

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**MEJORAMIENTO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO PARA  
CORTE DE TALUDES EN TAJO ABIERTO, MINA ROSARINA,  
YAULI - JUNÍN**

**TESIS**  
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE**  
**INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:**

**Bach. HUAMÁN ROJAS, JIMMI GABRIEL**  
**Bach. HUAMANLAZO ANCHIRAICO, YOSSELÍN MERLY**

**ASESOR: Mg. Ing. TORRES CHUNG, CESAR ROBERTO**

**LIMA - PERÚ**

**2019**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mis padres por el apoyo incondicional, los consejos y la paciencia que tuvieron conmigo durante este camino, para llegar a ser un buen profesional con valores e iniciativas para nuevos retos y a mi esposa Milsinia, mi hijo Jim y mi hermana Gabriela por ser mi motivación a seguir adelante.

Jimmi Huamán Rojas

La presente tesis lo dedico en primer lugar a Dios, por ser el inspirador y el quien guía mis pasos para continuar en este proceso, a mis padres por todo el amor y sacrificio que me brindan para lograr mis metas.

Yoselín Huamanlazo Anchiraico

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro sincero agradecimiento a los docentes de la carrera de Ingeniería Civil de la facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma, en especial a nuestro asesor de tesis, Mg. Ing. Torres Chung Cesar Roberto por guiar esta investigación y formar parte de este objetivo alcanzado.

Jimmi Huamán y Yoselín Huamanlazo

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Descripción de la realidad de la problemática.....	3
1.2 Formulación del problema.....	4
1.2.1 Problema principal.....	4
1.2.2 Problemas secundarios .....	4
1.3 Objetivos de la investigación.....	4
1.3.1 Objetivo principal.....	4
1.3.2 Objetivos secundarios.....	4
1.4 Justificación e importancia de la investigación .....	5
1.4.1 Conveniencia .....	5
1.4.2 Relevancia social .....	5
1.4.3 Implicancia práctica.....	5
1.5 Limitaciones de la investigación.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	7
2.1 Antecedentes del estudio de investigación .....	7
2.1.1 En el ámbito internacional.....	7
2.1.2 En el ámbito nacional .....	8
2.2 Bases Teóricas .....	9
2.2.1 Fundamentos del diseño de salud .....	9
a) Factores de seguridad / sociales .....	11
b) Factores económicos .....	11
c) Factores ambientales y reglamentarios.....	12

2.2.2 Terminología del diseño de taludes.....	12
2.2.2.1 Inestabilidad .....	13
2.2.2.2 Caída de rocas .....	14
2.2.3 Modelo geotécnico .....	14
2.2.3.1 Recolección de datos en campo .....	15
2.2.3.2 Mapeo y registro de afloramientos.....	15
2.2.4 Modelo geológico .....	16
2.2.4.1 Reconocimiento y recolección de la información geológica .....	16
2.2.4.2 Mapeo.....	16
2.2.4.2.1 Tipos de Mapeo .....	16
2.2.4.2.1 Mapeo geomecánico.....	17
2.2.4.2.2 Tipo de discontinuidades.....	20
2.2.4.2.3 Orientación de las discontinuidades .....	20
2.2.4.3 Influencia de los procesos geológicos:.....	22
2.2.4.4 Sismicidad regional .....	22
2.2.5 Modelo estructural.....	23
2.2.5.1 Componentes del modelo .....	23
2.2.5.2 Fábrica.....	27
2.2.5.2.1 Estructuras de pliegue menor .....	27
2.2.5.2.2 Fracturación.....	28
2.2.5.2.3 Diaclasas o juntas (Joints) .....	28
2.2.5.3 Herramientas de modelado estructural.....	31
2.2.5.4 Definición de dominio estructural.....	32
2.2.6 Modelo de macizo rocoso.....	33
2.2.6.1 Clasificación del macizo rocoso (RMR) .....	34
2.2.6.1.1 RMR de Bieniawski .....	34
2.2.6.1.2 Laubscher RMR y MRMR .....	37

2.2.6.1.3 GSI de Hoek .....	39
2.2.6.4 Resistencia del macizo rocoso.....	43
2.2.6.4.1 Criterio de resistencia de Hoek-Brown .....	43
2.2.7 Modelo hidrogeológico .....	45
2.2.7.1 Porosidad y presión de los poros.....	46
2.2.7.1.1 Porosidad .....	46
2.2.7.1.2 Presión del poro en el talud del tajo .....	47
2.2.8 Construcción del modelo geotécnico.....	48
2.2.8.1 Desarrollo de modelos.....	49
2.2.8.2 Construcción del modelo.....	49
2.2.8.3 Aplicación del modelo geotécnico .....	50
2.2.8.4 Efectos de escala .....	50
2.2.8.5 Macizo Rcoso .....	50
2.2.8.6 Criterio de resistencia del macizo rocoso Hoek-Brown.....	52
2.2.9 Incertidumbre de datos .....	53
2.2.9.1 Causas de la incertidumbre de los datos.....	53
2.2.9.2 Impacto de la incertidumbre de los datos.....	54
2.2.10 Criterios de aceptación .....	55
2.2.10.1 Modelo de riesgo.....	56
2.2.10.2 Proceso del modelo de riesgo.....	58
2.2.10.3 Análisis de costo-beneficio .....	58
2.3 Definiciones conceptuales .....	58
2.4 Estructura teórica y científica que sustenta la investigación .....	61
2.4.1 Formulación de diseños de taludes.....	61
2.4.2 Métodos de diseño de taludes:.....	63
2.4.2.1 Pasos de diseño.....	63
2.4.2.2 Análisis de diseño.....	66

2.4.3	Análisis cinemático .....	67
2.4.3.1	Bancos .....	67
2.4.3.2	Altura del banco .....	69
2.4.3.3	Ancho de banco .....	69
2.4.3.4	Ángulo de la cara del banco .....	70
2.4.4	Métodos numéricos .....	72
2.4.4.1	Modelos de continuo .....	72
2.4.4.2	Modelos de discontinuidad.....	72
2.4.4.3	Consideraciones de modelado tamaño del elemento.....	73
2.4.5	Implementación del diseño.....	75
2.4.5.1	Aspectos de planificación minera del diseño de taludes .....	75
2.4.5.2	Proceso de diseño de tajo abierto .....	76
2.4.6	Aplicación de los criterios de diseño de taludes en el diseño de la mina.....	77
2.4.6.1	Fase de identificación del objetivo.....	77
2.4.6.2	Nivel 1: Diseño conceptual .....	77
2.4.6.3	Nivel 2: Prefactibilidad .....	79
2.4.6.4	Nivel 3: Viabilidad .....	80
2.4.6.5	Nivel 4: Diseño y construcción .....	82
2.4.6.6	Nivel 5: Operaciones .....	83
2.4.6.7	Cierre.....	85
2.4.7	Evaluación y monitoreo del desempeño.....	86
2.4.7.1	Evaluación del rendimiento del talud.....	86
2.4.7.2	Validación y refinamiento del modelo geotécnico.....	87
2.4.7.3	Desempeño del banco.....	87
2.4.7.4	Aspectos operativos.....	88
2.4.7.5	Gestión de riesgos .....	88
2.4.8	Cierre .....	89

2.5 Formulación de hipótesis .....	89
2.5.1 Hipótesis general .....	89
2.5.2 Hipótesis específicas .....	90
2.5.3 Variables.....	90
2.5.3.1 Definición conceptual de las variables.....	90
2.5.3.4 Operacionalización de las variables .....	91
<b>CAPITULO III: DISEÑO METODOLÓGICO.....</b>	<b>92</b>
3.1 Tipo y nivel.....	92
3.1.1 Tipo de investigación .....	92
3.1.2 Nivel de investigación .....	92
3.2 Diseño de investigación .....	92
3.3 Población y muestra.....	92
3.3.1 Población .....	92
3.3.2 Muestra .....	93
3.4 Técnicas de recolección de datos.....	93
3.4.1 Tipos de técnicas e instrumentos.....	93
3.4.2 Criterio de validez y confiabilidad de los instrumentos .....	93
3.4.3 Técnicas para el procesamiento y análisis de datos.....	93
<b>CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>94</b>
4.1 Descripción de la zona de estudio.....	94
4.1.1 Ubicación del proyecto.....	94
4.1.3 Ubicación geográfica:.....	95
4.1.4 Clima .....	95
4.2 Corte del talud sin diseño.....	95
4.3 Topografía de la zona de estudio .....	96
4.4 Modelo geológico .....	98
4.4.1 Reconocimiento.....	98

4.4.2 Mapeo geológico .....	100
4.4.3 Mapeo geotécnico.....	100
4.4.3.1 Tipo de discontinuidades.....	101
4.4.3.2 Orientación de discontinuidades .....	102
4.5 Modelo estructural .....	102
4.5.1 Fallas.....	102
4.5.2 Entorno geológico-Rocas Metamórficas .....	103
4.6 Modelo del macizo rocoso .....	103
4.6.1 Muestreo de rocas .....	103
4.6.2 Propiedades índices .....	105
4.6.3 Propiedades mecánicas .....	105
4.6.4 Clasificación del macizo rocoso utilizando el GSI de Hoek .....	106
4.6.5 Parámetros de diseño .....	107
4.6.5.1 Ensayo de resistencia compresión Uniaxial:.....	107
4.7 Modelo Hidrogeológico .....	108
4.8 Modelo geotécnico.....	108
4.8.1 Análisis cinemático .....	108
<b>CAPÍTULO V: PROPUESTA O APLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>111</b>
5.1 Antecedentes .....	111
5.2 Sistema de seguridad e identificación de riesgos.....	111
5.3 Estudio de suelos y de rocas: .....	111
5.4 Identificación de suelos y rocas .....	113
5.5 Inicio de corte de talud según diseño.....	113
5.6 Mejoramiento de la señalización y sistema de seguridad .....	115
<b>CAPÍTULO VI: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>116</b>
6.1 Resultados de la investigación.....	116
6.1.1 Obtención de los Parámetros Geotécnicos (ver Tabla 47): .....	116

6.1.2 Obtención de los parámetros geomecánicos.....	116
6.2 Análisis e interpretación de los resultados.....	116
6.2.1 Análisis de los parámetros geomecánicos del macizo rocoso .....	116
6.2.2 Análisis de estabilidad por el método de equilibrio limite .....	117
a) Condición estática .....	117
b) Condición pseudo estática: .....	118
6.2.3 Diseño del talud con bancos: .....	119
a) Condición estática .....	120
b) Condición pseudo estática: .....	121
6.3 Contrastación de hipótesis .....	122
CONCLUSIONES .....	123
RECOMENDACIONES .....	125
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	126
ANEXOS .....	128
Anexo 1: Matriz de Consistencia.....	128
Anexo 2: Matriz de Operacionalización de variables.....	129
Anexo 3: Plano Topográfico y de Cortes.....	130
Anexo 4: Plano de Secciones Principales .....	131
Anexo 5: Plano de Secciones.....	132
Anexo 6: Plano del tajo en 3D .....	134
Anexo 7: Plano prospección de recursos de rocas y minerales industriales" .....	135
Anexo 8: Relación de Calicatas .....	136
Anexo 9: Calicatas para la identificación de material .....	137
Anexo 10: Ensayo de comprensión uniaxial – Muestra 1 .....	138
Anexo 11: Ensayo de comprensión uniaxial – Muestra 2 y Muestra 3 .....	140

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Criterios para la estimación de la UCS en campo. ....	19
Tabla 2: Tabla de discontinuidades .....	20
Tabla 3: Escala sugerida de magnitud de la falla.....	25
Tabla 4: Clasificación del grado de actividad de fallas .....	27
Tabla 5: RMR calibrado contra la calidad del macizo rocoso.....	34
Tabla 6: Calificaciones de parámetros de RMR de Bieniawski, 1976 y 1979 .....	35
Tabla 7: Calificaciones de parámetros RQD de Bieniawski 1979.....	36
Tabla 8: Calificaciones de los parámetros de espaciamiento de juntas de Bieniawski ..	36
Tabla 9: Características del macizo rocoso según GSI.....	41
Tabla 10: Valores del GSI .....	42
Tabla 11: Pautas para estimar el factor de alteración, D .....	44
Tabla 12: Valores típicos de los criterios de aceptación de FS y PF .....	55
Tabla 13: Operacionalización de las variables .....	91
Tabla 14: Ángulos de Buzamiento y Dirección de Buzamiento.....	102
Tabla 15: Propiedades físicas de la roca .....	105
Tabla 16: Resultados de las propiedades físicas de la roca .....	105
Tabla 17: Propiedades mecánicas de la roca .....	106
Tabla 18: Resultados de las propiedades mecánicas de la roca.....	106
Tabla 20: Relación de calicatas .....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo del desarrollo del proyecto .....	9
Figura 2: Efectos potenciales de la inclinación de taludes .....	11
Figura 3: Terminología de la pared del tajo.....	12
Figura 4: Tipos de Mapeo.....	17
Figura 5: Mapeo geomecánico líneas de detalle.....	18
Figura 6: Efectos de propiedades de juntas sobre la estabilidad de un talud.....	21
Figura 7: Definición de los términos de la orientación de discontinuidades .....	21
Figura 8: Componentes del desplazamiento de la falla .....	25
Figura 9: Direcciones de tensión .....	26
Figura 10: Familias de diaclasas asociadas a pliegues .....	29
Figura 11: Disyunción columnar en basaltos con juntas verticales. La Gomera.....	30
Figura 12: Superficies de estratificación horizontales de gran continuidad .....	30
Figura 13: Representación de un plano en proyección estereográfica.....	32
Figura 14: Correlación de Bieniawski entre el RQD y el espaciado de las juntas .....	37
Figura 15: Evaluación de un valor equivalente del IRS .....	38
Figura 16: Ilustración de la porosidad .....	46
Figura 17: Información de los componentes y resultados del modelo geotécnico .....	49
Figura 18: Muestra en comparación con la situación a escala de campo .....	51
Figura 19: El bloqueo del macizo rocoso depende del volumen considerado.....	51
Figura 20: Transición entre la matriz rocosa y el macizo rocoso fracturado.....	52
Figura 21: Matriz de riesgos semicuantitativa.....	56
Figura 22: Proceso de diseño de taludes .....	62
Figura 23: Controles de diseño de talud por resistencia de roca .....	63
Figura 24: Componentes de configuraciones de banco .....	68
Figura 25: Proceso de diseño del ángulo de la cara del banco para rocas modificadas..	68
Figura 26: Definición de contragolpe y ángulo efectivo de la cara del banco.....	70
Figura 27: Geometrías entre rampas y bancos utilizadas en evaluaciones a tajo abierto	80
Figura 28: Configuraciones alternativas para lidiar con una falla .....	81
Figura 29: Ubicación de la zona de estudio.....	94
Figura 30: Extracción de la materia prima con el martillo hidráulico .....	96
Figura 31: Levantamiento topográfico de la zona de estudio.....	97

Figura 32: Observación de estratos.....	97
Figura 33: Levantamiento topográfico en planta de la zona de estudio .....	98
Figura 34: Mapa Geológico de Junín.....	99
Figura 35: Columna cronoestratigráfica – (Rocas y minerales industriales) RMI.....	100
Figura 36: Mapeo geomecanico por líneas de detalle de la cara del talud .....	101
Figura 37: Muestra representativa del estrato 1 .....	103
Figura 38: Muestra representativa del estrato 2.....	104
Figura 39: Muestra cúbica representativa del estrato 2 .....	104
Figura 40: Estereograma de rotura en cuñas.....	109
Figura 41: Estereograma de rotura plana.....	109
Figura 42: Estereograma de rotura por vuelco.....	110
Figura 43: Excavación de la calicata .....	112
Figura 44: Estratificación del talud.....	113
Figura 45: Inicio del corte de talud según el diseño .....	114
Figura 46: Continuación del corte de talud según resultados del diseño del tajo.....	115
Figura 47: Parámetros Geotécnicos del talud .....	116
Figura 48: Modelamiento y análisis estático de la sección 2-2' .....	117
Figura 49: Modelamiento y análisis estático de la sección 3-3' .....	118
Figura 50: Modelamiento y análisis pseudo estático de la sección 2-2' .....	118
Figura 51: Modelamiento y análisis pseudo estático de la sección 3-3' .....	119
Figura 52: Modelamiento en bancos y análisis estático de la sección de 2-2' .....	120
Figura 53: Modelamiento en bancos y análisis estático de la sección de 3-3' .....	120
Figura 54: Modelamiento en bancos y análisis pseudo estático de la sección de 2-2' .....	121
Figura 55: Modelamiento y análisis pseudo estático de la sección de 3-3' .....	121

## RESUMEN

La presente tesis es el resultado de la investigación y principalmente de la experiencia en la Mina Rosarina, Santa Rosa de Sacco, Yauli – Junín, la mina que produce minerales no metálicos a tajo abierto.

