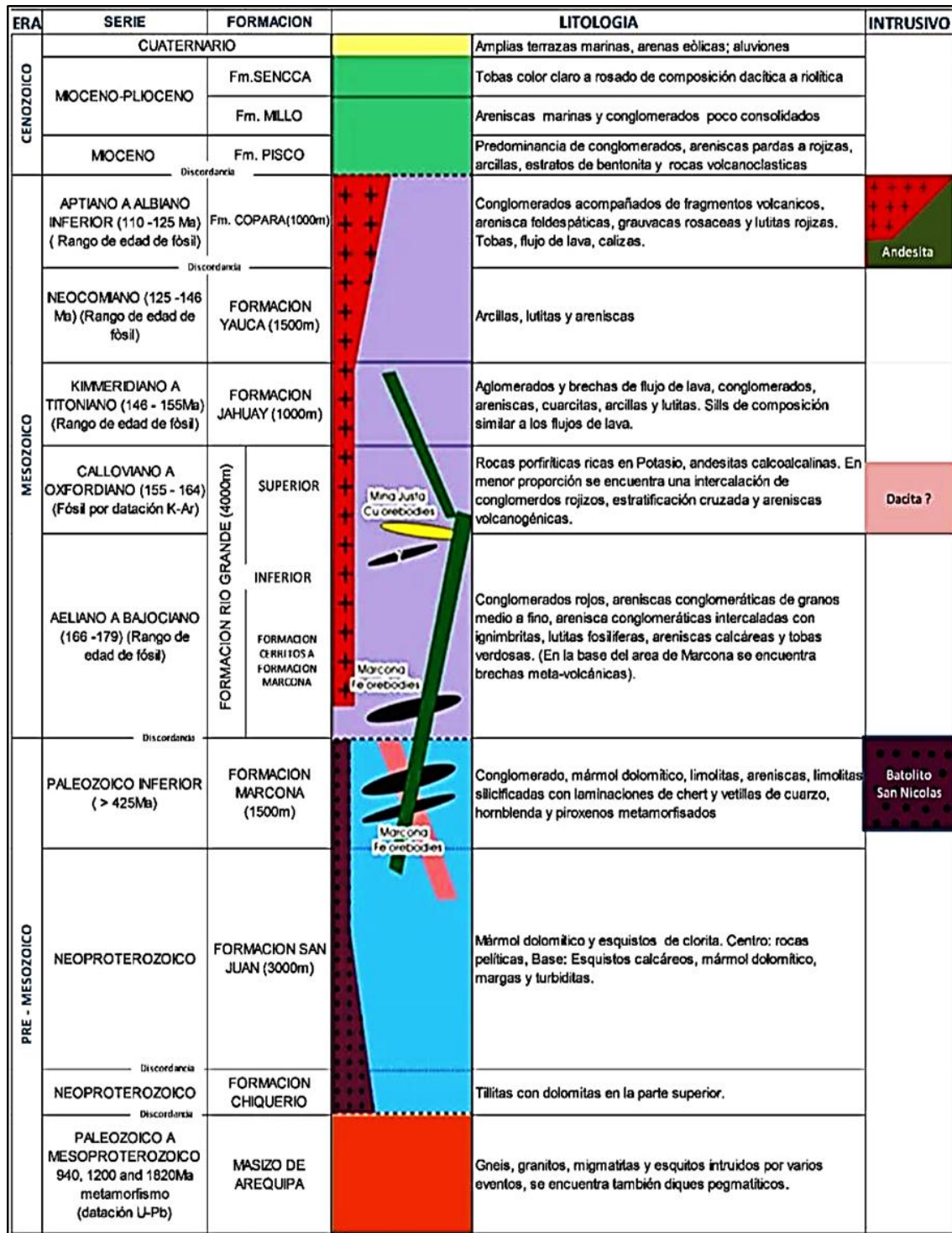


Figura N° 2. 4: Columna estratigráfica regional del área de estudio y alrededores (Fuente: Chen, 2010)

2.2.2.1. Complejo basal de la costa (Pe-gr/Pe-gn)

Este conjunto de origen metamórfico de amplia extensión regional está conformado litológicamente por esquistos micáceos, gneises, granitos gnéisicos y migmatitas. Los esquistos ocupan áreas marginales y constituyen 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.

Este complejo en su composición también tiene granodiorita (Pe-gn) con plagioclasas y ortosa, en forma de bandas de tonalidades claras alternadas con segregaciones oscuras de minerales máficos.

Estos se presentan atravesados por una serie de diques sintectónicos y postectónicos principalmente andesíticos a básicos.

Estas rocas, principalmente los granitos gnéisicos, se presentan 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 han reconocido foliaciones de 35° a 80° y juntas mayores a 50°.

Este basamento cristalino, es conocido también como Complejo Lomas, representa la unidad más antigua que ocurre en el área de San Juan de Marcona, se le correlaciona con las rocas del Cratón Brasileño y su edad es asignada al Precámbrico. Pese a su enorme potencia contiene pocos fósiles diagnósticos.

#### **2.2.2.2. Formación San Juan (Pe-sj)**

Esta formación está constituida por metasedimentos principales de origen calcáreo y lutáceo, transformados a esquistos de bajo grado por metamorfismo térmico. 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 unidad se presenta al sureste y noreste del Cerro Tres Hermanas donde se reconoce un sector con inclinación de sus metasedimentos de 50° SE.

La Formación San Juan se estima que tiene una potencia regional de 3 000 m, es única por su naturaleza y posición, infrayace regionalmente a la Formación

Marcona y está intruida por el batolito de San Nicolás, por lo cual su edad es Precambriana Superior - Paleozoica Inferior, posiblemente Ordovícica.

#### **2.2.2.3. Formación Marcona (Pi-ma)**

Esta formación está constituida por una secuencia calcárea pre-mesozoica, que se expone en la región de San Juan. Se encuentra el conglomerado basal cubierto por calizas solidificadas marrones formando una estructura simple y envolvente en el sector oriental del Domo de Marcona.

Los niveles inferiores consisten en potentes bancos de caliza silicificada, cuya estratificación en la mayoría de los casos es poco distinguible debido al metamorfismo, que ha ocasionado un endurecimiento y le ha dado un aspecto masivo salvo por la presencia de hilos de chert que han resistido este metamorfismo. El espesor de la Formación Marcona se estima en 1500 metros.

#### **2.2.2.4. Formación Río Grande (Js- rg)**

Con este nombre se designa a la mayor parte de las unidades volcánicas - sedimentarias que se exponen en la faja costanera del departamento de Ica y que se prolonga 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 Pre-andina.

No ha sido posible precisar el espesor exacto de esta formación, debido al intenso fallamiento y la cubierta reciente que dificulta la observación de estas unidades, pero se estima que supera los 4 000 m de potencia.

El piso de la Formación Río Grande es un conglomerado basal polimíctico con una acumulación lávica violácea de textura porfírica y de composición mayormente andesítica, en ciertos casos se presentan minerales de calcita y hematita dentro de estructuras amigdaloides; sigue una acumulación algo monótona compuesta principalmente de calizas gris - violáceas y areniscas calcáreas gris - verde en bancos medianos con abundantes restos de corales; suprayacen esta acumulación lutitas rojas en capas delgadas con un alternancia de flujos lávicos brechoides abigarrados con litoclastos predominantemente

afaníticos y hasta vítreos de tonos rosados y verdes, que suprayacen a la Formación Marcona.

#### **2.2.2.5. Formación Pisco (Ts-pi)**

Esta formación está constituida por secuencias sedimentarias consolidadas, compuesta 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 alternancia de areniscas tufáceas, concreciones de areniscas silíceas, tufos y cenizas retrabajadas, caracterizadas por ser livianas y frágiles, con tonalidades gris claro a gris blanquecino ligeramente anaranjado, presenta asimismo abundante fósiles y microfósiles como foraminíferos, gasterópodos, braquiópodos y lamalibranquios.

Esta unidad se presenta al noreste y este del Cerro Tres Hermanas, presenta como característica general una estratificación subhorizontal, ligeramente ondulada y con numerosas vetillas de yeso; en el área de San Juan tiene un espesor cercano a 500 m y su edad corresponde al Mioceno del Terciario Superior.

#### **2.2.2.6. Depósitos cuaternarios**

##### **a. Depósitos Cuaternarios – Terrazas Marinas (Q-tm)**

Estos depósitos se asocian a mesetas aisladas, debido a una intensa erosión fluvial posterior a su 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 constituido por capas de conglomerados con elementos heterogéneos dentro de una matriz arenácea, lentes de arenisca y areniscas bioclásticas caracterizados por presentar horizontes conchíferos. También contienen

algo de tufos redepositados y flujos de barro de material volcánico. Estas acumulaciones generalmente subhorizontales pertenecen al cuaternario pleistocénico.

#### **b. Depósitos Cuaternarios – Aluviales (Q-al)**

Los depósitos aluviales, se encuentran en forma muy localizada en el lecho de quebradas antiguas, están constituidos por mezclas de grava y arena, generalmente con cantos subredondeados a angulosos y matriz areno - limosa, lentes de arena sucia, lodolitas y materiales tufáceos en estado suelto a ligeramente consolidados, de naturaleza heterogénea y heterométrica. Estos depósitos pertenecen al Cuaternario Holoceno (reciente).

#### **c. Depósitos Cuaternarios – Eólicos (Q-e)**

Estos depósitos tapizan a las rocas en lomadas, pampas y laderas de los promontorios o macizos, están conformados por arenas y arenas limosas, en superficie se hallan con esporádicas gravas y algunos fragmentos de roca, este material se encuentra en estado suelto, seco, de espesor variable, esta unidad por lo diseminado que se encuentra en el área de estudio no ha sido cartografiada.

#### **2.2.2.7. Rocas intrusivas**

Esta unidad denominada el batolito de San Nicolás se ha emplazado en la Cordillera de la Costa, intruyendo a las rocas del Complejo Basal de la Costa y formaciones pre- mesozoicas. Está constituida por cuerpos irregulares de las rocas intrusivas de la serie adamelitas en la parte central, granodiorita en la parte intermedia y diorita - gabros en la parte marginal, de textura porfírica, de grano grueso a medio, se encuentran meteorizados y fracturados, de coloración gris marrón y en estado fresco de color grisáceo.

En esta unidad aflora masivamente al norte de las lomas de Marcona, entre la pampa Choclón y la Mina Marcona, así como en las cercanías de Bella Esperanza, en la zona de San Juan de Marcona en las proximidades de las bahías San Nicolás y San Juan.

Las adamelitas de San Nicolás (Pi-adsn) son rocas de grano grueso, algo porfiríticas de tonalidades gris rosados, se encuentran con mayor propagación entre la bahía de San Nicolás y la Mina Marcona, aflora a lo largo del tramo noreste. Una vista de este tipo de rocas se presenta en la Figura N° 2. 5.

Las granodioritas (Pi-gdsn) son rocas de grano grueso, mesócratas, gris verdoso, caracterizados por presentar cristales tabulares de hornblenda verde, con ligera orientación, dando una disposición radial.

La edad del emplazamiento del batolito de San Nicolás, de acuerdo a datos radiométricos y su relación con la estratigrafía del área de estudio, corresponde al Ordovícico - Silúrico del Paleozoico Inferior.



**Figura N° 2. 5:** Rocas intrusivas (Adamelita) del Batolito de San Nicolás.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 2.2.3. Tectónica

El área de estudio y su entorno ha sido moderadamente deformada por la tectónica, estas deformaciones corresponden a fallamientos cuyos alineamientos tienen la orientación andina. Todas las fallas principales están acompañadas por diaclasas y fracturas cuyas orientaciones no son preferenciales, de igual modo sus espaciamentos, persistencias y rellenos son muy variables. Se estima que las unidades geológicas han sido afectadas por estos fallamientos. Estas estructuras se encuentran hacia el sur de la península San Juan.

## 2.3 Marco geológico local

### 2.3.1. Morfología local

Las principales unidades morfológicas locales ubicadas en las Minas 2-3-4 y sus alrededores, son típicas de zonas litorales desérticas, donde se pueden encontrar: colina, lomada, ladera, terraza marina y plataforma de abrasión.

En la evaluación geológica local, se detallan las principales unidades morfológicas locales dentro del área de la mina. A continuación se describen las unidades morfológicas reconocidas en campo, en la zona de las Minas 2-3-4 y sus alrededores:

#### 2.3.1.1. Colina

Esta unidad morfológica menor se encuentra ubicada en la zona NE y NW de la unidad minera, presenta un relieve topográfico superficial ligeramente accidentado con pendientes moderadamente pronunciadas en sus laderas; corresponden a afloramientos rocosos constituidos por rocas sedimentarias y volcánicas; se encuentran intemperizados, ligeramente rugosos y cubiertos por material cuaternario. Ver Figura N° 2. 6.



**Figura N° 2. 6:** Vista de colina, afloramiento rocoso, área cercana a San Nicolás  
(Fuente: Elaboración propia)

### 2.3.1.2. Lomada

Corresponde a una unidad morfológica menor, donde el relieve topográfico superficial del área es subhorizontal con pendientes bajas que van entre los  $08^{\circ}$  y  $12^{\circ}$  de inclinación en sus extremos laterales, sus pendientes son medias y van entre  $21^{\circ}$  y  $30^{\circ}$ ; en superficie está representada por una cobertura eólica, constituida por arena limosa con gravas en forma aislada, seco, no plástico, de compacidad suelta a media, de color pardo. En sectores aislados (alrededores de la parte alta de la faja) existen áreas cubiertas por arena gravosa de espesor moderado, que cubren el basamento rocoso. Ver Figura N° 2. 7.



**Figura N° 2. 7:** Vista de lomada.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 2.3.1.3. Ladera

Esta unidad morfológica menor está localizada en los flancos salientes de las colinas y lomadas; presenta un relieve moderadamente accidentado, con una pendiente media que varía entre  $15^{\circ}$  y  $50^{\circ}$ ; se encuentra estable y en buena proporción, posee cobertura de suelo constituida por grava arenosa, de compacidad suelta, a su vez esta se encuentra cubierta por depósitos eólicos.

### 2.3.1.4. Terraza marina

Esta unidad morfológica se encuentra ubicado al margen occidental de donde se encuentra la unidad minera, estas terrazas se han originado a partir de las variaciones del nivel del mar a lo largo del tiempo. En el área de estudio, estas

variaciones se dieron en el cuaternario, alcanzando un descenso de hasta 450 m. El constante ataque de las olas, origina terrazas marinas erosivas. Ver Figura N° 2. 8.



**Figura N° 2. 8:** Vista de terrazas marinas; ubicadas al occidente de las minas  
(Fuente: Elaboración propia)

#### **2.3.1.5. Plataforma de abrasión**

Es una antigua terraza marina de gran extensión, donde se ubican las minas 2-3-4. 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 colinas y lomas paralelas a la línea de costa (paleocosta). En la zona de estudio se encuentra cubierta por depósitos clásticos de tipo eólico retrabajados y material volcánico que aflora por la constante erosión.

#### **2.3.2. Litoestratigrafía local**

El cartografiado geológico local realizado en las Minas 2-3-4, se ha realizado a escala 1:5000; fueron correlacionados con información bibliográfica y mapas geológicos editados por INGEMMET (1998) y Chen (2010). Así mismo, se ha considerado como información base el mapeo de las zonas de mineralización.

El mapeo geológico local realizado en las minas se ilustra en el plano GE-003-01: Mapa Geológico Local del Anexo I, donde solo presenta las unidades del basamento rocoso, mientras que las zonas de alteración (tipos de

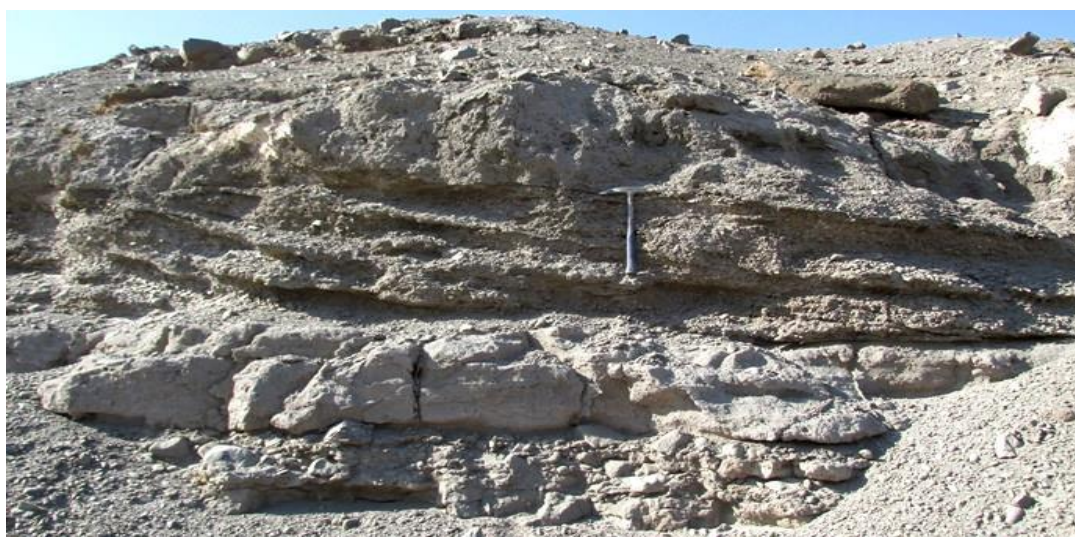


mineralización), se han generalizado, debido a que el objetivo del estudio es desarrollar el análisis de estabilidad física y no un mapeo mineralógico. Las secciones geológicas representativas de las Minas 2-3-4 se presentan en los planos GE-003-02: Sección Geológica Mina 2-4 y GE-003-03: Sección Geológica Mina 3 del Anexo I. Así mismo, las descripciones de las zonas de mineralización se desarrollan en el ítem 2.3: Geología Económica.

A continuación se describen las unidades litológicas cartografiadas en el área de estudio:

### 2.3.2.1. Depósitos conglomerados (Cgl)

Estos depósitos se registran en las partes altas de las Minas 2-3-4, formando una ligera cobertura. Presentan estratificación cruzada (depósitos marinos), con potencias que van de 0.8 m hasta los 10.0 m (Mina) de potencia, está conformado por gravas arenosas con algo de limo, compactas, de color gris, cementado, con niveles de yeso y sal. Los cantos son heterométricos, con tamaños que van desde 2" hasta 15", no presentan dirección e inclinación subhorizontal. Ver Figura N° 2. 9.



**Figura N° 2. 9:** Depósitos conglomerádicos, que presentan estratificación cruzada  
(Fuente: Elaboración propia)

### 2.3.2.2. Roca Hornfels (Hfs)

Esta unidad la constituye la roca encajonante de las Minas 2-3-4. Denominada hornfels filítico por Atchley (1956), constituida por una roca metasedimentaria,

de color gris verdosa a parduzca, de textura clástica de alta resistencia, moderadamente fracturada, con incrustaciones de cuarzo y material clástico. Presenta en algunos sectores biotitas, sericita y clorita.

Las fracturas de este afloramiento presentan buena persistencia, con rugosidad moderada a fuerte, cuyos planos de fracturas son ondulantes, para mejor detalle ver Figura N° 2. 10. Contienen en las partes inferiores capas delgadas de argilitas de color gris marrón, cruzados por fracturas de contenido esquistoso, reconociendo una muestra de cataclástica.



**Figura N° 2. 10:** Metasedimentos (Hornfels) moderadamente fracturados  
(Fuente: Elaboración propia)

### **2.3.2.3. Diques volcánicos (andesitas/dacitas)**

Estos materiales volcánicos se presentan en el área de estudio como intrusión de diques andesíticos y dacíticos porfiríticos, que forman estructuras tipo sills y enjambres de diques.

Los diques andesíticos se presentan como estructuras tabulares de potencia variable que van de pocos metros hasta alcanzar los 10 m en algunos sectores, así mismo estos diques se vuelven más potentes a medida que profundizan. Son de color verde grisáceo, moderadamente fracturados y de resistencia media a alta.

Los diques de dacita son considerados portadores de las soluciones mineralizantes, están constituidos por dacita porfirítica de coloración verde -

rosácea, asociada espacialmente a los cuerpos minerales en forma de sills o puntones. Una vista de este tipo de rocas se presenta en la Figura N° 2. 11.



**Figura N° 2. 11:** Contacto roca – mineral.

(Fuente: Chen (2010)).

(A) Contacto entre magnetita y cuerpos de dacita porfírica en la mina 3. (B) Metasedimentos conformados por hornfels (Formación Marcona) en contacto con dacitas.

#### 2.3.2.4. Depósitos Cuaternarios

##### a. Depósitos eólicos (Q-e)

Estos depósitos están conformados por acumulaciones de arena suelta en forma de montículos y mantos delgados. Estos materiales se observan en los alrededores de las minas, cuya superficie no se ha trabajado o modificado (Ver Figura N° 2. 12). Estos depósitos están constituidos por arenas y arenas limosas con gravas esporádicas y algunos fragmentos de roca, este material se encuentra en estado suelto y seco.



**Figura N° 2. 12:** Vista de depósitos eólicos, alrededores de la mina 4  
(Fuente: Elaboración propia)

#### **b. Depósitos antrópicos (Q-ant)**

Estos depósitos, están conformados por materiales recientes que han sido removidos producto de la acción del hombre, es decir que han sido desplazados y depositados en el proceso de explotación de las minas. Se dividen en materiales antrópicos de relleno, ubicados en las rampas y accesos para el transporte vehicular.

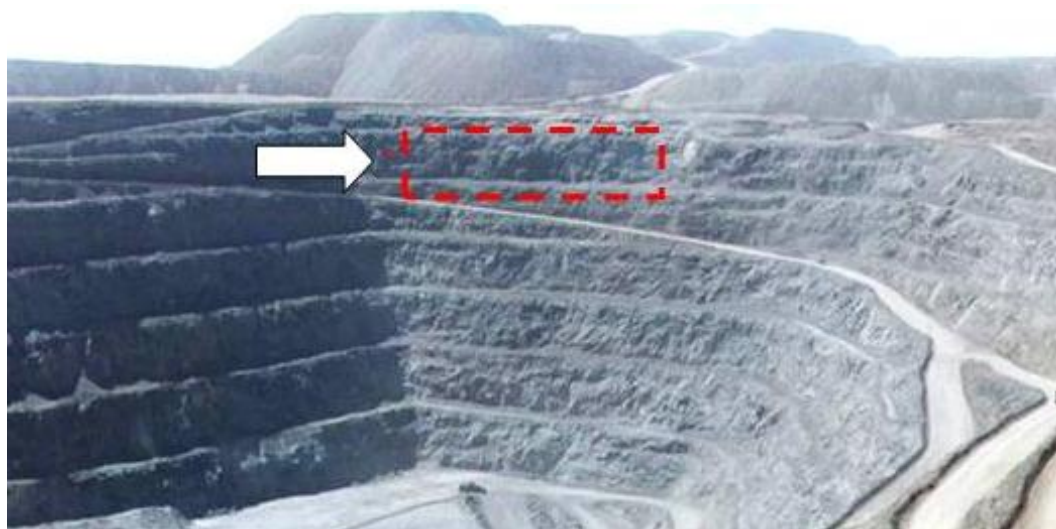
El segundo tipo lo conforman los materiales de desmonte o botaderos de mina, provenientes principalmente de la excavación de los diferentes tajos, constituidos principalmente por hornfels y rocas volcánicas. Ver Figura N° 2. 13.



**Figura N° 2. 13-** Vista de depósitos antrópicos, alrededores de la mina.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 2.3.2.5. Roca intrusiva - gabrodiorita

En el flanco este de la Mina 4, se ha identificado un pequeño cuerpo ígneo, conformado por gabrodiorita, de coloración gris rojizo, textura fanerítica, con ligera propilitización. El cuerpo intrusivo se presenta masivo, moderadamente fracturado y poco alterado. Una vista panorámica de este tipo de roca se aprecia en la Figura N° 2. 14.



**Figura N° 2. 14:** Flanco Este de la mina 4, cuerpo ígneo – gabrodiorita.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 2.3.3. Marco estructural

#### 2.3.3.1. Geología estructural asociada a la mineralización

Las unidades rocosas expuestas en las Minas 2-3-4, presentan paquetes volcánicos - sedimentarios. Estos materiales muestran una historia de deformación prolongada que incluye una etapa de plegamiento bajo en el borde sureste de toda la unidad minera.

El arreglo estructural de las Minas 2-3-4, consiste en cuerpos estratoligados de rumbo E-O a NE-SO y buzamiento entre 35° y 65° NO, a grandes rasgos, es concordante con los estratos circundantes. Todas las características estructurales de las Minas 2-3-4 se presentan en los Planos GE-003-04: Mapa Geológico Estructural Mina 2-3 y GE-003-05: Mapa Geológico Estructural Mina 4 del Anexo I.

### 2.3.3.2. Fallas

Una falla es una estructura geológica originada por las fuertes deformaciones del macizo rocoso causada por la orogénesis andina y los fenómenos subsiguientes de emplazamiento de minerales.

Por otro lado, a través del mapeo geológico realizado a lo largo de los bancos y taludes, se observa que las rocas del Yacimiento Marcona están dominados por fallas mayores que las cortan de manera transversal. Estas fallas son: falla Pista con rumbo N 65° W e inclinaciones de 45° a 60° NE y de 70° a 74° SW, falla repetición con rumbo N 45°E con inclinación de 35° a 65° SW y la falla La Huaca con rumbo de N25°W, con inclinaciones de 55° a 60° NE y de 77° a 80° SW. Estas discontinuidades mayores están acompañadas por diaclasas y fracturas, cuyas orientaciones se presentan de manera paralela a dichos planos principales de falla.

En la Mina 4, se observan tres arreglos estructurales, el primer arreglo de fallas normales con una componente dextral, dominada por la falla Huaca, con una dirección de orientación NNW-SSE. De manera local se presentan gravens a semi - gravens, activados por las fallas anteriormente mencionadas, que son las principales causantes de las caídas de rocas y deslizamientos en la Mina 4.

El segundo arreglo estructural está conformado por fallas con orientación NW-SE, de tipo normal con una ligera componente dextral, es decir poco desplazamiento secundario, asociada este último arreglo a la falla Pista.

El tercer arreglo está conformado por fallas cuyas orientaciones son NE-SW, dominadas por la falla Repetición. Aunque son menos abundantes, los sistemas de fracturamiento asociados a dicha falla son concluyentes para evidenciar la presencia de la falla Repetición.

### 2.3.3.3. Fracturas y Diaclasas

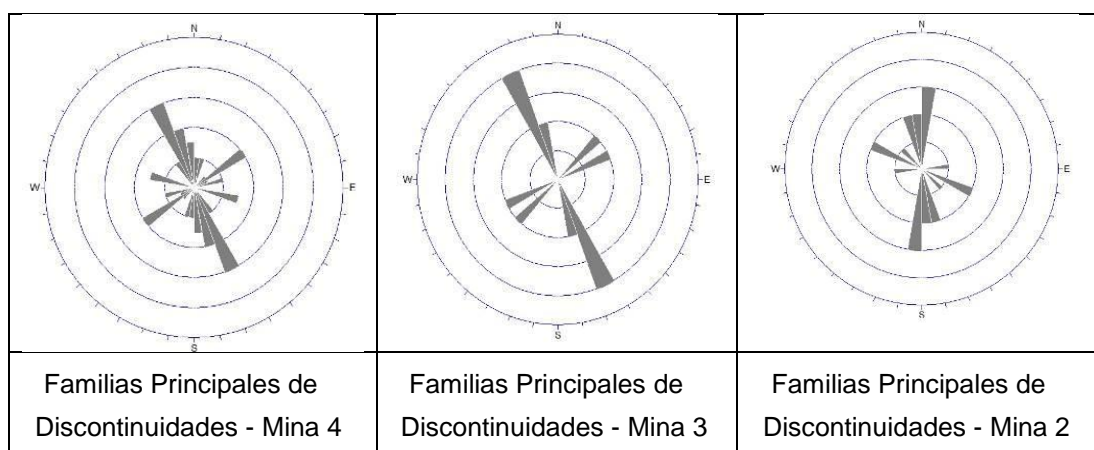
Las estructuras geológicas menores fueron mapeadas en todos los afloramientos de los bancos y taludes de las Minas 2-3-4.

Estas estructuras primarias, están ligadas a la deformación general de la zona, es decir a los sistemas de falla principales.

Se analizó los datos de dirección de buzamiento y buzamiento de las discontinuidades, tomados en los taludes, con el software Dips v 6.0 (Rocscience, 2012).

Se determinó la orientación de los principales sistemas de discontinuidades aplicando la metodología de la proyección estereográfica. En el diagrama de concentración de polos se delimitó las principales concentraciones de polos con un rango de contorno porcentual máximo del 5% del total de datos, lo que ha permitido obtener finalmente la orientación de los sistemas de fracturas dominantes. Dando como resultado tres principales sistemas de fracturas (ver Figura N° 2. 15) con los siguientes rangos de orientaciones:

- En la Mina 4, se observa una familia principal cuya orientación va de WNW-ESE a NW-SE, y una segunda familia con orientación NNE-SSW. Asociadas a las Fallas Huaca y Repetición.
- En la Mina 3, se observa una familia principal cuya orientación va de NNW-SSE a NW-SE, y una segunda familia con orientación ENE-WSW. Asociadas a las Fallas Huaca y Repetición.
- Para la Mina 2, se observa una familia principal cuya orientación va de N-S a NW-SE, y una segunda familia con orientación WNW-ESE. Asociadas a las Fallas Huaca y Pista.



**Figura N° 2. 15:** Principales dominios estructurales de la Mina 2-3-4.

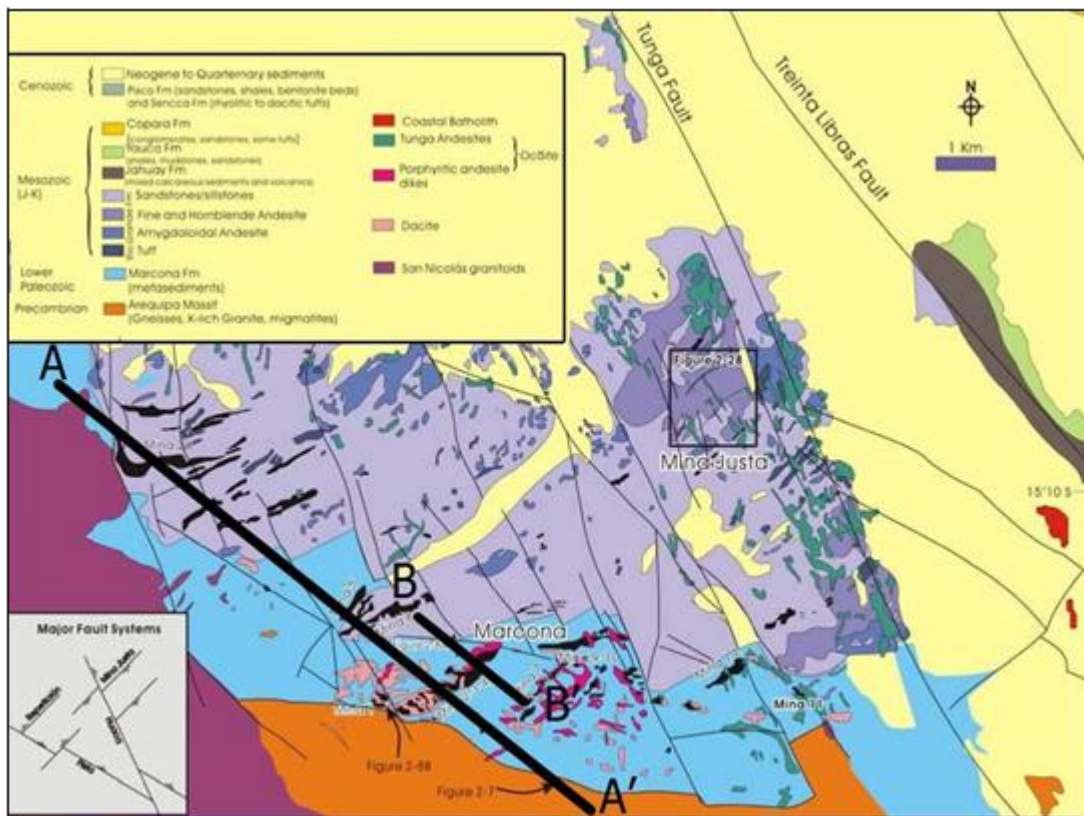
(Fuente: Elaboración propia)

### 2.4 Geología económica

La mineralización consiste en cuerpos estratoligados de rumbo E-O a NE-SO y buzamiento entre 35° y 65° NO, a grandes rasgos, es concordante con los estratos circundantes.