Para lograr el mejoramiento del proceso constructivo de corte de taludes se desarrolló una metodología propuesta en la tesis con la intención de implementar de forma correcta la extracción de la materia prima de la mina, con un énfasis del diseño óptimo del talud para el tajo. Esta metodología se realizó haciendo uso de los siguientes procedimientos: reconocimiento del terreno, recolección de datos en campo, estudio de geología, clasificación del macizo rocoso de las estructuras mayores, estudio de las unidades hidrogeológicas y la construcción del modelo geotécnico. Con la utilización de estos procedimientos se determinó el diseño que beneficie a la mina en su producción.

El diseño óptimo del talud del tajo abierto se ha determinado teniendo en claro que el procedimiento constructivo de corte de taludes se realice con seguridad y eficiencia.

Los análisis de estabilidad de taludes juegan un papel muy importante a parte de las voladuras, la razón es porque al tener taludes con más de 80m de profundidad, y el mismo movimiento que se genera por parte de las excavaciones hace que la estabilidad del talud se a vulnerable a deslizamientos y caída de rocas, lo que no se quiere en las minas.

Con la determinación de las propiedades mecánicas de la roca y la resistencia calculada en laboratorios de ensayos de rocas se corrió el programa Rocklab dando como resultando los parámetros geotécnicos, de ahí se importó el modelo del diseño óptimo del talud al programa Slide V6.0 y así se analizó la estabilidad del talud para el nuevo modelo.

**Palabras clave:** Mapeo de Afloramientos, Estabilidad de taludes, Tajo Abierto, Geometría del talud, Equilibrio Limite, Corte de taludes.

## **ABSTRACT**

The present thesis is the result of the research and mainly of the experience at Mina Rosarina, Santa Rosa de Sacco, Yauli Junín, the mine that produces non-metallic open-pit minerals.

In order to improve the construction process of cutting slopes, a methodology proposed in the thesis was developed with the intention of correctly implementing the extraction of the raw material from the mine, with an emphasis on optimal slope design for the pit. This methodology was carried out using the following procedures: land survey, field data collection, geology study, classification of the rocky massif of the larger structures, study of hydrogeological units and the construction of the geotechnical model. Using these procedures, the design that benefits the mine in its production was determined.

The optimal design of the open face slope has been determined with the understanding that the construction process of cutting slopes is carried out safely and efficiently.

Slope stability analyses play a very important role besides blasting, the reason is because having slopes more than 80m deep, and the same movement that is generated by the excavations makes the stability of the slope vulnerable to landslides and falling rocks, what is not wanted in the mines.

With the determination of the mechanical properties of the rock and the resistance calculated in rock testing laboratories, the Rocklab program was run, resulting in geotechnical parameters, from there the model of the optimal design of the slope was imported to the program Slide V6.0 and thus the stability of the slope for the new model was analyzed.

**Key words:** Slope Mapping, Slope Stability, Open Pit, Slope Geometry, Boundary Balance, Slope Cut.

## INTRODUCCIÓN

La tesis que lleva como título "Mejoramiento Del Proceso Constructivo para Corte De Taludes a tajo Abierto, Mina Rosarina, Yauli – Junín" será desarrollada con la asesoría del Mg. Ing. Torres Chung Cesar Roberto.

Actualmente la mina Rosarina está siendo explorada intensamente por una compañía minera, la exploración se está dando por un método observacional y empírico, pero esto no nos garantiza la estabilidad de taludes debido a las grandes modificaciones del perfil original que se deriva del corte de taludes, ya que la beta se encuentra muy profundo de la superficie, exponiéndose a deslizamientos de rocas, fisuras del terreno y accidentes que podrían ser mortales. Por lo que nos hemos visto con la necesidad de buscar un mejor método de exploración con la finalidad de mejorar la calidad del trabajo haciendo que el procedimiento sea económicamente rentable y seguro. Este método de corte consiste en lograr un diseño de taludes por un modelo de bancos, para eso debemos conocer antes los parámetros de diseño, también la estabilidad de los taludes se logra con la obtención del ángulo máximo de inclinación, con esto el proceso constructivo para corte de taludes será aceptable en la vida operativa, en el cierre y post cierre de la mina.

El diseño de taludes por bancos involucra la necesidad de establecer parámetros geotécnicos para la estabilidad de taludes y geomecánicos para clasificar las rocas. En la universidad no se cuenta con laboratorios para estos parámetros exclusivos para rocas, por esta razón hemos decidido realizar los ensayos en el laboratorio de mecánica de rocas de la Universidad Nacional de Ingeniería y otros laboratorios particulares, los ensayos que se realizaron son de las propiedades físicas y comprensión uniaxial, así que nos será factible alcanzar nuestros objetivos de nuestra investigación y completar las conclusiones y recomendaciones para el mejoramiento del proceso constructivo de corte de taludes.

La tesis se divide en seis capítulos; el primero aborda el planteamiento del problema, el segundo el marco teórico, el tercero el diseño metodológico, el cuarto el desarrollo de

investigación, el quinto la propuesta o aplicación de la investigación y por último la presentación de resultados.

# CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 Descripción de la realidad de la problemática

El Perú es antiguo en la producción de Minerales Metálicos, por sus amplias riquezas geológicas que se encuentran en sus terrenos, a nivel mundial se encuentra entre los primeros productores de diversos metales. Por otra parte, los Minerales no Metálicos también conocidos como minerales industriales forman parte del potencial minero que existe en el Perú, el aumento de esta producción creció a partir del año 2008 al año actual, siendo lo producido más del 250%, estos minerales son: boratos, diatomitas, selenio y andalucita.

Otros minerales no metálicos que se espera que la producción se incremente, son el yeso, talco, caliza y el mármol travertino. En la actualidad las empresas mineras que explotan estos minerales No Metálicos, no cuentan con el conocimiento necesario de investigación para su procedimiento constructivo, ya que todos estos recursos se encuentran muy por debajo de la superficie, por eso se debe de realizar el método de minado que se adecue a la zona, para el caso de minado por tajo abierto se tiene como problema principal las grandes alturas y los grados de inclinación de taludes, debido que al encontrar la beta del yacimiento después de una ardua tarea de excavación se tiene que continuar excavando para incrementar la extracción del mineral, pero el corte de talud se va perfilando con escasos ángulos de inclinación creando la inestabilidad de taludes y poniendo en riesgo la vida de los trabajadores por las posibles ocurrencias de deslizamientos y fallas de rocas.

De esta manera nuestra investigación realizara el mejoramiento del proceso constructivo para corte de taludes y lograr una extracción de mineral más rápida y eficiente, partiendo de un diseño óptimo para el tajo abierto, y a la vez ayudar a las empresas que realizan esta actividad a reducir los riesgos al deslizamiento y accidentes evitando pérdidas humanas y económicas.

Para lograr el mejoramiento al proceso constructivo de corte de taludes, se hará estudios y se describirá las rocas con ensayos, simulaciones en programas hasta lograr el diseño del talud.

## 1.2 Formulación del problema

### 1.2.1 Problema principal

¿En qué medida el mejoramiento del proceso constructivo influye en el corte de taludes a tajo abierto, en la Mina Rosarina, Yauli – Junín?

### 1.2.2 Problemas secundarios

- a) ¿De qué manera la determinación de los parámetros geotécnicos y geomecánicos influye en los taludes de la mina de tajo abierto?
- b) ¿De qué manera influye la estabilidad de taludes a nivel banco, ángulos interrampa y ángulos globales en condiciones estáticas y pseudo estáticas?
- c) ¿De qué manera influye el diseño de taludes en el mejoramiento del proceso constructivo de corte de taludes?

## 1.3 Objetivos de la investigación

### 1.3.1 Objetivo principal

Determinar la influencia del mejoramiento del proceso constructivo en el corte de taludes a tajo abierto, Mina Rosarina, Yauli – Junín

### 1.3.2 Objetivos secundarios

- a) Determinar los parámetros geotécnicos y geomecánicos que influyen en los taludes de la mina Rosarina.

- b) Analizar la influencia de la estabilidad de taludes a nivel banco, ángulos interrampa y ángulos globales en condiciones estáticas y pseudo estáticas.
- c) Determinar la influencia del diseño de taludes en el mejoramiento del proceso constructivo de corte de taludes.

#### 1.4 Justificación e importancia de la investigación

Esta investigación nos permite darle solución al procedimiento constructivo de corte de taludes que se hace en las minas para lograr producir minerales, para eso tendrá justificaciones en la parte técnica, económica y de seguridad.

##### 1.4.1 Conveniencia

Se va proponer realizar el diseño del talud con el ángulo favorable para los bancos y así la extracción de mineral será mayor y económicamente rentable.

##### 1.4.2 Relevancia social

La estabilidad de taludes se analiza obteniendo los parámetros necesarios del talud, de ahí se podrá verificar si el factor de seguridad cumple con lo especificado, y así tener la certeza que los trabajos en campo se realicen sin problemas al deslizamiento y otros eventos no deseados que causen accidentes y daños materiales.

##### 1.4.3 Implicancia práctica

Se va mejorar el procedimiento constructivo de corte de taludes partiendo de un diseño óptimo con modelos de bancos para la mina de tajo abierto.

## 1.5 Limitaciones de la investigación

La limitación de este trabajo de investigación se basa en la escasez de información de los estudios de terreno que nos dan como resultado los parámetros geotécnicos y geomecánicos los cuales caracterizan a la mina.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes del estudio de investigación

#### 2.1.1 En el ámbito internacional

Cuba C. (2015), presenta la tesis Diseño de minas a tajo abierto para la explotación de un yacimiento en Chile.

El propósito de su tesis es elegir el método de explotación de un yacimiento mineral basándose en una decisión económica. Esta decisión está relacionada con múltiples factores propios del yacimiento que se provendrá de una campaña de exploración debidamente desarrollada. La exploración de un yacimiento por el método de tajo abierto, requiere de datos iniciales, provenientes de campañas de exploración (Sondajes), los cuales serán procesados de modo de obtener un modelo de bloques. Este modelo consiste en una matriz tridimensional de bloques de dimensiones definidas por su largo, ancho (ambos iguales por lo general) y alto, este último valor corresponderá a la altura de los bancos del futuro tajo. El investigador concluye que una vez disponible la información entramos a la etapa de diseño, la cual nos entregara como resultado los limites económicos de nuestra explotación denominado Pit Final, a lo cual podemos agregar los límites de las distintas etapas de la explotación llamadas fases, las cuales nos definen la secuencia de explotación del yacimiento. (pág. 12)

Garrido G. (2013), presenta la tesis Propuesta de Estabilización del talud en el Boulevard Raúl Leoni, Caracas.

El propósito de su tesis es instituir las medidas de prevención y control para reducir los niveles de amenaza y riesgo a través de funcionamientos de sistemas de estabilización para el talud posterior a las residencias Icabaru y Aramis. Esta investigación será descriptiva, ya que se debe establecer su estructura y el comportamiento del talud para luego seleccionar un método de estabilización y proyectarlo al talud, en el Boulevard Raúl Leoni, El Cafetal, Caracas. El investigador concluye con la verificación de los métodos de estabilización

existentes más convenientes, que garantizaran el funcionamiento del talud y la calidad de vida de las personas existentes en las adyacencias del mismo. (pág. 26)

### 2.1.2 En el ámbito nacional

Rodríguez J. (2003), presenta la tesis “Evaluación de la estabilidad de taludes en la mina Lourdes” para explotaciones de mineral no metálico por el método de Canteras a tajo abierto. El propósito de su tesis tiene como objetivo evaluar las grandes modificaciones al perfil original del terreno, con el fin de mejorar las explotaciones implementando un método de minado superficial por bancos que permita un mejor control de estabilidad del terreno. Esto implicaría la necesidad de establecer los parámetros geomecánicos y establecer los dominios geotécnicos del área de la explotación que permitan un diseño seguro de bancos en suelos rocosos y en los botaderos de desmonte. El investigador concluye señalando que un talud en rocas en la superficie y una excavación en el subsuelo, son dos ambientes claramente distintos, siendo el talud en la superficie generalmente menos seguro. (pág. 34)

Mendoza J. (2016), presenta la tesis “Análisis de estabilidad de taludes de suelos de gran altura en la mina Antapaccay”. El propósito de su tesis es determinar los parámetros de diseño de los taludes que se van a construir en suelos. Estos taludes son considerados de gran altura porque su profundidad efectiva de excavación o desnivel es mayor a los 100 metros. Por lo que se realizaron los análisis de estabilidad en condiciones estáticas y dinámicas considerando valores diferentes de poropresión ( $R_u$ ) para los suelos debido a la falta de conocimiento de la ubicación exacta de la línea piezométrica. El investigador concluye que, de los resultados de los análisis, se define los parámetros más óptimos de diseño de taludes con el fin de reducir los riesgos de deslizamientos. (pág. 45)

## 2.2 Bases Teóricas

### 2.2.1 Fundamentos del diseño de talud

Para una mina a tajo abierto, el diseño de taludes es uno de los mayores desafíos en cada etapa de la planificación y operación. Se requiere de un conocimiento especializado de la geología, aunque a menudo sean complejas las proximidades de los yacimientos, donde la estructura y/o alteración son factores clave, y de las propiedades de los materiales, que a menudo son muy variables. También requiere de una comprensión de los aspectos prácticos de la implementación del diseño.

El objetivo de cualquier diseño de talud a tajo abierto es proporcionar una configuración óptima de la excavación en contexto de la seguridad, la recuperación de mineral y el retorno financiero (ver Figura 1).

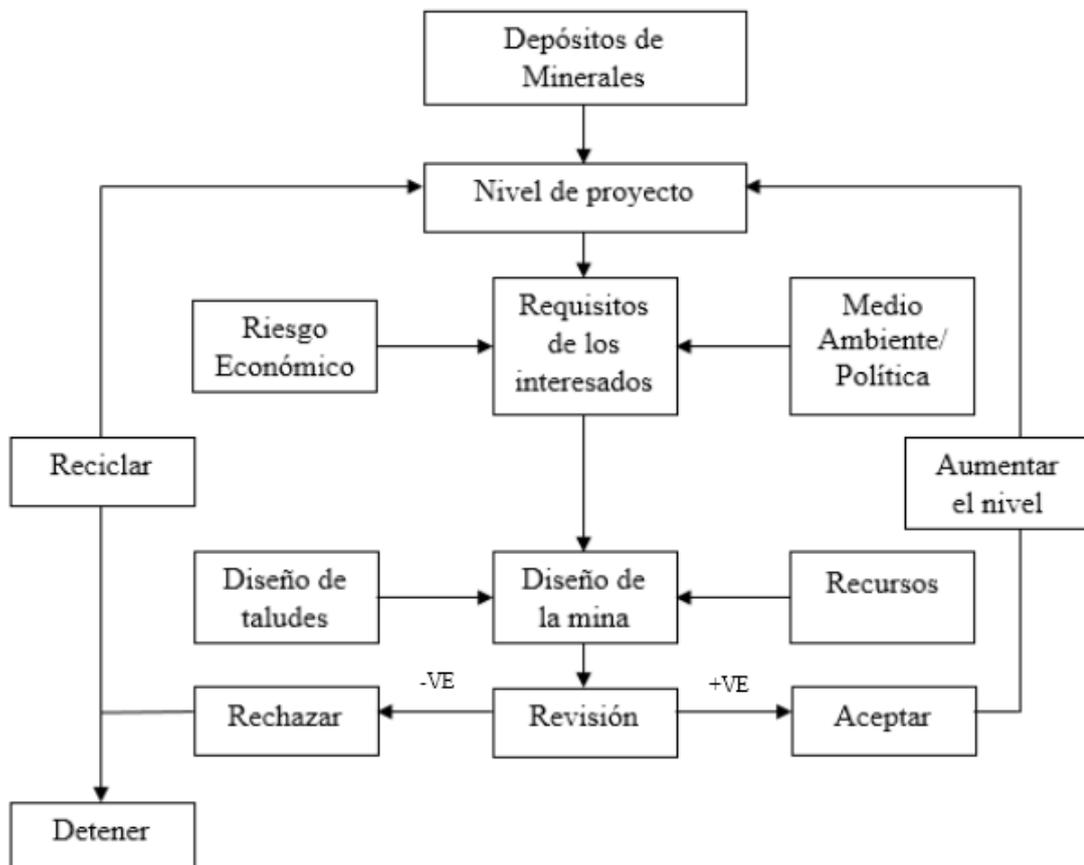


Figura 1: Diagrama de flujo del desarrollo del proyecto

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

Como se describe en la Figura 1, los diseños de taludes constituyen un insumo esencial en el diseño de una mina a tajo abierto en cada etapa de la evaluación de un yacimiento mineral, desde los diseños conceptuales iniciales, que evalúan el valor de los trabajos futuros sobre un descubrimiento de exploración hasta los diseños a corto y largo plazo de una mina en operación.

A diferencia de los taludes en ingenierías civiles, que alcanzan alturas máximas de 40 o 50 m, y se proyectan para ser estables a largo plazo, los taludes de tajo abierto pueden alcanzar profundidades de centenares de metros. En yacimientos de minerales no metálicos, disponibles en capas horizontales o inclinadas, los taludes tienen carácter temporal y se proyectan para permanecer estables a corto o mediano plazo (meses o años), ya que tras la extracción del mineral la excavación se abandona o se rellena.