En la Formación Marcona, se presentan cuerpos de mineral de hierro y, como subproductos se tiene cobre, plata y oro. La principal mena de hierro consiste en magnetita.

Los cuerpos siguen dos horizontes estratigráficos paralelos. El horizonte Egrid de 150 m a 2 m de ancho, el horizonte Mina 7 de menor potencia. En la Formación Río Grande los cuerpos de hierro están restringidos a la sección inferior de dicha formación, se presentan también como disseminaciones y en stockwork con contenido de cobre con magnetita y specularita, la ley alcanza hasta 50% de hierro.



**Figura N° 2. 16:** Geología de los alrededores de la zona de estudio (Fuente: Elaboración propia)

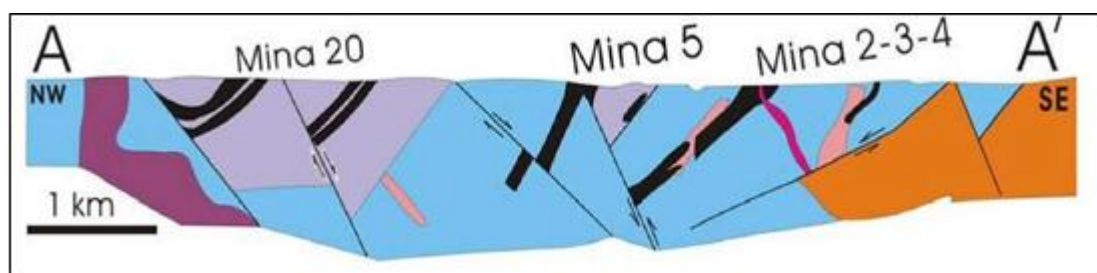


### 2.4.1. Zonas de alteración mineral

Se realizó recopilación bibliográfica para conocer los diferentes procesos de mineralización presentes. Esta información complementaria muestra tres principales conjuntos de alteraciones en el yacimiento Marcona:

- Potásica: K-feldespato +/- albita – especularita – clorita - calcita; como reemplazo generalizado y vetillas menores.
- Fe-Mg: Actinolita +/- magnetita - apatito; como reemplazo y actinolita secundaria +/- apatito en venilla rellena.
- Fe-Óxido: como reemplazo de magnetita semi masiva de grano fino a masiva.

La magnetita en forma de cuerpo es un evento temprano y es anterior al evento principal de cobre. La mineralización está especialmente asociada con una mayor actinolita y la alteración de magnetita. Para mayor detalle se presenta la sección geológica en la Figura N° 2. 17.



**Figura N° 2. 17:** Sección geológica de la zona de estudio.  
(Fuente: Hawkes (2002))

### 2.4.2. Paragénesis y zoneamiento

La secuencia paragenética está representada por la formación inicial de los calcosilicatos de temperatura alta como el dióxido, cordierita y hornablenda en la Formación Marcona; y actinolita, epidota en la formación Río Grande. Luego se formó actinolita y tremolita con magnetita en grandes cantidades. Al final, la formación de sulfuros (pirita, pirrotita y calcopirita). Los minerales como esfena, rutilo, clorita, calcita se formaron durante todo el proceso de mineralización.

De acuerdo al proceso de oxidación de la pirita, se ha llegado a la conclusión de que las zonas de un cuerpo de mineral de la Formación Marcona son los que se presentan en la Tabla N° 2. 1, Tabla N° 2. 2 y Tabla N° 2. 3.

**Tabla N° 2. 1:** Zonas de mineralización y sus principales características

Zona		Características	Potencia (m)
Zona de Lixiviación		Hematita y martita (masivas y porosas), áreas limoníticas fracturadas, magnetita densa. Yeso en vetillas, brochantita, crisocola. Sericita, clorita, goethita, cuarzo.	25 - 40
Zona de transición	Zona superior	Hematita - martita, vetillas de jarosita, sulfatos (jarosita, botyrogen) venillas de yeso y anhidrita.	12
	Zona inferior	Martitización, hematita y magnetita. Pirita fresca, jarosita, yeso	27
Zona de Sulfuros Primarios		Hierro (magnetita), actinolita verdosa, pirita diseminada, escasa bornita, carbonatos diseminados, calcita y yeso.	?

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 2. 2:** Resumen de los tipos de minerales

Mineral	% Fe (cabeza)	% S (cabeza)	% FeO (cabeza)
Oxidado (MO,OX)	>50%	<1%	<15%
Transicional (MT,TO)	>50%	>1%	<15%
Primario (MP,PO)	>50%	>1%	>15%

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 2. 3:** Resumen de los tipos de mineral primario (MP-O-PO)

Mineral Primario		% S (Malla-10) Concentrado	%Fe S (Malla-100) Concentrado
De Molienda Gruesa	CG MMG	<0.8%	<0.2%
De Molienda Fina Normal	FG MFN	>0.8%	<0.2%
De Molienda Fina Refractada	FGR MFR	>0.8%	>0.2%

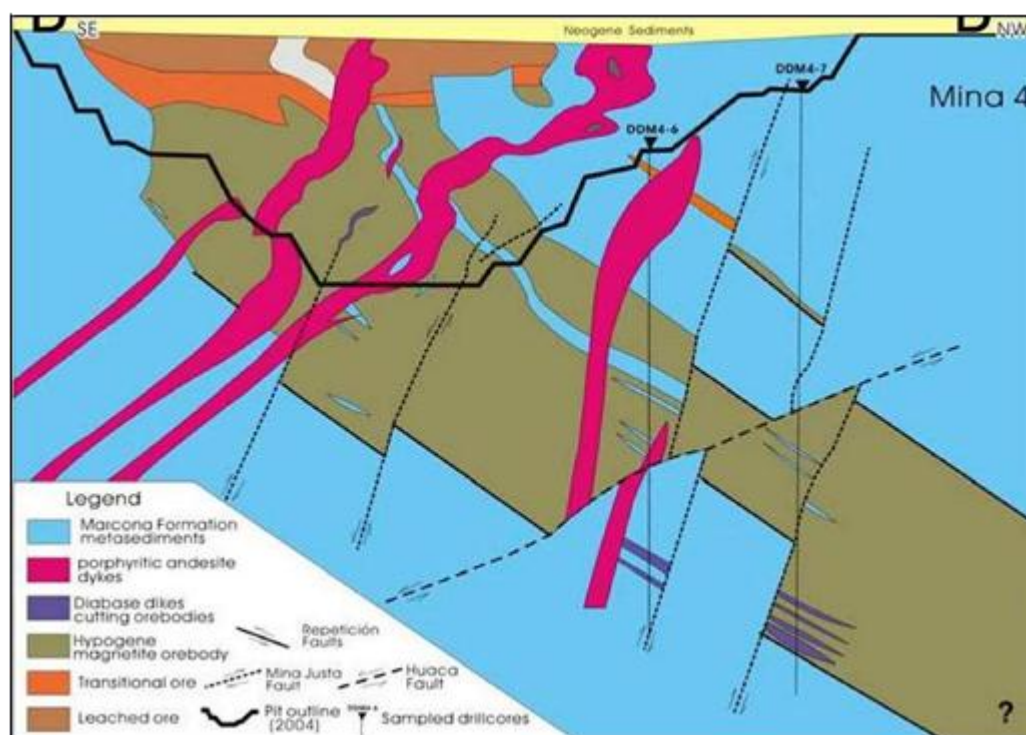
Fuente: Elaboración propia.

### 2.4.3. Génesis

La fuente de las soluciones mineralizantes ha sido el batolito granodiorítico, en el cual la dacita porfirítica, se separó durante la cristalización, estos cuerpos evidentemente llevaron soluciones de hierro a las rocas encajonantes, dolomita y sedimentos calcáreos ambos del Paleozoico, se transformaron

metasomáticamente, el cual ha sido progresivo formando grandes bolsones de magnetita y pequeñas cantidades de otros sulfuros.

Las rocas están muy metamorfizadas por la proximidad del stock granodiorítico, considerando así, que la mineralización ha reemplazado metasomáticamente a la roca sedimentaria, según lo cual se expone los siguientes criterios: desigual diseminación de magnetita, en el caso de capas que habrían sido reemplazadas en forma más completa o incompletamente debido a facies más o menos calcáreas según la composición original (ver Figura N° 2. 18). Y el segundo criterio es las alternancias e inter - estratificaciones concordantes de capas de hematita y magnetita con estratos sedimentarios.



**Figura N° 2. 18:** Sección geológica del cuerpo mineralizado en la Mina 4.  
(Fuente: Chen (2010))

## 2.5 Identificación de zonas de riesgo

En el área de estudio, se han producido procesos geodinámicos externos, como es el caso de deslizamientos de detritos y caída de fragmentos de roca en los taludes rocosos de las Minas 2-3-4, asimismo existen varias zonas de agrietamiento en los bancos.

De acuerdo a los análisis efectuados, estos procesos no ponen en riesgo la estabilidad física de los taludes de las Minas 2-3-4.

### **2.5.1. Análisis de riesgos geotécnicos**

Los riesgos son combinaciones de la probabilidad de que ocurran sucesos no deseados y la gravedad de las consecuencias en caso de que esos sucesos ocurriesen (Johnson, 1998). La cuestión clave está en decidir el tipo y el nivel de riesgo que estamos dispuestos a admitir en contrapartida a los beneficios que supone la actividad minera.

Para evaluar los peligros geológicos identificados en campo, se ha elaborado una matriz de riesgos con el fin de evaluar la severidad de estos fallos. El efecto de un fallo lleva generalmente un costo asociado, el cual será la pérdida de producción debido a una paralización de las actividades mineras.

Una vez estimada la severidad de los diferentes fallos, se procede a estimar su frecuencia, la cual se clasifica de acuerdo a cuatro índices: frecuente, ocasional, imposible y raro.

Cruzando las matrices severidad y frecuencia, se obtiene una matriz de clases de riesgo (ver Figura N° 2. 19) con tres categorías, desde riesgo menor a riesgo catastrófico.

Se ha tenido en consideración que el objetivo no es otro más, que la determinación del riesgo. Este riesgo será cuantificado individualmente para cada una de las zonas de riesgo identificadas en campo. La ubicación de estas zonas de riesgo se presenta en el Plano GE-004-01: Mapa de Ubicación de peligros geológicos, del Anexo I.

		INDICE DE SEVERIDAD DE LA CONSECUENCIA			
Categoria		1. Menor	2. Moderado	3. Serio	4. Catastrófico
Pérdida de Producción		2-4 Semanas	1-3 Meses	3-6 Meses	> 6 Meses
FRECUCENCIA					
Indice	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 N° 2. 19:** Caracterización y clasificación de los riesgos.  
(Fuente: Elaboración propia)

A continuación, se describen los principales tipos de peligros geológicos - geodinámicos encontrados en la zona de las Minas 2-3-4.

### 2.5.2. Principales peligros geológicos

Los principales peligros geológicos que se han identificado en el área de estudio son los siguientes:

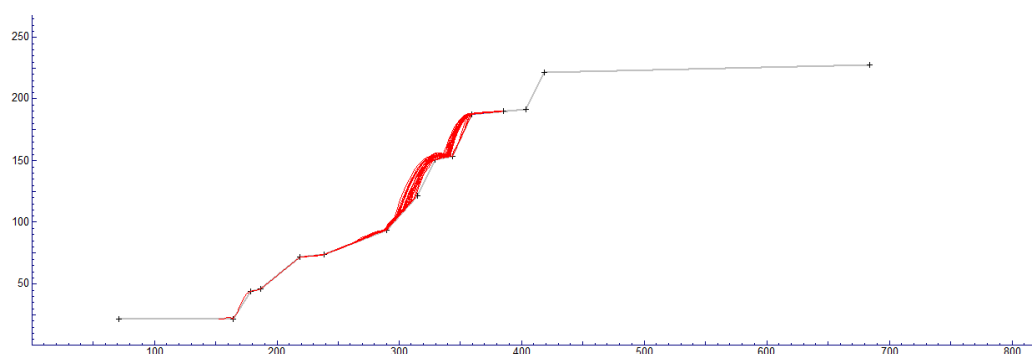
- **Caída de rocas**

Se ha identificado este fenómeno en las paredes de los taludes de las Minas 2-3-4, ya que se encuentran fracturados y muy diaclasados. El fenómeno de caída de rocas está asociado a la orientación desfavorable de los planos de fracturas que generan fallas por cuña principalmente y fallas planares, esta última de poca ocurrencia.

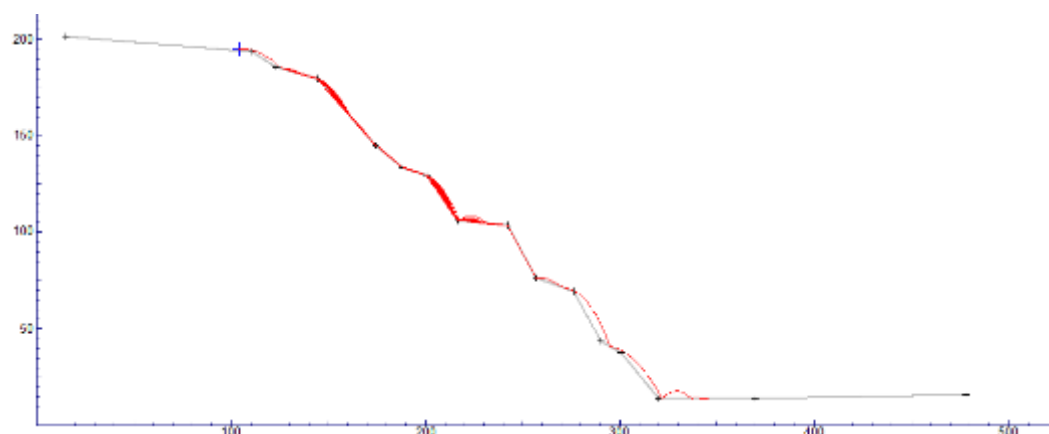
Se mapearon 72 zonas de caída de roca, mostrando en su mayoría niveles de riesgo bajo, algunos de riesgo moderado y solo un evento de riesgo alto. Este último puede generar una pérdida de proceso en caso de activarse nuevamente (ver Tabla N° 2. 4).

De manera general, estas caídas de bloques de roca no implican un riesgo mayor, ya que en campo los taludes muestran una estabilidad adecuada, y solamente por el proceso de voladura se podría generar caída de bloques aislados.

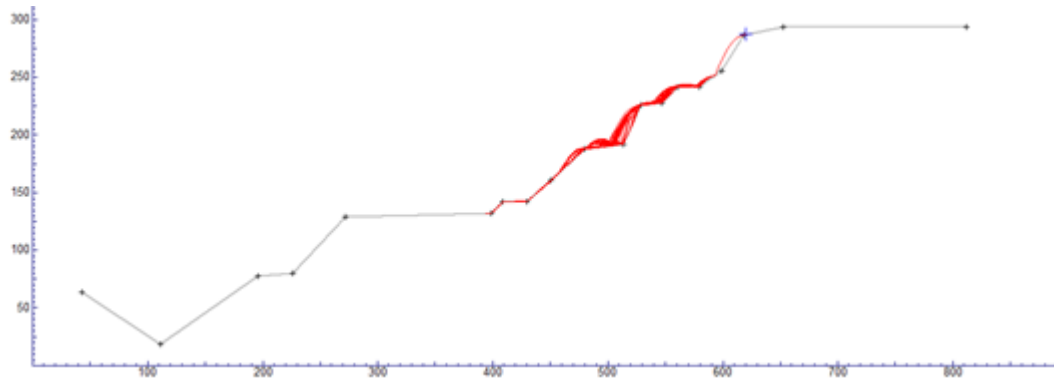
Se realizó el modelamiento de caída de rocas en los taludes de las Minas 2-3-4 utilizando el programa Rockfall de Rocscience, con la finalidad de verificar si la caída de bloques rocosos podría causar problemas de colmatación de las bermas de los taludes. Desde la Figura N° 2. 20 a la Figura N° 2. 25 se presentan los resultados de estas evaluaciones:



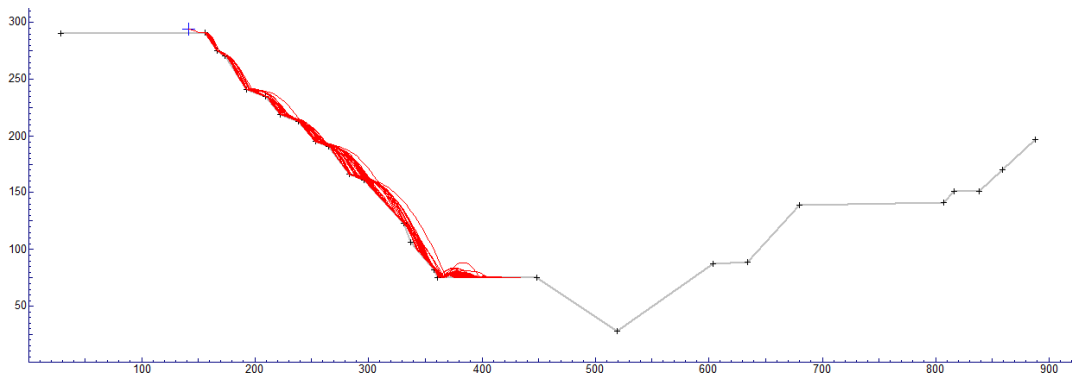
**Figura N° 2. 20:** Análisis de caída de rocas de la Mina 2 – Talud Norte  
Fuente: Elaboración propia.



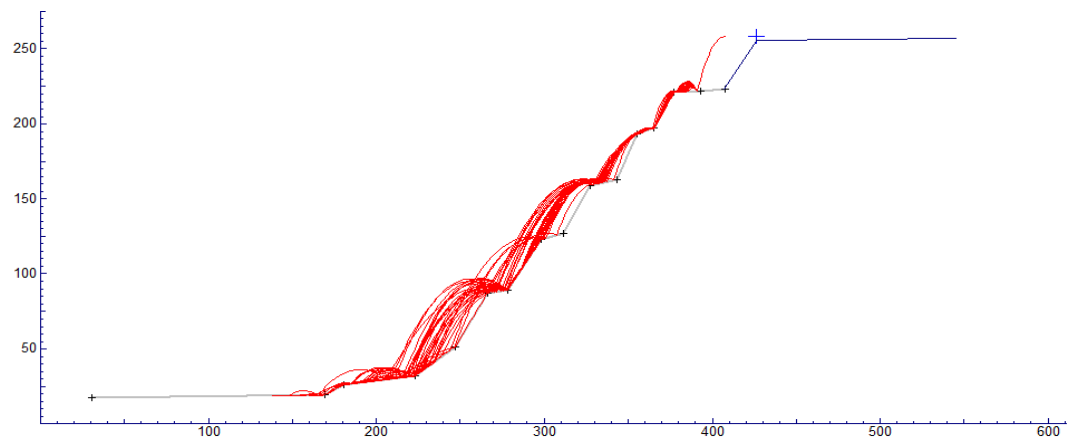
**Figura N° 2. 21:** Análisis de caída de rocas de la Mina 2 – Talud Sur  
Fuente: Elaboración propia.



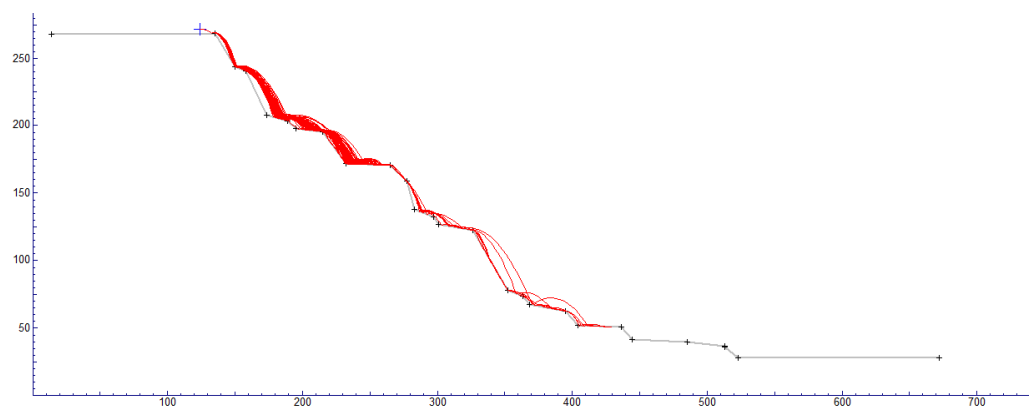
**Figura N° 2. 22:** Análisis de caída de rocas de la Mina 3 – Talud Norte  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 2. 23:** Análisis de caída de rocas de la Mina 3 – Talud Sur  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 2. 24:** Análisis de caída de rocas de la Mina 4 – Talud Norte  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 2. 25:** Análisis de caída de rocas de la Mina 4 – Talud Sur

Fuente: Elaboración propia.

### ▪ Deslizamientos

Los deslizamientos son volúmenes de material intemperizados, que se desprenden y se desplazan cuesta abajo como una sola unidad sobre un plano inclinado o sobre una superficie cóncava.

En el área de estudio, estos fenómenos se encuentran estrechamente ligados a los afloramientos de alteración mineral transicional (MT, TO) y mineral primario (MO, PO). Y son poco frecuentes en los afloramientos de metasedimentos (hornfels) y enjambres de diques, ya que presentan una resistencia elevada, caracterizada por una roca Tipo III.

Se identificaron 23 fenómenos de deslizamientos, cuya evaluación en la matriz de riesgo indicó como resultado que la totalidad de los dichos eventos tienen un riesgo bajo (ver Tabla N° 2. 4).

### ▪ Zona de grietas

En los bancos de algunos niveles se observaron cuatro zonas de agrietamiento, con una longitud de ruptura de hasta 8 m. Estos agrietamientos se caracterizan por presentar asentamiento y están directamente relacionados a los taludes inferiores, cuyos afloramientos presentan intenso fracturamiento y orientación favorable para formar fallas tipo cuña.



Según el análisis de matriz de riesgo elaborado se han caracterizado como riesgo intermedio o moderado (ver Tabla N° 2. 4).

En la Tabla N° 2. 4 se presenta la matriz de riesgos correspondiente a la estabilidad física de los taludes de las Minas 2-3-4. Los datos han sido tomados en campo en los diferentes frentes y niveles de dichos tajos.

**Tabla N° 2. 4:** Resumen del análisis de riesgos geotécnicos en la mina 2-3-4

Fenómeno* Geodinámico	Nivel de Riesgo			Cantidad Total Identificada
	Riesgo bajo	Riesgo moderado	Riesgo Extremo	
Caída de Rocas	61	10	1	72
Deslizamientos	23	-	-	23
Zonas de Agrietamiento	-	4	0	4

Fuente: Elaboración propia.

\*No incluye riesgos a gran escala.

De la Figura N° 2. 26 a Figura N° 2. 28 se presenta un registro de fotos que permite visualizar las zonas de peligros geológicos identificadas en campo. En el Anexo I se presenta el Plano GE-004-01: Plano de ubicación de peligros geológicos.



**Figura N° 2. 26:** Zona de agrietamiento GR-03, nivel de riesgo medio.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 2. 27:** Zona de deslizamiento DZ-5, nivel de riesgo bajo.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 2. 28:** Zona de caída de rocas CR-11, nivel de riesgo alto.  
Fuente: Elaboración propia.

### 2.5.3. Alternativas de solución

En la inspección de los taludes de las Minas 2-3-4, no se han identificado zonas de riesgo que requieran un estudio y/o evaluación más detallada, la magnitud de los eventos son relativamente pequeños con respecto al daño que producen. De acuerdo al análisis de riesgos geológicos, se recomienda:

- Para las zonas identificadas con nivel de riesgo bajo, se recomienda realizar el retiro y/o limpieza del material caído o deslizado.
- Para las zonas identificadas con nivel de riesgo moderado, se recomienda realizar el desquinche selectivo del material propenso a caerse y la limpieza del material caído, posteriormente verificar si la zona aún presenta riesgo potencial.
- También, para las zonas donde se ha identificado grietas se recomienda retirar los fragmentos de roca que están a punto de caer, con la finalidad de eliminar el riesgo potencial.
- Para la zona identificada con nivel de riesgo extremo (el cual se ubica en nivel 557 de la Mina 4 en la intersección de los taludes este y sur), como se trata de una zona de caídas de rocas y que afecta al banco inferior, obstruyendo el tránsito de los camiones gigantes, por lo que, se recomienda realizar el desquinche y eliminación del material caído. También, para esta zona se recomienda la inspección después de una voladura, con la finalidad de identificar fragmentos que están a punto de caer y hacer el desquinche respectivo.

## 2.6 Sismicidad

El Perú se localiza entre las regiones de más alta actividad sísmica que existe en la Tierra, por encontrarse 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 ambas placas es de unos 10 cm por año aproximadamente.

El área de estudio se encuentra en la Zona 3, correspondiéndole una sismicidad alta, de acuerdo al Mapa de Zonificación Sísmica del Perú.

Se debe tener en cuenta la actividad sísmica ocurrida en el pasado, ya que son datos importantes para la estimación de la amenaza sísmica. En la Tabla N° 2. 5 se presenta un resumen de los sismos más importantes registrados cerca de la zona de estudio.

**Tabla N° 2. 5:** Sismos de los últimos 500 años en el Sur – Oeste peruano

Fecha	Epicentro	Magnitud (Richter)	Intensidad (Mercalli)
1582	Cerca de Arequipa	S/D	X
1604	Cerca de Arequipa	S/D	VIII
1664	Cerca de Ica	S/D	X
1813	Cerca de Ica	S/D	VII
1868	Cerca de Moquegua	8.5	X
10/02/1716	Cerca de Pisco	S/D	IX
24/08/1942	Cerca de Nazca	8	IX
15/01/1958	Cerca de Arequipa	S/D	VII
15/01/1960	Cerca de Nazca	S/D	VII
12/11/1996	Cerca de Nazca	7.7	VII
23/06/2001	Cerca de Atico	8.4	VII
15/08/2007	Cerca de Pisco	7.9	VII

Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Materiales

Para realizar las investigaciones geológicas – geotécnicas en campo, se han empleado los siguientes materiales y equipos:

- Martillo de geólogo
- Brújula
- Esclerómetro (Martillo Schmidt)
- GPS
- Lápiz de dureza
- Wincha 50 m.
- Protactor
- Flexómetro de 7 m.
- Cámara fotográfica
- Formato de registro geomecánico (Skan Line).
- Equipo Sismógrafo Smartseis ST.

#### 3.2. Métodos

El trabajo de investigación se realiza mediante un análisis cuantitativo, que comprometen la estabilidad física del macizo rocoso, donde se ejecutarán una campaña de investigaciones en campo, que consiste en evaluación geológica (geología regional, local, estructural, geomorfología y geodinámica externa), evaluación geotécnica (mapeo geomecánico en superficie y ensayos de campo), evaluación geomecánica (caracterización de los macizos rocosos, zonificación geomecánica) y ensayos geofísicos, ensayos de laboratorio (propiedades índice y de resistencia) y el análisis de estabilidad a nivel de bancos y a nivel global de los taludes del tajo. A continuación se detalla cada metodología:

### 3.2.1. Investigaciones Geotécnicas

Con la finalidad de caracterizar los macizos rocosos que conforman los taludes de los tajos de las minas en estudio, se establecieron estaciones geomecánicas, se ejecutaron ensayos con el martillo Schmidt en las discontinuidades principales, se tomó muestras representativas para ejecutar un programa de ensayos de laboratorio de mecánica de rocas y adicionalmente se realizaron ensayos geofísicos (refracción sísmica y MASW).

En el Anexo I, se presenta el plano GT-005-01: Plano de Ubicación de Investigaciones Geotécnicas, donde se presenta la ubicación de las estaciones geomecánicas, de las líneas sísmicas y de los ensayos MASW ejecutados.

En los siguientes ítems se desarrolla la descripción de cada una de las actividades ejecutadas durante la investigación geotécnica.

#### 3.2.1.1. Estaciones geomecánicas

Se establecieron 55 estaciones geomecánicas (utilizando el mapeo de líneas de detalle) distribuidas convenientemente en la mina 2-3-4, registrando para cada discontinuidad la dirección de buzamiento, buzamiento, espaciamiento, persistencia, separación, rugosidad, meteorización y presencia de agua. Se tomó muestras representativas de roca, las cuales fueron identificadas y embaladas para ser remitidas al laboratorio.

De la Tabla N° 3. 1 a Tabla N° 3. 3 se presenta un resumen de las estaciones geomecánicas ubicadas en cada mina.

**Tabla N° 3. 1:** Resumen de las estaciones geomecánicas ubicadas en la Mina 2

Estación	Coordenadas UTM (PSAD 56)		Long. (m)	Nivel (msnm)	Litología
	Inicio	Fin			
EG-1	487 440 E, 8 318 879 N	487 426 E, 8 318 927 N	50	593	Magnetita
EG-2	487 466 E, 8 318 964 N	487 507 E, 8 318 993 N	50	593	Magnetita
EG-3	487 521 E, 8 318 887 N	487 559 E, 8 318 919 N	50	605	Magnetita
EG-4	487 623 E, 8 318 959 N	487 672 E, 8 318 965 N	50	605	Magnetita
EG-5	487 423 E, 8 318 832 N	487 431 E, 8 318 826 N	10	605	Magnetita
EG-6	487 345 E, 8 318 962 N	487 340 E, 8 318 992 N	30	653	Hematita - Martita
EG-7	487 346 E, 8 319 003 N	487 372 E, 8 319 046 N	50	653	Hematita - Martita
EG-8	487 395 E, 8 319 067 N	487 439 E, 8 319 091 N	50	653	Hematita - Martita
EG-9	487 871 E, 8 318 927 N	487 901 E, 8 318 928 N	30	653	Hornfels filítico

Estación	Coordenadas UTM (PSAD 56)		Long. (m)	Nivel (msnm)	Litología
	Inicio	Fin			
EG-10	487 639 E, 8 318 884 N	487 686 E, 8 318 900 N	50	670	Magnetita
EG-11	487 526 E, 8 318 720 N	487 555 E, 8 318 761 N	50	670	Magnetita
EG-12	487 360 E, 8 318 716 N	487 384 E, 8 318 698 N	30	713	Magnetita
EG-13	487 301 E, 8 318 761 N	487 325 E, 8 318 742 N	30	713	Magnetita
EG-14	487 262 E, 8 318 788 N	487 251 E, 8 318 816 N	30	725	Hornfels filítico
EG-15	487 659 E, 8 319 227 N	487 705 E, 8 319 247 N	50	677	Hematita - Martita
EG-16	487 236 E, 8 318 981 N	487 258 E, 8 319 025 N	50	725	Hornfels filítico
EG-17	487 584 E, 8 319 258 N	487 611 E, 8 319 271 N	30	749	Hornfels filítico
EG-18	487 584 E, 8 319 032 N	487 629 E, 8 319 054 N	50	581	Magnetita

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 3. 2:** Resumen de las estaciones geomecánicas ubicadas en la Mina 3

Estación	Coordenadas UTM (PSAD 56)		Long. (m)	Nivel (msnm)	Litología
	Inicio	Fin			
EG-1	487 753 E, 8 319 349 N	487 751 E, 8 319 399 N	50	677	Hornfels filítico
EG-2	487 754 E, 8 319 411 N	487 792 E, 8 319 443 N	50	677	Hornfels filítico
EG-3	487 826 E, 8 319 469 N	487 869 E, 8 319 495 N	50	677	Hornfels filítico
EG-4	487 966 E, 8 318 931 N	488 016 E, 8 318 936 N	50	641	Hornfels filítico
EG-5	488 044 E, 8 318 804 N	488 091 E, 8 318 822 N	50	605	Hornfels filítico
EG-6	488 178 E, 8 318 893 N	488 222 E, 8 318 870 N	50	729	Hornfels filítico
EG-7	488 298 E, 8 318 932 N	488 336 E, 8 318 965 N	50	689	Hematita - Martita
EG-8	488 202 E, 8 319 089 N	488 242 E, 8 319 060 N	50	569	Hornfels filítico
EG-9	488 303 E, 8 319 145 N	488 331 E, 8 319 187 N	50	569	Hornfels filítico
EG-10	487 975 E, 8 319 533 N	488 053 E, 8 319 596 N	100	665	Hornfels filítico
EG-11	488 117 E, 8 319 608 N	488 167 E, 8 319 611 N	50	629	Hornfels filítico

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 3. 3:** Resumen de las estaciones geomecánicas ubicadas en la Mina 4

Estación	Coordenadas UTM (PSAD 56)		Long. (m)	Nivel (msnm)	Litología
	Inicio	Fin			
EG-1	488 512 E, 8 319 896 N	488 614 E, 8319 976 N	130	665	Hornfels filítico
EG-2	488 672 E, 8 319 988 N	488 760 E, 8320 034 N	100	665	Hornfels filítico
EG-3	488 963 E, 8 320 128 N	489 061 E, 8320 042 N	130	665	Gabrodiorita
EG-4	489 057 E, 8 319 497 N	489 084 E, 8319 538 N	50	665	Hornfels filítico
EG-5	488 753 E, 8 319 378 N	488 795 E, 8319 405 N	50	605	Hornfels filítico
EG-6	488 480 E, 8 319 332 N	488 526 E, 8319 351 N	50	617	Hematita - Martita
EG-7	488 481 E, 8 319 725 N	488 564 E, 8319 780 N	100	533	Magnetita
EG-8	488 876 E, 8 319 945 N	488 920 E, 8319 969 N	50	521	Magnetita
EG-9	488 824 E, 8 319 964 N	488 913 E, 8320 009 N	100	557	Hematita - Martita
EG-10	488 921 E, 8 320 013 N	488 946 E, 8320 030 N	30	557	Hornfels filítico
EG-11	488 964 E, 8 320 015 N	489 021 E, 8319 958 N	80	557	Hornfels filítico
EG-12	489 037 E, 8 319 933 N	489 060 E, 8319 900 N	40	557	Hornfels filítico
EG-13	489 039 E, 8 319 724 N	489 081 E, 8319 815 N	100	557	Hematita - Martita
EG-14	488 996 E, 8 319 663 N	489 021 E, 8319 707 N	50	557	Andesita

Estación	Coordenadas UTM (PSAD 56)		Long. (m)	Nivel (msnm)	Litología
	Inicio	Fin			
EG-15	488 780 E, 8 319 513 N	488 823 E, 8319 538 N	50	545	Hornfels filítico
EG-16	488 218 E, 8 319 828 N	488 268 E, 8319 837 N	50	761	Hornfels filítico
EG-17	489 180 E, 8 319 975 N	489 210 E, 8319 934 N	50	701	Hornfels filítico
EG-18	489 214 E, 8 319 755 N	489 174 E, 8319 642 N	120	701	Hornfels filítico
EG-19	489 062 E, 8 319 401 N	489 015 E, 8319 383 N	50	701	Hornfels filítico
EG-20	488 799 E, 8 319 250 N	488 845 E, 8319 289 N	60	701	Hornfels filítico
EG-21	488 434 E, 8 319 072 N	488 469 E, 8319 107 N	50	701	Hematita - Martita
EG-22	488 274 E, 8 319 072 N	488 294 E, 8319 840 N	20	749	Hornfels filítico
EG-23	488 301 E, 8 319 842 N	488 327 E, 8319 856 N	30	749	Hornfels filítico
EG-24	488 927 E, 8 320 181 N	488 953 E, 8320 197 N	30	701	Gabrodiorita
EG-25	489 018 E, 8 320 160 N	489 042 E, 8320 141 N	30	701	Gabrodiorita
EG-26	488 950 E, 8 319 974 N	488 988 E, 8319 941 N	50	521	Hornfels filítico

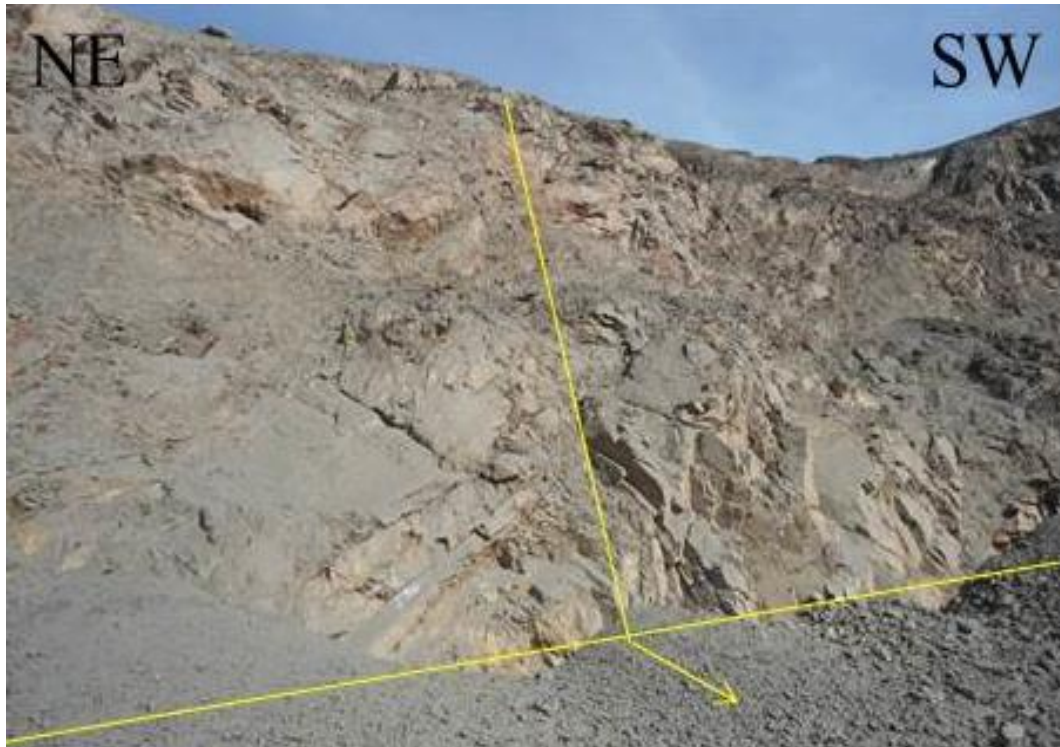
Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo A: Registros de Mapeo Geomecánico (formato utilizado en la mina 2-3-4), se presentan los registros de las mediciones obtenidas en las estaciones geomecánicas por el método de líneas de detalle. De la Figura N° 3. 1 a Figura N° 3. 3 se presenta imágenes representativas donde se realizaron estaciones geomecánicas en la Mina 2-3-4.



**Figura N° 3. 1:** Vista de la EG-8, Nivel 653 – Mina 2. (Fuente: Elaboración propia)





**Figura N° 3. 2:** Vista de la EG-7, Nivel 689 – Mina 3.  
(Fuente: Elaboración propia)



**Figura N° 3. 3:** Vista de la EG-23, Nivel 749 – Mina 4.  
(Fuente: Elaboración propia)

### 3.2.1.2. Ensayo con el martillo Schmidt

Con la finalidad de determinar los parámetros de resistencia de las discontinuidades se realizaron ensayos con el Martillo Schmidt en cada una de las discontinuidades identificadas en las estaciones geomecánicas. El procesamiento y resultados obtenidos de los ensayos con el Martillo Schmidt se presenta en el Anexo E: Parámetros de Resistencia de las Discontinuidades (una estación geomecánica por mina como modelo).

### 3.2.1.3. Ensayo de refracción sísmica

Los objetivos principales del ensayo de refracción sísmica son:

- 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.

#### 3.2.1.3.1. Equipo utilizado

El equipo Sismógrafo Smartseis ST, utilizado para realizar el trabajo de prospección sísmica posee un sistema de adquisición de datos que son almacenados y procesados por una computadora; las características técnicas del equipo se presentan en la Tabla N° 3. 4.

**Tabla N° 3. 4:** Características del sismógrafo

Características	Valor Nominal
Marca / Modelo / N° 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.

### **3.2.1.3.2. Método de ensayo**

El ensayo de refracción sísmica consiste en la medición de los tiempos de viaje de las ondas de compresión (primarias) generadas por el impacto de una comba sobre el disco metálico del equipo. Estos impactos son localizados a diferentes distancias a lo largo de un 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 correlacionados con la densidad de los estratos.

### **3.2.1.3.3. Trabajo de campo**

Para el ensayo de refracción sísmica se utilizó la estación portátil de prospección sísmica SMARTSEIS ST de 24 canales de registro, geófonos magnéticos y una computadora para almacenar datos.

Se realizaron ensayos en 20 líneas sísmicas de 100 m de longitud, con espaciamiento de 4 m entre geófonos y la generación de ondas fue producida por el impacto de una comba de 25 libras.

En la se presenta un resumen de los ensayos de refracción sísmica realizados en cada mina.

**Tabla N° 3. 5:** Resumen de ensayos de refracción sísmica – Minas 2-3-4

Línea	Coordenadas UTM (PSAD 56)		Longitud (m)	Ubicación
	Inicio	Fin		
LS-1	488 848 E, 8 319 925 N	488 942 E, 8 319 961 N	100	Mina 4 - Nivel 521
LS-2	488 484 E, 8 319 704 N	488 559 E, 8 319 770 N	100	Mina 4 - Nivel 533
LS-3	488 781 E, 8 319 530 N	488 860 E, 8 319 593 N	100	Mina 4 - Nivel 533
LS-4	487 599 E, 8 319 019 N	487 692 E, 8 319 053 N	100	Mina 2 - Nivel 581
LS-5	487 441 E, 8 318 900 N	487 507 E, 8 318 974 N	100	Mina 2 - Nivel 593
LS-6	488 338 E, 8 319 297 N	488 423 E, 8 319 351 N	100	Mina 4 - Nivel 569
LS-7	488 952 E, 8 319 605 N	489 005 E, 8 319 689 N	100	Mina 4 - Nivel 557
LS-8	488 669 E, 8 319 983 N	488 758 E, 8 320 029 N	100	Mina 4 - Nivel 665
LS-9	488 857 E, 8 320 079 N	488 948 E, 8 320 123 N	100	Mina 4 - Nivel 665
LS-10	488 978 E, 8 320 183 N	489 055 E, 8 320 120 N	100	Mina 4 - Nivel 701
LS-11	488 965 E, 8 319 366 N	489 054 E, 8 319 412 N	100	Mina 4 - Nivel 701
LS-12	488 022 E, 8 318 938 N	488 109 E, 8 318 987 N	100	Mina 3 - Nivel 641
LS-13	487 834 E, 8 319 241 N	487 858 E, 8 319 338 N	100	Mina 3 - Nivel 617
LS-14	487 830 E, 8 319 468 N	487 913 E, 8 319 523 N	100	Mina 3 - Nivel 677
LS-15	487 508 E, 8 319 216 N	487 598 E, 8 319 259 N	100	Mina 2 - Nivel 749
LS-16	487 269 E, 8 318 791 N	487 247 E, 8 318 889 N	100	Mina 2 - Nivel 713
LS-17	487 631 E, 8 318 888 N	487 728 E, 8 318 911 N	100	Mina 2 - Nivel 665
LS-18	489 073 E, 8 319 870 N	489 017 E, 8 319 953 N	100	Mina 4 - Nivel 557
LS-19	489 174 E, 8 319 661 N	489 210 E, 8 319 755 N	100	Mina 4 - Nivel 701
LS-20	488 518 E, 8 319 038 N	488 612 E, 8 319 072 N	100	Mina 4 - Nivel 773

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.2.1.3.4. Procesamiento e interpretación

La interpretación de los perfiles sísmicos se realizó mediante el grupo de programas PickWin y PlotRefra (SeisImager). El programa PickWin permite realizar las lecturas de los sismogramas y además permite obtener el tiempo de llegada de la primera onda (esto se realiza para los cinco shots o golpes).

El programa PlotRefra genera un modelo de profundidad a partir del archivo de datos de entrada producido por el programa PickWin, creando el gráfico de las dromocrónicas el cual permite distinguir el cambio de pendientes que vendría a representar el cambio de velocidad del suelo en estudio. Así mismo, el programa 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 caracterizar el material en función de la velocidad de propagación de la onda sísmica ( $V_p$ ), se ha recopilado tablas que correlacionan el valor de la velocidad con el tipo de material. En la Tabla N° 3. 6, Tabla N° 3. 7 y Tabla N° 3. 8 se presentan las principales correlaciones propuestas por diferentes autores.

**Tabla N° 3. 6:** Velocidades de ondas “P” en suelos y rocas

Tipo de Suelos	$V_p$ (m/s)
Suelos intemperizado	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 esquistosa	2750 – 4270
Tiza	1830 – 3960
Caliza	2130 – 6100
Granito	4575 – 5800
Roca metamórfica	3050 - 7000

Fuente: ASTM-D577-95.

**Tabla N° 3. 7:** Velocidades de ondas “P” en suelos y rocas según Hellberg

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

Fuente: Hellberg (1990).

**Tabla N° 3. 8:** Velocidades de ondas “P” en suelos y rocas según Curvich y Dobrin

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

Fuente: Curvich y Dobrin (1961).

En la Tabla N° 3. 9 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para cada una de las líneas sísmicas, teniendo en cuenta las correlaciones presentadas en las tablas anteriores y la descripción de la geología local de cada lugar donde se ejecutó el ensayo.

**Tabla N° 3. 9:** Resultado de los ensayos de refracción sísmica – Mina 2-3-4

Línea sísmica	Ubicación	Estrato	V <sub>P</sub> (m/s)	Profundidad Promedio (m)	Tipo de material
LS-1	Mina 4 Nivel 521	1	600	0.00 a 2.00	Cobertura densa
		2	1904	2.00 a 9.00	Roca muy fracturada
		3	4147	9.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-2	Mina 4 Nivel 533	1	541	0.00 a 2.00	Cobertura densa
		2	2788	2.00 a 9.00	Roca fracturada
		3	4066	9.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-3	Mina 4 Nivel 533	1	978	0.00 a 3.00	Cobertura muy densa
		2	2196	3.00 a 12.00	Roca fracturada
		3	3662	12.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-4	Mina 2 Nivel 581	1	786	0.00 a 2.00	Cobertura muy densa
		2	2088	2.00 a 12.00	Roca fracturada
		3	4465	12.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-5	Mina 2 Nivel 593	1	790	0.00 a 2.00	Cobertura muy densa
		2	2357	2.00 a 11.00	Roca fracturada
		3	4167	11.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-6	Mina 4 Nivel 569	1	660	0.00 a 2.00	Cobertura densa
		2	2016	2.00 a 11.00	Roca fracturada
		3	3687	11.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-7	Mina 4 Nivel 557	1	653	0.00 a 2.00	Cobertura densa
		2	2523	2.00 a 15.00	Roca fracturada
		3	5132	15.00 a 30.00	Roca sana
LS-8	Mina 4 Nivel 665	1	806	0.00 a 3.00	Cobertura muy densa
		2	1845	3.00 a 10.00	Roca muy fracturada
		3	3952	10.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-9	Mina 4 Nivel 665	1	408	0.00 a 2.00	Cobertura medianamente densa
		2	2013	2.00 a 15.00	Roca fracturada
		3	3887	15.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-10	Mina 4 Nivel 701	1	306	0.00 a 2.00	Cobertura suelta
		2	2482	2.00 a 12.00	Roca fracturada
		3	4235	12.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-11	Mina 4 Nivel 701	1	481	0.00 a 2.00	Cobertura medianamente densa
		2	2523	2.00 a 12.00	Roca fracturada
		3	3985	12.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-12	Mina 3 Nivel 641	1	847	0.00 a 2.00	Cobertura muy densa
		2	2452	2.00 a 14.00	Roca fracturada

Línea sísmica	Ubicación	Estrato	V <sub>P</sub> (m/s)	Profundidad Promedio (m)	Tipo de material
		3	4310	14.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-13	Mina 3 Nivel 617	1	585	0.00 a 2.00	Cobertura densa
		2	2069	2.00 a 9.00	Roca fracturada
		3	4094	9.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-14	Mina 3 Nivel 677	1	578	0.00 a 2.00	Cobertura densa
		2	2148	2.00 a 11.00	Roca fracturada
		3	3773	11.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-15	Mina 2 Nivel 749	1	622	0.00 a 3.00	Cobertura densa
		2	2004	3.00 a 15.00	Roca fracturada
		3	3775	15.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-16	Mina 2 Nivel 713	1	1257	0.00 a 3.00	Roca muy fracturada
		2	2880	3.00 a 11.00	Roca fracturada
		3	4118	11.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-17	Mina 2 Nivel 665	1	1719	0.00 a 2.00	Roca muy fracturada
		2	2697	2.00 a 9.00	Roca fracturada
		3	4838	9.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-18	Mina 4 Nivel 557	1	514	0.00 a 2.00	Cobertura densa
		2	2109	2.00 a 9.00	Roca fracturada
		3	3831	9.00 a 30.00	Roca fracturada
LS-19	Mina 4 Nivel 701	1	597	0.00 a 2.00	Cobertura densa
		2	2331	2.00 a 13.00	Roca fracturada
		3	4502	13.00 a 30.00	Roca poco fracturada
LS-20	Mina 4 Nivel 773	1	844	0.00 a 3.00	Cobertura muy densa
		2	1978	3.00 a 18.00	Roca muy fracturada
		3	4794	18.00 a 30.00	Roca poco fracturada

Fuente: Elaboración propia.

El procesamiento y resultados de los ensayos de refracción sísmica se presenta en el Anexo C: Ensayos Geofísicos, donde en el Anexo C.1 se presentan los perfiles sísmicos de ondas P (solo un perfil representativo).

### 3.2.1.4. Medición de ondas de superficie en arreglos multicanales -MASW

Los objetivos principales del ensayo MASW son los siguientes:

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

### 3.2.1.4.1. Procedimiento del ensayo

El ensayo MASW consiste en la medición de los tiempos de viaje de las ondas de corte ( $V_s$ ), generadas por el impacto de una comba de 25 libras. La diferencia principal con el 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.

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 S a través de los diferentes suelos cuya estructura, geometría y continuidad son investigadas.

### 3.2.1.4.2. Trabajo de campo

Se realizaron ocho ensayos MASW, ubicados en los puntos medios de las líneas sísmicas de refracción que se ubican en los niveles más bajos. El resumen de la ubicación de los ensayos MASW se presenta en la Tabla N° 3. 10.

**Tabla N° 3. 10:** Resumen del ensayo MASW – Minas 2-3-4

Ensayo	Coordenadas UTM (PSAD 56)	Long. (m)	Ubicación
MASW-1	488 895 E, 8 319 943 N	100	En la línea sísmica LS-1, Nivel 521 – Mina 4
MASW-2	488 522 E, 8 319 737 N	100	En la línea sísmica LS-2, Nivel 533 – Mina 4
MASW-3	488 821 E, 8 319 562 N	100	En la línea sísmica LS-3, Nivel 533 – Mina 4
MASW-4	487 646 E, 8 319 036 N	100	En la línea sísmica LS-4, Nivel 581 – Mina 2
MASW-5	487 474 E, 8 318 937 N	100	En la línea sísmica LS-5, Nivel 593 – Mina 2
MASW-6	488 381 E, 8 319 324 N	100	En la línea sísmica LS-6, Nivel 569 – Mina 4
MASW-7	488 979 E, 8 319 647 N	100	En la línea sísmica LS-7, Nivel 557 – Mina 4
MASW-8	487 846 E, 8 319 289 N	100	En la línea sísmica LS-13, Nivel 617 – Mina 3

Fuente: Elaboración propia.

Cabe indicar que los ensayos realizados en la Mina 4, los trabajos de campo se ejecutaron con equipos y maquinarias en movimiento, debido a que la mina no pudo parar los trabajos de proceso de explotación.



**3.2.1.4.3. 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 superficies. 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 ( $V_s 30$ ), tal como se presenta en la Tabla N° 3. 11.

**Tabla N° 3. 11:** 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, NSPT
A	Roca muy dura	$V_s > 1500$	No aplica
B	Roca	$760 < V_s < 1500$	No aplica
C	Suelo muy denso o roca	$360 < V_s < 760$	NSPT > 50
D	Suelo rígido	$180 < V_s < 360$	$15 < NSPT < 50$
E	Suelo blando	$V_s < 180$	NSPT < 15

Fuente: IBC (International Building Code; 2009).

En la Tabla N° 3. 12 se presenta un resumen de los resultados del ensayo MASW y la clasificación del terreno de acuerdo a la clasificación del IBC.

**Tabla N° 3. 12:** Resultados del ensayo MASW – Minas 2-3-4

Ensayo	Ubicación	Estrato	Vs30 (m/s)	Profundidad Promedio (m)	Tipo de suelo
MASW-1	Línea sísmica LS-1, Nivel 521 – Mina 4	1	240	0.00 a 2.00	Suelo rígido (cobertura densa)
		2	1051	2.00 a 9.00	Roca (roca fracturada)
		3	2363	9.00 a 30.00	Roca muy dura (roca poco fracturada)
MASW-2	Línea sísmica LS-2, Nivel 533 – Mina 4	1	234	0.00 a 2.00	Suelo rígido (cobertura densa)
		2	1458	2.00 a 9.00	Roca (roca fracturada)
		3	2203	9.00 a 30.00	Roca muy dura (roca poco fracturada)
MASW-3	Línea sísmica LS-3, Nivel 533 – Mina 4	1	395	0.00 a 3.00	Suelo muy denso (cobertura muy densa)
		2	1136	3.00 a 12.00	Roca (roca fracturada)
		3	2181	12.00 a 30.00	Roca muy dura (roca fracturada)
MASW-4	Línea sísmica LS-4, Nivel 581 – Mina 2	1	395	0.00 a 2.00	Suelo muy denso (cobertura muy densa)
		2	1142	2.00 a 12.00	Roca (roca fracturada)
		3	2637	12.00 a 30.00	Roca muy dura (roca poco fracturada)
MASW-5	Línea sísmica LS-5, Nivel 593 – Mina 2	1	395	0.00 a 2.00	Suelo muy denso (cobertura muy densa)
		2	1307	2.00 a 11.00	Roca (roca fracturada)
		3	2402	11.00 a 30.00	Roca muy dura (roca poco fracturada)
MASW-6	Línea sísmica LS-6, Nivel 569 – Mina 4	1	298	0.00 a 2.00	Suelo rígido (cobertura densa)
		2	1066	2.00 a 11.00	Roca (roca fracturada)
		3	2120	11.00 a 30.00	Roca muy dura (roca fracturada)
MASW-7	Línea sísmica LS-7, Nivel 557 – Mina 4	1	298	0.00 a 2.00	Suelo rígido (cobertura densa)
		2	1404	2.00 a 15.00	Roca (roca fracturada)
		3	2876	15.00 a 30.00	Roca muy dura (roca sana)
MAS-W-8	Línea sísmica LS-13, Nivel 617 – Mina 3	1	298	0.00 a 2.00	Suelo rígido (cobertura densa)
		2	1140	2.00 a 9.00	Roca (roca fracturada)
		3	2325	9.00 a 30.00	Roca muy dura (roca poco fracturada)

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.1.5. Parámetros de deformación

Con los valores de velocidad de propagación  $V_p$  y  $V_s$  obtenidos de los ensayos geofísicos y la densidad del terreno se determina el Coeficiente de Poisson ( $\mu$ ), 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 a las siguientes relaciones:

- **Coeficiente de Poisson**

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

- **Módulo de corte**

$$G_d = \gamma \cdot V_s^2 \quad (\gamma = \text{densidad del terreno})$$

▪ **Módulo de Elasticidad**

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

▪ **Módulo Volumétrico**

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

Utilizando las formulaciones anteriores y los resultados de las velocidades de ondas primarias Vp y ondas de corte Vs obtenidos de los ensayos geofísicos (refracción sísmica y MASW) se obtiene los parámetros de deformación de los estratos, las cuales se presentan en la Tabla N° 3. 13.

**Tabla N° 3. 13:** Resumen de los parámetros dinámicos – Minas 2-3-4

Línea Sísmica y MASW	Ubicación	Velocidades de Onda		Densidad (T/m3)	Coeficiente de Poisson $\mu$	Módulo de Corte Dinámico	Módulo de Elasticidad Dinámico	Módulo de Elasticidad Estático	
		Vp (m/s)	Vs (m/s)			Gd (kN/m2)	Ed (kN/m2)	Ee (kN/m2)	Ee (kg/cm2)
LS-1 y MASW-1	Nivel 521 – Mina 4	600	240	2.00	0.40	117551	330262	22017	225
		1904	1051	2.20	0.28	2479717	6352471	423498	4321
		4147	2363	2.50	0.26	14244309	35884465	1794223	18308
LS-2 y MASW-2	Nivel 533 – Mina 4	541	234	2.00	0.38	111747	309523	20635	211
		2788	1458	2.20	0.31	4772123	12520003	834667	8517
		4066	2203	2.50	0.29	12380635	31997197	1599860	16325
LS-3 y MASW-3	Nivel 533 – Mina 4	978	395	2.00	0.40	318418	893189	59546	608
		2196	1136	2.20	0.32	2897032	7632575	508838	5192
		3662	2181	2.50	0.23	12134594	29733479	1486674	15170
LS-4 y MASW-4	Nivel 581 – Mina 2	786	395	2.00	0.33	318418	847667	56511	577
		2088	1142	2.20	0.29	2927715	7533556	502237	5125
		4465	2637	2.60	0.23	18448775	45464641	2273232	23196
LS-5 y MASW-5	Nivel 593 – Mina 2	790	395	2.00	0.33	318418	849116	56608	578
		2357	1307	2.20	0.28	3834845	9801771	653451	6668
		4167	2402	2.60	0.25	15307113	38304139	1915207	19543
LS-6 y MASW-6	Nivel 569 – Mina 4	660	298	2.00	0.37	181233	497290	33153	338
		2016	1066	2.20	0.31	2551003	6662932	444195	4533
		3687	2120	2.60	0.25	11923918	29882371	1494119	15246
LS-7 y MASW-7	Nivel 557 – Mina 4	653	298	2.00	0.37	181233	496026	33068	337
		2523	1404	2.20	0.28	4425179	11290474	752698	7681
		5132	2876	2.60	0.27	21944467	55786326	2789316	28462
LS-13 y MASW-8	Nivel 617 – Mina 3	585	298	2.00	0.32	181233	480190	32013	327
		2069	1140	2.20	0.28	2917469	7480574	498705	5089
		4094	2325	2.60	0.26	14341454	36197142	1809857	18468

Fuente: Elaboración propia.

Según la 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”. En este informe se ha dividido las propiedades dinámicas de los estratos 1 y 2 entre 15 (valor promedio); y las propiedades dinámicas del estrato 3 entre 20, 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 C: Ensayos Geofísicos, donde en el Anexo C.2 se presentan las curvas de dispersión, los perfiles sísmicos de ondas S obtenidos y los resultados del procesamiento de las propiedades dinámicas del terreno (un solo modelo representativo por mina).

### **3.2.1.6. Ensayos de Laboratorio**

#### **3.2.1.6.1. Carga puntual**

Con la finalidad de determinar los parámetros físico - mecánicos del macizo rocoso, se realizó el ensayo de carga puntual para conocer la resistencia a la compresión simple de la roca intacta. El ensayo de carga puntual se realizó en muestras obtenidas de los sitios donde se realizó las estaciones geomecánicas.

Este ensayo se basa en la norma ASTM D-5731 y consiste en comprimir la muestra de roca entre dos puntos situados en generatrices opuestas, generando así la deformación y rotura de la roca. Como resultado de este ensayo se obtiene el índice de carga puntual corregido I50 con el cual se obtiene la resistencia a la compresión de la roca intacta.

De la Tabla N° 3. 14 a Tabla N° 3. 16 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo:

**Tabla N° 3. 14:** Resultado de los ensayos de Carga Puntual – Mina 2

Estación Geomecánica / Muestra	Litología	Dureza de la Roca	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)		
			Máximo	Mínimo	Promedio
EG-1 / M-1	Magnetita	R5	212.16	138.48	178.18
EG-2 / M-1	Magnetita	R5	191.28	128.16	161.42
EG-3 / M-1	Magnetita	R3 – R4	74.64	28.32	51.55
EG-3 / M-2	Magnetita	R4 – R5	224.64	83.04	131.38
EG-4 / M-1	Magnetita	R5	225.84	114.00	156.77
EG-5 / M-1	Magnetita	R4 – R5	118.32	58.56	84.29
EG-6 / M-1	Hematita - Martita	R4 – R5	123.60	89.28	107.42
EG-7 / M-1	Hematita - Martita	R4 – R5	112.80	82.56	100.08
EG-8 / M-1	Hematita - Martita	R4 – R5	121.68	53.52	86.83
EG-9 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	138.70	80.70	106.52
EG-10 / M-1	Magnetita	R5	208.56	113.76	159.07
EG-11 / M-1	Magnetita	R4 – R5	154.32	86.40	116.98
EG-12 / M-1	Magnetita	R4 – R5	130.80	78.48	105.46
EG-13 / M-1	Magnetita	R4 – R5	100.80	71.04	86.74
EG-14 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	197.52	89.04	135.60
EG-15 / M-1	Hematita - Martita	R3 – R4	83.04	44.88	64.70
EG-16 / M-1	Hornfels filítico	R5 – R6	303.36	176.16	230.06
EG-17 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	163.44	87.60	125.95
EG-18 / M-1	Magnetita	R5	228.24	158.16	199.10

Fuente: Elaboración propia

**Tabla N° 3. 15:** Resultado de los ensayos de Carga Puntual – Mina 3

Estación Geomecánica / Muestra	Litología	Dureza de la Roca	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)		
			Máximo	Mínimo	Promedio
EG-1 / M-1	Hornfels filítico	R3 – R4	128.16	25.44	60.77
EG-2 / M-1	Hornfels filítico	R5	190.32	103.92	152.3
EG-3 / M-1	Hornfels filítico	R3 – R5	261.36	40.56	166.75
EG-4 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	162.24	98.88	130.42
EG-5 / M-1	Hornfels filítico	R5	178.32	104.64	134.11
EG-6 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	156.48	89.76	132.62
EG-7 / M-1	Hematita - Martita	R5	188.88	126.72	153.12
EG-8 / M-1	Hornfels filítico	R5 – R6	294.48	180.48	228.53
EG-9 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	201.6	96.24	143.86
EG-10 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	133.68	81.6	103.34
EG-10 / M-2	Hornfels filítico	R4 – R5	167.04	91.92	124.22
EG-11 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	108.72	73.2	91.25

Fuente: Elaboración propia

**Tabla N° 3. 16:** Resultado de los ensayos de Carga Puntual – Mina 4

Estación Geomecánica / Muestra	Litología	Dureza de la Roca	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)		
			Máximo	Mínimo	Promedio
EG-1 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	144.00	80.40	110.30
EG-1 / M-2	Hornfels filítico	R4 – R5	126.00	94.08	111.22
EG-2 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	119.04	74.64	94.18
EG-2 / M-2	Hornfels filítico	R4	79.92	62.16	73.54
EG-3 / M-1	Gabrodiorita	R5	181.68	102.00	138.62
EG-4 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	144.72	85.20	112.13
EG-5 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	141.12	96.96	126.19
EG-6 / M-1	Hematita - Martita	R5	210.24	156.72	177.98
EG-7 / M-1	Magnetita	R5	214.08	121.20	175.44
EG-8 / M-1	Magnetita	R4 – R5	122.40	75.36	96.58
EG-9 / M-1	Hematita - Martita	R4 – R5	119.04	62.40	82.94
EG-9 / M-2	Hematita - Martita	R4 – R5	79.68	131.52	97.44
EG-9 / M-3	Hematita - Martita	R3 – R4	97.68	45.36	75.46
EG-10 / M-1	Hornfels filítico	R3 – R4	86.88	38.40	62.88
EG-11 / M-1	Hornfels filítico	R3 – R4	69.12	35.04	50.64
EG-11 / M-2	Hornfels filítico	R4	98.40	55.92	77.33
EG-12 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	124.08	75.12	94.37
EG-12 / M-2	Hornfels filítico	R5	222.72	122.16	150.24
EG-13 / M-1	Hematita - Martita	R5 – R6	264.24	129.12	191.76
EG-13 / M-2	Hematita - Martita	R5	188.64	105.60	141.98
EG-14 / M-1	Andesita	R5 – R6	258.08	207.90	233.78
EG-15 / M-1	Hornfels filítico	R3 – R4	91.92	38.16	61.20
EG-16 / M-1	Hornfels filítico	R3 – R4	83.04	45.60	64.22
EG-17 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	173.28	87.84	133.58
EG-18 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	111.12	82.08	94.94
EG-18 / M-2	Hornfels filítico	R2 – R3	30.48	20.40	26.54
EG-19 / M-1	Hornfels filítico	R5	173.28	101.76	133.30
EG-20 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	149.52	95.76	121.06
EG-21 / M-1	Hematita - Martita	R5	234.96	139.44	201.36
EG-22 / M-1	Hornfels filítico	R3 – R4	82.56	45.12	65.09
EG-23 / M-1	Hornfels filítico	R3 – R4	55.92	26.88	42.10
EG-24 / M-1	Gabrodiorita	R4 – R5	146.64	78.48	109.15
EG-25 / M-1	Gabrodiorita	R5	148.80	115.68	131.18
EG-26 / M-1	Hornfels filítico	R4 – R5	149.76	90.48	114.48

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos de carga puntual fueron ejecutados en un laboratorio geotécnico.