La inestabilidad incontrolada, en efecto la falla de un talud, puede tener muchas ramificaciones, incluyendo:

a) Factores de seguridad / sociales:

- Pérdida de vidas o lesiones
- Pérdida de ingresos de los trabajadores
- Pérdida de confianza del trabajador
- Pérdida de credibilidad corporativa, tanto externa como con los accionistas.

b) Factores económicos

- Interrupción de las operaciones
- Pérdida de mineral
- Pérdida de equipo
- Mayor eliminación de residuos
- Costo de la limpieza
- Pérdida de mercados.

c) Factores medioambientales/reguladores

- Impactos ambientales
- Aumento de la regulación
- Consideraciones de cierre

a) Factores de seguridad / sociales

Las condiciones de operación seguras que protegen contra el peligro de muerte o lesiones al personal que trabaja en el tajo abierto son requisitos morales y legales fundamentales.

b) Factores económicos

El principal incentivo económico en la mayoría de los tajos abiertos es alcanzar el ángulo máximo de inclinación acorde con el nivel de estabilidad aceptado. En un tajo abierto grande, el empinamiento de una pared en sólo unos pocos grados puede tener un impacto importante en el retorno de la operación a través de una mayor recuperación de mineral y/o una reducción del desmonte (ver Figura 2).

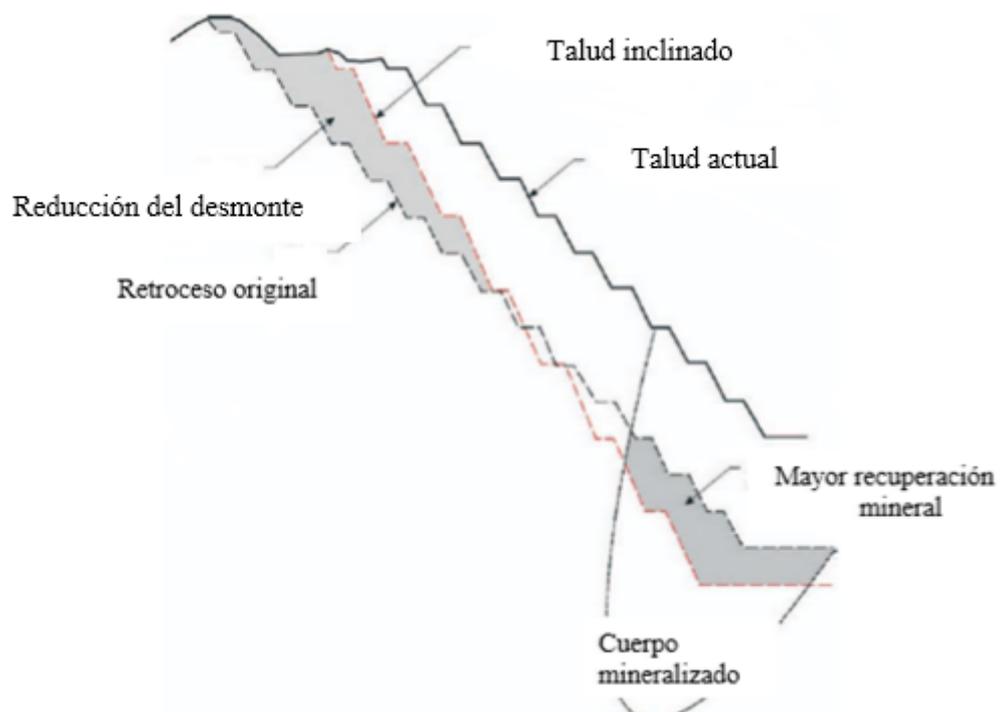


Figura 2: Efectos potenciales de la inclinación de taludes

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

c) Factores ambientales y reglamentarios

Las regulaciones relacionadas con los taludes de tajo abierto varían considerablemente entre jurisdicciones, al igual que los grados de flexibilidad para modificar las configuraciones de talud de las especificadas en los códigos. Sin embargo, independientemente del tipo de código, en la mayoría de las jurisdicciones, si no en todas, es responsabilidad última del Gerente de Mina registrado mantener el «estándar de cuidado» y las revisiones regulares por parte de una «persona competente» que se requiere.

2.2.2 Terminología del diseño de taludes.

La terminología estándar utilizada para describir la disposición geométrica de los bancos y las rampas de acarreo en la pared del tajo se ilustra en la Figura 3.

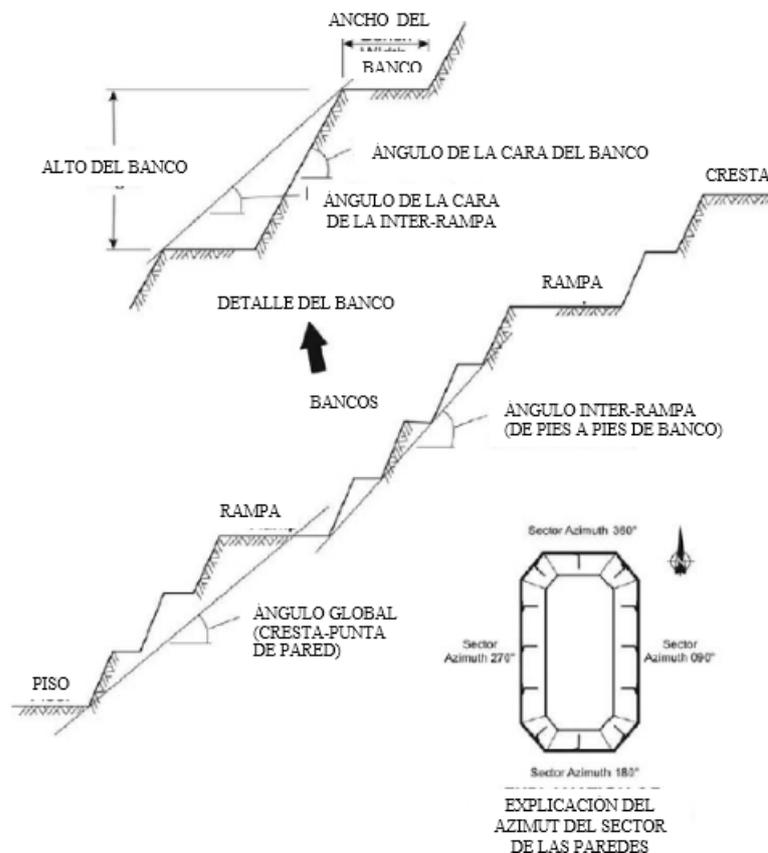


Figura 3: Terminología de la pared del tajo

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

### 2.2.2.1 Inestabilidad

El aumento de la capacidad para detectar pequeños movimientos en taludes y manejar la inestabilidad hace necesaria una mayor precisión terminológica. Anteriormente, el movimiento significativo en un talud se refería con frecuencia, en términos algo alarmistas como la "falla", por ejemplo: Modo de falla, incluso si el movimiento podría ser manejado. Ahora es apropiado ser más específico sobre el nivel de movimiento e inestabilidad, utilizando las definiciones que reconocen la progresión del movimiento del talud en el siguiente orden de severidad.

- Respuesta de la descarga

Los movimientos iniciales en el talud a menudo se asocian con la relajación de la tensión del talud a medida que se excava y se levanta el confinamiento proporcionado por la roca. Este tipo de movimiento es deformación elástica lineal. Se produce en cada talud excavado y no es necesariamente sintomático de la inestabilidad. Es típicamente pequeño en relación con el tamaño del talud y, aunque puede ser detectado por instrumentos, no exhibe necesariamente grietas superficiales.

- Movimiento o dilatación

Se considera que esta es la primera evidencia clara de inestabilidad, con la formación asociada de grietas y otros signos visibles, p. ej. Levantamiento en la punta (base) de talud. En la roca más fuerte, el movimiento generalmente resulta del deslizamiento a lo largo de una superficie o superficies, que pueden ser formadas por las estructuras geológicas (por ej. plano de estratos, falla), o una combinación de éstos con una zona de debilidad en el material que forma el talud.

- La falla

Se puede considerar que un talud ha fallado cuando el desplazamiento ha alcanzado un nivel en el que ya no es seguro de operar o la función prevista no puede cumplirse, por ejemplo, cuando ya no es posible el acceso en rampa a través del talud.

Los términos "falla" y "colapso" se han utilizado como sinónimos al referirse a los taludes de los tajos a tajo abierto, particularmente cuando la falla ocurre rápidamente.

En el caso de un modelo de "falla progresiva", la falla de un talud del tajo ocurre cuando "el desplazamiento continuará acelerándose hasta un punto de colapso (o movimiento muy acelerado)" Call et al. (2000).

#### 2.2.2.2 Caída de rocas

El término 'caída de rocas' se usa generalmente para materiales sueltos que caen o ruedan desde las caras. Como tal, es principalmente un problema de seguridad, aunque posiblemente podría ser un precursor de la inestabilidad a gran escala.

La caída de rocas puede ser un síntoma de una implementación deficiente del diseño, es decir, malas prácticas de voladura y/o escalado. Sin embargo, también puede resultar de la degradación del talud como resultado de la intemperie o de la acción de congelación y descongelación.

#### 2.2.3 Modelo geotécnico

El modelo geotécnico, es la base fundamental para todos los diseños de taludes y esta a su vez se compone por cuatro modelos:

- El modelo geológico
- El modelo estructural
- El modelo del macizo rocoso
- El modelo hidrogeológico.

Estos modelos también tienen aplicaciones para otros aspectos de la operación minera, por ejemplo, en reservas de mineral. Sin embargo, los aspectos particulares de cada uno son críticos para el proceso de diseño de taludes.

Existen otros aspectos del modelo geotécnico que pueden ser importantes en casos específicos, por ejemplo, los esfuerzos in situ, particularmente en relación con taludes muy altos, la presencia de grandes aberturas subterráneas y las cargas sísmicas.

#### 2.2.3.1 Recolección de datos en campo

Completar el modelo geotécnico con datos de campo relevantes requiere no solo de una aguda observación y atención al detalle, sino también de una estricta adherencia a los protocolos para la recolección de datos de campo desde el primer día en el desarrollo del proyecto. Estos se dan de la siguiente manera:

- Para los modelos geológicos y estructurales, estas tecnologías pueden ir desde el mapeo directo o digital y el muestreo de afloramientos desde la superficie, zanjas hasta estudios geofísicos directos e indirectos, barreno rotativo y perforación de núcleos.
- Para el modelo de macizo rocoso, pueden incluir una plétora de pruebas de campo y laboratorio.
- Para el modelo hidrogeológico pueden incluir desde datos hidrogeológicos regionales históricos, hasta la recolección de datos hidrogeológicos 'respaldados' sobre programas de exploración de minerales, perforación de recursos y programas rutinarios de monitoreo del nivel de agua en instalaciones específicas de pozos observación de aguas subterráneas y/o piezómetros.

#### 2.2.3.2 Mapeo y registro de afloramientos

Preferiblemente debe ser realizado solo por ingenieros geológicos o geotécnicos especializados debidamente capacitados, los datos mapeados serán registrados a mano en hojas de papel y / o cuadernos de campo, pero de acuerdo a los avances en el software y el hardware electrónicos ahora se usan cada vez más el registro electrónico de datos directamente en tabletas portátiles y / o computadoras portátiles. Ambos sistemas tienen sus méritos, pero el sistema electrónico tiene la ventaja de que elimina la tediosa transferencia de datos en papel a un formato electrónico.

#### 2.2.4 Modelo geológico

El propósito del modelo geológico es vincular la geología física regional y los eventos que conducen a la formación de los afloramientos y llevarlos a una descripción a escala del talud de la ubicación, distribución, naturaleza de los suelos sobrecargados y los tipos de rocas del sitio, incluidos los efectos de la alteración y la meteorización. La información geológica recolectada en campo o mapeo es lo primero que se debe tener en cuenta para caracterizar el macizo rocoso, debido a que con esta información determinamos su composición, su estructura y los fenómenos que ocurren o han ocurrido.

##### 2.2.4.1 Reconocimiento y recolección de la información geológica

Los macizos rocosos que componen al talud presentan generalmente múltiples discontinuidades, por ello se requiere reconocer y describir a medida el comportamiento mecánico de los macizos rocosos, resultando necesario hacer un análisis previo del comportamiento de las discontinuidades naturales.

##### 2.2.4.2 Mapeo

El mapeo es una herramienta de exploración rentable y un proceso generador de proyectos que entrega beneficios tangibles para todos los programas de exploración.

###### 2.2.4.2.1 Tipos de Mapeo

En la figura 4 se encuentran los tipos de mapeo que existen para macizos rocosos.

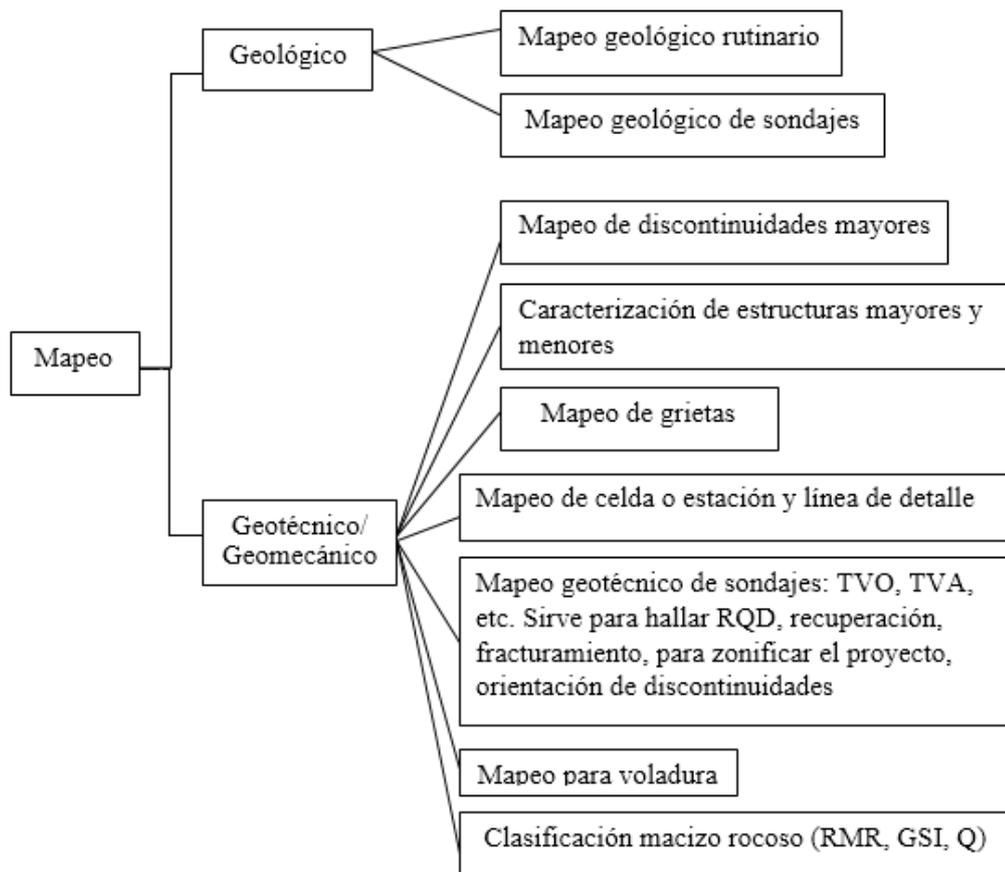


Figura 4: Tipos de Mapeo

Fuente: Elaboración Propia

Para la presente tesis se empleara el mapeo geomecánico por líneas de detalle, ya que solo se requiere saber para un área predeterminada del macizo rocoso lo siguiente: el análisis probabilístico, el análisis estructural, orientación del talud y el ajuste de los parámetros de diseño (ajuste por orientación parámetro RMR)

#### 2.2.4.2.1 Mapeo geomecánico

##### **Mapeo por líneas de detalle**

El mapeo por líneas de detalle significa registrar en las paredes de rocas de los afloramientos superficiales las discontinuidades más importantes sin ser limitativos. Estos son: tipo de sistema de discontinuidad, tipo de roca, buzamiento, orientación de la discontinuidad, tipo de relleno, espesor de relleno, rugosidad, persistencia, meteorización

y presencia de agua. Adicionalmente se deben registrar datos de resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad y la frecuencia de fracturamiento.

El mapeo consiste en establecer una línea empleando una cinta de medición sobre la que se identifican todas las estructuras o discontinuidades que cortan o interceptan dicha línea, se toma la orientación de la cara de medición, luego la orientación de la cinta o línea y se procede a registrar las discontinuidades (ver Figura 5).



Figura 5: Mapeo geomecánico líneas de detalle

Fuente: Leandro, 2004

Definición de algunas discontinuidades:

- La discontinuidad, es la deformación del cuerpo que ha sido fracturado.
- Persistencia, es la longitud de fractura, o también llamado fractura continua.
- Espaciado, es la distancia perpendicular entre dos fracturas, cuando el espaciado es mayor la roca será más competente.