### 3.2.1.6.2. Propiedades índices de rocas

Con las muestras de roca obtenidas de las estaciones geomecánicas, se ejecutaron ensayos para determinar las propiedades índices de la roca, tales

como: gravedad específica, absorción (ASTM C-9783) y densidad (ASTM D-2937). En Tabla N° 3. 17, Tabla N° 3. 18 y Tabla N° 3. 19 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de estos ensayos.

**Tabla N° 3. 17:** Resultado de ensayos de propiedades índices de rocas – Mina 2

Estación Geomecánica / Muestra	Litología	Gravedad Específica (Gs)	Absorción (%)	Densidad (kN/m3)
EG-1 / M-1	Magnetita	2.75	0.12	27.00
EG-2 / M-1	Magnetita	2.67	0.12	26.00
EG-3 / M-1	Magnetita	4.18	0.79	39.30
EG-3 / M-2	Magnetita	4.04	0.80	36.70
EG-4 / M-1	Magnetita	2.72	0.20	26.70
EG-5 / M-1	Magnetita	3.55	0.24	33.90
EG-6 / M-1	Hematita - Martita	2.71	0.09	26.50
EG-7 / M-1	Hematita - Martita	2.70	0.11	26.50
EG-8 / M-1	Hematita - Martita	2.71	0.11	26.50
EG-9 / M-1	Hornfels filítico	2.70	0.14	26.30
EG-10 / M-1	Magnetita	2.71	0.15	26.40
EG-11 / M-1	Magnetita	2.76	0.13	26.90
EG-12 / M-1	Magnetita	2.64	0.11	25.80
EG-13 / M-1	Magnetita	2.64	0.18	25.80
EG-14 / M-1	Hornfels filítico	2.68	0.15	26.10
EG-15 / M-1	Hematita - Martita	2.74	0.35	26.70
EG-16 / M-1	Hornfels filítico	2.68	0.11	26.10
EG-17 / M-1	Hornfels filítico	2.75	0.23	26.60
EG-18 / M-1	Magnetita	2.76	0.20	26.90

Fuente: Elaboración propia

**Tabla N° 3. 18:** Resultado de ensayos de propiedades índices de rocas – Mina 3

Estación Geomecánica /Muestra	Litología	Gravedad Específica	Absorción (%)	Densidad (kN/m3)
EG-1 / M-1	Hornfels filítico	2.74	0.19	26.70
EG-2 / M-1	Hornfels filítico	2.76	0.19	26.40
EG-3 / M-1	Hornfels filítico	2.76	0.16	26.60
EG-4 / M-1	Hornfels filítico	2.70	0.16	26.20
EG-5 / M-1	Hornfels filítico	2.68	0.17	26.10
EG-6 / M-1	Hornfels filítico	2.77	0.09	27.00
EG-7 / M-1	Hematita - Martita	2.83	0.11	27.60
EG-8 / M-1	Hornfels filítico	2.85	0.17	27.80
EG-9 / M-1	Hornfels filítico	2.71	0.08	26.40
EG-10 / M-1	Hornfels filítico	2.76	0.05	27.00
EG-10 / M-2	Hornfels filítico	2.79	0.24	27.10
EG-11 / M-1	Hornfels filítico	2.76	0.09	26.90

Fuente: Elaboración propia

**Tabla N° 3. 19:** Resultado de ensayos de propiedades índices de rocas – Mina 4

Estación Geomecánica /Muestra	Litología	Gravedad Específica	Absorción (%)	Densidad (kN/m3)
EG-1 / M-1	Hornfels filítico	2.74	0.14	26.50
EG-1 / M-2	Hornfels filítico	2.76	0.05	26.80
EG-2 / M-1	Hornfels filítico	2.75	0.11	26.20
EG-2 / M-2	Hornfels filítico	2.72	0.14	26.60
EG-3 / M-1	Gabrodiorita	2.80	0.22	27.30
EG-4 / M-1	Hornfels filítico	2.70	0.07	26.40
EG-5 / M-1	Hornfels filítico	2.68	0.24	26.10
EG-6 / M-1	Hematita - Martita	2.69	0.25	26.10
EG-7 / M-1	Magnetita	2.75	0.06	27.00
EG-8 / M-1	Magnetita	2.70	0.04	26.30
EG-9 / M-1	Hematita - Martita	2.74	0.22	26.50
EG-9 / M-2	Hematita - Martita	2.74	0.15	26.70
EG-9 / M-3	Hematita - Martita	2.67	0.14	26.00
EG-10 / M-1	Hornfels filítico	2.73	0.28	26.50
EG-11 / M-1	Hornfels filítico	2.75	0.22	26.70
EG-11 / M-2	Hornfels filítico	2.75	0.13	26.80
EG-12 / M-1	Hornfels filítico	2.72	0.06	26.50
EG-12 / M-2	Hornfels filítico	3.87	0.27	37.40
EG-13 / M-1	Hematita - Martita	2.83	0.12	27.60
EG-13 / M-2	Hematita - Martita	2.77	0.33	27.10
EG-14 / M-1	Andesita	2.74	0.18	26.40
EG-15 / M-1	Hornfels filítico	2.73	0.59	26.40
EG-16 / M-1	Hornfels filítico	2.71	0.12	26.40
EG-17 / M-1	Hornfels filítico	2.79	0.22	27.10
EG-18 / M-1	Hornfels filítico	2.69	0.14	26.30
EG-18 / M-2	Hornfels filítico	2.70	0.20	26.20
EG-19 / M-1	Hornfels filítico	2.71	0.09	26.40
EG-20 / M-1	Hornfels filítico	2.70	0.06	26.30
EG-21 / M-1	Hematita - Martita	2.71	0.01	26.30
EG-22 / M-1	Hornfels filítico	2.73	0.28	26.60
EG-23 / M-1	Hornfels filítico	2.72	0.22	26.30
EG-24 / M-1	Gabrodiorita	2.67	0.20	26.10
EG-25 / M-1	Gabrodiorita	2.69	0.25	26.10
EG-26 / M-1	Hornfels filítico	2.72	0.20	26.40

Fuente: Elaboración propia

Los ensayos de propiedades fueron realizados por un laboratorio geotécnico.



### 3.2.1.6.3. Compresión Triaxial

Se realizaron ensayos de compresión triaxial según la norma ASTM D-2664, preparándose tres especímenes para cada ensayo, en la Tabla N° 3. 20 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo.

**Tabla N° 3. 20:** Resultado de los ensayos de Compresión Triaxial

Mina	Nivel	Muestra	Litología	mi	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción Interna (°)
Mina 2	725	EG-14	Hornfels	27.02	36.70	58.33
Mina 3	613	Fondo de banco, talud	Hornfels	18.45	14.53	50.09
Mina 4	533	EG-7	Magnetita	24.17	12.37	53.15
Mina 4	557	EG-14	Andesita	24.64	34.34	56.78

Fuente: Elaboración propia.

Resultados obtenidos de los ensayos realizados en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad Nacional de Ingeniería.

### 3.2.1.6.4. Corte Directo

Con la finalidad de determinar los parámetros de resistencia al corte de las discontinuidades se realizaron ensayos de corte directo sobre las discontinuidades con caras paralelas a la dirección de corte, según la norma ASTM D-5607. En la Tabla N° 3. 21 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de este ensayo.

**Tabla N° 3. 21:** Resultado de los ensayos de Corte Directo

Mina	Nivel	Muestra	Litología	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción Residual (°)
Mina	653	EG-6	Hematita -	0.124	32.090
Mina	725	EG-14	Hornfels filítico	0.133	31.010
Mina	677	EG-1	Hornfels filítico	0.187	33.100
Mina	641	EG-4	Hornfels filítico	0.093	31.270
Mina	521	Fondo de banco, talud	Hornfels filítico	0.125	32.770
Mina	665	EG-4	Hornfels filítico	0.116	29.010
Mina	521	EG-8	Magnetita	0.127	30.610
Mina	701	EG-21	Hematita -	0.119	30.820
Mina	521	EG-26	Hornfels filítico	0.095	30.810

Fuente: Elaboración propia.

Resultados obtenidos de los ensayos realizados en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad Nacional de Ingeniería.

### 3.2.2. Caracterización geomecánica del macizo rocoso

Para caracterizar un macizo rocoso donde se está realizando cortes y/o se proyectará una excavación, es necesario conocer los parámetros de resistencia 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).

#### 3.2.2.1. 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 N° 3. 22 se presenta la clasificación de las rocas de acuerdo a su resistencia a la compresión uniaxial.

**Tabla N° 3. 22:** 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).

Considerando la clasificación presentada en la Tabla N° 5-1 y los resultados de los ensayos de carga puntual (Tablas N° 4-15, N° 4-16 y N° 4-17), se tiene la siguiente interpretación para los taludes de las Minas 2-3-4.

- La Mina 2 en su mayoría está conformada por roca dura y roca muy dura (R4 – R5), solo se identificó roca media (R3) en la zona mineralizada (parte inferior del talud sur).
- La Mina 3 en su mayoría está conformado por roca dura y roca muy dura (R4 – R5), solo se identificó roca media (R3) en el talud norte adyacente y/o colindante a la Mina 2.
- La Mina 4 en su mayoría está conformada por roca dura y roca muy dura (R4 – R5), solo se identificó roca media (R3) en la parte superior del talud; el talud sur en su mayoría está conformado por roca dura y roca muy dura (R4 – R5), el talud oeste en su mayoría está conformado por roca muy dura (R5)

### 3.2.2.2. Valoración del macizo rocoso

#### 3.2.2.2.1. Sistema RMR

Este sistema de clasificación fue desarrollado por el profesor Bieniawski en el Consejo Sudafricano para la investigación Científica e Industrial (CSIR, 1973), fue actualizado en los años de 1979 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
- Fracturamiento (RQD)
- Espaciamiento de discontinuidades
- Estado de las discontinuidades
- Condición de agua subterránea
- Orientación relativa de las discontinuidades

El sistema de clasificación RMR, 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 RMR, se estimará la calidad del macizo rocoso con fines de evaluación de estabilidad de taludes.

En la Tabla N° 3. 23 se presentan los rangos de valoración del macizo rocoso según su clasificación RMR.

**Tabla N° 3. 23:** Rangos de valoración según el índice RMR

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

Fuente: Bieniawski (1989).

### 3.2.2.2. Índice SMR

El índice SMR está basado en el índice RMR de Bieniawski y cuatro factores de ajuste de acuerdo a la condición del talud en evaluación. 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 N° 3. 24, Tabla N° 3. 25 y Tabla N° 3. 26 se presenta un resumen de la valoración del macizo rocoso de acuerdo a los índices RMR y SMR determinado para cada estación geomecánica establecida en cada mina.

**Tabla N° 3. 24:** Resumen de la valoración RMR y SMR en la mina 2

Estación Geomecánica	Litología	RMR <sub>89</sub>	RMR <sub>ajustado</sub>	Clase de Roca	SMR	Estabilidad (SMR)
EG-1	Magnetita	57	32	III	59	Parcialmente Estable
EG-2	Magnetita	55	30	III	39	Inestable
EG-3	Magnetita	59	54	III	42	Parcialmente Estable
EG-4	Magnetita	58	53	III	49	Parcialmente Estable
EG-5	Magnetita	58	33	III	61	Estable
EG-6	Hematita - Martita	53	28	III	26	Inestable
EG-7	Hematita - Martita	60	35	III	59	Parcialmente Estable
EG-8	Hematita - Martita	53	28	III	60	Parcialmente Estable
EG-9	Hornfels filítico	61	11	II	27	Inestable
EG-10	Magnetita	61	56	II	65	Estable
EG-11	Magnetita	63	38	II	51	Parcialmente Estable

Estación Geomecánica	Litología	RMR <sub>89</sub>	RMR <sub>ajustado</sub>	Clase de Roca	SMR	Estabilidad (SMR)
EG-12	Magnetita	63	58	II	71	Estable
EG-13	Magnetita	60	55	III	62	Estable
EG-14	Hornfels filítico	63	13	II	21	Inestable
EG-15	Hematita - Martita	53	48	III	57	Parcialmente Estable
EG-16	Hornfels filítico	59	34	III	63	Estable
EG-17	Hornfels filítico	57	7	III	30	Inestable
EG-18	Magnetita	58	53	III	49	Parcialmente Estable

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 3. 25:** Resumen de la valoración RMR y SMR en la mina 3

Estación Geomecánica	Litología	RMR <sub>89</sub>	RMR <sub>ajustado</sub>	Clase de Roca	SMR	Estabilidad (SMR)
EG-1	Hornfels filítico	58	33	III	59	Parcialmente Estable
EG-2	Hornfels filítico	63	38	II	62	Estable
EG-3	Hornfels filítico	63	38	II	62	Estable
EG-4	Hornfels filítico	61	36	II	61	Estable
EG-5	Hornfels filítico	56	31	III	56	Parcialmente Estable
EG-6	Hornfels filítico	56	51	III	63	Estable
EG-7	Hematita - Martita	63	13	II	47	Parcialmente Estable
EG-8	Hornfels filítico	66	41	II	53	Parcialmente Estable
EG-9	Hornfels filítico	61	56	II	69	Estable
EG-10	Hornfels filítico	63	38	II	51	Parcialmente Estable
EG-11	Hornfels filítico	63	38	II	54	Parcialmente Estable

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 3. 26:** Resumen de la valoración RMR y SMR en la mina 4

Estación Geomecánica	Litología	RMR <sub>89</sub>	RMR <sub>ajustado</sub>	Clase de Roca	SMR	Estabilidad (SMR)
EG-1	Hornfels filítico	60	35	III	61	Estable
EG-2	Hornfels filítico	55	30	III	62	Estable
EG-3	Gabrodiorita	63	38	II	54	Parcialmente Estable
EG-4	Hornfels filítico	63	38	II	46	Parcialmente Estable
EG-5	Hornfels filítico	58	33	III	41	Parcialmente Estable
EG-6	Hematita - Martita	62	57	II	61	Estable
EG-7	Magnetita	66	61	II	74	Estable
EG-8	Magnetita	67	42	II	51	Parcialmente Estable
EG-9	Hematita - Martita	57	52	III	61	Estable
EG-10	Hornfels filítico	58	53	III	62	Estable
EG-11	Hornfels filítico	58	33	III	62	Estable
EG-12	Hornfels filítico	63	38	II	62	Estable
EG-13	Hematita - Martita	63	38	II	51	Parcialmente Estable
EG-14	Andesita	62	57	II	63	Estable

Estación Geomecánica	Litología	RMR <sub>89</sub>	RMR <sub>ajustado</sub>	Clase de Roca	SMR	Estabilidad (SMR)
EG-15	Hornfels filítico	57	32	III	41	Parcialmente Estable
EG-16	Hornfels filítico	39	14	IV	43	Parcialmente Estable
EG-17	Hornfels filítico	63	58	II	62	Estable
EG-18	Hornfels filítico	55	30	III	53	Parcialmente Estable
EG-19	Hornfels filítico	63	38	II	62	Estable
EG-20	Hornfels filítico	63	38	II	41	Parcialmente Estable
EG-21	Hematita - Martita	57	32	III	56	Parcialmente Estable
EG-22	Hornfels filítico	48	23	III	49	Parcialmente Estable
EG-23	Hornfels filítico	57	32	III	61	Estable
EG-24	Gabrodiorita	64	59	II	70	Estable
EG-25	Gabrodiorita	63	38	II	51	Parcialmente Estable
EG-26	Hornfels filítico	55	30	III	59	Parcialmente Estable

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo B: Valoración del Macizo Rocoso, se presentan los registros de valoración del macizo rocoso de acuerdo con las clasificaciones RMR y SMR, en el Anexo B.1 se muestra algunos registros de la valoración de RMR y SMR (solo se presenta como modelo realizado).

En el plano GT-006-01: Plano de Zonificación Geomecánica del Anexo I, se presenta la zonificación de los macizos rocosos en base a su índice SMR.

### 3.2.2.2.3. Índice de Resistencia Geológica (GSI)

La clasificación GSI se basa en una observación cuidadosa del macizo rocoso y por consiguiente, 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 N° 3. 4 se presenta la plantilla de cálculo del índice GSI para los macizos rocosos fracturados.

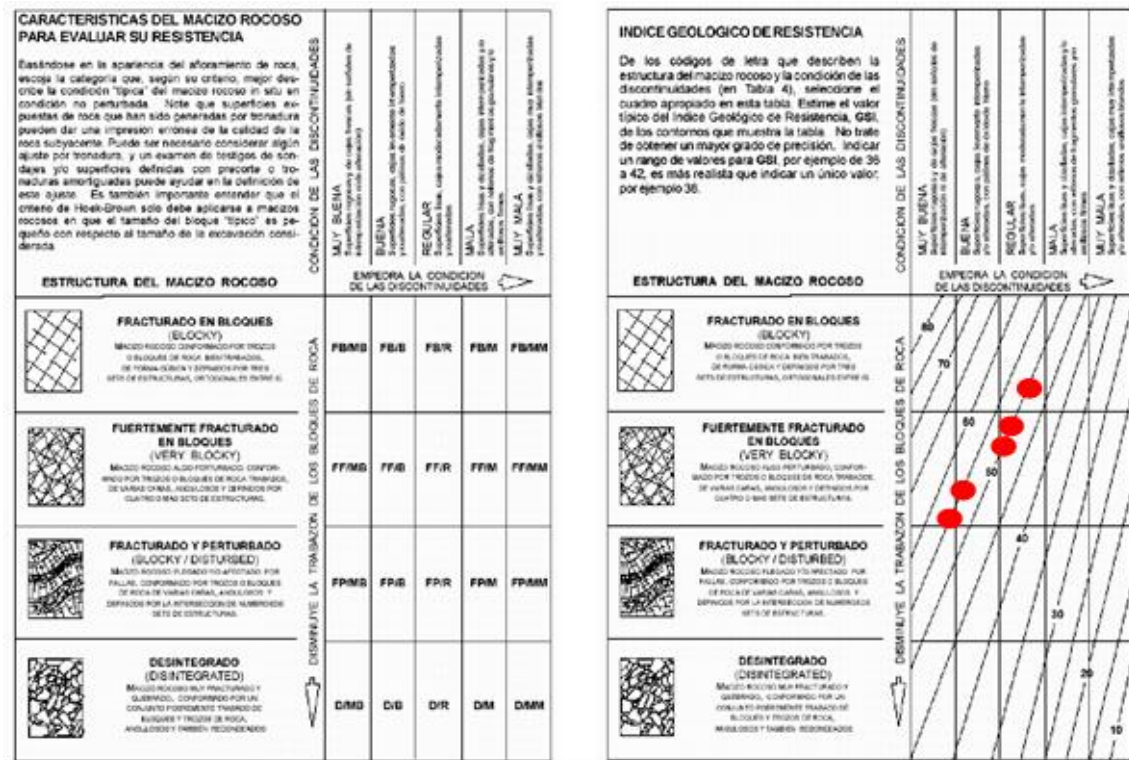


Figura N° 3. 4: Índice de resistencia geológica (GSI).  
(Fuente: Elaboración propia/Hoek & Brown)

De acuerdo a la plantilla anterior, las condiciones de las discontinuidades se clasifica 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 meteorizada con recubrimientos o rellenos de arcillas blandas.

Según 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 las tres minas, se encuentra entre 40 y 55.

En la Tabla N° 3. 27, Tabla N° 3. 28 y Tabla N° 3. 29 se presenta un resumen de los índices GSI del macizo rocoso estimados en cada estación geomecánica establecida en cada mina.

**Tabla N° 3. 27:** Resumen de la valoración GSI en la Mina 2

Estación Geomecánica	Litología	GSI
EG-1	Magnetita	45
EG-2	Magnetita	50
EG-3	Magnetita	50
EG-4	Magnetita	50
EG-5	Magnetita	55
EG-6	Hematita - Martita	50
EG-7	Hematita - Martita	45
EG-8	Hematita - Martita	55
EG-9	Hornfels filítico	50
EG-10	Magnetita	40
EG-11	Magnetita	55
EG-12	Magnetita	50
EG-13	Magnetita	40
EG-14	Hornfels filítico	55
EG-15	Hematita - Martita	55
EG-16	Hornfels filítico	45
EG-17	Hornfels filítico	50
EG-18	Magnetita	55

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 3. 28:** Resumen de la valoración GSI en la Mina 3

Estación Geomecánica	Litología	GSI
EG-1	Hornfels filítico	55
EG-2	Hornfels filítico	40
EG-3	Hornfels filítico	45
EG-4	Hornfels filítico	40
EG-5	Hornfels filítico	55
EG-6	Hornfels filítico	50
EG-7	Hematita - Martita	50
EG-8	Hornfels filítico	50
EG-9	Hornfels filítico	50
EG-10	Hornfels filítico	55



Estación Geomecánica	Litología	GSI
EG-11	Hornfels filítico	45

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 3. 29:** Resumen de la valoración GSI en la Mina 4

Estación Geomecánica	Litología	GSI
EG-1	Hornfels filítico	55
EG-2	Hornfels filítico	50
EG-3	Gabrodiorita	45
EG-4	Hornfels filítico	55
EG-5	Hornfels filítico	50
EG-6	Hematita - Martita	40
EG-7	Magnetita	50
EG-8	Magnetita	45
EG-9	Hematita - Martita	50
EG-10	Hornfels filítico	55
EG-11	Hornfels filítico	50
EG-12	Hornfels filítico	55
EG-13	Hematita - Martita	50
EG-14	Andesita	55
EG-15	Hornfels filítico	50
EG-16	Hornfels filítico	45
EG-17	Hornfels filítico	50
EG-18	Hornfels filítico	45
EG-19	Hornfels filítico	55
EG-20	Hornfels filítico	55
EG-21	Hematita - Martita	50
EG-22	Hornfels filítico	45
EG-23	Hornfels filítico	55
EG-24	Gabrodiorita	55
EG-25	Gabrodiorita	45
EG-26	Hornfels filítico	45

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo B: Valoración del Macizo Rocoso, se presenta la tabla detallada de Índice de Resistencia Geológica – GSI para cada estación geomecánica (Anexo B.2). Y en el Anexo B.3 se presenta una tabla resumen de los índices de calidad estimados.

#### 3.2.2.2.4. Caracterización geomecánica de las discontinuidades

El aspecto principal que condiciona el comportamiento mecánico de una discontinuidad es su resistencia al corte. La resistencia a la tracción perpendicular a las paredes de una discontinuidad se considera nula. Los factores que intervienen en la respuesta de una discontinuidad frente a un esfuerzo de corte son los siguientes:

##### a. Resistencia de la pared de la discontinuidad (JCS)

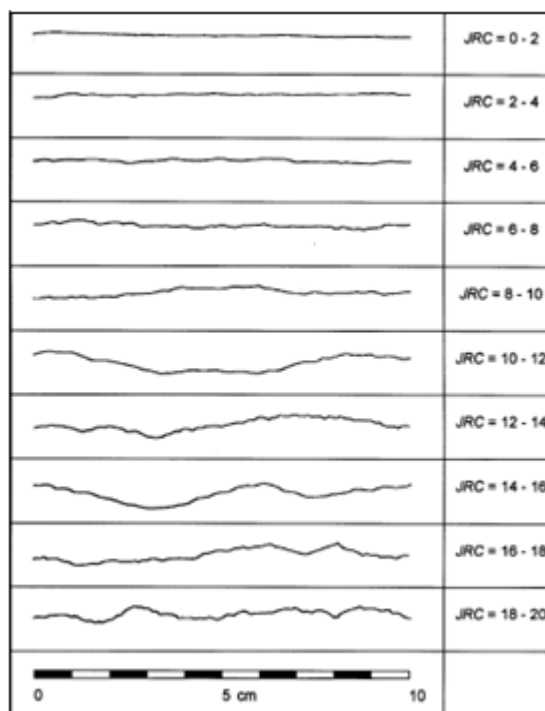
La resistencia de la pared de la discontinuidad (JCS) se ha determinado mediante la aplicación del Martillo Schmidt sobre la discontinuidad, conociendo el número de rebotes del martillo ( $r$ ), se aplica la siguiente expresión, propuesta por Miller (1966):

$$JCS = 10^{0.00088\gamma r + 1.01}$$

Donde “ $\gamma$ ” es el peso específico de la roca expresado en kN/m<sup>3</sup> y “ $r$ ” es el número de rebotes del Martillo Schmidt, el cual se debe corregir en el caso de que el martillo no se aplique verticalmente y hacia abajo.

##### b. Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (JRC)

Para obtener el coeficiente de rugosidad de una junta o JRC, se ha considerado los perfiles normalizados propuestos por Barton y Choubey (1977), los cuales se presentan en la Figura N° 3. 5.



**Figura N° 3. 5:** Perfiles normalizados propuestos por Barton y Choubey  
(Fuente: Barton y Choubey (1977)).

#### c. Grado de alteración de las discontinuidades

En la evaluación del macizo rocoso, se ha estimado el grado de alteración de las discontinuidades, lo cual se ha registrado en las estaciones geomecánicas establecidas en cada mina.

En general, el macizo rocoso que conforma los taludes de las Minas 2-3-4, se encuentra no intemperizado a ligeramente intemperizado

#### d. Espesor y tipo de relleno

El espesor y tipo de relleno que se han identificado en las discontinuidades se ha evaluado y registrado en las estaciones geomecánicas realizadas para cada mina.

En general, las discontinuidades del macizo rocoso que conforman los taludes de las Minas 2-3-4 presentan relleno de óxido y tienen una abertura que varía entre 1 y 5 mm.

**e. Circulación de agua grado de saturación de relleno**

Durante la evaluación geomecánica no se ha identificado la presencia o afloramiento de agua en los taludes, por lo que en las estaciones geomecánicas establecidas para las Minas 2-3-4, se ha considerado la condición completamente seca.

**f. Orientación de las discontinuidades**

Durante la evaluación geomecánica se ha medido la orientación de las discontinuidades (dirección de buzamiento y buzamiento) y se ha registrado su condición respecto a la orientación del talud de corte.

En las Minas 2-3-4, las discontinuidades principales presentan una condición entre favorable y regular respecto a la orientación del talud de corte. En la Mina 2 se ha identificado la condición desfavorable en la zona mineralizada (parte inferior del talud norte), también en la Mina 3 presenta la condición desfavorable en la parte inferior del talud norte y adyacente a la Mina 4.

La caracterización geomecánica de las discontinuidades ha servido para estimar los índices RMR, GSI presentados anteriormente y para determinar los parámetros de resistencia al corte de las discontinuidades.

En el Anexo E: Parámetros de Resistencia de las Discontinuidades, se presentan los registros de cálculo para evaluar los parámetros de resistencia al corte de las discontinuidades que serán utilizados para el análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos (se presenta en el Anexo E una estación geomecánica por mina como modelo).

**3.2.3. Zonificación geomecánica**

La zonificación geomecánica de los taludes de las Minas 2-3-4, se ha realizado considerando las condiciones estructurales del macizo rocoso (calidad, tipo de roca discontinuidades, meteorización y agua en las discontinuidades) y su comportamiento en los taludes de corte a nivel de bancos.

### **3.2.3.1. Zonificación geomecánica del macizo rocoso de la mina 2-3-4**

#### **3.2.3.1.1. Zonificación – Mina 2**

Los macizos rocosos de la Mina 2, en su mayoría están compuestos por minerales (hematita – martita y magnetita) y en los niveles superiores de los taludes está compuesto por hornfels filítico.

Estructuralmente los taludes de corte se encuentran con una estabilidad de media a buena, y la roca presenta una resistencia muy dura.

#### **3.2.3.1.2. Zonificación – Mina 3**

Los macizos rocosos de la Mina 3, en su mayoría están compuestos por hornfels filítico, solo se ha identificado hematita - martita en el talud sur - este. Estructuralmente los taludes de corte se encuentran con una estabilidad buena y la roca presenta una resistencia de muy dura a extremadamente dura.

#### **3.2.3.1.3. Zonificación – Mina 4**

Los macizos rocosos del talud norte de la Mina 4, en la parte superior están compuestos por hornfels filítico hasta el nivel 605, la parte inferior está compuesto por hematita - martita y magnetita al pié del talud. Estructuralmente el talud presenta una estabilidad media y la roca presenta una resistencia muy dura, se ha identificado zonas con estabilidad mala en la parte superior del talud y en el nivel 605 adyacente al talud este.

Los macizos rocosos del talud este de la Mina 4, en la parte superior están compuestos por gabrodiorita hasta el nivel 665 y la parte inferior está compuesto por hornfels filítico. Estructuralmente el talud presenta una estabilidad de media a buena y la roca presenta una resistencia muy dura, se ha identificado zonas con estabilidad mala en la parte superior (encima del nivel 701) y en la intersección con el talud sur.

Los macizos rocosos del talud sur de la Mina 4, en la parte superior están compuestos mayoritariamente por hornfels filítico, presenta una zona colindante con la Mina 3 compuesto por hematita - martita. Estructuralmente el talud presenta una estabilidad de media a buena y la roca presenta una resistencia muy dura.

### **3.2.3.2. Definición de los dominios estructurales de las Minas 2-3-4**

Los dominios estructurales generalmente están delimitados por discontinuidades geológicas, dentro de la cual la estructura es homogénea. También las discordancias (fallas) o zonas de pliegues separan dominios estructurales diferentes.

#### **3.2.3.2.1. Dominio estructural – Mina 2**

El talud norte, está caracterizado por presentar hornfels filítico en sus niveles de talud superior, variando a zonas de alteración mineral en el nivel intermedio y magnetita masiva en el nivel inferior. Es precisamente en estos niveles donde se observan zonas de derrumbe y caída de rocas, asociadas a las zonas de alteración e intenso fracturamiento. Las fallas presentan una orientación de NW-SE.

El talud oeste, se encuentra caracterizado litológicamente por cuerpos de alteración mineral y magnetita masiva, cortados estos últimos por diques dacíticos. Se observa una falla de desgarre (dextral) que corta longitudinalmente a todo el flanco. Este flanco presenta una gran cantidad de zonas de derrumbe y caída de rocas en sus diferentes niveles, pero que no indican un mayor peligro, ya que los análisis de riesgo indican que son eventos locales, debido al tipo de roca (zona mineralizada), y al intenso fracturamiento.

El talud sur se caracteriza por presentar hornfels filítico y zonas de mineralización en igual porcentaje en todos sus niveles. Estas unidades rocosas se presentan cortadas por fallas de desgarre asociadas a la deformación regional con fracturamiento moderado.

#### **3.2.3.2.2. Dominio estructural – Mina 3**

El talud norte, está caracterizado litológicamente por hornfels filítico en los niveles superior e intermedio, cambiando a zonas de alteración mineral en los niveles inferiores. Presenta fallas de desgarre asociadas al fracturamiento principal. Este talud se encuentra estable con poca incidencia de riesgos geológicos, debido a la buena resistencia de los afloramientos rocosos.

En el flanco sur, se observa que los niveles superiores están caracterizados por hornfels silicificado de alta resistencia, poco a moderado fracturamiento y las fallas presentan una orientación NNW- SSE. En los niveles intermedio e inferior se observa una gran cantidad de zonas de derrumbe y caída de rocas, debido al intenso fracturamiento de la zona de alteración mineral, muy característicos en este flanco.

#### **3.2.3.2.3. Dominio estructural – Mina 4**

El talud norte se caracteriza por presentar capas potentes de metasedimentos (hornfels filítico), en los taludes superiores e intermedios, en los taludes inferiores se observan zonas de mineralización y magnetita masiva. Los taludes se presentan cortados por fallas de desgarre, estas fallas están asociadas a deformación tectónica regional.

El talud este presenta un cuerpo intrusivo granítico en los niveles superiores, aflorando hornfels filítico en el nivel intermedio, y magnetita masiva en el nivel inferior. En este sector, las unidades rocosas se presentan altamente fracturadas, revelando una fuerte y continua deformación tectónica, el cual genera abundantes cuñas inestables que posteriormente por los procesos de excavación (voladura), generan derrumbes y caídas de rocas.

El talud sur está conformado principalmente por hornfels filítico en los taludes superiores y zonas de alteración mineral y diques dacíticos en los niveles intermedio e inferior. En los taludes se observan fallas de desgarre asociado a la deformación tectónica regional, extendiéndose estas fallas a lo largo de los flancos norte y sur de la Mina 4.

#### **3.2.3.3. Orientación de las familias de discontinuidades**

La orientación de unas discontinuidades con respecto a otras, determina la forma de los bloques existentes en el macizo rocoso, y de su orientación con relación a los taludes depende el tipo de bloque que puede desprenderse de estos.

Para la definición de la orientación correspondiente a cada familia de discontinuidades se ha utilizado el programa Dips v 6.0 (Rocscience, 2012), con

lo que se ha obtenido valores de dirección de buzamiento y buzamiento correspondientes a las orientaciones medias de cada familia.

Con los valores medios de orientación se reubicará cada discontinuidad sobre el censo original en su familia para obtener las propiedades promedio de cada una de las familias identificadas.

#### **3.2.3.3.1. Orientación de las discontinuidades – Mina 2**

En el talud norte, el fracturamiento presenta dos orientaciones, la principal paralela al sistema de fallas con orientación NW-SE, y el secundario con orientación WNW-ESE, asociada a fallas locales.

En el talud oeste, el fracturamiento es moderado a intenso, con orientaciones que van de N-S a NE- SW, asociado a fallas locales.

En el talud sur, se presenta una discontinuidad principal cuya dirección es paralela al sistema de falla con orientación NW-SE, variando a NE-SW por fallas locales.

#### **3.2.3.3.2. Orientación de las discontinuidades – Mina 3**

En el talud norte, el fracturamiento principal es paralelo al sistema de fallas con orientación NW-SE, se observa un segundo conjunto de fracturas con orientaciones NE-SW, asociadas a fallas conjugadas de tipo local.

En el talud sur, las fallas principales presentan una orientación NNW-SSE. El fracturamiento presenta una orientación NE-SW, asociada a fallas de corte (cizalla) de tipo local.

#### **3.2.3.3.3. Orientación de las discontinuidades – Mina 4**

En el talud norte, las discontinuidades presentan en su mayoría una orientación que va de NW-SE a N-S, paralelas al sistema de fallas existente.

En el talud este, se evidencia la presencia de un sistema de fallas E-W, así mismo, se observa un segundo grupo de fracturas con orientación NE-SW.



En el talud sur, las discontinuidades presentan una orientación NW-SE paralelas a las fallas principales.

En el Anexo F: Análisis de Estabilidad a Nivel de Bancos, se presentan las salidas de la evaluación realizada con el programa Dips, en donde se presenta las orientaciones de las familias identificadas en cada estación geomecánica de las Minas 2-3-4 (en el Anexo F se presenta a una estación geomecánica como modelo de procesamiento).

### 3.2.3.4. Estimación de las propiedades de resistencia y deformación de los macizos rocoso de acuerdo al criterio de rotura de Hoek y Brown (2002)

El Criterio Generalizado de Hoek-Brown (Hoek et al, 2002) es el que 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. En su revisión más reciente, corresponde a la siguiente formulación:

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

Dónde:

- $\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$ : Esfuerzos efectivos principales mayor y menor respectivamente en el momento de la rotura.
- $\sigma_{ci}$ : 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:

- mi: 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 efecto de voladura.

A continuación se describe como se han estimado los valores de “mi” y “D”.

La constante “mi” 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 N° 3. 30.

**Tabla N° 3. 30:** Valores de la constante “mi” para la matriz rocosa

Sedimentarias clásticas	Conglomerados	(22)	Lutita	4
	Areniscas	19	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
	Corneanas	(19)	Gneiss(*)	33
	Cuarcita	24	Esquisto(*)	4-8
	Migmatita	(30)	Filita(*)	(10)
	Anfibolita	31	Pizarra(*)	9
Ígneas	Granito	33	Andesita	19
	Riolita	(16)	Gabro	27
	Obsidiana	(19)	Dolerita	(19)
	Granodiorita	(30)	Basalto	(17)
	Dacita	(17)	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.

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 las minas, se ha considerado utilizar un factor de perturbación  $D=1$  (explotaciones mineras a cielo abierto).

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 N° 3. 31, Tabla N° 3. 32 y Tabla N° 3. 33 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. En el Anexo D: Parámetros de Resistencia del Macizo Rocos, se presentan las curvas de resistencia del macizo rocoso y sus correspondientes parámetros de resistencia al corte y módulo de deformación obtenidos (un modelo por mina).

**Tabla N° 3. 31:** Propiedades de resistencia y deformación – Mina 2

Estación Geomecánica	Litología	GSI	mi	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Resistencia a Compresión (MPa)	mb	s	a	Es (MPa)
EG-1	Magnetita	45	24	27.00	178.18	0.472	0.0001	0.508	3749.47
EG-2	Magnetita	50	24	26.00	161.42	0.675	0.0002	0.506	5000.00
EG-3	Magnetita	50	24	36.70	51.55	0.675	0.0002	0.506	3589.92
EG-4	Magnetita	50	24	26.70	156.77	0.675	0.0002	0.506	5000.00
EG-5	Magnetita	55	24	33.90	84.29	0.964	0.0006	0.504	6121.50
EG-6	Hematita - Martita	50	24	26.50	107.42	0.675	0.0002	0.506	5000.00
EG-7	Hematita - Martita	45	24	26.50	100.08	0.472	0.0001	0.508	3749.47
EG-8	Hematita - Martita	55	24	26.50	86.83	0.964	0.0006	0.504	6213.05
EG-9	Hornfels filítico	50	18	26.30	87.79	0.506	0.0002	0.506	4684.82
EG-10	Magnetita	40	24	26.40	159.07	0.33	4.54E-05	0.511	2811.71
EG-11	Magnetita	55	24	26.90	116.98	0.964	0.0006	0.504	6213.05
EG-12	Magnetita	50	24	25.80	105.46	0.675	0.0002	0.506	5000.00
EG-13	Magnetita	40	24	25.80	86.74	0.33	4.54E-05	0.511	2618.66
EG-14	Hornfels filítico	55	18	26.10	135.60	0.723	0.0006	0.504	6667.61
EG-15	Hematita - Martita	55	24	26.70	64.70	0.964	0.0006	0.504	5363.18
EG-16	Hornfels filítico	45	18	26.10	230.06	0.354	0.0001	0.508	3749.47
EG-17	Hornfels filítico	50	18	26.60	125.95	0.506	0.0002	0.506	5000.00
EG-18	Magnetita	55	24	26.90	199.10	0.964	0.0006	0.504	6667.61

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 3. 32:** Propiedades de resistencia y deformación – Mina 3

Estación Geomecánica	Litología	GSI	mi	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Resistencia a Compresión (MPa)	mb	s	a	Es (MPa)
EG-1	Hornfels filítico	55	18	26.70	60.77	0.723	0.0006	0.504	5197.74
EG-2	Hornfels filítico	40	18	26.40	152.30	0.248	0.0000454	0.511	2811.71
EG-3	Hornfels filítico	45	18	26.60	166.75	0.354	0.0001	0.508	3749.47
EG-4	Hornfels filítico	40	18	26.20	130.42	0.248	0.0000454	0.511	2811.71
EG-5	Hornfels filítico	55	18	26.10	134.11	0.723	0.0006	0.504	6667.61
EG-6	Hornfels filítico	50	18	27.00	132.62	0.506	0.0002	0.506	5000.00
EG-7	Hematita - Martita	50	24	27.60	153.12	0.675	0.0002	0.506	5000.00
EG-8	Hornfels filítico	50	18	27.80	228.53	0.506	0.0002	0.506	5000.00
EG-9	Hornfels filítico	50	18	26.40	143.86	0.506	0.0002	0.506	5000.00
EG-10	Hornfels filítico	55	18	27.00	103.34	0.723	0.0006	0.504	6667.61
EG-11	Hornfels filítico	45	18	26.90	91.25	0.354	0.0001	0.508	3581.68

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 3. 33:** Propiedades de resistencia y deformación – Mina 4

Estación Geomecánica	Litología	GSI	mi	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Resistencia a Compresión (MPa)	mb	s	a	Es (MPa)
EG-1	Hornfels filítico	55	18	26.50	110.30	0.723	0.0006	0.504	6667.61
EG-2	Hornfels filítico	50	18	26.20	73.54	0.506	0.0002	0.506	4287.77
EG-3	Gabrodiorita	45	30	27.30	138.62	0.59	0.0001	0.508	3749.47
EG-4	Hornfels filítico	55	18	26.40	112.13	0.723	0.0006	0.504	6667.61
EG-5	Hornfels filítico	50	18	26.10	126.19	0.506	0.0002	0.506	5000.00
EG-6	Hematita - Martita	40	24	26.10	177.98	0.33	0.0000454	0.511	2811.71
EG-7	Magnetita	50	24	27.00	175.44	0.675	0.0002	0.506	5000.00
EG-8	Magnetita	45	24	26.30	96.58	0.472	0.0001	0.508	3684.80
EG-9	Hematita - Martita	50	24	26.00	75.46	0.675	0.0002	0.506	4343.39
EG-10	Hornfels filítico	55	18	26.50	62.88	0.723	0.0006	0.504	5287.21
EG-11	Hornfels filítico	50	18	26.70	50.64	0.506	0.0002	0.506	3558.09
EG-12	Hornfels filítico	55	18	26.50	94.37	0.723	0.0006	0.504	6477.20
EG-13	Hematita - Martita	50	24	27.10	141.98	0.675	0.0002	0.506	5000.00
EG-14	Andesita	55	24	26.40	191.95	0.964	0.0006	0.504	6667.61
EG-15	Hornfels filítico	50	18	26.40	61.20	0.506	0.0002	0.506	3911.52
EG-16	Hornfels filítico	45	18	26.40	64.22	0.354	0.0001	0.508	3004.73
EG-17	Hornfels filítico	50	18	27.10	133.58	0.506	0.0002	0.506	5000.00
EG-18	Hornfels filítico	45	18	26.20	26.54	0.354	0.0001	0.508	1931.61
EG-19	Hornfels filítico	55	18	26.40	133.30	0.723	0.0006	0.504	6667.61
EG-20	Hornfels filítico	55	18	26.30	121.06	0.723	0.0006	0.504	6667.61
EG-21	Hematita - Martita	50	24	26.30	201.36	0.675	0.0002	0.506	5000.00
EG-22	Hornfels filítico	45	18	26.60	65.09	0.354	0.0001	0.508	3025.01
EG-23	Hornfels filítico	55	18	26.30	42.10	0.723	0.0006	0.504	4326.24
EG-24	Gabrodiorita	55	30	26.10	109.15	1.206	0.0006	0.504	6667.61
EG-25	Gabrodiorita	45	30	26.10	131.18	0.59	0.0001	0.508	3749.47
EG-26	Hornfels filítico	45	18	26.40	114.48	0.354	0.0001	0.508	3749.47

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.3.5. Estimación de los parámetros de resistencia al corte de las discontinuidades

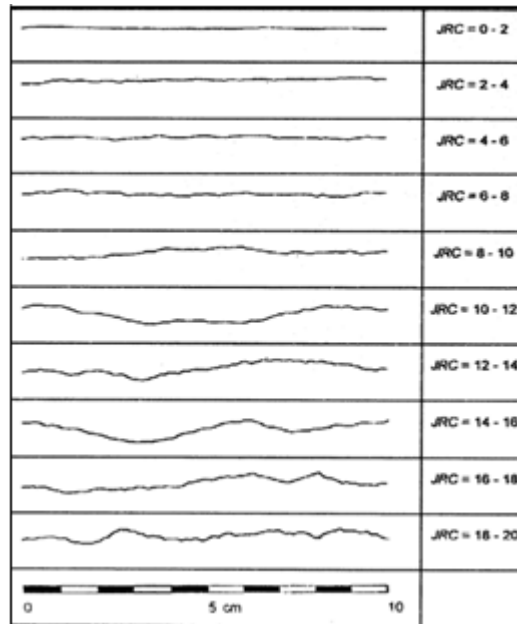
La superficie de una discontinuidad nunca es completamente lisa, sino que presenta ondulaciones y asperezas que tienen una influencia importante en la resistencia al corte, especialmente para fines de estabilidad de taludes. El aumento de la rugosidad representa también un aumento en la resistencia al esfuerzo cortante. Barton estudió el comportamiento de las discontinuidades y propuso la siguiente relación de resistencia al corte a partir de un esfuerzo normal.

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

Dónde:

- $\phi_r$ : Ángulo de fricción residual.
- JRC: Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad.
- JCS: Resistencia de la pared de la discontinuidad.

Los valores de JRC pueden determinarse por medio de la comparación de la apariencia de la superficie de la discontinuidad con los perfiles estándar publicados por Barton o a partir de pruebas de volteo en muestras de discontinuidades naturales de roca. Ver Figura N° 3. 6.



**Figura N° 3. 6:** Perfiles de rugosidad y valores de JRC.  
Fuente: Barton y Chouvey (1977).

A partir de las ecuaciones que relacionan estos tres parámetros de entrada, para cada valor de “σ<sub>n</sub>” se pueden obtener los valores del ángulo de fricción (Φ) y cohesión (c) de la discontinuidad.

Finalmente, los parámetros de fricción para el análisis de estabilidad, se estiman eligiendo un valor de esfuerzo normal promedio similar al que van a estar sometidas las discontinuidades.

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} = \tan \left( \phi_r + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) - \frac{\pi}{180} \times \frac{JRC}{\ln 10} \left[ \tan^2 \left( \phi_r + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) + 1 \right]$$

$$C_t = \tau - \sigma_n \tan \phi_t$$

$$\phi_t = \tan^{-1} \left( \frac{\varepsilon_\tau}{\varepsilon \sigma_n} \right)$$

Siendo las ecuaciones no válidas para  $\sigma_n = 0$  y para  $JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r > 70^\circ$

Los ángulos de fricción y cohesión para las discontinuidades serán estimadas utilizando dicha metodología.



## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Características Geológicas

Del marco geológico local se determina que los aspectos litológicos más característicos relacionados a la geología local del área de estudio, son los afloramientos meta - sedimentarios llamados hornfels filítico, que conforman la roca encajonante y enjambre de diques andesíticos y dacíticos formando principalmente estructuras tipo sills.

El arreglo estructural de las Minas 2-3-4, consiste en cuerpos estratoligados de rumbo E-O a NE-SO y buzamiento entre 35° y 65° NO, a grandes rasgos, es concordante con los estratos circundantes.

Por otro lado, a través del mapeo geológico realizado a lo largo de los bancos y taludes, se observa que las rocas del Yacimiento Marcona están dominados por fallas mayores que las cortan de manera transversal. Estas fallas son: falla Pista con rumbo N 65° W e inclinaciones de 45° a 60° NE y de 70° a 74° SW, falla repetición con rumbo N 45°E con inclinación de 35° a 65° SW y la falla La Huaca con rumbo de N25°W, con inclinaciones de 55° a 60° NE y de 77° a 80° SW. Estas discontinuidades mayores están acompañadas por diaclasas y fracturas, cuyas orientaciones se presentan de manera paralela a dichos planos principales de falla.

#### 4.2. Características y condiciones geomecánicas del macizo rocoso

##### 4.2.1. Análisis de estabilidad de taludes a nivel de bancos

Se ha evaluado la estabilidad de los taludes de los bancos en condiciones actuales y proyectadas de los tajos de las Minas 2-3-4. Según la operación de estas minas se tiene proyectado alcanzar las dimensiones presentadas en la Tabla N° 4. 1.

**Tabla N° 4. 1:** Dimensiones actuales y proyectadas de las Minas 2-3-4

Mina	Actual (2 012)				Proyectado			
	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Nivel Inferior (msnm)	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Nivel Inferior (msnm)
Mina 2	712	623	156	629	720	740	276	509
Mina 3	458	904	276	497	500	870	348	425
Mina 4	1100	854	240	533	1100	840	348	425

Fuente: Mina 2-3-4.

En los Planos GT-007-01 y GT-008-01 del Anexo I se presenta el plano topográfico de las Minas 2-3-4 en las condiciones actuales y proyectadas respectivamente.

#### 4.2.2. Metodología utilizada

Para analizar la estabilidad de un talud hay que tener en cuenta las características del macizo rocoso donde se proyecta la excavación. Si se trata de un macizo rocoso con gran resistencia en conjunto pero diaclasado o con fallas, son las discontinuidades las que van a gobernar el tipo de rotura. Si, por el contrario, la resistencia del macizo rocoso es baja, la rotura viene condicionada por la resistencia al corte de éste. Además, existen otros factores que pueden condicionar la rotura, como la presencia de agua, los efectos vibratorios provocados por voladuras, los sismos, etc.

Para evaluar la estabilidad de taludes se ha seguido la siguiente metodología:

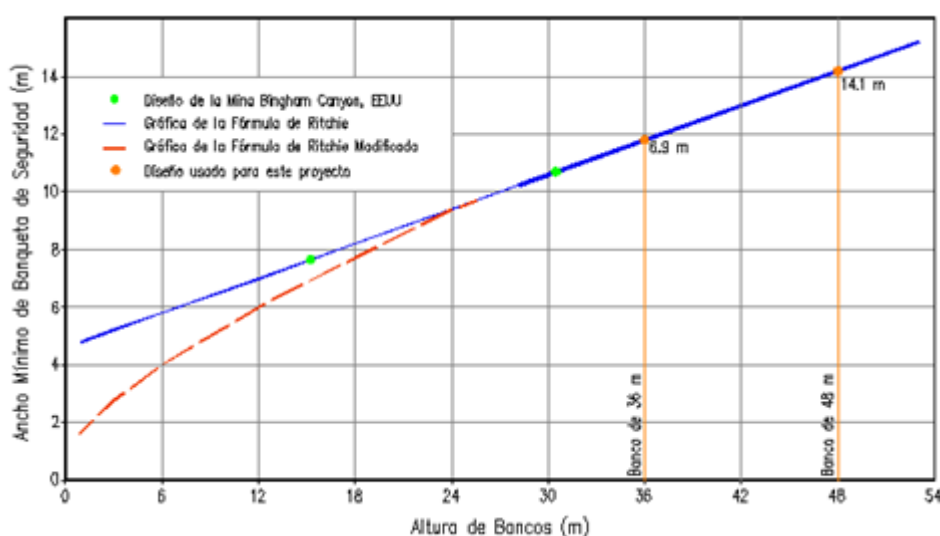
- Ejecución de una campaña de investigación geológica y geotécnica.
- Investigación de las características resistentes de la roca intacta y de las discontinuidades, mediante ensayos de campo y de laboratorio.
- Determinación de los criterios de rotura más adecuados para explicar los comportamientos observados en los macizos rocosos.
- Análisis cinemático de roturas
- Análisis de la estabilidad de los taludes utilizando modelos de equilibrio límite.

En este capítulo se desarrollará la definición de los criterios de cálculo y el análisis cinemático de las roturas.

### 4.2.3. Verificación del diseño de los taludes de banco del tajo

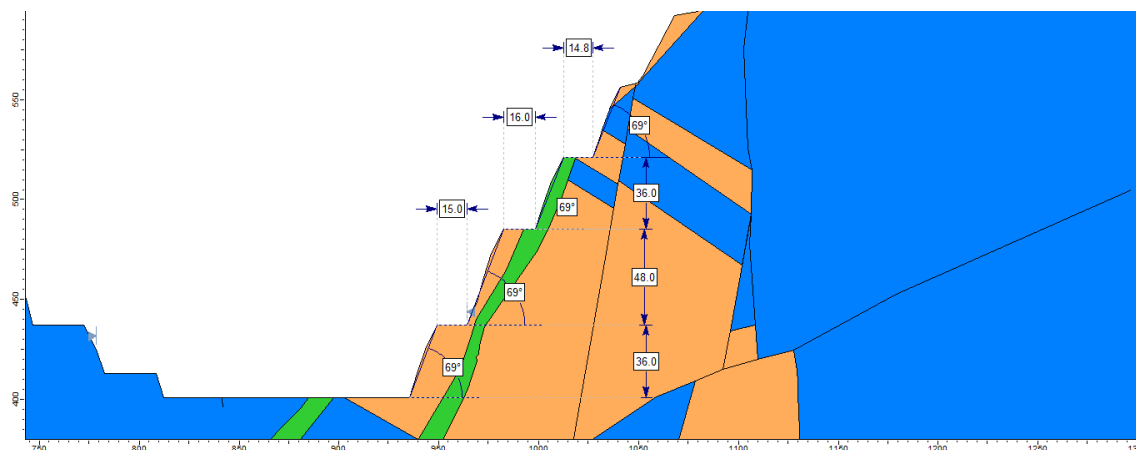
#### 4.2.3.1. Verificación del ancho mínimo de la berma de seguridad

El diseño de una 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 N° 4. 1 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 de las Minas 2-3-4, las cuales son de 36 m y 48 m. Con estos valores se calculó el ancho mínimo de la berma de seguridad, resultando 6.9 m y 14.1 m para los bancos de 36 m y 48 m respectivamente.



**Figura N° 4. 1:** Ancho mínimo de berma de seguridad de la Mina 2-3-4.  
(Fuente: Crouse, 2008)

El ancho de la berma de seguridad considerado en el desarrollo de las Minas 2-3-4 (En la Figura N° 4. 2) 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 N° 4. 2:** Valores de la berma de seguridad en la Mina 2-3-4  
(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.2.3.2. Verificación del ángulo de la cara de los bancos

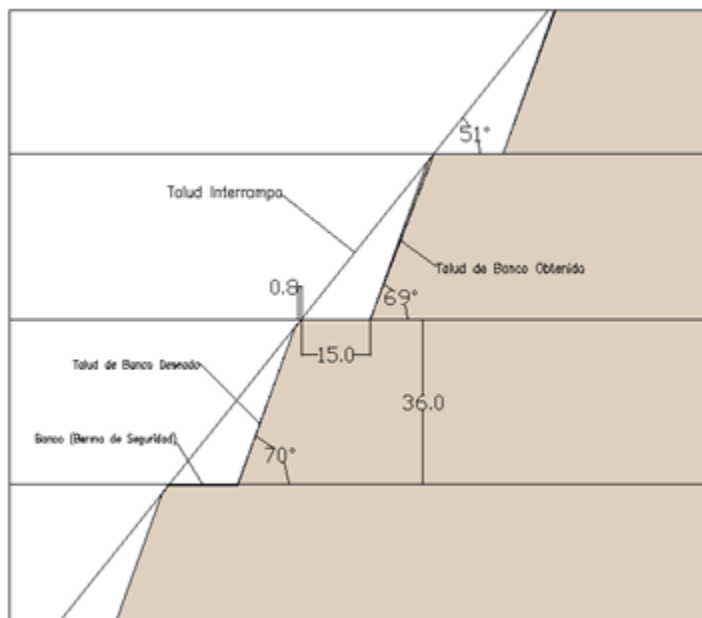
Es práctica común que, dependiendo del equipo usado y del tipo de roca de minado, el ángulo de la cara del banco excavado sea de  $65^\circ$  a  $70^\circ$ . No se debe usar el ángulo de la cara del banco excavado para el diseño de la berma de seguridad, debido a que siempre hay pérdida de cresta debido a las roturas planas y cuñas que deslizan a través de las discontinuidades, 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.

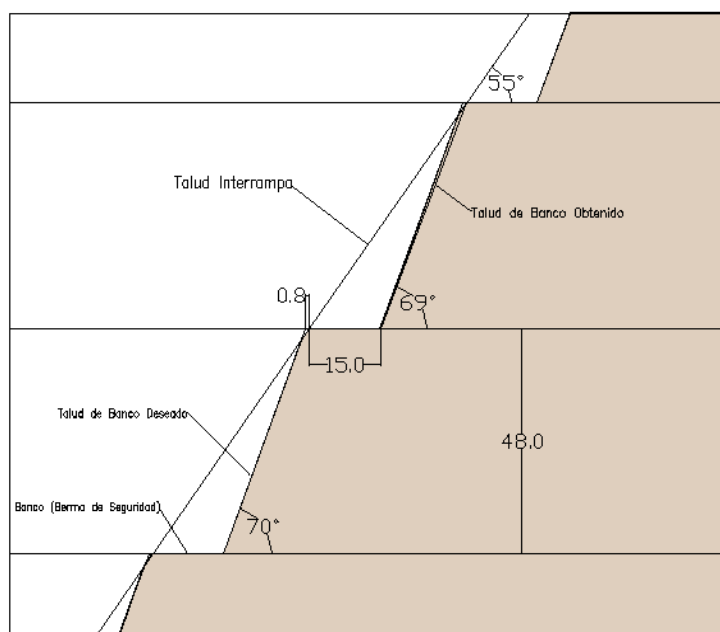
Para estimar el ángulo de la cara del banco, se asumió un valor fijo de pérdida de cresta a partir de un ángulo inicial de  $70^\circ$ . Este valor fue de 0.80 m, debido a que el 80% de los valores de espaciamiento de discontinuidades mapeados en campo era menor que 0.80 m, correspondiente a niveles de riesgo moderados a bajos, de acuerdo a lo presentado en el análisis de riesgos geológicos.

La pérdida o caída asumida en la cresta de un banco, 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 Figura N° 4. 3 y Figura N° 4. 4.



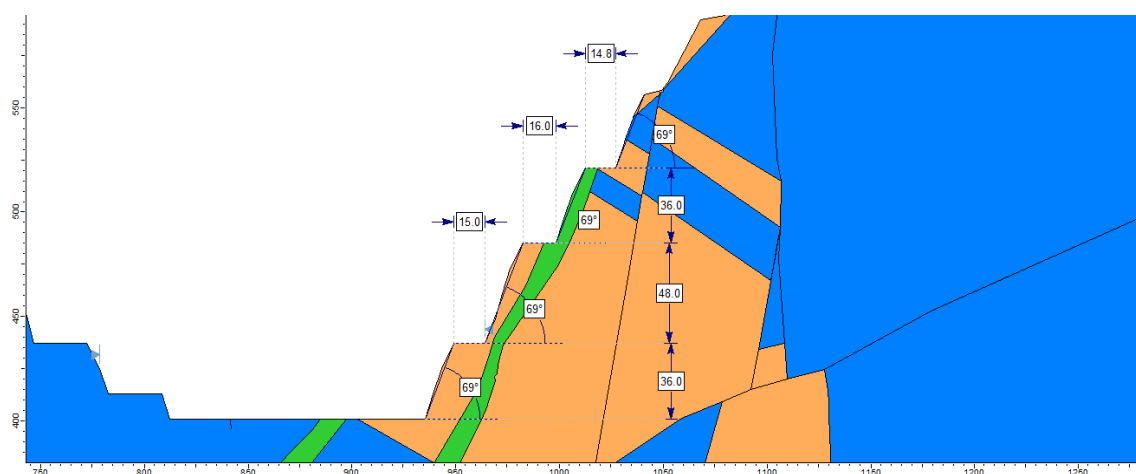
**Figura N° 4. 3:** Verificación del diseño genérico de 36 m. de altura.  
(Fuente: Elaboración propia)



**Figura N° 4. 4:** Verificación del diseño genérico de 48 m. de altura.  
Fuente: Elaboración propia.

De los diseños de bancos genéricos, se estimó un ángulo confiable de banco de  $69^\circ$ , que es la inclinación que se ha considerado durante el desarrollo de las Minas 2-3-4, por lo que su diseño actualmente se considera adecuado.

El máximo ángulo interrampa recomendado varía entre  $51^\circ$  a  $55^\circ$  de acuerdo a la altura de bancos y considerando la ausencia de rampas o accesos. En la Figura N° 4. 5 se presenta parte de la configuración de los taludes de las minas 2-3-4, donde se observa que de acuerdo a los cálculos presentados el diseño es adecuado.



**Figura N° 4. 5:** Configuración de los taludes de la Mina 2-3-4.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.4. 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 (sin considerar la acción del sismo),  $FS = 1.5$ .
- Condición pseudo - estática (considerando la acción del sismo),  $FS = 1.1$ .

#### 4.2.5. Condiciones de agua subterránea

En la etapa de evaluación de campo no se identificó la presencia de napa freática, tampoco zonas parcialmente saturadas, esto se debe a que en la zona de estudio las lluvias son mínimas y no hay riesgo de inundación, por lo que, para el análisis de estabilidad se ha considerado condición seca.

#### **4.2.6. 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.

#### **4.2.7. Propiedades de los materiales**

En el Anexo E: Parámetros de Resistencia de las Discontinuidades (Se presenta una estación geomecánica como modelo por cada mina), se ha presentado los parámetros de resistencia al corte de los principales sistemas de discontinuidades estimados según la metodología de Barton. Se han presentado los valores 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.

#### **4.2.8. Análisis cinemático del macizo rocoso**

Para la revisión de 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.

En consecuencia, se ha realizado el análisis de discontinuidades a fin de estimar el tipo de falla más probable que puede ocurrir considerando el talud de corte existente. Una vez determinado el tipo de falla, se analiza la estabilidad para cada caso, mediante el método de equilibrio límite, utilizando el programa de cómputo Swedge (Rocscience, 2012) para la falla tipo cuña y Rocplane (Rocscience, 2012) para la falla tipo planar.

Las redes estereográficas permiten el análisis tridimensional de las discontinuidades de un macizo rocoso, esto permite la identificación de las discontinuidades que tienen orientación desfavorable respecto a un talud existente; este procedimiento se denomina análisis cinemático. El potencial de

ocurrencia de la falla plana, en cuña y por vuelco de estratos pueden identificarse con esta metodología.

Mediante el análisis de la proyección estereográfica con el programa Dips es posible predecir el tipo de falla que produciría en un macizo rocoso con 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 posibilita ilustrar los planos de discontinuidades en términos de su buzamiento y su dirección de buzamiento.

La orientación de las principales familias de discontinuidades se obtiene a partir de un diagrama de concentración de polos. Generalmente se obtiene tres familias principales de discontinuidades del macizo rocoso y el resto se considera como secundarias.

En base a los resultados presentados en el Anexo E (Parámetros de Resistencia de las Discontinuidades), el ángulo de fricción residual de las discontinuidades varía entre  $26^\circ$  y  $31^\circ$ , de acuerdo con esto, para el análisis cinemático de los macizos rocosos se consideró un ángulo de fricción residual promedio de  $28^\circ$ .

En el Anexo F.1.1, Anexo F.2.1 y Anexo F.3.1 se presenta los estereogramas: los diagramas de rosas, diagramas de concentración de polos y la orientación de las principales familias de discontinuidades obtenidas de cada estación geomecánica en la Mina 2, 3 y 4 respectivamente, que han servido de base para el posterior análisis cinemático (en el Anexo F se presenta una estación geomecánica como modelo de procesamiento).

#### **4.2.7.1. Falla de tipo planar**

La falla tipo planar se produce a favor de una superficie pre - existente, que puede ser una estratificación, una junta tectónica, una falla geológica, etc. La condición básica es la presencia de discontinuidades buzando a favor del talud, con 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.



#### **4.2.7.2. Falla tipo cuña**

Corresponde al deslizamiento de un bloque en forma de cuña, formado por dos planos de discontinuidad, a favor de la línea de su intersección. Para que se produzca 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.

La obtención del 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 conlleva un número mucho mayor de variables angulares.

#### **4.2.7.3. Falla por volteo**

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.

En el Anexo F: Análisis de estabilidad a nivel de bancos, se presenta los análisis cinemáticos para fallas planas, en cuña y por volteo, realizados para cada estación geomecánica en la Mina 2, 3 y 4 respectivamente, que han servido de base para el posterior análisis de estabilidad (sin embargo en el Anexo F se presenta una estación geomecánica como modelo de procesamiento).

#### **4.2.9. Análisis de estabilidad a nivel de bancos – Diseño existente**

Una vez identificado el tipo de falla que puede ocurrir, se procede a estimar el factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudo - estáticas. Para los análisis de estabilidad se utilizó los programas Rocplane y Swedge (Rocscience), considerando fallas tipo planar y cuña, respectivamente.

No se realizaron análisis de estabilidad para falla tipo volteo debido a que en el análisis cinemático de las discontinuidades se han identificado muy pocas fallas

de este tipo, y durante la evaluación de campo tampoco se observaron en gran magnitud la falla por volteo en los taludes de los bancos existentes.

De la Tabla N° 4. 2 a Tabla N° 4. 4 se presentan el resumen de los factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad a nivel de bancos de los taludes de los tajos existentes, en donde se han resaltado las familias de discontinuidades que afectan en mayor medida la estabilidad del talud.