Luego de observar las discontinuidades de la cara del talud, se determina la resistencia a la compresión de las discontinuidades. En la tabla 1, se dan resultados de resistencia de compresión uniaxial estimadas en campo.

Tabla 1: *Criterios para la estimación de la UCS en campo.*

Grado	Descripción	Identificación del terreno	Rango aproximado de resistencia a la compresión uniaxial (Mpa)
S1	Arcilla muy blanda	Fácilmente penetrable varias pulgadas con el puño	<0.025
S2	Arcilla blanda	Fácilmente penetrable varias pulgadas con el pulgas	0.025-0.05
S3	Arcilla Firme	Puede ser penetrada varias pulgadas con el pulgar, con esfuerzo moderado	0.05-0.10
S4	Arcilla rígida	Fácilmente marcada por el pulgar, solamente puede ser penetrada con gran esfuerzo	0.10-0.25
S5	Arcilla muy rígida	Fácilmente marcada por la uña	0.25-0.50
S6	Arcilla Dura	Marcada con dificultad por la uña	>0.5
R0	Roca extremadamente débil	Marcada por la uña	0.25-1.0
R1	Roca muy débil	Se disgrega por un golpe fuerte de la punta del martillo geológico, puede ser escarbada por el cortaplumas	1.0-5.0
R2	Roca débil	Puede ser escarbada por el cortaplumas con dificultad, se deforma o disgrega por un fuerte golpe de la punta del martillo	5.0-25
R3	Roca medianamente fuerte	No puede ser escarbada o disgregada por una cortaplumas, la muestra se fractura con un solo golpe firme del martillo geológico	25-50
R4	Roca fuerte	La muestra requiere mas de un golpe del martillo geológico para se fracturada	50-100
R5	Roca muy fuerte	La muestra requiere de muchos golpes del martillo geológico para ser fracturada	100-250
R6	Roca extremadamente fuerte	La muestra solo puede sr astillada con el martillo geológico	>250

Fuente: Gonzales de Vallejo, 2002

#### 2.2.4.2.2 Tipo de discontinuidades

La palabra discontinuidad hace referencia a un plano o separación en el macizo rocoso, apareciendo rocas de origen sedimentarias, como las superficies de laminación o estratificación, tectónico o diagenético como las fallas o diaclasas (ver Tabla 2).

Tabla 2: *Tabla de discontinuidades*

<b>Discontinuidades</b>	<b>Sistemáticas</b>	<b>Singulares</b>
Planares	Planos de estratificación Planos de laminación Diaclasas o juntas Planos de esquistosidad	Fallas Diques Discordancias
Lineales	Intersección de discontinuidades planares Lineaciones	Ejes de pliegue

Fuente: Gonzales de Vallejo, 2002

#### 2.2.4.2.3 Orientación de las discontinuidades

Como primer paso de la investigación de discontinuidades es analizar su orientación e identificar las familias de discontinuidades que pueden formar bloques de rocas potenciales inestables (ver Figura 6). Este análisis está facilitado por el uso de un método simple para expresar la orientación de la discontinuidad. Siendo la terminología adecuada para la orientación, el buzamiento (dip) y la dirección del buzamiento (dip direction) que son definidos de la siguiente manera (ver Figura 7):

1. Buzamiento, máxima inclinación de una discontinuidad en referencia a la horizontal (ángulo  $\Psi$ ).
2. Dirección de buzamiento, dirección de la traza horizontal de la línea de inmersión, medida en el sentido de las agujas del reloj desde el norte (ángulo  $\alpha$ ).

El sistema buzamiento y dirección de buzamiento facilita el mapeo en campo.

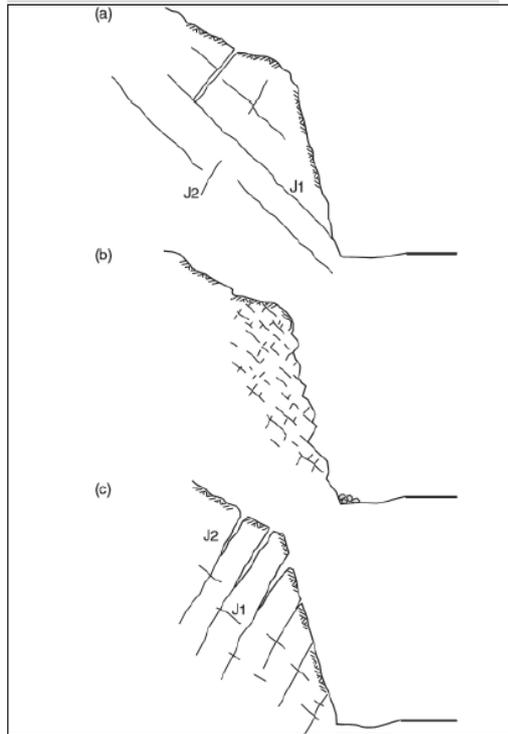


Figura 6: Efectos de propiedades de juntas sobre la estabilidad de un talud

Fuente: Mah 2004

- a) Juntas J1 persistente, junta de deslizamiento fuera de la cara formando bloques potenciales de deslizamiento
- b) Espacios cerrados, baja persistencia de juntas formando pequeños bloques
- c) Juntas J2 persistentes dentro de la cara de deslizamiento formando posibles roturas por vuelco.

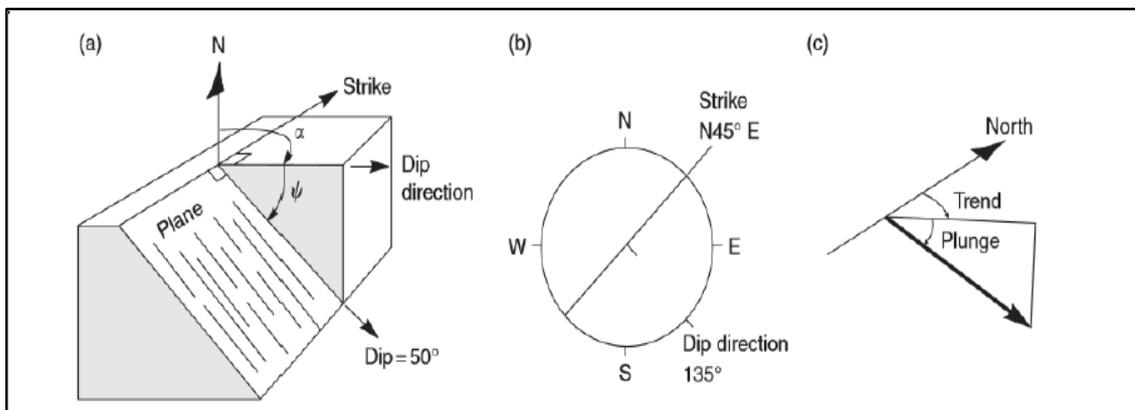


Figura 7: Definición de los términos de la orientación de discontinuidades

Fuente: Mah, 2004

De la figura: 7.a. Vista isométrica de un plano (dip y dip direction), 7.b. Vista en planta de un plano y c. Vista isométrica de una línea (plung y trend).

#### 2.2.4.3 Influencia de los procesos geológicos:

Pacheco (2018), Los procesos geológicos desde su formación hasta su condición actual han proporcionado a los macizos rocosos, propiedades y características que los diferencian unos de otros y que controlan su comportamiento cuando son excavados. Los parámetros o características más significativos de su comportamiento son las condiciones de fractura y las condiciones de resistencia. Las condiciones de fractura se miden utilizando un flexómetro o una cinta métrica y se determina midiendo a lo largo de un metro, cuantas fracturas se presentan en la roca, para observarse mejor la pared del macizo rocoso de la labor debe estar bien lavada. No se consideran las fracturas por disparo, ni las fracturas muy pequeñas menores de 1 m d longitud. Según el número de fracturas por metro lineal los macizos rocosos se clasifican, según la mecánica de rocas en:

1. Masiva (menos de 2 fracturas/metro)
2. Levemente fracturada (2 a 5 fracturas/metro)
3. Moderadamente fracturada (6 a 12 fracturas/metro)
4. Muy fracturada (13 a 20 fracturas/metro)
5. Intensamente fracturada (más de 20 fracturas/metro)
6. Triturada (solamente se obtienen fragmentos)

#### 2.2.4.4 Sismicidad regional

Distribución de los terremotos

Hay una serie de casos en que los terremotos han provocado deslizamientos de tierra en taludes naturales, pero no hay casos identificados de terremotos que provoquen fallas en los taludes de grandes minas a tajo abierto. Esta situación ha creado un considerable

debate sobre la necesidad de realizar análisis sísmicos de los taludes de tajos abiertos, es la razón principal por la que la carga sísmica se ignora a menudo en el diseño de taludes de tajos abiertos. Sin embargo, si una propiedad estuviera ubicada en una región sísmicamente activa y se produjera un gran terremoto cerca de un talud minado, los efectos podrían ser considerables, en particular si se utilizaran materiales débiles similares a los del suelo.

En otras infraestructuras mineras, especialmente las presas de relaves, pueden ser y han sido afectadas por terremotos. Por esta razón, es importante documentar la sismicidad regional e integrarla con el modo geológico.

### 2.2.5 Modelo estructural

El segundo componente del modelo geotécnico es el modelo estructural. El propósito del modelo estructural es describir la orientación y distribución espacial de los defectos estructurales o discontinuidades (mayores y menores) que pueden influir en la estabilidad de los taludes del tajo.

Distribución de las discontinuidades:

- Mayores: Resistencia, rugosidad, rellenos, halos de influencia
- Menores: Persistencia, espaciamiento

El modelo estructural se construye a través de la integración de mapeos a escala de banco (scan-lines).

#### 2.2.5.1 Componentes del modelo

- Estructuras mayores

Las estructuras mayores incluyen los pliegues y fallas que son continuos a lo largo de la perforación e inmersión hacia abajo donde se encuentra la mina, también son considerados las características tales como las estructuras laminadas asociadas con rocas

metamórficas como la pizarra, filita y esquisto. A continuación se describe la terminología básica utilizada para describir estas características.

#### a) Pliegues

Los pliegues son una de las estructuras más comunes en rocas deformadas. Se forman cuando las características planas como la estratificación y la esquistosidad se desvían en estructuras onduladas curvilineales o curvilíneas. Se desarrollan en una o varias capas y se producen principalmente por flexión y pandeo. También pueden ocurrir por la caída de gravedad y pueden tener una amplia variedad de geometrías y tamaños.

El curvado es una flexión inducida por una compresión que actúa en un ángulo alto con respecto a la estratificación. La pandeo es una flexión inducida por compresión que actúa en un ángulo bajo con respecto a la estratificación.

#### b) Fallas

Para fines de ingeniería, cualquier movimiento es una falla, reconociendo que incluso una falla menor (escala pequeña) puede tener una importancia considerable para la ingeniería en términos de reducción de la resistencia.

Los sistemas de clasificación de fallas reconocen el estado hidrostático del origen de esfuerzo en la corteza terrestre mediante el cual la magnitud de las tensiones horizontales en cualquier profundidad dada es igual a la tensión geostática vertical inducida en profundidad por la carga gravitatoria.

Las características principales estructurales como fallas y pliegues para la mina pueden ser utilizados para subdividir la mina en números selectos de dominios estructurales, mediante el cual cada uno se caracteriza interiormente por un tejido estructural conocido compuesto por fallas y uniones estrechamente espaciadas. Para minas a cielo abierto, los límites litológicos y su forma pueden intervenir en la selección de los límites para su dominio.

Para el diseño de taludes, en la Tabla 3 se presenta una escala sugerida. Los componentes de desplazamiento de una falla se miden en términos de lanzamiento, elevación, deslizamiento total y desplazamiento (ver Figura 8).

Tabla 3: *Escala sugerida de magnitud de la falla*

Longitud (m)	Descripción
<1	Menor (pequeña escala)
1-100	Banco
10-100	Banco a inter-rampas
100-1000	Inter-rampas en general
>1000	Escala de la mina a nivel regional

Fuente: John, 1968

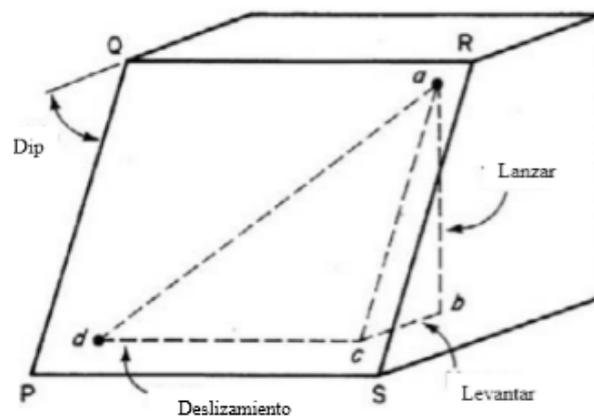


Figura 8: Componentes del desplazamiento de la falla

Fuente: Blyth FGH & deFreitas MH, 1984

La magnitud de las tensiones horizontales ( $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ) en relación con la tensión vertical ( $\sigma_1$ ) puede cambiar de tres maneras. Si la tensión diferencial es suficientemente grande, estas variaciones darán lugar a tres fallas principales: normal, empuje (reversa) y deslizamiento de golpe (ver Figura 9).

- Falla normal: es una extensión lateral donde la magnitud de los esfuerzos horizontales decrece (ejemplo  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ). Estas fallas pueden ocurrir en cualquier medio geológico.
- Falla de empuje o inversa: resulta de la compresión, los esfuerzos horizontales incrementan en magnitud. La superficie de la falla mayor a los  $45^\circ$ .
- Fallas de deslizamiento: ocurren cuando el plano de falla es aproximadamente vertical y el movimiento está en la dirección del rumbo. Un esfuerzo horizontal aumenta en magnitud mientras que el otro disminuye en magnitud ( $\sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_1$ ).

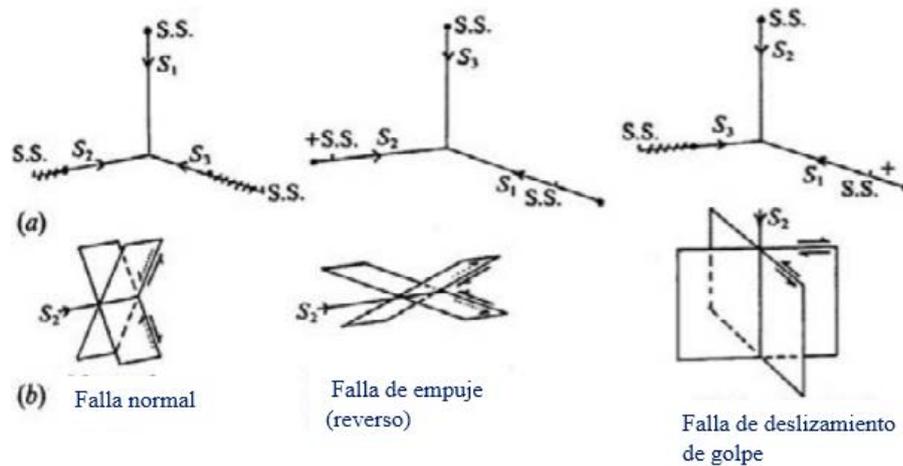


Figura 9: Direcciones de tensión

Fuente: Blyth FGH & deFreitas MH, 1984

En la tabla 4 se encuentra la clasificación del grado de actividad de fallas en rocas que tienen tensiones diferenciales muy grandes.

Tabla 4: *Clasificación del grado de actividad de fallas*

Parámetro	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Clase 6
Tasa de deslizamiento	>10mm/año	1-10mm/año	0.5-5mm/año	0.1-1mm/año	<1mm/año	<0.1mm/año
Deslizamiento por evento	>1m.	>1m.	0.1-3m.	0.01-1m.		
Longitud de ruptura	>100Km	50-200Km	10-100Km	>10Km		
Magnitud de sismo máximo	>7.5	>7.0	>6.5	>5.5		
Recurrencia	<500 a.	100-200 a.	500-5000 a.	1000-10000 a.	>10000 a.	>100000 a.

Fuente: Costa, 2012

#### 2.2.5.2 Fábrica

La fábrica estructural a escala de rampas dentro de un mayor dominio puede incluir micro estratificación y plegamiento, clivaje, esquistosidad y juntas.

##### 2.2.5.2.1 Estructuras de pliegue menor

Las estructuras comunes de pliegue menor incluyen clivaje o crucero de fractura, las brechas de tensión, estructura vesicular y espejos de falla.

- Clivaje o crucero de fractura: Consiste en una serie de fracturas paralelas (o cortes conjugadas) formados en una incompetente capa (esquisto) en respuesta al encierro de una competente capa (arenisca).
- Estructura vesicular: Son formadas por extensión durante el flexuramiento de material frágil, totalmente fracturado la capa en piezas similares a varillas.

- Espejos de falla: Son lineamientos que reflejan la dirección del movimiento de capas adyacentes o estructuras durante el pliegue o falla.