**Tabla N° 4. 2:** Análisis de estabilidad a nivel de bancos (D. existente – Mina 2)

Estación Geomecánica	Litología	N° Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> )/ Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático	
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar	Cuña
EG-1	Magnetita	5	1) 61°/067°	67°/069°	1) 4.2/47.3	F1	F1/F5	1.4	1.9	1.1	1.6	
			2) 41°/309°		2) 4.4/48.4							
			3) 58°/176°		3) 3.9/45.8							
			4) 57°/154°		4) 3.3/41.6							
			5) 88°/343°		5) 3.4/42.0							
EG-2	Magnetita	5	1) 47°/175°	70°/149°	1) 4.5/48.5	F1/F2		2.4		1.8		
			2) 71°/066°		2) 4.9/50.6							
			3) 35°/325°		3) 4.0/46.1							
			4) 25°/138°		4) 3.5/43.1							
			5) 66°/125°		5) 4.3/47.9							
EG-3	Magnetita	6	1) 87°/007°	70°/329°	1) 4.4/48.1	F5						
			2) 81°/225°		2) 3.3/41.3							
			3) 85°/340°		3) 4.1/46.6							
			4) 75°/245°		4) 4.0/46.1							
			5) 78°/152°		5) 4.2/47.3							
			6) 17°/296°		6) 4.1/46.8							
EG-4	Magnetita	4	1) 36°/331°	68°/346°	1) 4.9/50.5	F1 F2	F2/F3	2.0 1.9	4.7	1.4 1.5	3.9	
			2) 63°/004°		2) 5.1/51.1							
			3) 81°/084°		3) 5.0/51.1							
			4) 35°/101°		4) 3.8/45.2							
EG-5	Magnetita	5	1) 56°/031°	64°/041°	1) 3.8/44.8	F1	F1/F2	1.3	2.0	1.0	1.6	
			2) 68°/338°		2) 3.8/44.9							
			3) 27°/250°		3) 3.9/45.2							
			4) 54°/290°		4) 4.4/48.1							
			5) 85°/010°		5) 4.0/45.9							
EG-6	Hematita - Marrita	5	1) 67°/069°	74°/080°	1) 4.3/47.6	F1	F2/F3 F2/F5 F1/F5	1.2	2.4 2.2 1.9	1.0	1.8 1.7 1.6	
			2) 48°/132°		2) 4.2/47.2							
			3) 58°/017°		3) 3.5/42.5							
			4) 32°/095°		4) 4.3/47.6							
			5) 74°/020°		5) 4.2/47.3							

Estación Geomecánica	Litología	Nº Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> ) y Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático	
						Planar	Cuña	Volte	Planar	Cuña	Planar	Cuña
EG-7	Hematita - Martita	5	1) 86°/047° 2) 30°/113° 3) 67°/170° 4) 86°/140° 5) 80°/090°	83°/120°	1) 3.4/42.4 2) 4.9/50.5 3) 3.8/45.1 4) 4.3/47.8 5) 4.5/48.6		F1/F3 F1/F5 F3/F5				1.6 4.3 1.4	1.3 3.6 1.1
EG-8	Hematita - Martita	5	1) 80°/042° 2) 73°/201° 3) 67°/074° 4) 48°/118° 5) 78°/174°	70°/153°	1) 4.0/45.9 2) 4.0/46.2 3) 4.5/48.9 4) 4.7/49.6 5) 4.0/46.2		F1/F3 F2/F3 F2/F4 F3/F4				11.8 2.6 1.8 2.8	9.7 2.1 1.4 2.2
EG-9	Hornfels filítico	5	1) 71°/097° 2) 47°/345° 3) 84°/020° 4) 51°/133° 5) 85°/309°	72°/358°	1) 4.1/46.6 2) 4.0/46.1 3) 4.0/46.1 4) 3.3/41.5 5) 3.4/41.8	F2	F1/F2		1.2	2.2	0.9	1.7
EG-10	Magnetita	3	1) 24°/306° 2) 55°/077° 3) 56°/113°	73°/341°	1) 4.3/47.9 2) 4.0/46.1 3) 4.7/49.4							
EG-11	Magnetita	3	1) 70°/089° 2) 69°/266° 3) 78°/028°	77°/306°	1) 4.3/47.7 2) 4.3/47.7 3) 4.3/48.0		F2/F3				2.1	1.7
EG-12	Magnetita	3	1) 60°/083° 2) 58°/184° 3) 82°/358°	56°/035°	1) 4.2/47.2 2) 3.9/45.5 3) 4.3/47.8							
EG-13	Magnetita	4	1) 62°/085° 2) 60°/185° 3) 17°/318° 4) 34°/117°	57°/038°	1) 4.2/47.2 2) 4.7/49.7 3) 4.0/45.9 4) 3.9/45.4							
EG-14	Hornfels filítico	4	1) 73°/008° 2) 45°/017° 3) 36°/125° 4) 80°/084°	87°/067°	1) 4.3/47.8 2) 4.3/47.9 3) 4.7/49.7 4) 3.9/45.7	F4	F1/F4		0.9	1.2	0.0	1.0

Estación Geomecánica	Litología	Nº Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. $\alpha$ Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> ) y Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático	
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar	Cuña
EG-15	Hematita - Marrita	4	1) 52°/205° 2) 63°/054° 3) 64°/328° 4) 79°/275°	72°/156°	1) 3.6/43.6 2) 3.3/41.6 3) 3.9/45.8 4) 4.7/49.6			F3				
EG-16	Hornfels filítico	3	1) 72°/062° 2) 78°/189° 3) 40°/094°	79°/116°	1) 4.0/45.8 2) 3.6/43.2 3) 3.6/43.8					2.0 1.7		1.6 1.3
EG-17	Hornfels filítico	3	1) 73°/085° 2) 67°/141° 3) 63°/241°	74°/154°	1) 3.4/42.1 2) 3.8/45.2 3) 3.7/43.9	F2			1.1	1.9	0.9	1.6
EG-18	Magnetita	6	1) 68°/250° 2) 40°/291° 3) 57°/323° 4) 50°/036° 5) 36°/092° 6) 79°/191°	76°/154°	1) 4.4/48.1 2) 4.1/46.9 3) 4.2/47.4 4) 4.3/48.0 5) 4.1/46.8 6) 4.0/46.4			F3				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4. 3: Análisis de estabilidad a nivel de bancos (D. existente – Mina 3)

Estación Geomecánica	Litología	N° Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> ) y Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático	
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar	Cuña
EG-1	Hornfels filítico	5	1) 80°/061° 2) 81°/164° 3) 74°/038° 4) 36°/056° 5) 62°/317°	76°/085°	1) 4.4/48.5 2) 3.9/45.7 3) 3.0/38.8 4) 4.4/48.5 5) 4.5/48.9		F2/F3					1.6
EG-2	Hornfels filítico	4	1) 82°/356° 2) 70°/077° 3) 24°/045° 4) 44°/182°	77°/140°	1) 4.4/48.2 2) 4.2/47.4 3) 4.2/47.0 4) 4.5/48.9		F2/F4					1.7
EG-3	Hornfels filítico	5	1) 57°/071° 2) 81°/078° 3) 78°/162° 4) 31°/074° 5) 65°/105°	72°/146°	1) 4.4/48.1 2) 4.4/48.4 3) 3.9/45.3 4) 5.4/52.5 5) 4.7/49.7		F2/F5				4.5	3.6
EG-4	Hornfels filítico	5	1) 59°/295° 2) 63°/275° 3) 79°/030° 4) 54°/330° 5) 79°/058°	77°/355°	1) 4.8/49.9 2) 4.8/50.3 3) 4.0/46.3 4) 4.8/49.9 5) 5.1/51.4		F1/F5 F2/F5 F4/F5 F4/F1 F4/F3				2.6 4.0 1.6 1.7 1.3	2.0 3.1 1.3 1.4 1.1
EG-5	Hornfels filítico	4	1) 43°/310° 2) 87°/016° 3) 88°/045° 4) 58°/110°	70°/342°	1) 4.1/46.9 2) 4.2/47.1 3) 4.1/46.5 4) 4.7/49.5		F1/F3				1.8	1.4
EG-6	Hornfels filítico	5	1) 72°/087° 2) 86°/345° 3) 25°/046° 4) 21°/153° 5) 61°/282°	73°/027°	1) 4.6/49.4 2) 5.0/50.8 3) 4.4/48.3 4) 4.9/50.6 5) 5.1/51.5							

Estación Geomecánica	Litología	Nº Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> ) y Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático																			
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar	Cuña																		
EG-7	Hematita - Marfita	4	1) 52°/335°	82°/316°	1) 4.0/46.3	F1	F1/F4		2.2	1.7	0.7	1.1																		
			2) 40°/305°										F2	F2/F4	1.6	1.2														
			3) 61°/260°														F3	F3/F1	1.4	1.1										
			4) 66°/012°																		F4	F3/F4	1.8	1.5						
	F5	F3/F2	2.6	2.0																										
1) 58°/138°					F3	F3/F4	1.9	1.5																						
2) 75°/080°									F4	F3/F5	1.8	1.4																		
3) 46°/027°													F5	F2/F5	2.3	1.9														
4) 62°/105°	F6	F4/F5	3.8	2.9																										
5) 70°/322°																														
1) 33°/317°					1) 4.5/48.5																									
2) 76°/236°													2) 5.6/53.1																	
3) 85°/337°	3) 3.8/45.0																													
4) 52°/017°																														
					1) 4.5/48.6																									
1) 66°/090°													2) 4.4/48.2																	
2) 43°/317°	3) 4.9/50.7																													
3) 83°/186°																														
4) 65°/357°					1) 5.1/51.1																									
													2) 4.2/47.3																	
1) 72°/083°	3) 4.0/46.3																													
2) 69°/188°																														
3) 30°/290°					F2	F1/F4	5.4	4.6	4.9	3.5	2.6																			
4) 72°/233°																														

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 4. 4: Análisis de estabilidad a nivel de bancos (D. existente – Mina 4)

Estación Geomecánica	Litología	N° Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> ) y Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático	
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar	Cuña
EG-1	Hornfels filítico	5	1) 65°/094° 2) 76°/193° 3) 62°/357° 4) 49°/231° 5) 19°/257°	74°/138°	1) 4.9/50.4 2) 4.2/47.5 3) 4.9/50.7 4) 4.1/46.8 5) 4.5/48.9		F1/F2			1.9		1.6
EG-2	Hornfels filítico	5	1) 64°/094° 2) 70°/160° 3) 71°/212° 4) 73°/190° 5) 69°/348°	74°/153°	1) 4.6/49.3 2) 4.9/50.5 3) 4.4/48.4 4) 4.1/46.5 5) 3.5/42.6	F2	F1/F2 F1/F3 F1/F4 F2/F4	2.0	2.4 2.4 1.9 3.7	1.6		1.9 2.0 1.5 3.1
EG-3	Gabrodiorita	6	1) 83°/210° 2) 33°/145° 3) 74°/132° 4) 85°/147° 5) 76°/254° 6) 35°/299°	73°/221°	1) 5.2/51.6 2) 2.7/52.4 3) 2.6/52.0 4) 4.4/48.2 5) 4.2/47.4 6) 4.2/47.0		F3/F5		2.3			1.9
EG-4	Hornfels filítico	6	1) 21°/299° 2) 82°/357° 3) 81°/228° 4) 67°/079° 5) 59°/360° 6) 62°/317°	74°/315°	1) 4.3/47.9 2) 4.3/47.8 3) 4.5/48.9 4) 4.7/49.5 5) 4.4/48.4 6) 4.2/47.3	F6	F3/F5 F3/F6 F5/F6	1.5	3.2 1.9 1.9	1.2		2.5 1.6 1.6
EG-5	Hornfels filítico	5	1) 50°/254° 2) 67°/325° 3) 78°/046° 4) 64°/013° 5) 52°/040°	76°/327°	1) 3.9/45.6 2) 4.2/47.3 3) 4.4/48.2 4) 4.1/46.5 5) 3.9/45.2	F2	F1/F4 F2/F3 F2/F4 F3/F4	1.5	2.7 2.2 2.1 4.2	1.2		2.0 1.8 1.8 3.5



Estación Geomecánica	Litología	Nº Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> ) y Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad	
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar	Cuña
EG-6	Hematita - Marrita	5	1) 85°/017° 2) 88°/347° 3) 61°/296° 4) 68°/087° 5) 25°/310°	70°/337°	1) 4.4/48.2 2) 4.3/47.6 3) 4.7/49.8 4) 4.2/47.0 5) 4.5/48.9							
EG-7	Magnetita	5	1) 69°/063° 2) 85°/034° 3) 83°/154° 4) 34°/329° 5) 24°/217°	54°/145°	1) 4.3/47.6 2) 4.0/46.3 3) 4.0/46.4 4) 4.4/48.2 5) 4.2/47.0							
EG-8	Magnetita	5	1) 77°/069° 2) 51°/065° 3) 58°/253° 4) 45°/013° 5) 67°/114°	72°/153°	1) 4.2/47.2 2) 4.2/47.2 3) 4.0/46.1 4) 4.4/48.2 5) 4.5/48.9		F1/F5 F3/F5		4.9 2.2		4.1 1.7	
EG-9	Hematita - Marrita	6	1) 45°/222° 2) 78°/172° 3) 53°/135° 4) 75°/115° 5) 67°/056° 6) 37°/064°	68°/159°	1) 4.3/48.0 2) 4.8/50.2 3) 4.1/46.7 4) 4.4/48.2 5) 4.5/48.9 6) 4.2/47.4							
EG-10	Hornfels filítico	4	1) 88°/047° 2) 65°/030° 3) 30°/113° 4) 78°/079°	74°/146°	1) 4.7/49.8 2) 4.3/47.6 3) 3.8/44.9 4) 4.0/46.2		F1/F4		12.0		10.0	
EG-11	Hornfels filítico	6	1) 81°/287° 2) 75°/185° 3) 50°/248° 4) 54°/090° 5) 16°/272° 6) 49°/135°	74°/225°	1) 4.9/50.6 2) 4.7/49.5 3) 4.4/48.4 4) 4.5/48.9 5) 4.5/49.0 6) 4.5/48.8		F2/F3		1.5		1.1	

Estación Geomecánica	Litología	Nº Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> ) y Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático	
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar	Cuña
EG-12	Hornfels filítico	5	1) 69°/002° 2) 52°/149° 3) 74°/228° 4) 42°/116° 5) 66°/262°	77°/235°	1) 4.6/49.2 2) 3.5/43.1 3) 4.3/48.0 4) 4.0/45.9 5) 4.2/47.4	F3	F3/F5		2.1	1.3	1.8	1.1
							F1/F3 F1/F5 F1/F6 F4/F5 F4/F6				2.3 1.9 3.1 1.9 2.1	
EG-13	Hematita - Martita	6	1) 82°/027° 2) 80°/172° 3) 77°/276° 4) 44°/249° 5) 37°/305° 6) 60°/350°	81°/295°	1) 4.7/49.6 2) 4.2/47.2 3) 4.7/49.6 4) 4.0/45.9 5) 4.4/48.4 6) 4.3/47.7	F3			1.7		1.4	
EG-14	Andesita	5	1) 74°/211° 2) 60°/097° 3) 79°/280° 4) 25°/322° 5) 63°/121°	66°/300°	1) 4.3/47.9 2) 4.3/47.9 3) 4.7/49.5 4) 4.2/47.4 5) 4.2/47.0			F5				
EG-15	Hornfels filítico	6	1) 78°/206° 2) 89°/254° 3) 44°/156° 4) 87°/097° 5) 66°/317° 6) 56°/120°	72°/327°	1) 4.3/47.9 2) 4.1/46.7 3) 4.2/47.2 4) 4.5/48.5 5) 4.0/46.1 6) 4.1/46.7	F5	F2/F5		1.3	2.1	1.0	1.7
EG-16	Hornfels filítico	4	1) 58°/091° 2) 89°/216° 3) 65°/240° 4) 86°/092°	73°/170°	1) 4.5/48.9 2) 4.1/46.7 3) 5.2/51.6 4) 4.8/49.9					4.5		3.5
							F3/F4					
EG-17	Hornfels filítico	5	1) 81°/314° 2) 83°/204° 3) 82°/235° 4) 53°/307° 5) 06°/253°	75°/133°	1) 3.9/45.5 2) 4.0/46.3 3) 4.4/48.1 4) 4.4/48.2 5) 4.2/47.4			F1 F4				

Estación Geomecánica	Litología	Nº Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> )/ Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático	
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar	Cuña
EG-18	Hornfels filítico	5	1) 87°/334° 2) 82°/228° 3) 59°/309° 4) 06°/269° 5) 77°/266°	82°/290°	1) 3.5/42.6 2) 4.1/46.7 3) 3.1/39.6 4) 3.6/43.9 5) 3.3/41.2		F2/F3			1.5		1.2
EG-19	Hornfels filítico	6	1) 74°/035° 2) 74°/132° 3) 75°/095° 4) 81°/320° 5) 62°/290° 6) 46°/062°	85°/335°	1) 3.8/45.1 2) 3.1/43.5 3) 3.2/44.0 4) 3.9/45.5 5) 4.0/46.1 6) 3.7/44.4		F1/F4 F1/F5	F2		1.5 1.5		1.3 1.2
EG-20	Hornfels filítico	5	1) 62°/266° 2) 45°/316° 3) 81°/349° 4) 80°/020° 5) 51°/058°	81°/319°	1) 4.5/48.9 2) 4.6/49.3 3) 4.2/47.1 4) 4.3/47.8 5) 4.1/46.7		F1/F4 F2/F4	F2	1.5	2.3 1.7	1.1	1.9 1.3
EG-21	Hematita - Marfita	4	1) 75°/040° 2) 79°/348° 3) 30°/318° 4) 49°/347°	68°/314°	1) 4.9/50.6 2) 4.3/47.7 3) 4.1/46.9 4) 4.2/47.4		F1/F4			2.4		1.9
EG-22	Hornfels filítico	4	1) 49°/080° 2) 67°/242° 3) 85°/088° 4) 87°/200°	71°/176°	1) 4.5/48.7 2) 4.4/48.1 3) 5.3/52.2 4) 4.8/50.2		F2/F3			5.5		4.2
EG-23	Hornfels filítico	4	1) 50°/080° 2) 86°/199° 3) 84°/087° 4) 65°/240°	75°/151°	1) 4.1/46.9 2) 4.8/50.0 3) 4.6/49.1 4) 4.8/30.8		F3/F4			4.2		3.2

Estación Geomecánica	Litología	Nº Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. $\alpha$ Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> ) y Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático	
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar	Cuña
EG-24	Gabrodiorita	3	1) 78°/057°	80°/148°	1) 4.7/49.6							
			2) 88°/158°		2) 4.9/50.5							
			3) 06°/248°		3) 4.8/49.9							
EG-25	Gabrodiorita	6	1) 84°/135°	78°/220°	1) 4.0/46.3							
			2) 77°/185°		2) 4.5/48.9							
			3) 54°/250°		3) 4.3/47.7							
			4) 71°/090°		4) 4.2/47.2	F5			1.4		1.1	
			5) 53°/210°		5) 4.7/49.5							
			6) 82°/275°		6) 4.1/46.6							
EG-26	Hornfels filítico	5	1) 70°/189°	65°/221°	1) 4.1/46.7							
			2) 69°/151°		2) 4.2/47.4							
			3) 67°/282°		3) 4.0/45.8							
			4) 73°/114°		4) 4.3/47.9							
			5) 48°/249°		5) 4.4/48.1							

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados presentados en las tablas anteriores, se concluye que hay pocas zonas con un factor de seguridad menor que 1.1, por lo que se recomienda que para esos sectores realizar el desquinche selectivo, esto es con la finalidad de eliminar los bloques de roca que están a punto de caer y/o deslizarse.

En el Anexo F.1.2, Anexo F.2.2 y Anexo F.3.2: Análisis de estabilidad a nivel de bancos con el diseño actual, se presentan las salidas gráficas obtenidas de la aplicación de los programas Swedge y Rocplane en el análisis de estabilidad de fallas en cuña y bloque para las condiciones existentes (en el Anexo F se presenta una estación geomecánica como modelo de procesamiento).

#### **4.2.10. Análisis de estabilidad a nivel de bancos – Diseño Proyectado**

Para el diseño proyectado se han considerado las estaciones geomecánicas ubicadas en los niveles más bajos (es decir las que se encuentran en la cota más baja).

Al igual que para el caso del diseño existente, luego de identificar el tipo de falla que puede ocurrir, se procede a estimar el factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudo - estáticas. Para los análisis de estabilidad se utilizó los programas Rocplane y Swedge de Rocscience, considerando fallas tipo planar y cuña, respectivamente.

No se realizaron análisis de estabilidad para falla tipo volteo debido a que en el análisis de discontinuidades se han identificado muy pocas fallas de este tipo, y durante la evaluación de campo tampoco se observaron en gran magnitud la falla por volteo en los taludes de los bancos existente.

En la Tabla N° 4. 5, Tabla N° 4. 6 y Tabla N° 4. 7 se presentan el resumen de los factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad a nivel de bancos de los taludes de los tajos para el diseño proyectado.

**Tabla N° 4. 5:** Análisis de estabilidad a nivel de bancos (D. proyectado – Mina 2)

Estación Geomecánica	Litología	N° Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> )/ Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático	
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar	Cuña
EG-1	Magnetita	5	1) 61°/067°	72°/083°	1) 7.5/44.3	F1	F1/F5		1.4	1.9	1.1	1.5
			2) 41°/309°		2) 7.8/45.7							
			3) 58°/176°		3) 7.1/43.1							
			4) 57°/154°		4) 6.1/39.0							
			5) 88°/343°		5) 6.2/39.3							
EG-2	Magnetita	5	1) 47°/175°	72°/151°	1) 7.9/45.8		F1/F2 F2/F5			2.6 13. 0		2.0 10.8
			2) 71°/066°		2) 8.7/48.0							
			3) 35°/325°		3) 7.2/43.4							
			4) 25°/138°		4) 6.4/40.4							
			5) 66°/125°		5) 7.7/45.2							
EG-3	Magnetita	6	1) 87°/007°	72°/311°	1) 7.8/45.4		F2/F4	F5		7.9		6.5
			2) 81°/225°		2) 6.0/38.6							
			3) 85°/340°		3) 7.3/43.9							
			4) 75°/245°		4) 7.2/43.4							
			5) 78°/152°		5) 7.5/44.6							
			6) 17°/296°		6) 7.4/44.1							
EG-4	Magnetita	4	1) 36°/331°	72°/351°	1) 8.6/47.8	F1 F2		2.1 1.8			1.5 1.5	
			2) 63°/004°		2) 8.9/48.5							
			3) 81°/084°		3) 8.8/48.4							
			4) 35°/101°		4) 6.9/42.5							
EG-7	Hematita - Marfita	5	1) 86°/047°	72°/127°	1) 6.3/39.7		F1/F3 F3/F5			3.1 6.6		2.5 5.5
			2) 30°/113°		2) 8.6/47.9							
			3) 67°/170°		3) 6.9/42.5							
			4) 86°/140°		4) 7.7/45.1							
			5) 80°/090°		5) 7.9/45.9							

Estación Geomecánica	Litología	N° Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> ) y Fricción (°)	Tipo de Falla		Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático	
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar
EG-18	Magnetita	6	1) 68°/250°	72°/151°	1) 7.8/45.4						
			2) 40°/291°		2) 7.4/44.2						
			3) 57°/323°		3) 7.6/44.8						
			4) 50°/036°		4) 7.7/45.4						
			5) 36°/092°		5) 7.4/44.2						
			6) 79°/191°		6) 7.2/43.8						

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 4. 6:** Análisis de estabilidad a nivel de bancos (D. proyectado – Mina 3)

Estación Geomecánica	Litología	N° Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> )/ Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad d Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático		
						Plana	Cuña	Volteo	Plana	Cuña	Plana	Cuña	
EG-4	Hornfels filítico	5	1) 59°/295° 2) 63°/275° 3) 79°/030° 4) 54°/330° 5) 79°/058°	72°/340°	1) 8.4/47.2 2) 8.5/47.6 3) 7.2/43.7 4) 8.4/47.2 5) 9.0/48.7	F4	F1/F5			3.1			2.5
							F2/F5			4.5			3.5
							F4/F5			2.0			1.6
							F4/F3			1.8			1.5
							F4/F2		1.5		1.1		1.6
EG-8	Hornfels filítico	5	1) 58°/138° 2) 75°/080° 3) 46°/027° 4) 62°/105° 5) 70°/322°	72°/036°	1) 8.0/46.1 2) 8.7/48.2 3) 9.1/49.1 4) 8.0/46.1 5) 7.5/44.6	F3	F4/F1			2.1			1.7
							F2/F1			9.6			7.9
							F3/F1			2.6			2.1
							F3/F2			3.1			2.5
							F3/F4			2.1			1.7
		1.7		1.2		1.7							
				4.1			3.1						
				3.4			2.7						

Fuente: Elaboración propia.



Tabla N° 4. 7: Análisis de estabilidad a nivel de bancos (D. proyectado – Mina 4)

Estación Geomecánica	Litología	N° Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> ) y Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático	
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar	Cuña
EG-6	Hematita - Marrita	5	1) 85°/017°	72°/52°	1) 7.8/45.5							4.0
			2) 88°/347°									
			3) 61°/296°									
			4) 68°/087°									
			5) 25°/310°									
EG-6	Hematita - Marrita	5	1) 85°/017°	72°/327°	1) 7.8/45.5							1.8
			2) 88°/347°									
			3) 61°/296°									
			4) 68°/087°									
			5) 25°/310°									
EG-7	Magnetita	5	1) 69°/063°	72°/151°	1) 7.6/45.0							4.3
			2) 85°/034°									
			3) 83°/154°									
			4) 34°/329°									
			5) 24°/217°									
EG-8	Magnetita	5	1) 77°/069°	72°/151°	1) 7.5/44.5							5.6
			2) 51°/065°									
			3) 58°/253°									
			4) 45°/013°									
			5) 67°/114°									
EG-12	Hornfels filítico	5	1) 69°/002°	72°/238°	1) 8.1/46.5							1.7
			2) 52°/149°									
			3) 74°/228°									
			4) 42°/116°									
			5) 66°/262°									
EG-13	Hematita - Marrita	6	1) 82°/027°	72°/300°	1) 8.2/46.9							2.7
			2) 80°/172°									
			3) 77°/276°									
			4) 44°/249°									
			5) 37°/305°									
			6) 60°/350°									

Estación Geomecánica	Litología	Nº Familias	Orientación de las Familias Principales	Buz. y Dirección de Buz. del Talud de Corte	Cohesión (T/m <sup>2</sup> ) y Fricción (°)	Tipo de Falla			Factor de Seguridad Estático		Factor de Seguridad Pseudo - Estático	
						Planar	Cuña	Volteo	Planar	Cuña	Planar	Cuña
EG-14	Andesita	5	1) 74°/211° 2) 60°/097° 3) 79°/280° 4) 25°/322° 5) 63°/121°	72°/300°	1) 7.7/45.2 2) 7.7/45.3 3) 8.3/46.8 4) 7.6/44.8 5) 7.4/44.4			F2 F5				
EG-15	Hornfels filítico	6	1) 78°/206° 2) 89°/254° 3) 44°/156° 4) 87°/097° 5) 66°/317° 6) 56°/120°	72°/326°	1) 7.7/45.3 2) 7.3/44.0 3) 7.5/44.5 4) 7.9/45.9 5) 7.2/43.4 6) 7.4/44.1			F5 F2/F5	1.9	3.0	1.6	2.5
EG-26	Hornfels filítico	5	1) 70°/189° 2) 69°/151° 3) 67°/282° 4) 73°/114° 5) 48°/249°	72°/225°	1) 7.4/44.1 2) 7.5/44.7 3) 7.1/43.2 4) 7.7/45.2 5) 7.8/45.4			F5 F1/F3 F2/F3 F2/F5	1.6	3.2 3.5 2.5	1.2	2.6 2.7 1.9

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los resultados presentados en las tablas anteriores, se concluye que los taludes de los bancos proyectados son estables, pues todos los factores de seguridad son mayores que los mínimos permisibles. En el Anexo F.1.3, Anexo F.2.3 y Anexo F.3.3: Análisis de estabilidad a nivel de bancos con el diseño proyectado, se presentan las salidas gráficas obtenidas de la aplicación de los programas Swedge y Rocplane en el análisis de estabilidad de fallas en cuña y bloque para las condiciones proyectadas (en el Anexo F se presenta a una estación geomecánica como modelo de procesamiento).

#### **4.2.11. Análisis de estabilidad global de los taludes del tajo**

Teniendo en cuenta los modos de falla, la estabilidad de los taludes de los macizos rocosos se pueden estudiar básicamente de dos maneras:

- Roturas controladas por las estructuras, que generan deslizamientos traslacionales en bloque y caídas de roca. Este modo de falla ha sido estudiado y analizado en el análisis de estabilidad a nivel de bancos presentado en el Capítulo 4.1.
- Falla por corte a través del macizo rocoso, que generan fundamentalmente deslizamientos traslacionales masivos y rotacionales. Este modo de falla debe ser estudiado mediante el análisis de estabilidad global presentado en este capítulo.

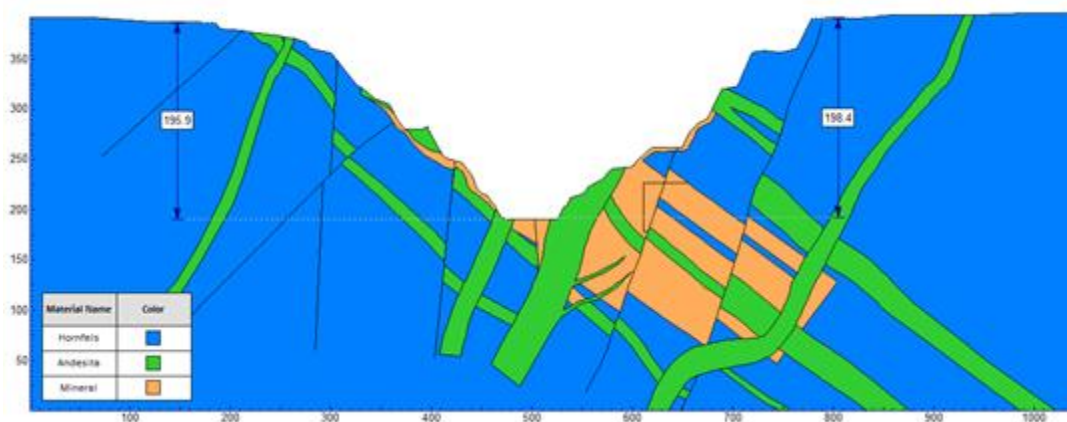
##### **4.2.11.1. Consideraciones geotécnicas generales**

Para el análisis de estabilidad global se ha considerado las secciones más críticas y representativas de los taludes en cada mina, los cuales han sido analizados en la condición actual y en la condición proyectada.

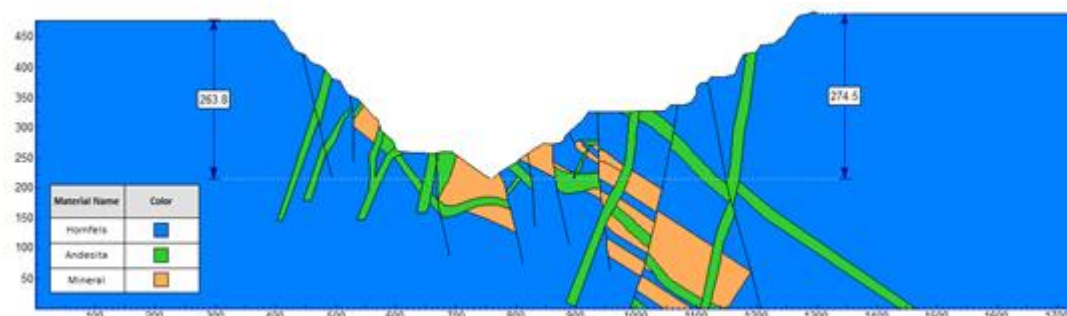
###### **4.2.11.1.1. Modelo Geológico – Geotécnico**

Para la elaboración del modelo geológico - geotécnico, se ha tomado en cuenta la información de las secciones geológicas de la mina 2-3-4, verificando la litología con la evaluación de campo y los sondeos diamantinos.

En la Figura N° 4. 6, Figura N° 4. 7 y Figura N° 4. 8 se presentan las secciones de análisis de cada mina de acuerdo a la geometría actual de los taludes del tajo.