#### 2.2.5.2.2 Fracturación

Gonzales de V. (2002), La fracturación del macizo rocoso está definida por el número, espaciado y condiciones de las discontinuidades, cualquiera que sea su origen y clase. El grado de fracturación se expresa habitualmente por el valor del índice RQD (rock quality designation),

#### 2.2.5.2.3 Diaclasas o juntas (Joints)

Gonzales de V. (2002), Son los planos de discontinuidad más frecuentes en los macizos rocosos, y corresponden a superficies de fracturación o rotura de la roca a favor de las cuales no ha habido desplazamiento o ha sido muy pequeño. Afectan a cualquier tipo de roca. Atendiendo a su origen se distinguen varios tipos:

- Diaclasas de origen tectónico asociadas a plegamientos y a fallas. En el primer caso presentan una disposición característica (Figura ver 10).  
Las diaclasas asociadas a fallas se disponen paralelamente a la superficie de falla y con una frecuencia que disminuye al aumentar la distancia a la misma.
- Diaclasas en rocas ígneas formadas por contracción durante o después del emplazamiento del cuerpo ígneo. Presentan una disposición característica en tres familias ortogonales entre sí.  
Un ejemplo de juntas de contracción por enfriamiento corresponde a las que se forman en las lavas basálticas, dando lugar a la disyunción columnar (ver Figura 11).

- Diaclasas de relajación debidas a una reducción de la carga litostática. Se disponen subparalelamente a la superficie topográfica y su frecuencia disminuye en profundidad (ver Figura 12).

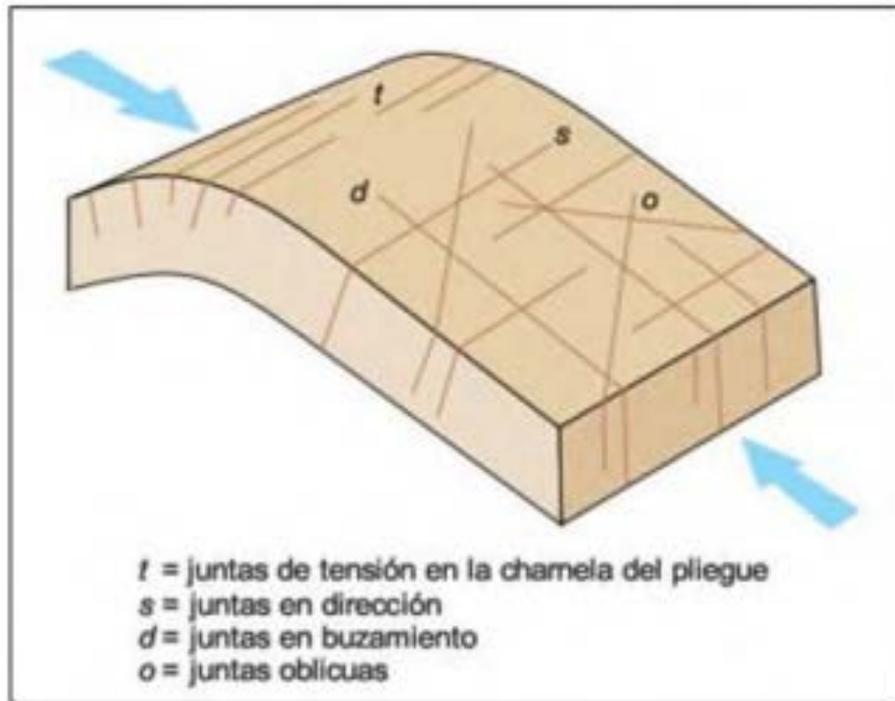


Figura 10: Familias de diaclasas asociadas a pliegues

Fuente: Blyth FGH & deFreitas MH, 1984



Figura 11: Disyunción columnar en basaltos con juntas verticales. La Gomera

Fuente: Gonzales de Vallejo, 2002



Figura 12: Superficies de estratificación horizontales de gran continuidad

Fuente: Gonzales de Vallejo, 2002

El desarrollo de juntas contesta a tres procesos geológicos.

- Deformación, resultado de procesos orogénicos
- Deformación, resultado de procesos epirogénicos (edificación y descenso)
- Contracción, resultado del enfriamiento o disecación.

#### 2.2.5.3 Herramientas de modelado estructural

##### Modelado sólido

Al igual que el modelo geológico, el primer paso es juntar la cartografía de campo y los datos estructurales del núcleo de perforación en un plan geológico del tajo. El plan se incorpora a un modelo geológico sólido en 3D utilizando uno de los sistemas de modelización mencionados anteriormente. La presentación estereográfica traslada una dimensión por lo cual se considera que las líneas o puntos puedan representar planos.

La presentación estereográfica consiste en una esfera de referencia donde el plano ecuatorial es horizontal y su orientación es fija con relación con el norte.

Para la estabilidad de taludes normalmente se utiliza preferentemente el hemisferio inferior de la esfera para la proyección estereográfica, en cambio el hemisferio norte apenas se toca.

La dirección de buzamiento y buzamiento es el inicio para dibujar el plano, para lo cual se utiliza la falsilla en donde el plano ecuatorial es horizontal y su orientación sea fija con relación al norte. La intersección de la forma con la mitad inferior de la esfera define una línea única sobre la superficie del hemisferio de referencia. Para el plano, la intersección con la esfera de referencia es un arco circular llamada círculo mayor (ver Figura 13).

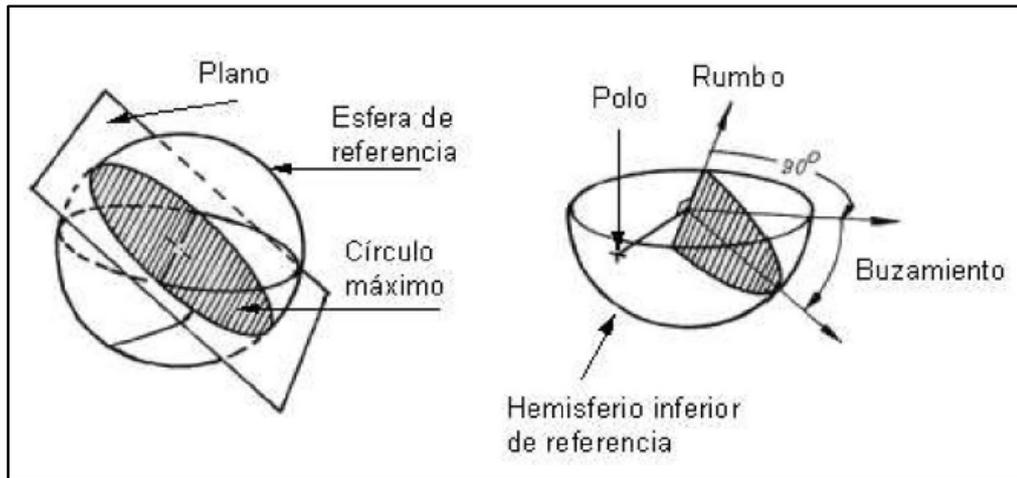


Figura 13: Representación de un plano en proyección estereográfica

Fuente: Ramírez y Alejano, 2004

El plano queda representado por el círculo máximo de la esfera proyectada, definida por la intersección del plano y la esfera, logrando pasar el plano por el centro de la esfera.

#### 2.2.5.4 Definición de dominio estructural

##### Pautas generales

La información contenida en el modelo estructural se utiliza para subdividir las rocas de la mina en un número selecto de dominios estructurales, cada uno de ellos con límites distintos y caracterizados internamente por un tejido estructural reconocible que lo diferencia claramente de sus vecinos.

Todas las características descritas en las secciones anteriores deben utilizarse para ayudar a definir cada dominio. Estos incluyen:

- Contactos a escala de mina que marcan cambios en la geología, incluyendo cambios en la litología (por ejemplo, entre rocas ígneas y subvolcánicas intrusivas y rocas sedimentarias intrusivas), cambios en los perfiles meteorológicos y cambios en los estilos de alteración
- Fallas a escala de mina que pueden dividir las rocas en la mina en diferentes bloques estructurales

- Estructuras plegadas a escala de mina, con especial énfasis en los cambios en la orientación de los pliegues
- Estructuras metamórficas a escala de mina, también con énfasis en los cambios en la orientación de las estructuras
- Fallas de banco e interrampa, pliegues y estructuras metamórficas
- Juntas a escala de banco, fisuras y microestructuras como pliegues parasitarios o de segundo orden formados en las extremidades de cualquier interrampa o pliegue a escala de mina.

Todas estas características deberían haber sido identificadas a partir del mapeo y la perforación de afloramientos, y almacenadas en la base de datos estructural 3D.

#### 2.2.6 Modelo de macizo rocoso

El tercer componente, que ahora debe ser abordado, es el modelo del macizo rocoso. El propósito de este modelo es obtener una base de datos de las propiedades de ingeniería del macizo rocoso para usarlo en los análisis de estabilidad que se utilizarán para preparar los diseños de taludes en cada etapa del desarrollo del proyecto.

Esto incluye las propiedades de las piezas intactas de roca que constituyen el macizo rocoso que mecánicamente son medios anisotrópicos, discontinuos y heterogéneos.

**Anisotropía:** La presencia de planos de debilidades en orientaciones preferentes (laminación, estratificación, familias de diaclasas tectónicas) involucra diferentes propiedades y comportamientos mecánicos en función a la dirección considerada.

**Discontinuidad:** La presencia de discontinuidades (juntas, fallas, diques, superficies de estratificación, etc.) quiebra la continuidad de las propiedades mecánicas del bloque rocoso, otorgando al macizo un comportamiento geomecánico e hidráulico discontinuo, posicionado por la naturaleza, frecuencia y orientación de los planos de discontinuidad.

**Heterogeneidad:** Las zonas con variantes litologías, meteorización o grado de alteración, contenido en agua, representan propiedades muy diferentes.

### 2.2.6.1 Clasificación del macizo rocoso (RMR)

El objetivo de la geomecánica es la caracterización y valoración de las propiedades del macizo rocoso, el empleo de sistemas de clasificación geomecánica para la evaluación y prognosis preliminar de la calidad del macizo rocoso serán de utilidad para el diseño y ejecución de proyectos, en el transcurso de los años se han desarrollado diversos sistemas de clasificación geomecánica:

#### 2.2.6.1.1 RMR de Bieniawski

- Clasificaciones de parámetros

El valor de RMR determina la calidad geotécnica del macizo rocoso en una escala que va de cero a 100 y considera las 5 clases presentadas en la Tabla 5. Los parámetros y clasificaciones utilizados para determinar la calidad geotécnica del macizo rocoso se muestran en la Tabla 6. Los cambios para el RQD (Designación de calidad de roca), el espaciamiento de las juntas y la clasificación de las condiciones de las juntas se muestran en la Tabla 6.

Tabla 5: *RMR calibrado contra la calidad del macizo rocoso*

<b>RMR</b>	<b>Descripción</b>
81–100	Muy buena roca
61–80	Buena roca
41–60	Roca justa
40–21	Roca pobre
<21	Roca muy pobre

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

Tabla 6: *Calificaciones de parámetros de RMR de Bieniawski, 1976 y 1979*

<b>Parámetro</b>	<b>Clasificación (1976)</b>	<b>Clasificación (1979)</b>
UCS	0–15	0–15
RQD (núcleo de perforación)	3–20	0–20
Distancia entre juntas	5–30	5–20
Condición de la junta	0–25	0–30
Agua subterránea	0–10	0–15
RMR básico	8–100	8–100
Ajuste de orientación conjunta	0–60	0–60

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

- Consideraciones prácticas

Independientemente de la versión que se elija, al utilizar el sistema Bieniawski en aplicaciones de diseño de taludes de tajo abierto se deben tener en cuenta una serie de consideraciones prácticas.

1. Parámetro de aguas subterráneas: se debe suponer que el macizo rocoso está completamente seca y que la clasificación de las aguas subterráneas es de 10 (1976) o 15 (1979). Cualquier presión de poro en el macizo rocoso debe tenerse en cuenta en el análisis de estabilidad.
2. Ajuste de la orientación de las juntas: se debe suponer que las orientaciones de las juntas son muy favorables y que el factor de ajuste se fija en cero. El efecto de las juntas y otros defectos estructurales debe tenerse en cuenta en la evaluación de la resistencia del macizo rocoso (por ejemplo, si se utiliza el criterio de resistencia Hoek-Brown y/o en los análisis de estabilidad.

3. Parámetro RQD: El RQD mide la longitud total de las piezas sólidas de núcleos frescos, (ver tabla 7 y 8) ligeramente y moderadamente erosionado de más de 100 mm con respecto a la longitud total del recorrido del núcleo indicado, expresada en porcentaje.

Tabla 7: *Calificaciones de parámetros RQD de Bieniawski 1979*

<b>Calidad de la masa rocosa</b>	<b>RQD (%)</b>	<b>Clasificación</b>
MUY MALA calidad geotécnica	<25	3
MALA calidad geotécnica	25-50	8
JUSTA calidad geotécnica	50-75	13
BUENA calidad geotécnica	75-90	17
EXCELENTE calidad geotécnica	90-100	20

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

Tabla 8: *Calificaciones de los parámetros de espaciamiento de juntas de Bieniawski*

<b>Descripción cualitativa de la separación</b>	<b>s (mm)</b>	<b>Clasificación</b>
Muy Cerca a Extremadamente Cerrado	<60	5
Cerrado	60-200	8
Moderado	200-600	10
Amplio	600-2000	15
Muy Amplio A Extremadamente Amplio	>2000	20

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

Bieniawski (1989), sugirió que, si no se dispone de datos de RQD o de espaciamiento entre las juntas, el gráfico que se muestra en la Figura 14 podría utilizarse para estimar el parámetro que falta. Dado el sesgo que puede imponerse a los valores

RQD por la orientación de un pozo o de una línea de exploración con respecto a la orientación de la junta, este procedimiento debe utilizarse con precaución.

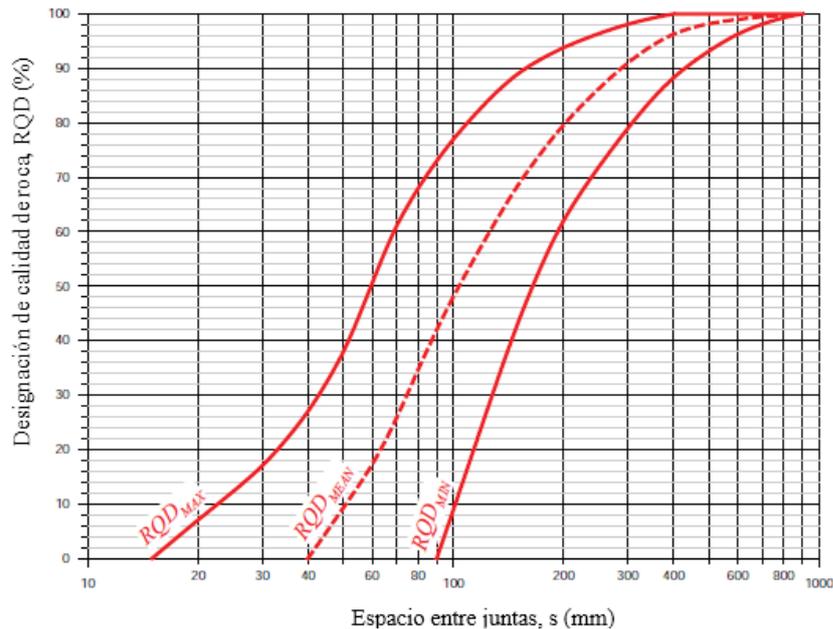


Figura 14: Correlación de Bieniawski entre el RQD y el espaciado de las juntas

Fuente: Bieniawski, 1979

#### 2.2.6.1.2 Laubscher RMR y MRMR

El sistema de clasificación del macizo rocoso in situ (IRMR) y el sistema de clasificación del macizo roco minero (MRMR) de Laubscher fueron introducidos por Laubscher como una extensión del sistema RMR de Bieniawski para aplicaciones mineras. El IRMR, llamado así para distinguirlo del sistema RMR de Bieniawski, considera cuatro parámetros básicos:

- 1) La resistencia a la compresión intacta (IRS), definida como la resistencia a la compresión no confinada (UCS) de la muestra de roca que puede ser analizada directamente
- 2) La fuerza de la roca (RBS), definida como la fuerza de los bloques de roca contenidos en el macizo rocoso

- 3) El bloqueo del macizo rocoso, que se controla mediante el número de conjuntos de juntas y sus espaciamientos (JS)
- 4) La condición de la junta, definida en términos de una descripción geotécnica de las juntas contenidas en el macizo rocoso (JC).

- Resistencia a la roca intacta

Si la muestra de roca intacta es homogénea, se considera que el valor del IRS (resistencia de la roca intacta) es igual al valor UCS (resistencia a la compresión uniaxial). Si la muestra es heterogénea, y contiene zonas de roca más débiles debido a defectos internos como microfracturas, foliación o clastos minerales más débiles, entonces se determina un valor equivalente considerando la fuerza de ambos tipos de roca y sus porcentajes en la muestra, usando el gráfico que se muestra en la Figura 15.

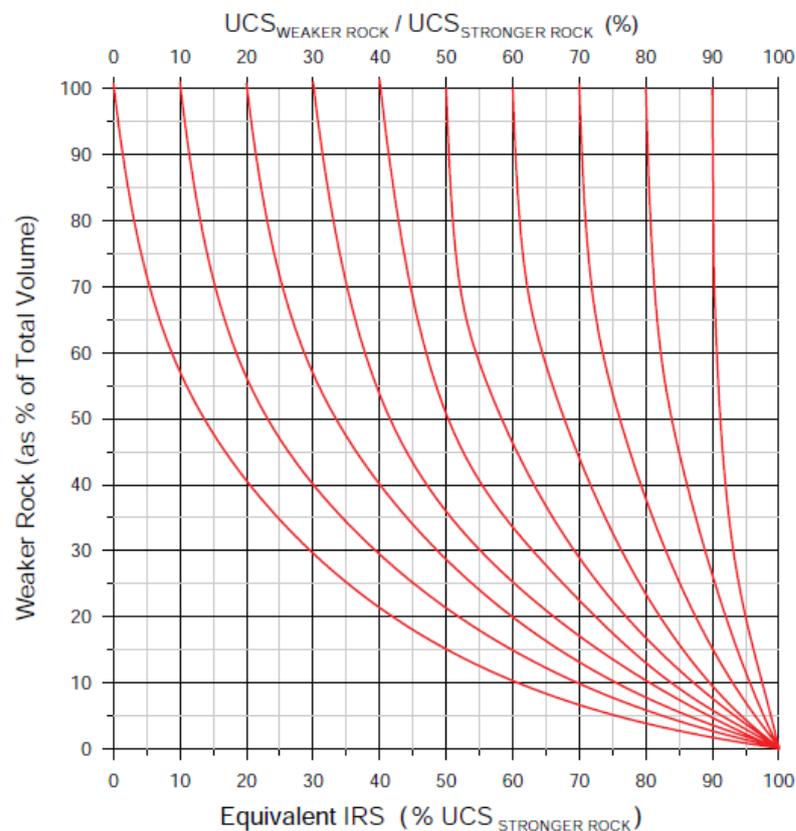


Figura 15: Evaluación de un valor equivalente del IRS

Fuente: Laubscher DH & Jakubec J, 2001

- Resistencia a la compresión uniaxial

La compresión de la muestra cubica de roca llevada desde un núcleo de perforación es probablemente el test más extenso realizado sobre roca. Este es usado para saber la resistencia compresiva uniaxial (UCS), Modulo de Young y el coeficiente de Poisson.

La resistencia a la compresión uniaxial se representa como:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} + \frac{4P}{\pi D^2} \dots\dots\dots\text{Ecuación 1}$$

Donde:

P: es la carga que causa la falla de la muestra cubica de roca

D: es el diámetro del espécimen

A: es el área de sección transversal, las correcciones para tener en cuenta en el área de la sección transversal son por lo general insignificantes si se produce una ruptura antes de que se alcance el 2- 3% de la tensión.

La Norma ASTM D2938-95 servirá para los ensayos para determinar la resistencia a la compresión uniaxial y el modulo elástico de especímenes de roca, la forma aproximada para la muestra son cubos de 20\*20\*20 cm o algo mayor a estas dimensiones.

### 2.2.6.1.3 GSI de Hoek

El cambio de Hook en 1992 es fundamental, ya que vio el uso de RMR discontinuado y la masa rocosa caracterizada en términos de:

- Las formas de los bloques y el grado de interbloqueo
- El estado de la superficie de los defectos de intersección.

La razón principal para pasar del RMR al nuevo sistema de clasificación fue que se consideró que era un vehículo más adecuado para relacionar el criterio de falla Hoek-

Brown con las observaciones geológicas en el campo (Hoek E, Carranza-Torres C & Corkum B, 2002). También se pretendía superar un doble conteo efectivo de la resistencia a la compresión uniaxial de los pedazos de roca intactos, que se incluyó tanto en el proceso de clasificación RMR como en los cálculos de resistencia Hoek-Brown.

El nombre "índice de resistencia geológica", GSI se utilizó para destacar la importancia de las observaciones geológicas fundamentales evaluando la calidad del macizo rocoso en función de las características de la fracturación y del grado, estructura geológica, tamaño de los bloques y la alteración de las discontinuidades (ver Tabla 9 y 10)

Tabla 9: Características del macizo rocoso según GSI

<p><b>CARACTERIZACION DEL MACIZO ROCOSO PARA ESTIMAR SU RESISTENCIA</b></p> <p>Basándose en el aspecto de la roca a elegir la categoría que mejor describa las condiciones del macizo previas a la excavación. Tener en cuenta que las voladuras pueden crear una impresión falsa sobre la calidad del macizo rocoso, en cuyo caso será necesario realizar algún tipo de ajuste por daños debidos a voladuras; la observación de testigos de sondeos y de frentes de roca en zonas afectadas y no afectadas por voladuras puede ser de ayuda. Para definir el grado de fracturación (<i>blockiness</i>) debe considerarse la relación entre el tamaño del bloque y la dimensión del frente de excavación.</p>		<p><b>CONDICION DEL FRENTE</b></p>				
<p><b>ESTRUCTURA</b></p>		<p><b>MUY BUENA (MB)</b> Superficies muy rugosas, superficies frescas sin alterar</p>	<p><b>BUENA (B)</b> Superficies rugosas ligeramente resistentes y ligeramente alteradas, náminas de oxidación</p>	<p><b>MEDIA (M)</b> Superficies suaves moderadamente resistentes y superficies alteradas</p>	<p><b>POBRE (P)</b> Superficie de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos angulosos</p>	<p><b>MUY POBRE (MP)</b> Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos</p>
	<p><b>BLOQUES REGULARES (BR)</b> Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno</p>	BR/MB	BR/B	BR/M	BR/P	BR/MP
	<p><b>BLOQUES IRREGULARES (BI)</b> Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos</p>	BI/MB	BI/B	BI/M	BI/P	BI/MP
	<p><b>BLOQUES Y CAPAS (BC)</b> Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos</p>	BC/MB	BC/B	BC/M	BC/P	BC/MP
	<p><b>FRACTURACION INTENSA (FI)</b> Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.</p>	FI/MB	FI/B	FI/M	FI/P	FI/MP

Fuente: Marinos P & Hoek E, 2001

Tabla 10: Valores del GSI

GSI		CONDICION DEL FRENTE							
		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas, superficies frescas sin alterar	BUENA (B) Superficies rugosas ligeramente resistentes y ligeramente alteradas, náminas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente resistentes y superficies alteradas	POBRE (P) Superficie de cizalla muy alteradas con rellenos compactos conteniendo fragmentos angulosos	MUY POBRE (MP) Superficies de cizalla muy alteradas con rellenos arcillosos			
ESTRUCTURA		80	70	60	50	40	30	20	10
	<b>BLOQUES REGULARES (BR)</b> Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno								
	<b>BLOQUES IRREGULARES (BI)</b> Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos								
	<b>BLOQUES Y CAPAS (BC)</b> Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos								
	<b>FRACTURACION INTENSA (FI)</b> Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.								

Fuente: Marinos y Hoek (2000)

#### 2.2.6.4 Resistencia del macizo rocoso

La resistencia del macizo rocoso está en función de la matriz rocosa y de sus discontinuidades, siendo estas muy variables, y de las condiciones geoambientales en los que se encuentra sometida el macizo rocoso, por las tensiones naturales y las condiciones hidrogeológicas.

##### 2.2.6.4.1 Criterio de resistencia de Hoek-Brown

El criterio de resistencia Hoek-Brown se publicó por primera vez en 1980 en la forma:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left( m * \sigma'_3 / \sigma_c + s \right)^{1/2} \quad \text{.....Ecuación 2}$$

$\sigma'_1$  = esfuerzo principal mayor efectiva en la falla

$\sigma'_3$  = esfuerzo principal menor efectiva en la falla

$\sigma_c$  = Resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta

$m_b$  = Valor reducido de la constante del material  $m_i$

$s$  = constante de material adimensional del macizo rocoso.

En 1992 se modificó el criterio para eliminar la resistencia a la tracción prevista por el criterio original:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \left( m_b * \sigma'_3 / \sigma_c \right)^a \quad \text{.....Ecuación 3}$$

La tercera y última modificación se realizó en 2002 (Hoek et al. 2002), cuando se reajustaron los valores de  $m_b$ ,  $a$  y  $s$ :

$$m_b = m_i e^{\left( \frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right)} \quad \text{.....Ecuación 4}$$

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

.....Ecuación 5

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

.....Ecuación 6

D, representa el grado de alteración al que ha sido sometido el macizo rocoso por el daño por las voladuras o la relajación de la esfuerzos, oscilando entre D = 0 para roca no alterada y D = 1 para rocos muy alteradas (ver Tabla 11).

Tabla 11: *Pautas para estimar el factor de alteración, D*

APARIENCIA DEL MACIZO ROCOSO	DESCRIPCION DEL MACIZO ROCOSO	VALOR SUGERIDO DE D
	Excelente calidad por voladura controlada o excavación con tuneladora, TBM, resultando en la perturbación mínima del macizo alrededor del túnel	D=0
	Excavación mecánica o manual en macizo de mala calidad (sin voladura) resultando en la mínima perturbación en el macizo rocoso circundante  Cuando se presentan problemas de fluencia con significantes movimientos en el piso, la perturbación puede ser severa a menos que una solera temporal o contrabóveda se instalada, como muestra la fotografía.	D=0  D=5 sin solera
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roa competente con daños locales severos, extendiéndose 2-3m en el macizo circundante.	D=0,8
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños en el macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como se muestra en el lado izquierdo de la fotografía	D=0,7 ; buena voladura. D=1 pobre voladura
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento.  En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cavo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afección a los taludes será menor	D=1; voladura de producción  D=0,7; excavación mecánica.

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

### 2.2.7 Modelo hidrogeológico

La presencia de aguas subterráneas puede afectar las excavaciones de minas a cielo abierto de dos maneras.

1. Puede cambiar los esfuerzos efectivos y las presiones de poros resultantes ejercidas sobre la masa rocosa en la que se han excavado el talud del tajo. El aumento de la presión de los poros reducirá la resistencia al corte del macizo rocoso, aumentando la probabilidad de fallas en los taludes y podría dar lugar a un aplanamiento de ellos u otras medidas correctivas para compensar la menor resistencia global del macizo rocoso.
2. Puede crear condiciones saturadas y conducir el agua estancada dentro de los espacios que pueden ocasionar:
  - Pérdida de acceso a la totalidad o a partes de la zona de explotación de la mina
  - Mayor uso de explosivos, o el uso de explosivos especiales y mayores fallas explosivas debido a los agujeros de explosión húmedos
  - Mayor desgaste del equipo y carga ineficiente
  - Mayor daño a los neumáticos y transporte ineficiente
  - Condiciones de trabajo inseguras.

La presencia de aguas subterráneas puede tener un efecto determinístico sobre la estabilidad del talud. Las presiones de poros actúan dentro de las discontinuidades y los espacios en el macizo rocoso reducen la resistencia al corte, y ambos pueden afectar al diseño y rendimiento de los taludes para tajo abierto.

## 2.2.7.1 Porosidad y presión de los poros

### 2.2.7.1.1 Porosidad

Dentro de la mayoría de las formaciones porosas saturadas como arenisca, limo o esquisto, y dentro de los sedimentos clásicos no consolidados como arena, limo y arcilla, la mayor parte del agua subterránea está contenida dentro de los espacios porosos intersticiales primarios. La roca dura que es erosionada o alterada también puede exhibir espacios intersticiales entre granos, particularmente dentro de zonas de alteración de la arcilla o meteorización de la arcilla.

Sin embargo, especialmente en el caso de los materiales arcillosos, la porosidad drenable suele representar sólo una pequeña proporción de la porosidad total. Gran parte del agua subterránea puede estar retenida en su lugar por el esfuerzo superficial y puede que no drene libremente bajo la gravedad (ver Figura 16).

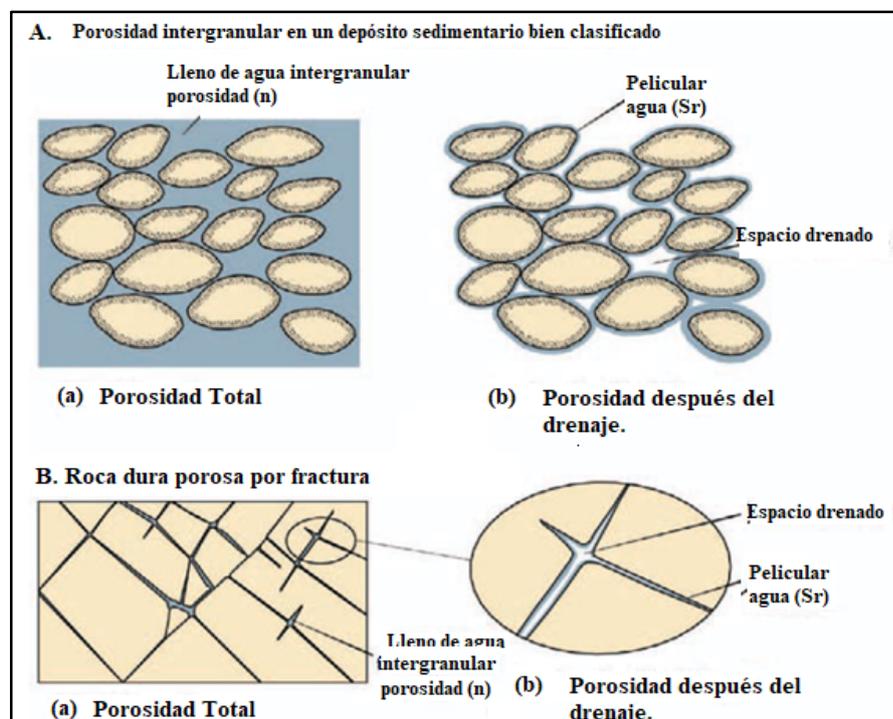


Figura 16: Ilustración de la porosidad

Fuente: Karzulovic, 2006

La relación entre la resistencia de corte de una roca o masa de suelo y la presión de los poros se expresa en la ley de falla de Mohr-Coulomb en combinación con el concepto de esfuerzo efectivo desarrollado por Terzaghi:

$$\tau = (\sigma_n - u) \tan \phi + c$$

.....Ecuación 7

donde:

$\tau$  = resistencia de corte en una superficie de falla potencial

$u$  = presión de fluido (o presión de poros)

$\sigma_n$  = esfuerzo normal total que actúa perpendicular a la superficie de falla potencial

$\phi$  = ángulo de fricción interna

$c$  = cohesión disponible a lo largo de la superficie potencial de falla.

#### 2.2.7.1.2 Presión del poro en el talud del tajo

La presión del poro ( $u$ ) se define como la presión del agua subterránea que ocurre dentro de los espacios porosos de la roca o el suelo. La presión de poros puede ocurrir en los espacios intersticiales entre granos (estratos porosos) o en fracturas abiertas y conjuntos de juntas (roca competente). La presión del poro es 0 en el nivel freático, positiva por debajo del nivel freático y negativa por encima del nivel freático.

La presión de poros es un parámetro integral para cualquier evaluación de ingeniería de taludes de rocas. Ejerce los siguientes controles geotécnicos:

- Cambia el esfuerzo efectivo del macizo rocoso dentro del talud
- Puede causar un cambio en el volumen del material del talud
- Puede causar un cambio en la carga hidrostática.

### **Objetivo de drenar:**

- Impedir que el agua se inserte al cuerpo del talud, interceptandola por medio de zanjas, cunetas o pantallas
- Disminuir el flujo en el talud, evacuandola por medio de sondeos, sondeos, pozos o galerias.

### 2.2.8 Construcción del modelo geotécnico

Este modelo refiere a la síntesis de la información recabada en las secciones anteriores. Se describen a continuación los procedimientos estándar para vincular cada componente y construir el modelo geotécnico. Se analizan diferentes enfoques sobre como procesar y preparar los datos que contienen en el modelo para su participación en el análisis de diseño.

Este modelo tiene como objetivo, resaltar y proporcionar orientación sobre los problemas de diseño de talud, para lo que frecuentemente se solicita ser aclarada, incluyendo la escala, los méritos de diferentes sistemas de clasificación del macizo rocoso y los problemas asociados con la derivación y aplicación del criterio de rotura de Hoek Brown generalizado para diseño de taludes y consideraciones de presión de poros.

El conjunto de información de estos componentes del modelo debe proporcionar los siguientes valores de diseño que representa cada dominio geotécnico y sector del diseño.