**Figura N° 4. 6:** Sección de análisis de estabilidad de la Mina 2 – Geometría actual  
Fuente: Elaboración propia.



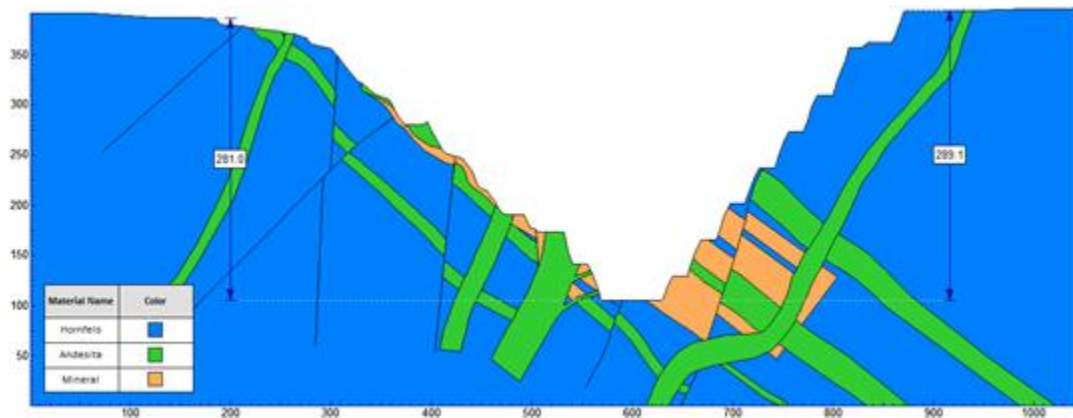
**Figura N° 4. 7:** Sección de análisis de estabilidad de la Mina 3 – Geometría actual  
Fuente: Elaboración propia.



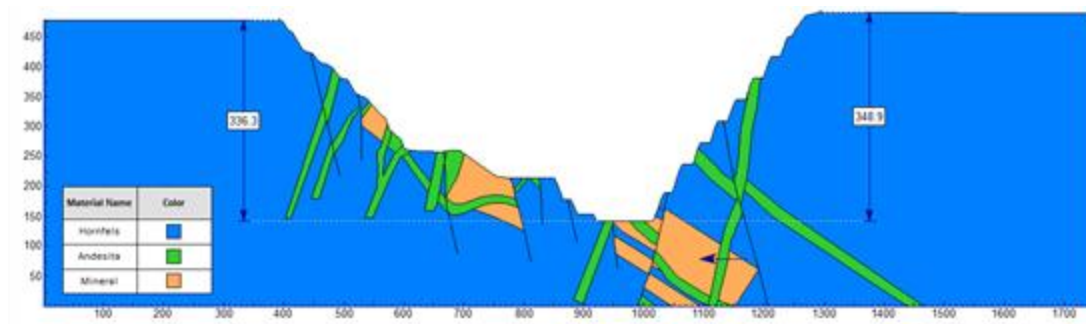
**Figura N° 4. 8:** Sección de análisis de estabilidad de la Mina 4 – Geometría actual  
Fuente: Elaboración propia.

En los Planos GT-007-02 y GT-007-03, se presentan las secciones de análisis críticas consideradas para las condiciones actuales de cada mina.

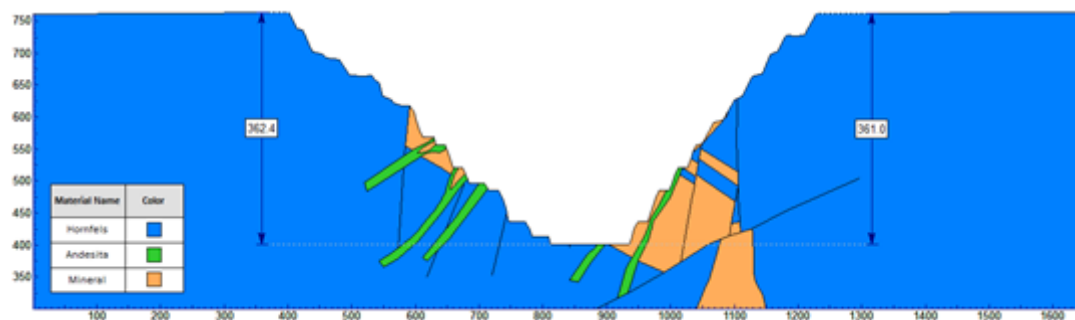
En la Figura N° 4. 9, Figura N° 4. 10 y Figura N° 4. 11 se presentan las secciones de análisis de cada mina de acuerdo a la geometría proyectada de los taludes de las Minas 2, 3 y 4 respectivamente.



**Figura N° 4. 9:** Sección de análisis de estabilidad de la Mina 2 – proyectada  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 4. 10:** Sección de análisis de estabilidad de la Mina 3 – proyectada.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 4. 11:** Sección de análisis de estabilidad de la Mina 4 – proyectada.  
Fuente: Elaboración propia.

En los Planos GT-008-02 y GT-008-03, se presentan las secciones de análisis críticas consideradas para las condiciones proyectadas de cada mina.

#### 4.2.11.1.2. Propiedades de los materiales

De acuerdo al modelo geológico - geotécnico, los parámetros de los materiales a ser usados en el análisis han sido estimados a partir del ensayo triaxial en el caso de la roca intacta y para el macizo rocoso se ha considerado el índice GSI determinado por la valoración del macizo rocoso, además se ha asumido el factor de perturbación de la roca  $D = 1$ .

Para definir los parámetros de resistencia al corte de los macizos rocosos de cada mina, se ha considerado las propiedades de las estaciones geomecánicas que pasan cerca de las secciones de 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 D: Parámetros de Resistencia del Macizo Rocosos (un modelo por mina).

Los parámetros de resistencia de los macizos rocosos usados en el análisis de estabilidad de taludes para cada mina se presentan de la Tabla N° 4. 8 a Tabla N° 4. 10.

**Tabla N° 4. 8:** Parámetros a usar en el análisis de estabilidad – Mina 2

Litología	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	mi	GSI	D
Hornfels	26.6	126	19	50	1
Andesita	26.4	233	24	55	1
Mineral	26.6	133	24	50	1

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 4. 9:** Parámetros a usar en el análisis de estabilidad – Mina 3

Litología	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	mi	GSI	D
Hornfels	27	120	19	49	1
Andesita	26.4	233	24	55	1
Mineral	26.8	118	24	50	1

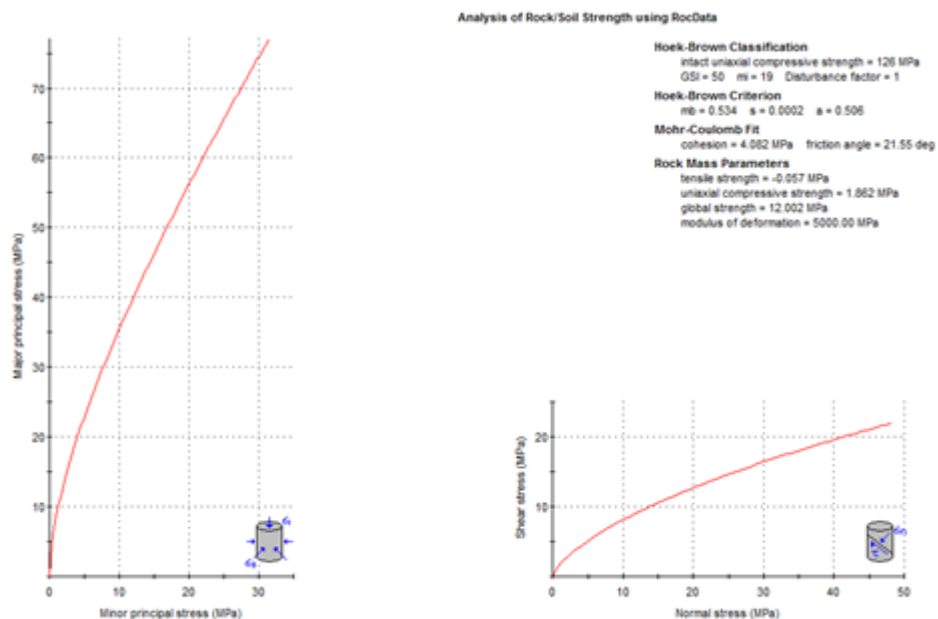
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 4. 10:** Parámetros a usar en el análisis de estabilidad–Mina 4

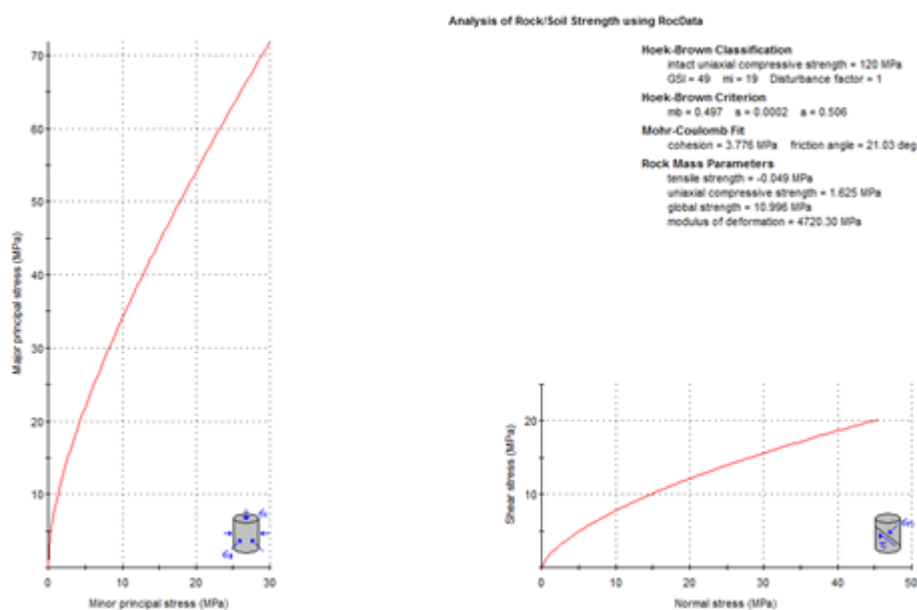
Litología	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	mi	GSI	D
Hornfels	26.3	110	19	55	1
Andesita	26.4	233	24	55	1
Mineral	26.7	117	24	55	1

Fuente: Elaboración propia.

Desde la Figura N° 4. 12 a la Figura N° 4. 18 se presentan las curvas de resistencia de los macizos rocosos que conforman los taludes de los tajos de las Minas 2-3-4. 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.

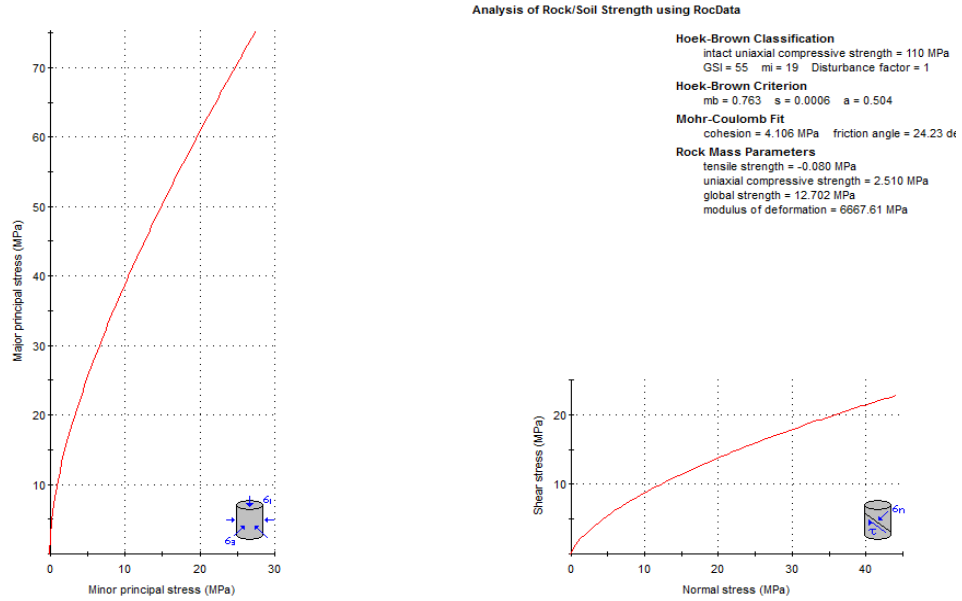


**Figura N° 4. 12:** Curva de resistencia del macizo rocoso – Hornfels (Mina 2)  
Fuente: Elaboración propia.

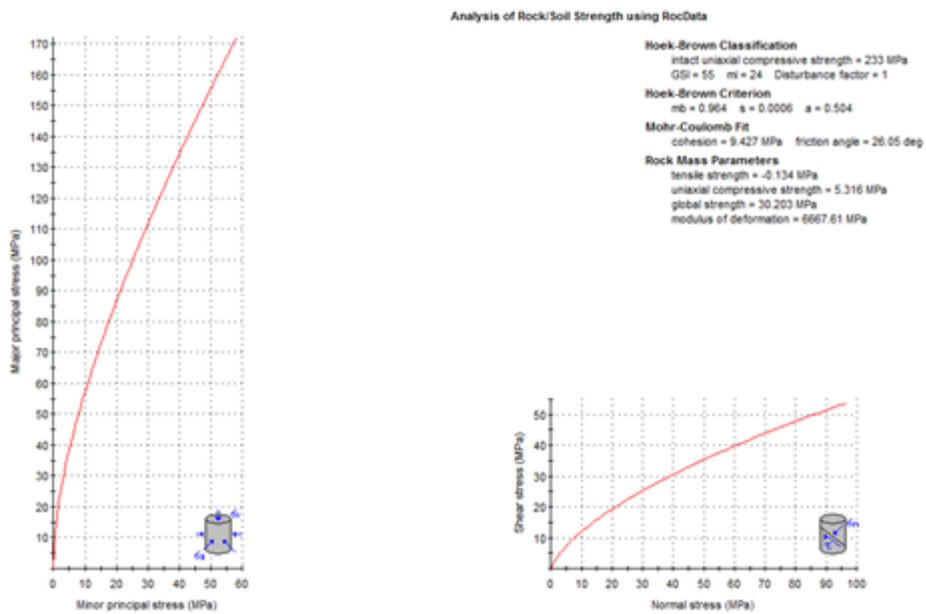


**Figura N° 4. 13:** Curva de resistencia del macizo rocoso – Hornfels (Mina 3)  
Fuente: Elaboración propia.

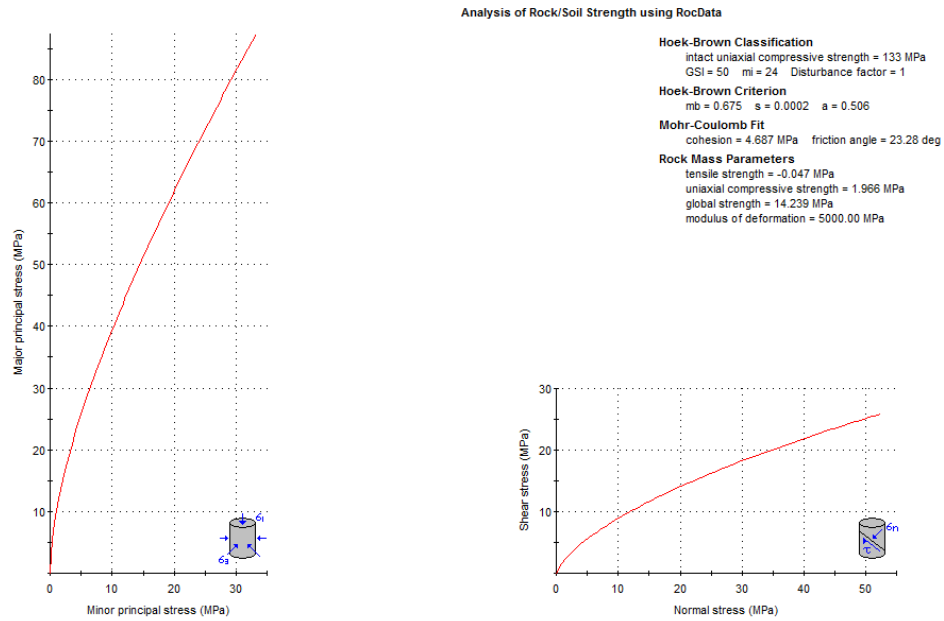




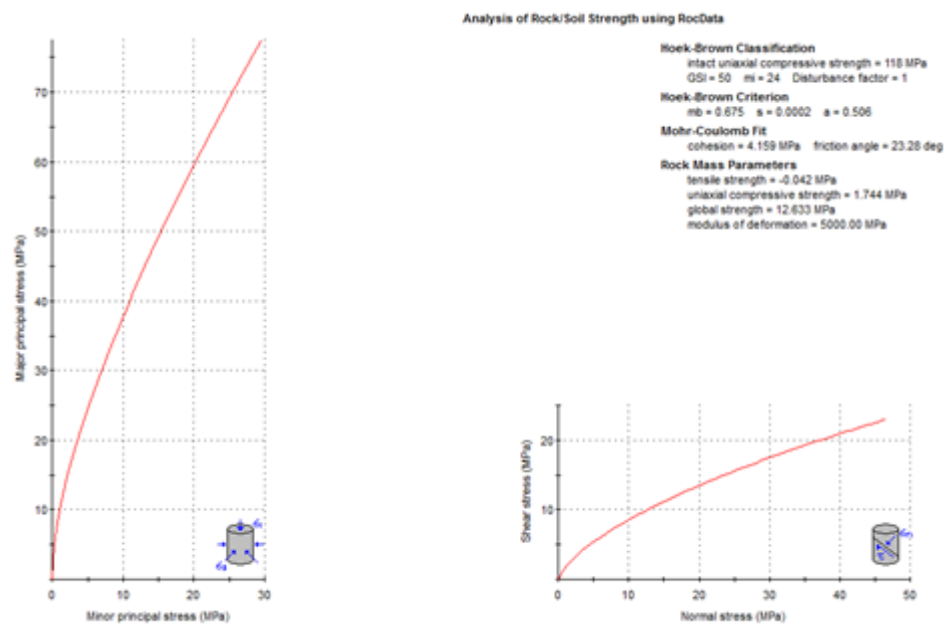
**Figura N° 4. 14:** Curva de resistencia del macizo rocoso – Hornfels (Mina 4)  
 Fuente: Elaboración propia.



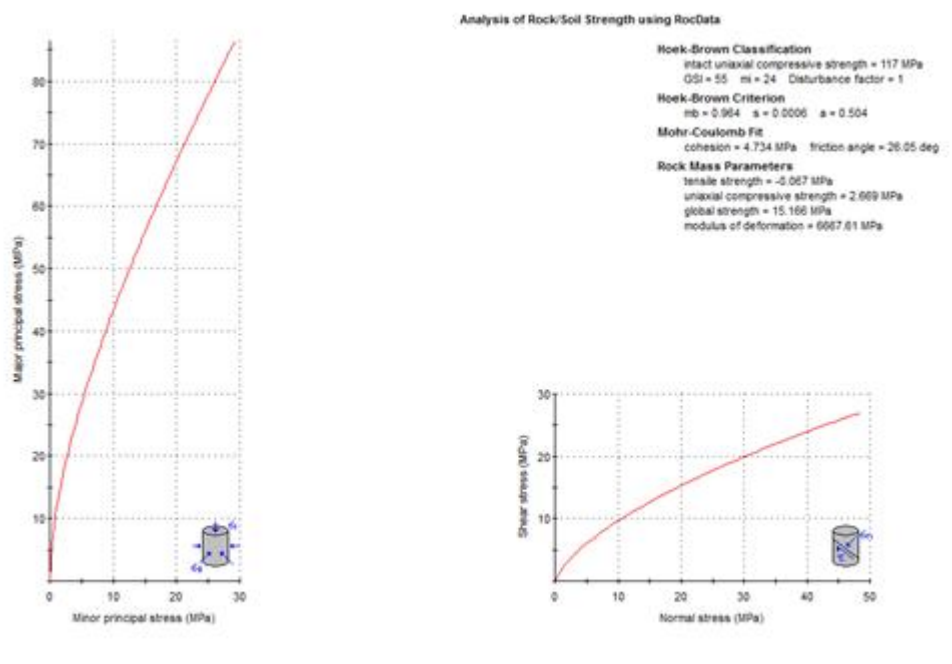
**Figura N° 4. 15:** Curva de resistencia del macizo rocoso – Andesita  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 4. 16:** Curva de resistencia del macizo rocoso – Mineral (Mina 2)  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 4. 17:** Curva de resistencia del macizo rocoso – Mineral (Mina 3)  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 4. 18:** Curva de resistencia del macizo rocoso – Mineral (Mina 4)  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.11.1.3. Condiciones hidrogeológicas

Dado que durante la etapa de evaluación de campo no se ha identificado la presencia de la napa 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.

#### 4.2.11.2. 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 (sin considerar la acción del sismo), FS = 1.5.
- Condición pseudo - estática (considerando la acción del sismo), FS = 1.1.

#### 4.2.11.3. Software empleado para el análisis de estabilidad global

Para el análisis se ha empleado 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 Modelo de Rotura Generalizado de Hoek y Brown. El programa permite analizar la estabilidad considerando superficies de rotura no

circulares, con el método de Morgenstern - Price. Para los cálculos realizados en el presente estudio, se han considerado 200 círculos de falla por cada análisis. Se obtiene así el mínimo factor de seguridad, graficando las superficies de falla que corresponden a factores de seguridad mínimos.

**4.2.11.4. Resultados obtenidos**

En la Tabla N° 4. 11 se presenta un resumen de los resultados obtenidos del análisis de estabilidad de los taludes globales e interrampa realizado para cada mina, tanto para las condiciones actuales como para las condiciones proyectadas.

**Tabla N° 4. 11:** Resultado de análisis de estabilidad global e interrampa

Mina	Condición	Talud	Talud Norte		Talud Sur	
			Estático	Pseudo Estático	Estático	Pseudo Estático
Mina 2	Actual	Global	3.40	2.50	2.70	2.10
		Interrampa	3.10	2.30	3.00	2.30
	Proyectado	Global	2.00	1.50	2.60	2.00
		Interrampa	2.20	1.70	2.70	2.10
Mina 3	Actual	Global	4.20	2.80	2.60	2.00
		Interrampa	3.20	2.30	3.20	2.80
	Proyectado	Global	1.70	1.30	2.90	2.10
		Interrampa	2.40	1.80	2.70	2.00
Mina 4	Actual	Global	2.30	1.80	3.10	2.30
		Interrampa	2.80	2.00	3.40	2.60
	Proyectado	Global	1.90	1.50	2.40	1.80
		Interrampa	2.10	1.60	3.00	2.00

Fuente: Elaboración propia.

De este análisis se concluye que los taludes globales e interrampa de la configuración actual y proyectada son estables, pues todos los factores de seguridad son mayores que los mínimos permisibles, tanto para condiciones estáticas como para condiciones pseudo - estáticas.

En el Anexo G: Análisis de Estabilidad Global (para este análisis se presenta como modelo de procesamiento a una sola mina), se presentan las salidas gráficas del programa Slide para cada sección de análisis, tanto en condiciones actuales como para las condiciones proyectadas.

#### 4.2.12. Modelamiento numérico de los taludes del tajo

Los métodos de equilibrio límite pueden considerarse válidos para la mayoría de aplicaciones de análisis de mecánica de suelos, pero es considerado demasiado simplista para muchas aplicaciones en mecánica de rocas. Para aplicar un método de análisis que se ajuste más a la realidad, se han desarrollado programas de modelamiento numérico (Plaxis, Phase2, etc.), los cuales crean una malla numérica de dos o tres dimensiones, asignándose en cada elemento las propiedades del macizo rocoso como densidad, ángulo de fricción, coeficiente de Poisson, etc.

En este capítulo se realiza el modelamiento numérico de los taludes de las Minas 2-3-4 utilizando el Método 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 falla del talud (Método SSR).

##### 4.2.12.1. Condiciones de análisis

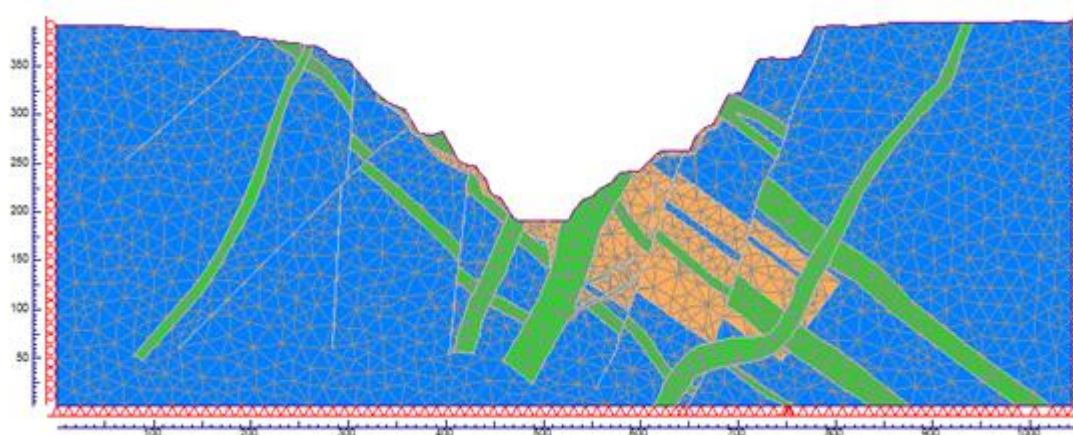
Las condiciones adoptadas para el modelamiento numérico de los taludes de las Minas 2-3-4 son las siguientes:

- **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.

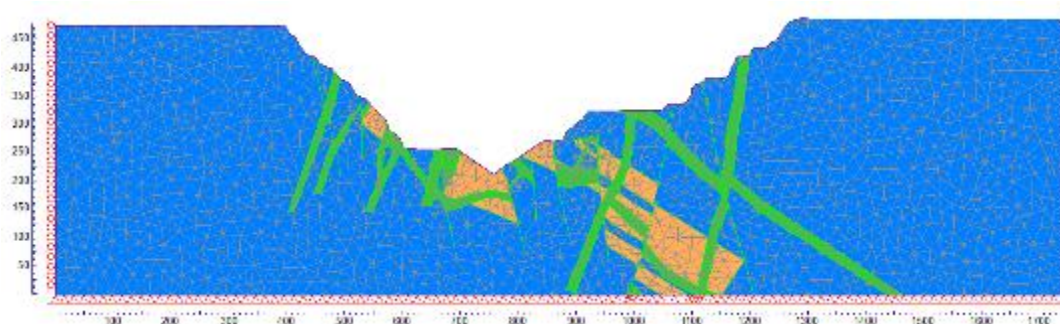
- **Forma de los elementos finitos:** Se han considerado elementos finitos triangulares de 6 nodos.
- **Tipo de análisis:** Deformación plana.
- **Número de iteraciones:** 500 con una tolerancia de 0.001.
- **Fases de excavación:** Para una mejor aproximación, en las simulaciones realizadas se han considerado varias fases de excavación, correspondiendo la primera fase a las condiciones actuales, y la última a las condiciones proyectadas de los taludes del tajo.
- **Ley de fluencia:** Se ha optado por una ley de fluencia no asociada considerando la dilatancia nula, la razón es porque es difícil conocer la dilatancia 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  $\mu = 0.25$  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 40 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 obtenidos con el programa Phase2.

#### 4.2.12.2. Secciones de análisis

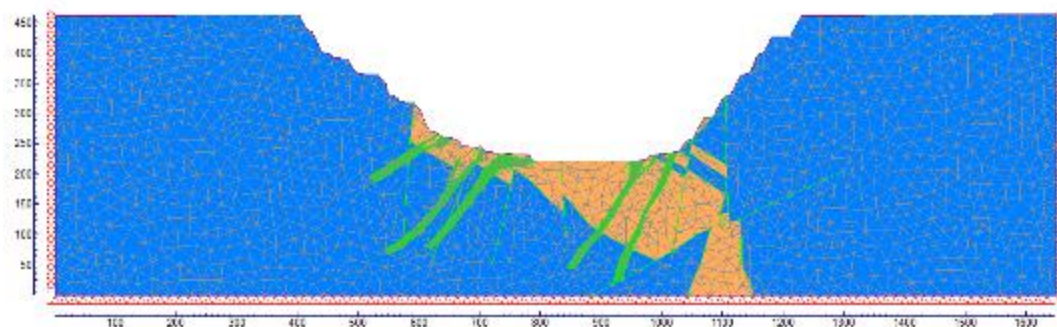
En la Figura N° 4. 19, Figura N° 4. 20 y Figura N° 4. 21 se presenta la geometría de los taludes de las Minas 2, 3 y 4 en sus condiciones actuales, en las cuales se puede observar la malla de elementos finitos y las condiciones de contorno del modelo numérico.



**Figura N° 4. 19:** Sección de análisis numérico de la Mina 2 – Geometría actual  
Fuente: Elaboración propia.

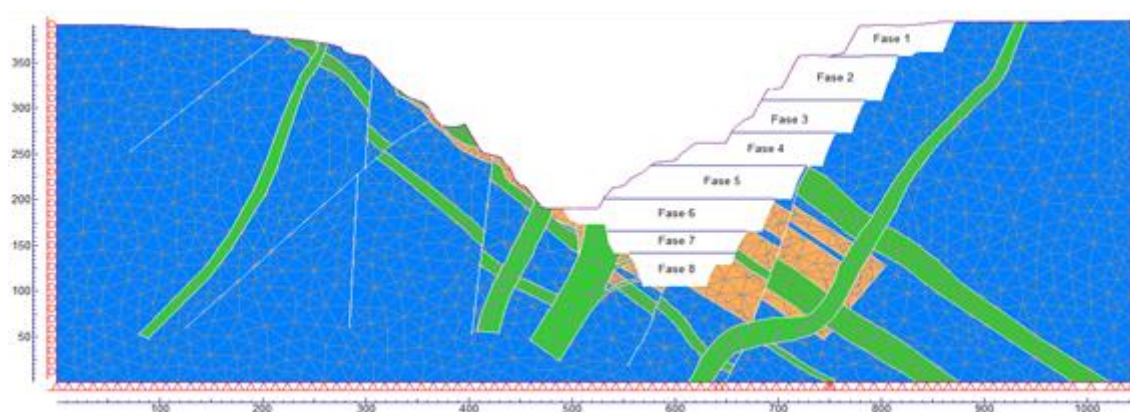


**Figura N° 4. 20:** Sección de análisis numérico de la Mina 3 – Geometría actual  
Fuente: Elaboración propia.



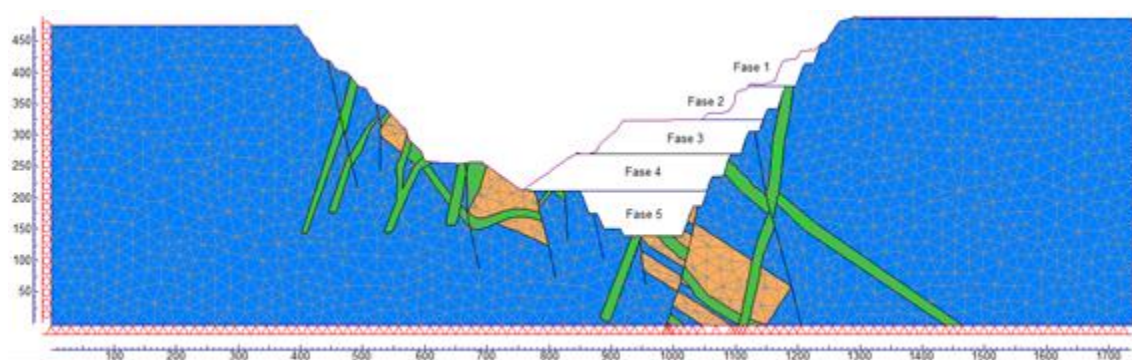
**Figura N° 4. 21:** Sección de análisis numérico de la Mina 4 – Geometría actual  
Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera, en la Figura N° 4. 22, Figura N° 4. 23 y Figura N° 4. 24 se presenta la geometría de los taludes de las Minas 2-3-4 en sus condiciones proyectadas, en las cuales se puede observar la malla de elementos finitos, las condiciones de contorno del modelo numérico y las fases de excavación asumidas para modelar mejor el proceso de redistribución de los esfuerzos.