- Tipo(s) de material, incluidas los variantes de alteración (tipo y/o grado)
- Orientación, distribución espacial y valores de resistencia al corte de las estructuras mayores, incluidas la resistencia al corte de la falla individual, planos de estratificación y cualquier estructura laminada asociada con rocas metamórficas como esquistos por ser continuos a lo largo del rumbo y buzamiento.
- Valores de resistencia del macizo rocoso, incluidas la carga puntual ( $I_{s50}$ )
- Valores de módulos elásticos para el macizo rocoso en cada dominio, para su uso en los análisis numéricos de estabilidad de taludes.

- Datos de presión de agua de poros derivados del modelo hidrogeológico subterráneo a escala regional

### 2.2.8.1 Desarrollo de modelos

La construcción del modelo geotécnico es un proceso en evolución a través de los diferentes niveles de desarrollo de una mina a cielo abierto. En muchos proyectos, sólo se dispondría de datos suficientes para elaborar un modelo detallado en las fases de factibilidad o construcción.

### 2.2.8.2 Construcción del modelo

Se esquematiza en la Figura 17 la información requerida para la construcción del modelo geotécnico.

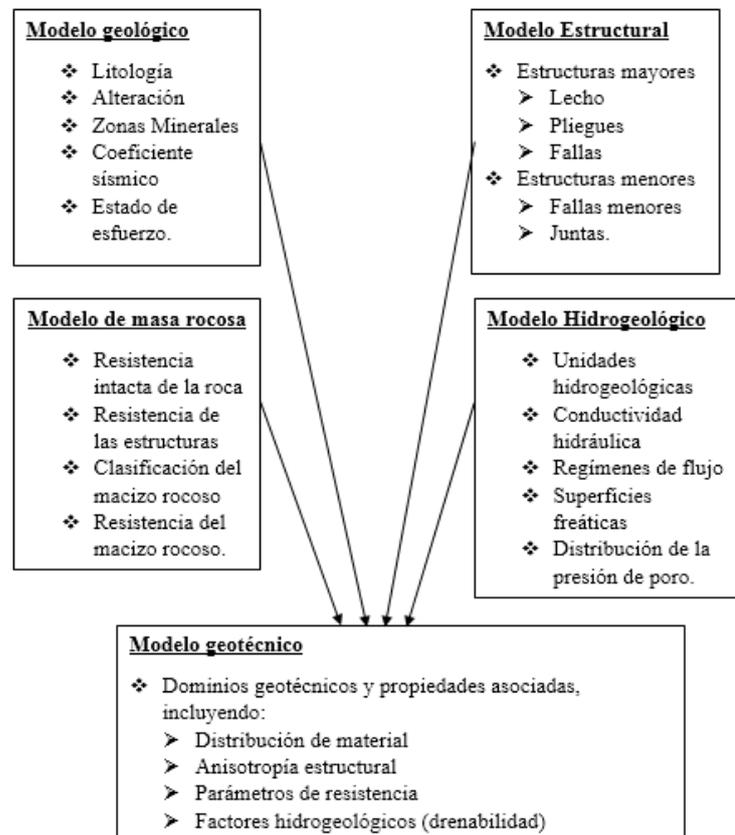


Figura 17: Información de los componentes y resultados del modelo geotécnico

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

### 2.2.8.3 Aplicación del modelo geotécnico

La construcción de un modelo geotécnico es un asunto, pero aplicar la información que contiene al diseño del talud es otra, y siempre hay preguntas. Las preguntas más frecuentes se refieren invariablemente a:

- La escala o relación entre el tamaño que se analiza y la resistencia del macizo rocoso y sus defectos.
- Qué sistema de clasificación del macizo rocoso se debe usar y por qué.
- Cómo se debe utilizar el criterio de falla de Hoek-Brown generalizado en los diseños de talud de tajo abierto.

### 2.2.8.4 Efectos de escala

La cuestión del tamaño debe abordarse al evaluar la resistencia al corte de los defectos que atraviesan el macizo rocoso y la resistencia al corte del macizo rocoso en sí.

Las resistencias del macizo rocoso determinadas por medios convencionales se apoyan en una serie de pruebas de laboratorio a pequeña escala y se combinan con mediciones de campo a media escala y estimaciones puntuales. Por lo tanto, los posibles efectos de escala siempre deben tenerse en cuenta al decidir qué tan apropiado puede ser usar un valor para determinar la resistencia a gran escala.

### 2.2.8.5 Macizo Rocosó

Los términos roca intacta, macizo rocoso y efectos de escala son usados ampliamente en ingeniería de taludes de rocas para describir el hecho de que las propiedades mecánicas se miden mediante pruebas de laboratorio de especímenes de rocas pequeñas, y estas propiedades deben darse a escala de campo para poder incluir el efecto de defectos tales como juntas y otras estructuras geológicas contenidas en el macizo rocoso. La sabiduría estándar de que el diámetro de la muestra debe ser al menos 10 veces el tamaño del grano más grande, la situación se vuelve un poco irreal. Esto se ilustra en la Figura 18, donde

se observa una muestra de núcleo estándar de 50 mm de diámetro con micro defectos en comparación con un macizo rocoso articulado en bloque a escala de banco.

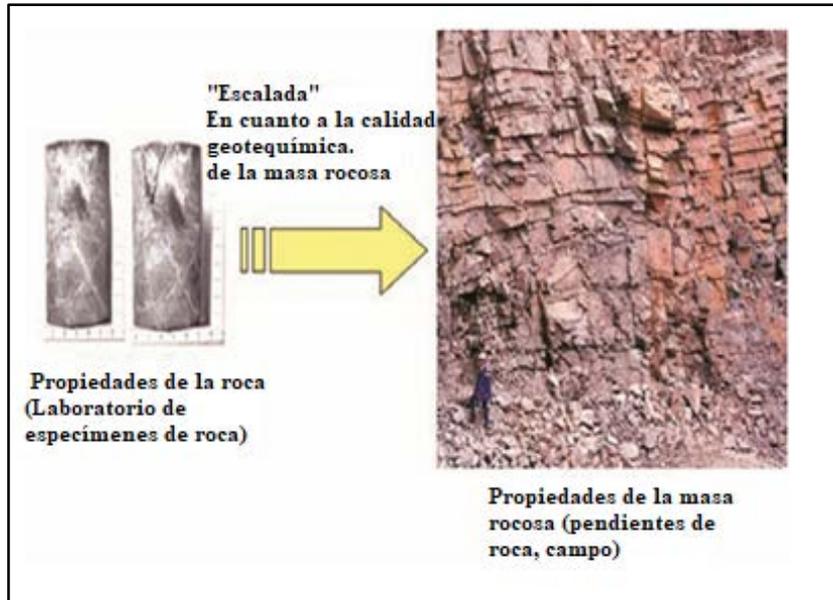


Figura 18: Muestra en comparación con la situación a escala de campo

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

Por lo tanto, la obstrucción de la masa de roca depende del tamaño relativo de sus bloques en comparación con el tamaño del talud que se analiza. El mismo macizo rocoso podría comportarse como muy bloqueado para un talud general, bloqueado para una escala de inter-rampa y casi masiva en escala de banco (Figura 19)

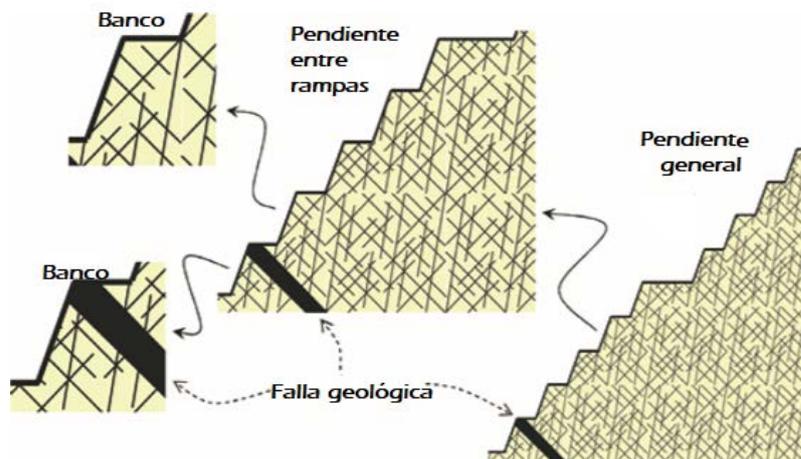


Figura 19: El bloqueo del macizo rocoso depende del volumen considerado

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

Hasta ahora, cuando se considera el diseño del talud del tajo, la solución aceptada generalmente es considerar las juntas explícitamente como estructuras discontinuas para el análisis de escalas en banco y entre rampas y como parte del tejido del macizo rocoso en la escala de talud general. El profesional decide su aplicabilidad de acuerdo con la escala percibida y el grado de anisotropía del macizo rocoso, según los criterios representados en el conocido diagrama de Hoek-Brown (ver Figura 20).

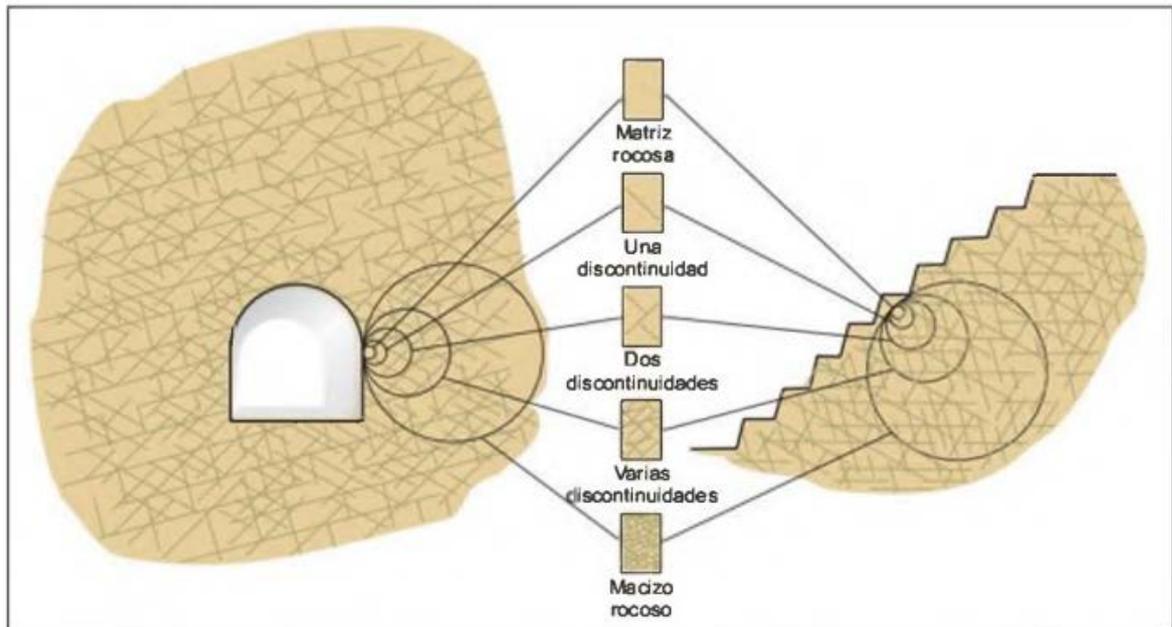


Figura 20: Transición entre la matriz rocosa y el macizo rocoso fracturado

Fuente: Hoek & Brown (1997)

#### 2.2.8.6 Criterio de resistencia del macizo rocoso Hoek-Brown

Al utilizar el criterio de Hoek-Brown, debemos comprender sus orígenes y que es una relación empírica, no constitutiva, para una masa de roca ostensiblemente homogénea e isotrópica. Deben tener en cuenta los orígenes de los valores que están utilizando. Dos elementos son particularmente importantes a este respecto.

1. Debemos verificar la veracidad de los valores  $\sigma_c$ ,  $m_i$  y GSI que están utilizando.

Las preguntas que deben hacerse son:

- Si los valores  $\sigma_c$  representan adecuadamente la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta.
  - Si los valores de  $m_i$  se obtuvieron de pruebas triaxiales de laboratorio en muestras de roca intacta o si fueron valores indicativos extraídos de tablas complementarias
  - Si los valores GSI / MRMR se derivaron de mapeo de campo o registros de perforación, o una combinación de ambos.
2. La influencia del parámetro puede ser grande y su aplicación requiere experiencia y juicio. El mayor valor de D ( $D = 1$ ) reduce efectivamente la cohesión de la masa de roca en un factor de 2, que es una reducción (o castigo) particularmente severa de la fuerza de la masa de roca.

### 2.2.9 Incertidumbre de datos

Determinar y reportar las incertidumbres en cada componente del modelo geotécnico requiere un entendimiento de las causas de la incertidumbre de los datos y su impacto potencial en la confiabilidad de los taludes del tajo, cómo se cuantifica y cómo se reporta a la gerencia corporativa de la mina y a la comunidad de inversiones.

#### 2.2.9.1 Causas de la incertidumbre de los datos

Los tipos relevantes de incertidumbre se pueden clasificar en tres grupos: incertidumbre geológica, incertidumbre de los parámetros e incertidumbre de los modelos.

1. La incertidumbre geológica, abarca la imprevisibilidad asociada a la identificación, geometría y relaciones entre las diferentes litologías y estructuras que constituyen los modelos geológicos y estructurales. Abarca, por ejemplo, las

incertidumbres derivadas de características tales como límites litológicos mal delimitados y fallas importantes, así como condiciones geológicas imprevistas.

2. La incertidumbre de los parámetros, representa la imprevisibilidad de los parámetros utilizados para explicar los diversos atributos del modelo geotécnico. Típicamente, incluye incertidumbres asociadas con los valores adoptados para el macizo rocoso y parámetros del modelo hidrogeológico tales como el ángulo de fricción, la cohesión, los módulos de deformación y las presiones de los poros.
3. La incertidumbre del modelo, explica la imprevisibilidad que rodea el proceso de selección y los diferentes tipos de análisis utilizados para formular el diseño del talud y estimar la confiabilidad de las paredes del tajo. Los ejemplos incluyen los diversos métodos bidimensionales de análisis de estabilidad de equilibrio límite y los análisis tridimensionales de esfuerzo y desplazamiento más recientemente desarrollados que ahora se utilizan en el diseño de taludes de tajos. Existe incertidumbre sobre el modelo si existe la posibilidad de obtener un resultado incorrecto, incluso si se dispone de valores exactos para todos los parámetros del modelo.

#### 2.2.9.2 Impacto de la incertidumbre de los datos

La incertidumbre geológica y de los parámetros conduce directamente a la falta de fiabilidad y al posible mal funcionamiento de los taludes del tajo. Una revisión internacional de los proyectos mineros de bajo rendimiento (IPA Inc. 2006) ha demostrado que los cuatro los factores clave del bajo rendimiento son:

1. Malinterpretación de la variabilidad de grado
2. Pruebas metalúrgicas inadecuadas y mala caracterización del mineral/residuos;
3. Perforación inadecuada para definir el yacimiento y la sobrecarga para apoyar la interpretación de la estructura geológica, y para apoyar la interpretación geotécnica y geohidrológica
4. Perforación inadecuada para apoyar la planificación detallada de la mina, el control de grado y la programación.

Con demasiada frecuencia, las decisiones de inversión a nivel operativo se han tomado utilizando datos geotécnicos que son más apropiados para un nivel de investigación conceptual o de pre-factibilidad.

## 2.2.10 Criterios de aceptación

En la tabla 12 se resume los valores de FS y PF que se utilizan típicamente como criterios de aceptación en la industria minera.

Tabla 12: *Valores típicos de los criterios de aceptación de FS y PF*

Escala de talud	Consecuencias de falla <sup>b</sup>	Criterios de Aceptación <sup>a</sup>		
		FoS (min) (estático)	FoS (min) (dinámico)	PoF (máx.) P[FoS≤1]
Banco	Bajo-alto	1.1	NA	25-50%
Interrampa	Bajo	1.15-1.2	1	25%
	Medio	1.2	1	20%
	Alto	1.2-1.3	1.1	10%
Global	Bajo	1.2-1.3	1	15-20%
	Medio	1.3	1.05	5-10%
	Alto	1.3-1.5	1.1	≤5%

a: Necesita cumplir con todos los criterios de aceptación

b: Evaluado semicuantitativamente(ver figura 5)

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

Las medidas de las consecuencias bajas, medias y altas de los fallos se basan en los procedimientos genéricos utilizados para desarrollar la matriz de riesgo semicuantitativa ilustrada en la Figura 21.