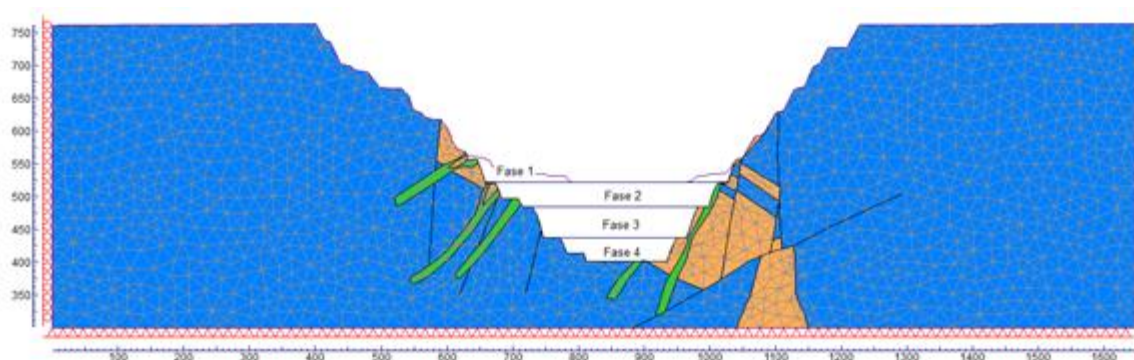


**Figura N° 4. 22:** Sección de análisis y fases de excavación de la Mina 2.  
Fuente: Elaboración propia.





**Figura N° 4. 23:** Sección de análisis y fases de excavación de la Mina 3.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura N° 4. 24:** Sección de análisis y fases de excavación de la Mina 4.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.12.3. Propiedades de los materiales

Para definir los parámetros deformacionales de los macizos rocosos de cada mina, se ha considerado las propiedades de las estaciones geomecánicas que pasan cerca de las secciones de análisis. Previamente se ha realizado el análisis de las curvas de resistencia del macizo rocoso con el programa Rocdata de Roscsience (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 para cada mina se presentan en la Tabla N° 4. 12, Tabla N° 4. 13 y Tabla N° 4. 14.

**Tabla N° 4. 12:** Parámetros deformacionales – Mina 2

Litología	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	mi	GSI	D	E (MPa)	v
Hornfels	26.60	126	19	50	1.00	5000.00	0.25
Andesita	26.40	233	24	55	1.00	6667.61	0.25
Mineral	26.60	133	24	50	1.00	5000.00	0.25

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 4. 13:** Parámetros deformacionales – Mina 3

Litología	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	mi	GSI	D	E (MPa)	v
Hornfels	27.00	120	19	49	1.00	4720.30	0.25
Andesita	26.40	233	24	55	1.00	6667.61	0.25
Mineral	26.80	118	24	50	1.00	5000.00	0.25

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 4. 14:** Parámetros deformacionales – Mina 4

Litología	Densidad (kN/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la Compresión Simple (MPa)	mi	GSI	D	E (MPa)	v
Hornfels	26.30	110	19	55	1.00	6667.61	0.25
Andesita	26.40	233	24	55	1.00	6667.61	0.25
Mineral	26.70	117	24	55	1.00	6667.61	0.25

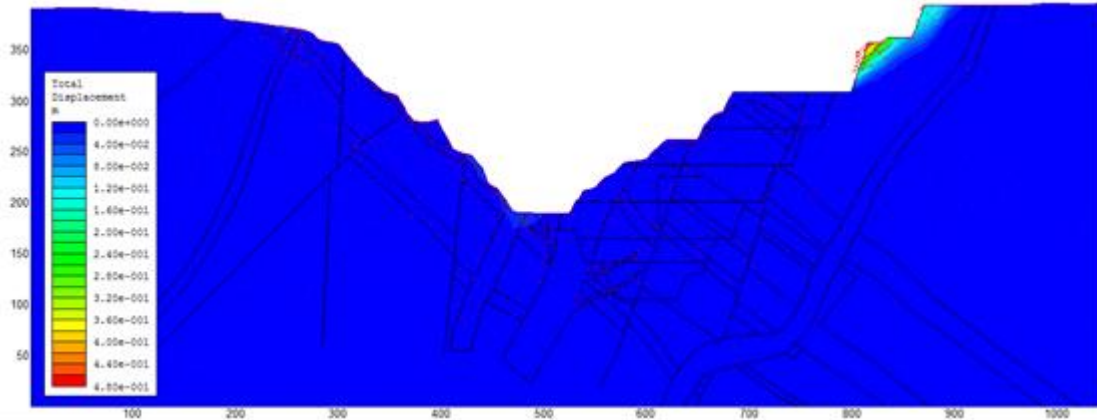
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.12.4. Resultados de análisis

El mecanismo de rotura de los taludes se ha identificado a partir de los contornos de desplazamientos totales obtenidos con el programa Phase2.

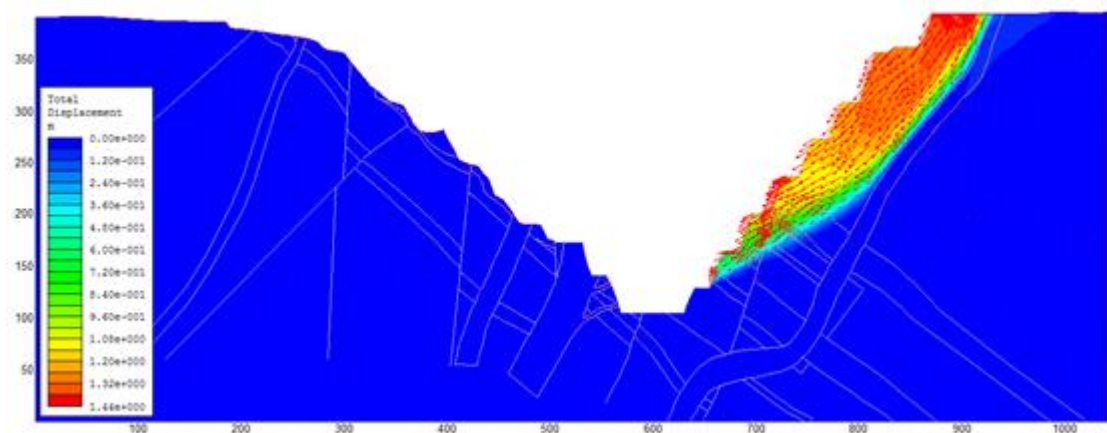
En el análisis de estabilidad a nivel de bancos, las discontinuidades son más influyentes que las propiedades de la roca intacta, la rotura está controlada por los sistemas de discontinuidades debido a que su espaciamiento y persistencia son del mismo orden de magnitud que la altura del talud, por lo que se producen roturas planas o cuñas; esto es evidente en el análisis de estabilidad considerando pocos banco de excavación, donde se nota claramente el deslizamiento bloques de roca a través de las discontinuidades. Un ejemplo de

este tipo de falla se presenta en la fase de excavación 1 del talud norte de la Mina 2, presentado en la Figura N° 4. 25.



**Figura N° 4. 25:** Ejemplo de falla local en los taludes de la Mina 2 (Fase 1).  
Fuente: Elaboración propia.

Al seguir incrementando la profundidad de la excavación hasta obtener el talud final del tajo, se pueden producir roturas globales, que se desarrollan rompiendo el macizo rocoso. En este caso, al ser el espaciamiento y persistencia de las discontinuidades de magnitud muy pequeña con respecto a la altura del talud, el macizo rocoso tiene un comportamiento como si se tratara de un medio continuo, produciéndose la rotura similar a la que se produce en los suelos. Un ejemplo de este tipo de rotura se presenta en la Figura N° 4. 26.



**Figura N° 4. 26:** Ejemplo de falla global en los taludes de la Mina 2 (proyectada)  
Fuente: Elaboración propia.

En el análisis de las Minas 2-3-4, conforme la altura del talud es incrementada el factor de seguridad disminuye, aunque el talud sigue siendo estable. Los mecanismos de rotura obtenidos para todas las fases de excavación son presentados en el Anexo H: Modelamiento Numérico (se presenta como análisis a la Mina 2, debido a que en las otras minas, se tuvo el mismo proceso de modelamiento).

El resumen de los factores de seguridad calculados para las condiciones actuales y proyectadas se presenta en la Tabla N° 4. 15, observándose que el factor de seguridad disminuye al profundizar la excavación y que el mecanismo de rotura asociado varía desde roturas planas y/o cuñas hasta roturas rotacionales. En todos los casos los taludes son estables.

**Tabla N° 4. 15:** Resultado del modelamiento numérico – Mina 2-3-4

Mina	Condicion	Talud	Factor de Seguridad (SRF)	
			Talud Norte	Talud Sur
Mina 2	Actual	Global	2.70	2.80
	Proyectado	Global	1.90	2.40
Mina 3	Actual	Global	3.40	2.60
	Proyectado	Global	1.70	2.50
Mina 4	Actual	Global	2.20	2.90
	Proyectado	Global	1.70	2.20

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla N° 4. 16, Tabla N° 4. 17 y Tabla N° 4. 18 se presentan los factores de seguridad para cada fase de excavación de las Minas 2-3-4. En todos los casos los taludes son estables. Las salidas gráficas de este modelamiento numérico se presentan en el Anexo H: Modelamiento Numérico (se presenta como análisis a la Mina 2, debido a que en las otras minas, se tuvo el mismo proceso de modelamiento).

**Tabla N° 4. 16:** Modelamiento numérico con fases de excavación – Mina 2

Fase de Excavación	Factor de Seguridad (SRF)	
	Talud Norte	Talud Sur
Talud Actual	2.7	2.8
Fase 1	3.4(*)	2.8
Fase 2	2.5	2.8
Fase 3	2.4	2.8
Fase 4	2.2	2.8
Fase 5	2.1	2.8
Fase 6	2	2.7
Fase 7	2	2.6
Talud Final	1.9	2.4

Fuente: Elaboración propia.

(\*) El factor de seguridad aumento debido a que el talud de corte correspondiente a esta fase de excavación tiene menor altura que la geometría actual (Ver Figura N° 4 del Anexo H).

**Tabla N° 4. 17:** Modelamiento numérico con fases de excavación – Mina 3

Fase de Excavación	Factor de Seguridad (SRF)	
	Talud Norte	Talud Sur
Talud Actual	3.4	2.6
Fase 1	2.2	2.5
Fase 2	2.2	2.5
Fase 3	2.1	2.5
Fase 4	2	2.5
Talud Final	1.7	2.5

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 4. 18:** Modelamiento numérico con fases de excavación – Mina 4

Fase de Excavación	Factor de Seguridad (SRF)	
	Talud Norte	Talud Sur
Talud Actual	2.2	2.9
Fase 1	2	2.5
Fase 2	1.9	2.3
Fase 3	1.7	2.3
Talud Final	1.7	2.2

Fuente: Elaboración propia.

#### **4.2.13. Análisis retrospectivo (Back Analysis)**

El análisis retrospectivo (back analysis), es usado comúnmente en la ingeniería de taludes para estimar la resistencia in situ del suelo o macizo rocoso. Esta resistencia se representa generalmente por los parámetros de resistencia al corte de Mohr-Coulomb (cohesión y ángulo de fricción) o por los parámetros de resistencia al corte de acuerdo con el criterio de Hoek y Brown (dependen de RCS y GSI). El análisis retrospectivo de fallas de taludes es un método efectivo que incorpora importantes factores que muchas veces no son bien representados en ensayos de laboratorio, tales como la estructura del suelo o macizo rocoso, la no homogeneidad, influencia de fisuras en la resistencia al corte y el efecto de los planos de debilidad dentro de la masa de suelo o roca. El análisis retrospectivo asume un factor de seguridad igual al mínimo permisible y considera la geometría original en el momento de la falla. Luego se estima la resistencia al corte del suelo que fue movilizada en la falla consistente con un modelo 2D realizado con un método de análisis seleccionado (Morgenstern-Price, Spencer, Janbu, Bishop, etc.). En muchos casos se dispone de poca información de las condiciones bajo las cuales ocurrió un deslizamiento, lo que reduce la confiabilidad de los valores de resistencia al corte obtenido mediante análisis retrospectivo. Estos valores pueden ser utilizados para analizar la estabilidad de otros taludes en la misma formación geológica y recomendar medidas de estabilización si corresponde.

Tradicionalmente, el análisis retrospectivo se ha realizado evaluando un solo parámetro de resistencia y suponiendo conocido el otro. Sólo si se conoce la geometría del deslizamiento es posible determinar ambos parámetros, si bien los resultados obtenidos no siempre son ajustados a la realidad, sobre todo cuando se produce una falla progresiva o si existen marcadas discontinuidades en el talud.

##### **4.2.13.1. Taludes analizados**

De acuerdo con el análisis de riesgos geológicos (presentado en el Capítulo 2.5), se presentan deslizamientos que pueden comprometer la estabilidad de varios bancos en los taludes norte de la Mina 4, tal como se presenta en la Figura N°

4. 27, por lo que se realizará el análisis retrospectivo de esta zona usando como criterio de rotura el de Hoek y Brown.



**Figura N° 4. 27:** Deslizamiento ocurrido en el talud Norte de la Mina 4  
Fuente: Elaboración propia.

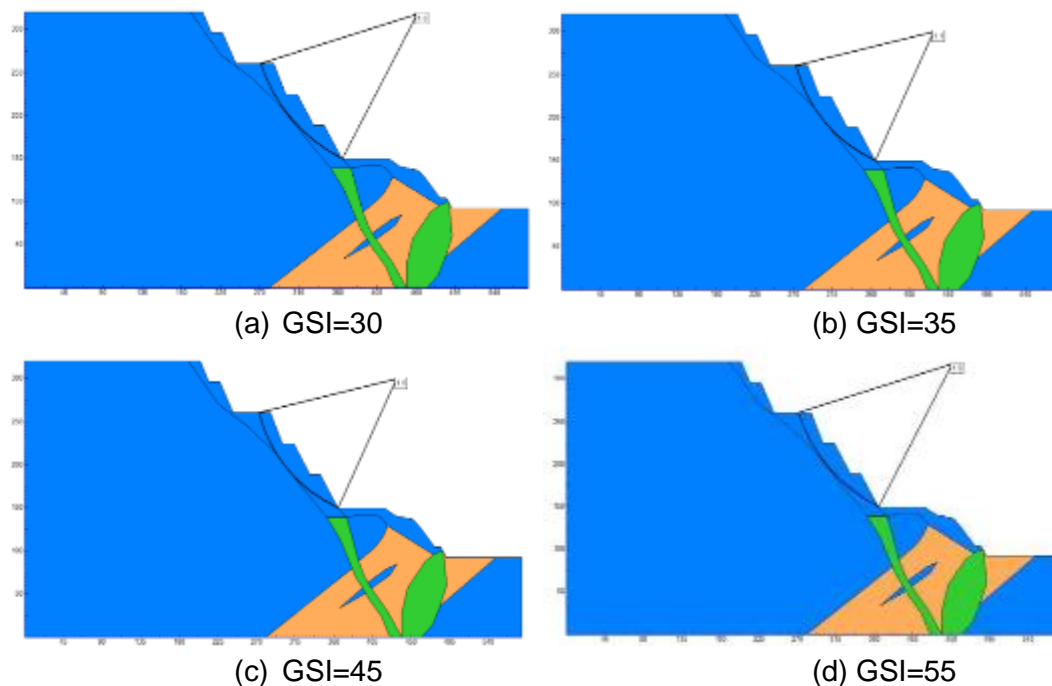
De acuerdo con el criterio de Hoek y Brown, la resistencia al corte del macizo rocoso depende básicamente de dos parámetros: la resistencia a la compresión simple de la roca intacta (RCS) y del Índice de Resistencia Geológica (GSI). De los cuales la mayor incertidumbre se presenta en definir el valor del índice GSI, ya que presenta una gran subjetividad durante su evaluación que varía aproximadamente en 10 puntos, a diferencia del valor de la resistencia a la compresión simple o del parámetro “mi” los cuales se obtienen de ensayos de laboratorio.

En base a lo anterior se analizará la combinación de valores de RCS y GSI con los cuales el talud se encuentra en su límite de estabilidad (F.S.=1), posteriormente se verificarán los resultados numéricamente.

De acuerdo con las estaciones geomecánicas ubicadas en el talud norte de la Mina 4, se observa que la resistencia a la compresión simple (RCS) varía de 42 MPa a 145 MPa y el índice GSI varía entre 45 y 55 (Estaciones EG-7, EG-10, EG-11, EG-16, EG-22 y EG-23)

En el análisis, conservadoramente se ha considerado combinaciones de valores de RCS de 40, 50 y 60 MPa e índices GSI de 25 a 55 hasta lograr un factor de seguridad igual a la unidad.

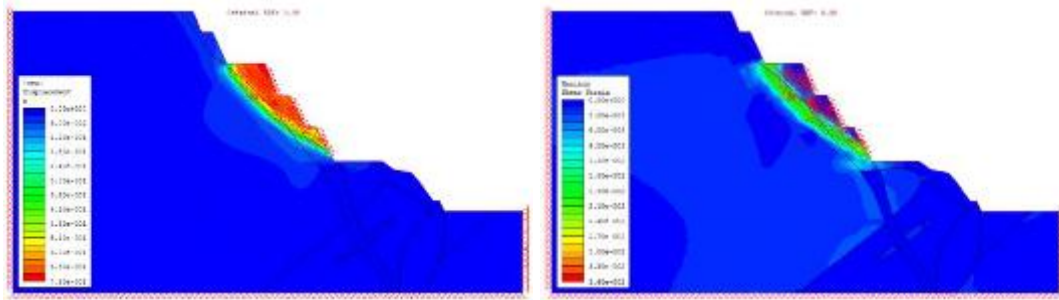
En la Figura N° 4. 28 se presentan los análisis de estabilidad que se han realizado para buscar los valores que ocasionan la falla del talud, considerando como valor fijo la RCS=40 MPa y variando el índice GSI.



**Figura N° 4. 28:** Análisis retrospectivos para RCS=40 MPa y GSI variable  
Fuente: Elaboración propia.

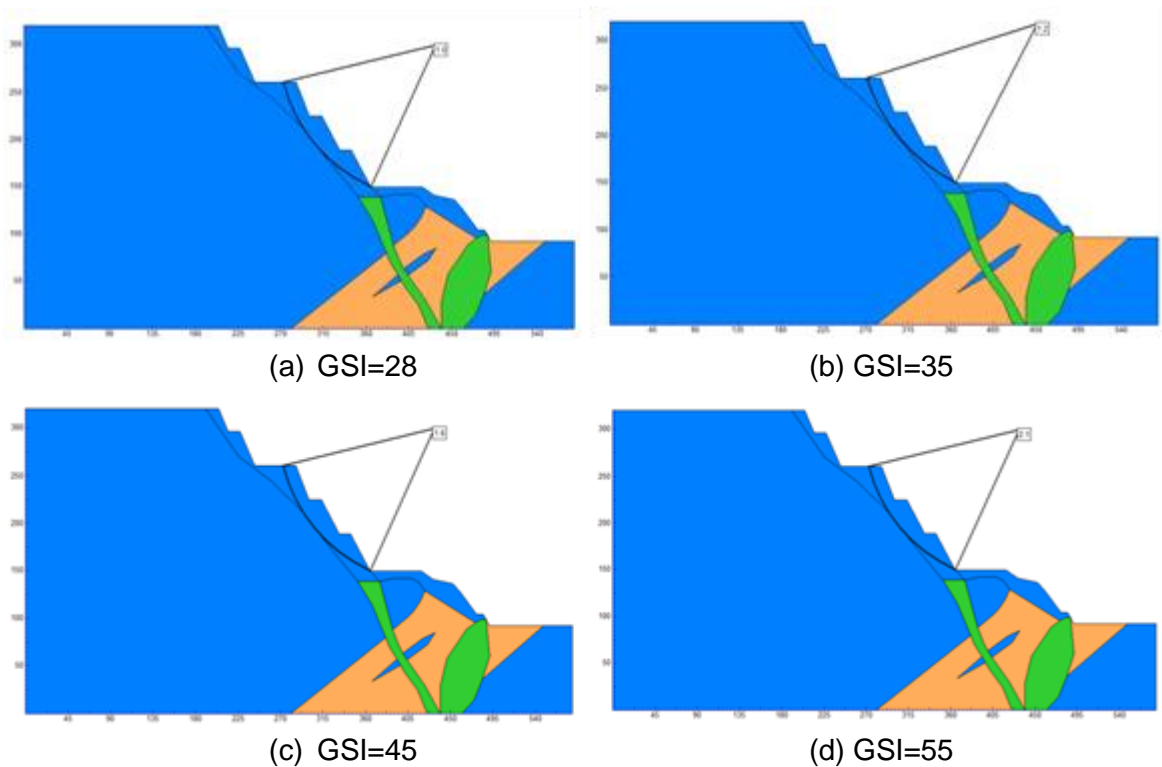
En la Figura N° 4. 29 se presenta la verificación numérica de la condición de equilibrio límite, la cual se encontró para la combinación RCS=40MPa y GSI=30. En esta figura se nota que la forma de la superficie de rotura se puede identificar a partir de los contornos de desplazamientos totales y de los contornos de máximas deformaciones por esfuerzos de corte.





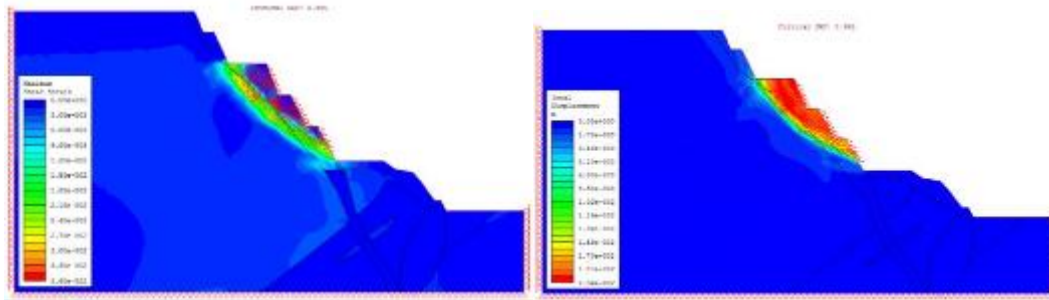
**Figura N° 4. 29:** Modelamiento numérico para F.S.=1.0 (RCS=40 MPa y GSI=30) Contornos de desplazamientos totales y máximas deformaciones por corte  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 4. 30 se presentan los análisis de estabilidad que se han realizado para buscar los valores que ocasionan la falla del talud, considerando como valor fijo la RCS=50 MPa y variando el índice GSI.



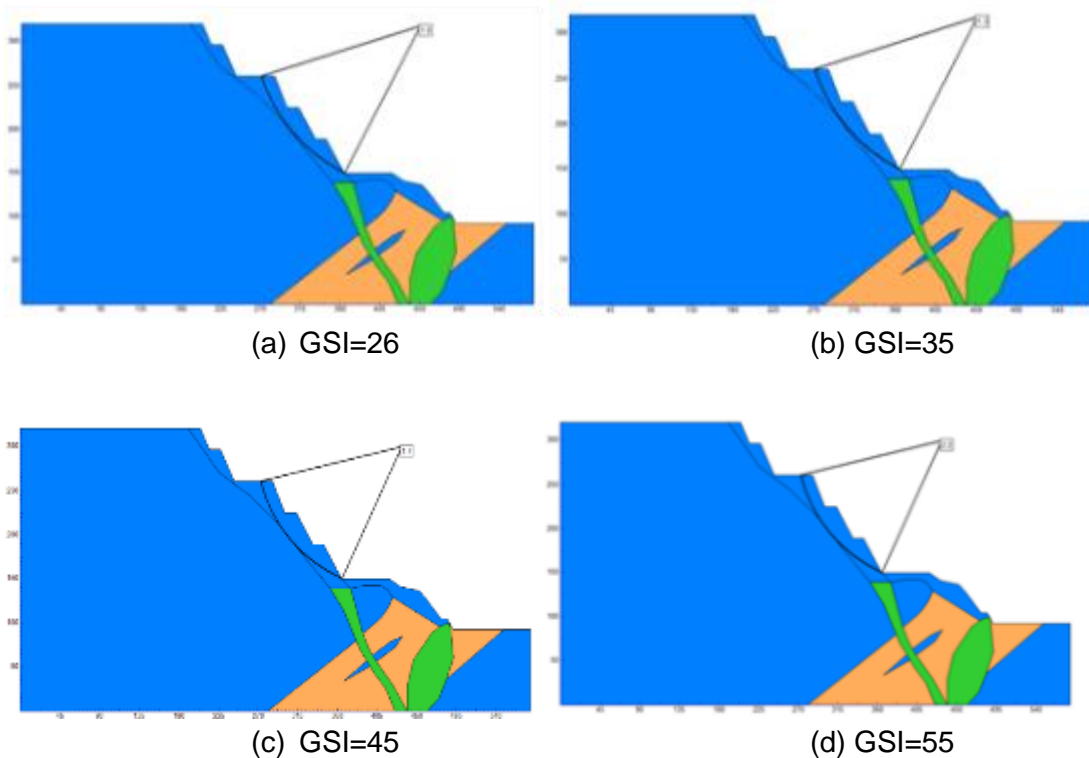
**Figura N° 4. 30:** Análisis retrospectivos para RCS=50 MPa y GSI variable.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 4. 31 se presenta la verificación numérica de la condición de equilibrio límite, la cual se encontró para la combinación RCS=50MPa y GSI=28. En esta figura se nota que la forma de la superficie de rotura se puede identificar a partir de los contornos de desplazamientos totales y de los contornos de máximas deformaciones por esfuerzos de corte.



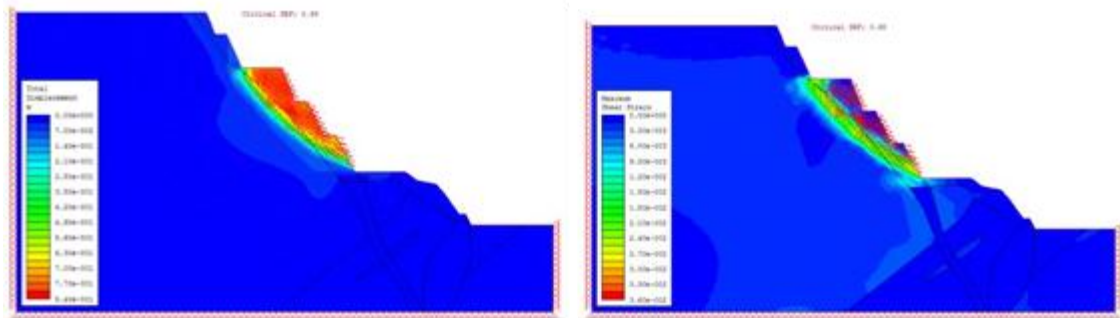
**Figura N° 4. 31:** Modelamiento numérico para F.S.=1.0 (RCS=50 MPa y GSI=28) Contornos de desplazamientos totales y máximas deformaciones por corte  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 4. 32 se presentan los análisis de estabilidad que se han realizado para buscar los valores que ocasionan la falla del talud, considerando como valor fijo la RCS=60 MPa y variando el índice GSI.



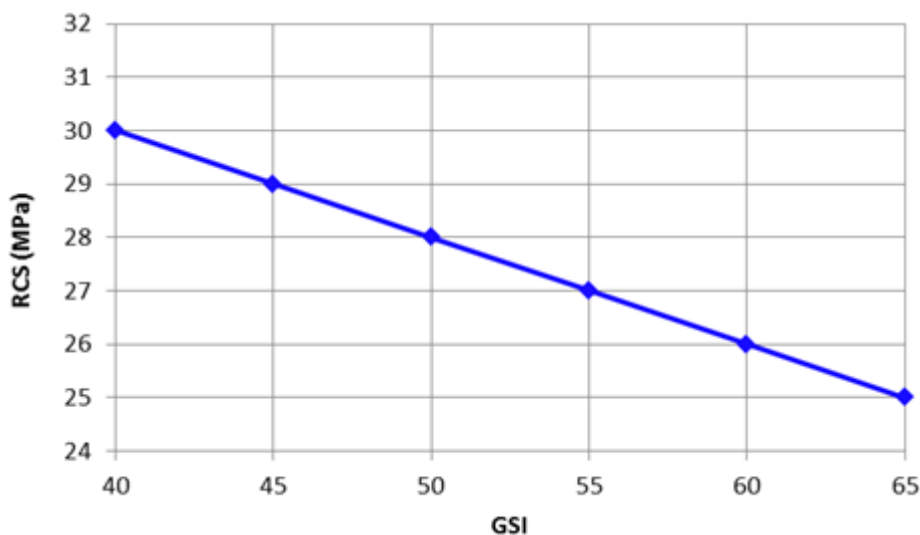
**Figura N° 4. 32:** Análisis retrospectivos para RCS=60 MPa y GSI variable.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 4. 33 se presenta la verificación numérica de la condición de equilibrio límite, la cual se encontró para la combinación RCS=60 MPa y GSI=26. En esta figura se nota que la forma de la superficie de rotura se puede identificar a partir de los contornos de desplazamientos totales y de los contornos de máximas deformaciones por esfuerzos de corte.



**Figura N° 4. 33:** Modelamiento numérico para F.S.=1.0 (RCS=60 MPa y GSI=26). Contornos de desplazamientos totales y máximas deformaciones por corte  
Fuente: Elaboración propia.

El resumen de resultados obtenidos de las combinaciones analizadas anteriormente se presenta en la Figura N° 4. 34. En esta figura se presentan las combinaciones de la resistencia a la compresión simple (RCS) y el índice GSI con las cuales el talud estaría en el factor de seguridad F.S.=1.0.



**Figura N° 4. 34:** Combinación de los valores de RCS y GSI para F.S.=1.0  
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los análisis retrospectivos, se observa que los taludes son estables debido a que los parámetros de resistencia que ocasionarían la rotura por corte de los taludes (F.S.=1.0), obtenidos al reducir progresivamente el índice GSI son menores que los parámetros de resistencia al corte promedio de los macizos rocosos. Sin embargo, podrían producirse deslizamientos superficiales que involucren 2 o 3 bancos, sin profundizar en el macizo rocoso

## CONCLUSIONES

- Los aspectos litológicos más característicos relacionados a la geología local del área de estudio, se concluye que los afloramientos meta - sedimentarios llamados hornfels filítico, conforman la roca encajonante, emplazados por un enjambre de diques andesíticos y dacíticos formando principalmente estructuras tipo sills. Las unidades rocosas expuestas en las Minas 2-3-4, muestran una historia de deformación prolongada que incluye una etapa de plegamiento bajo en el borde sureste de toda la unidad minera.
- Las condiciones geomecánicas del macizo rocoso en la Mina 2-3-4 en su mayoría está conformado por roca dura y roca muy dura (R4 – R5) y de resistencia media (R3) en sectores de mineralización; el índice RMR promedio en su mayoría varía de entre macizo rocoso de regular y buena calidad (53 y 63).
- Del análisis de estabilidad a nivel de bancos en el diseño existente y proyectado se concluye que en la mina 2, 3 y 4 los bancos son estables en el factor de seguridad estático y pseudo estático, sin embargo en determinados sectores el factor de seguridad pseudo estáticos es menor a 1.1, donde se recomienda realizar un desquinche selectivo para eliminar bloques que podrían generar riesgo.
- Del análisis global y numérico se concluye que en el diseño actual y proyectado, los factores de seguridad estático y pseudo estáticos son mayores a los mínimos requeridos, por lo que se concluye que los taludes son estables y no requieren hacer obras y/o estructuras de sostenimiento.

## RECOMENDACIONES

- En general los fenómenos geodinámicos, se presentan de manera local y aislada, no siendo una fuente de peligro de consideración alta. La principal recomendación es el mantenimiento preventivo de estas zonas de riesgo moderadas a extremas identificadas para evitar pérdidas en el proceso productivo de las minas.
- Actualmente, se han encontrado 72 zonas de caída de rocas, de los cuales, 61 son de riesgo bajo, 10 de riesgo moderado y 1 de riesgo alto, además de 23 casos de posible deslizamiento de riesgo bajo y 4 zonas de agrietamiento de riesgo moderado, todos como casos aislados; ante ello, se debe monitorear para evitar pérdidas de infraestructura, logística y humana. Probablemente estos casos son los efectos de la voladura en la generación de los bancos de los tajos.
- De acuerdo a las dimensiones de las Minas 2-3-4, se recomienda detectar el movimiento del talud mediante la Interferometría de Radar, con el cual se determinaría las zonas que están en movimiento.
- De acuerdo a la identificación de las zonas de peligro geológico se recomienda colocar puntos de control topográficos, monitorear mediante cintas extensométricas, para luego de la interpretación, diseñar el sistema de soporte requerido, asimismo se recomienda la instalación de inclinómetros.

## REFERENCIAS

- 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. John Wiley & Sons, New York.
- Bureau de Recherches Geologiques et Minières (BRGM), 1975. Anexo B: Estudio de la Estabilidad de los Taludes.
- 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.
- Investigaciones Geológicas Geotécnicas para la Elaboración del Plan de Cierre de Minas Shougang Hierro Perú, 2006. Cesel S.A.
- 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.
- Zer Geosystem Perú S.A.C., 2012. Estudio Básico de Peligro Sísmico para el Depósito de Relaves Choclón 2.

# ANEXOS