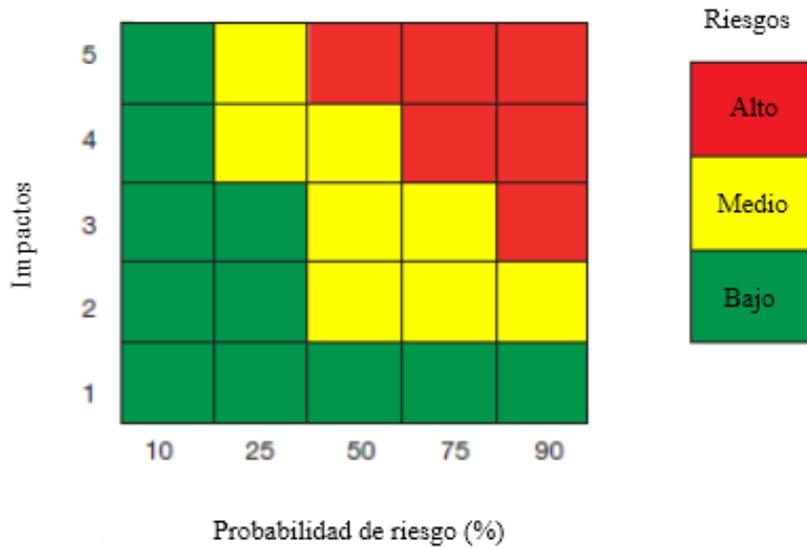


Figura 21: Matriz de riesgos semicuantitativa

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

### 2.2.10.1 Modelo de riesgo

En el diseño de taludes, los riesgos (R) asociados al fallo de talud se definen y cuantifican como:

$$R = PF * (\text{consecuencias del falla}) \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 8}$$

En términos generales, las consecuencias del falla del talud se pueden clasificar en las siguientes seis formas.

1. Muertes o lesiones sufridas por el personal, incluidos los costos de las acciones laborales y judiciales.
2. Daños a equipos e infraestructuras, incluidos los costos de sustitución de equipos e infraestructuras.
3. Repercusiones económicas en la producción, incluidas los costos de:

- La eliminación de materiales rocosos dañados en la medida en que la minería pueda continuar de forma segura;
  - La rehabilitación de taludes puede tener que reducirse para evitar fallos secundarios debidos a pendientes superiores más pronunciadas, o pueden ser necesarios sistemas de apoyo de taludes;
  - Reparación de la carretera de transporte y acceso de nuevo a la carretera de transporte y la rampa pueden sufrir daños y puede ser necesario considerar la posibilidad de volver a acceder a la mina
  - El costo del equipo aislado por el fallo y el costo del traslado del equipo a otras partes de la mina que no se vean afectadas por el fallo, donde pueda utilizarse productivamente
  - Mineral irrecuperable « la pérdida de una rampa o parte de una pendiente entre rampas puede dar lugar a la esterilización de secciones del yacimiento, al menos con carácter temporal.
4. Fuerza mayor (un importante impacto económico), que normalmente equivaldría a un fallo de un talud global o a la pérdida de acceso a medio y largo plazo al mineral, de manera que los contratos no puedan cumplirse.
  5. Acción industrial, es decir, pérdida de confianza de los trabajadores.
  6. Relaciones públicas, como la resistencia de las partes interesadas debido a opiniones sociales y/o impactos ambientales derivados del fracaso. Mayor supervisión de la reglamentación.

Tradicionalmente, las consecuencias de la falla del talud se han tenido en cuenta mediante análisis de costos y beneficios. Durante la última década, se ha propuesto un proceso de modelo de riesgo como medio de proporcionar la gama de consecuencias reales de posibles fallos para dar a la dirección la oportunidad y la responsabilidad de definir el riesgo apropiado para su negocio minero.

### 2.2.10.2 Proceso del modelo de riesgo

El objetivo del modelo de riesgo es proporcionar una base para la decisión de manejo mediante:

- Definir los riesgos en términos de seguridad y economía
- Cuantificar los niveles de riesgo para diferentes configuraciones de pendiente
- Cuantificar el valor añadido económico para aumentar los niveles de riesgo.

El modelo sugiere que la estabilidad no es el objetivo final, sino que la seguridad no debe verse comprometida, ya que se optimiza el impacto económico de los ángulos de pendiente elegidos. Un corolario de este objetivo es que los fallos del talud son aceptables a condición de que puedan gestionarse de forma segura sin comprometer el plan de negocio.

### 2.2.10.3 Análisis de costo-beneficio

Los análisis de costos y beneficios que comparan los efectos financieros de las fallas de talud u otras modificaciones del diseño del talud de base han sido durante mucho tiempo un requisito esencial del ciclo de planificación de la mina. Por lo general, el análisis calcula el efecto en relación con el caso de base de empinado de las paredes del tajo, incluyendo el ahorro de residuos desmonte y los costos de la inestabilidad. Los beneficios y costos se determinan para cada año de la vida potencial de la mina y se descuentan al presente CANMET (1977).

## 2.3 Definiciones conceptuales

**Talud:** Cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que ha de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, se clasifican por taludes naturales y taludes artificiales, siendo los taludes artificiales el resultado de la intervención del hombre para la construcción de obras de ingeniería (diques, terraplenes, etc.).

**Deslizamiento:** Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por un valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb, 1989).

**Estabilidad de taludes:** Los taludes requieren ser estabilizados para prevenir los efectos de inestabilidad, tanto el análisis como el diseño de taludes de excavaciones y rellenos constituyen una aplicación de la investigación y los avances que se logran en la mecánica de suelos y la mecánica de rocas, ciencias que proporcionan los métodos para cuantificar el factor de seguridad y la probabilidad de falla Escobar Potes (2017).

**Topografía:** Los trabajos topográficos en explotaciones de minerales deben adecuarse al ritmo con que la minería moderna modifica el entorno en el que se asienta.

Algunas de las tareas con las que se enfrenta el equipo topográfico de una empresa minera adquieren un carácter crítico, debido a las limitaciones de tiempo para realizarlas y a que condicionan otros trabajos posteriores, que a su vez son vitales para el funcionamiento de la mina.

**Mapeo y registro de afloramientos:** La cartografía de afloramientos es fundamental para todas las actividades que llevan a cabo los equipos responsables del diseño y gestión de los taludes de los tajos. Incluye el mapeo de afloramientos superficiales a escala regional y minera durante el desarrollo previo a la minería y el mapeo de bancos una vez que la minería ha comenzado. Preferiblemente debe ser llevado a cabo sólo por geólogos, ingenieros geólogos, ingenieros geólogos o especialistas en geotecnia debidamente capacitados, asistidos por especialistas de otras disciplinas, según sea necesario.

**Minas de tajo Abierto:** Estas minas se explotan en la superficie utilizando una línea de explosivos. Luego de la tronadura, que remueve el material mineralizado, se realiza el cargado en camiones o en cintas transportadoras. Para ello se usan cargadores frontales o palas mecánicas, que llevan las rocas hasta la planta de chancado para iniciar el proceso de concentración.

**Minerales No Metálicos:** son minerales que no tienen brillo propio ni conducen electricidad. En este grupo se ubican: arena sílica, azufre, barita, caolín, celestita, diatomita, dolomita, fluorita, feldespato, fosforita, fluorita, grafito, sal, sulfato de sodio, sulfato de magnesio, wollastonita y yeso, entre otros.

**Ángulos de talud en explotaciones a tajo abierto:** De los parámetros geométricos en la explotación de un tajo, los ángulos de talud son significativos, ya que en la explotación misma una restricción operacional más relevante es garantizar la estabilidad de cada uno de los comprometidos, para esto se requerirá mantener una geometría de diseño óptima que permita un máximo beneficio económico en función de un mínimo factor de riesgo de que se de algún siniestro geomecánico.

Los ángulos de talud con que se trabaja en una explotación son:

- Ángulos Interrampa
- Ángulos globales

**Diseño del talud con el software AutoCAD y Slide:** En la actualidad existen infinidad de programas para diseñar un talud. Para esta investigación se ha elegido usar dos software el AutoCAD y Slide versión 6.0 generado por la empresa MACAFERRI.

El software Slide determina factores de seguridad para diferentes geometrías, ya sea modelando en el mismo programa o importando desde un programa de dibujo.

Para el análisis de suelos el programa incluye criterios de rotura según: Mohr-Coulomb; Hoek-Brown. También se integran funciones de anisotropía y otras variaciones como estructuras de contención, condiciones de sobre carga, suelo grampeado y geotextiles.

**Cortes:** En yacimientos masivos o de capas inclinadas, la explotación se lleva a cabo tridimensionalmente por banqueo descendiente, con secciones verticales en forma troncocónica. Estos métodos son los tradicionales de la minera metálica y se adaptaron en las últimas décadas a los yacimientos de carbón y yesos, introduciendo algunas modificaciones.

La extracción, en cada nivel, se realiza en un banco con uno o varios tajos. Debe existir un desfase entre bancos a fin de disponer de unas plataformas de trabajo mínimas para que operen los equipos a su máximo rendimiento y en condiciones de seguridad. Las pistas de transporte se adaptan a los taludes finales, o en actividad, permitiendo el acceso a diferentes cotas.

## 2.4 Estructura teórica y científica que sustenta la investigación

### 2.4.1 Formulación de diseños de taludes

El proceso básico para el diseño de taludes de tajo abierto, independientemente de su tamaño o materiales, se resume en la Figura 22.

Siguiendo este enfoque, el proceso de diseño de taludes en cualquier nivel de un proyecto implica esencialmente los siguientes pasos:

- Formulación de un modelo geotécnico para el área del tajo
- Población del modelo con datos relevantes.
- División del modelo en dominios geotécnicos.
- Subdivisión de los dominios en sectores de diseño.
- Diseño de los elementos de talud en los respectivos sectores de los dominios.
- Evaluación de la estabilidad de los taludes resultantes en términos de los criterios de aceptación del proyecto.
- Definición de requisitos de implementación y monitoreo para los diseños.

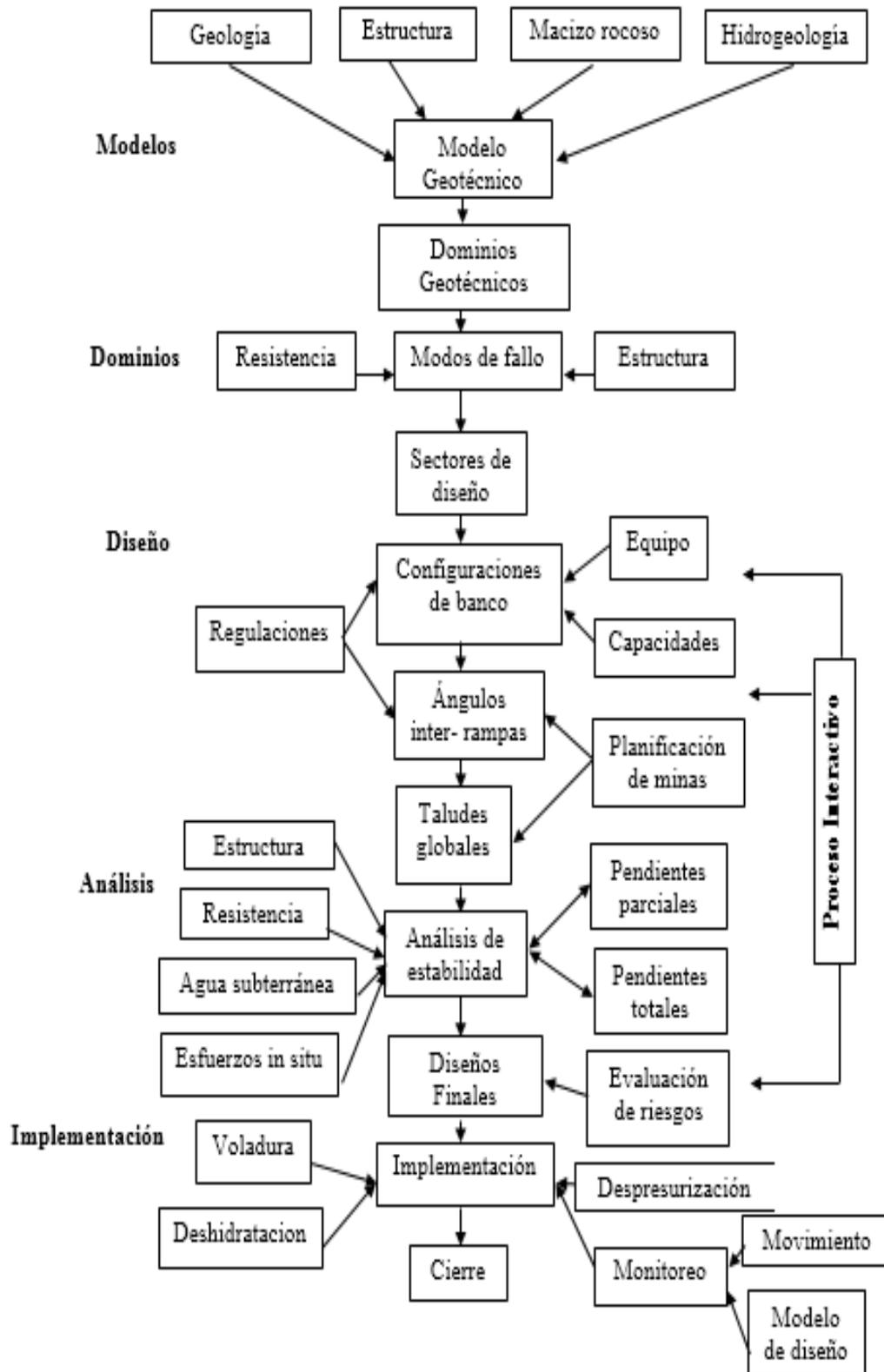


Figura 22: Proceso de diseño de taludes

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

## 2.4.2 Métodos de diseño de taludes:

El propósito de esta sección es esbozar los pasos esenciales en la formulación de los criterios de diseño de los taludes del tajo. Una parte integral de este proceso involucra el análisis de estabilidad de taludes de los taludes de roca en una mina a tajo abierto utilizando la información geológica, estructural, propiedades de materiales e hidrogeológica que se ha reunido en el modelo geotécnico. El objetivo fundamental del proceso de diseño de taludes es permitir un diseño seguro y económico de las paredes del tajo en las escalas de banco, inter-rampas y de taludes globales. El proceso se resume en la Figura 23.

MASA ROCA FUERTE			
	Débiles	Moderado	Fuerte
Elemento de pendiente	Fuerza (estructura)	Estructura	Estructura
Cara de banco	Fuerza	Estructura (Fuerza)	Estructura
IRA	Fuerza	Estructura (Fuerza)	Estructura (Fuerza)
En general	General	Por Sector	Por Sector
Enfoque de diseño	En general	Banco	Banco
	↕	↓	↓
	IRA	IRA	IRA
	↕	↓	↓
	Banco	En general	En general
<b>Las estructuras principales pueden impactar en general (e IRA)</b>			
<b>Notas</b>			
<b>ROCAS DÉBILES</b>		<b>ROCAS DE MODERADAS A FUERTES</b>	
*Menos susceptibles a la orientación de la pared		*Se requiere sectorizar	
*Comience evaluando la pendiente general		*Control estructural de BFAS	
*Ajuste la configuración de banco a general y / o IRA		*Diseño de captación basado en la cantidad de	
*La altura o ángulo del banco puede controlarse mediante la resistencia.		falla anticipada: se puede regular un mínimo	
*Múltiples bancos (apilamiento) de manera desigua		*Altura del banco controlada por equipo	
*Es probable que las presiones del agua desempeñen un papel importante		*Múltiples bancos (apilamiento) pueden ser posibles,	
		especialmente en rocas fuertes	

Figura 23: Controles de diseño de talud por resistencia de roca

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

### 2.4.2.1 Pasos de diseño

La formulación de los criterios de diseño de taludes implica fundamentalmente el análisis de los modos de falla previstos que podrían afectar al talud en bancos, interrampa y escalas globales.

- El proceso comienza con la división del modelo geotécnico del área del tajo propuesto en dominios geotécnicos con características geológicas, estructurales y de propiedad de materiales similares. Las características de cada dominio pueden utilizarse para formular el enfoque de un diseño básico. Esto implica esencialmente evaluar los factores críticos que determinarán la(s) modalidad(es) de falla potencial(es) en las escalas respectivas (banco, interrampa, global) contra lo(s) cual(es) se diseñarán los elementos del talud.
- Para cada dominio, se evalúan los modos de falla potenciales y los diseños se basan en los niveles de aceptación requeridos contra la inestabilidad según lo definido por la política de la compañía, los estándares industriales o los requisitos reglamentarios.
- Cuando se espera que la estructura sea un factor de control, la orientación del talud puede influir en el diseño criterios. En este caso, normalmente se requiere una subdivisión adicional de un dominio en sectores de diseño, basado en consideraciones cinemáticas relacionadas con el potencial de socavar estructuras (planas) o combinaciones (cuñas), o derribar las características de contr
- La sectorización puede reflejar controles en todos los niveles, desde la escala de banco, donde la tela proporciona el control principal para los ángulos de la cara del banco, hasta la escala de talud general, donde se puede esperar que una estructura principal en particular influya en un rango de orientaciones de taludes dentro de un dominio.
- En el caso de rocas débiles, donde se espera que el esfuerzo del macizo rocoso sea el factor de control para la estabilidad del talud, el proceso de diseño debe comenzar con análisis para establecer los ángulos de talud general e interrampa.

- Los ángulos que cumplan con los criterios de aceptación se deben traducir a escala en configuraciones de banco. Las combinaciones de bancos proporcionan la pendiente entre rampas, que simplemente puede representar la altura entre las rampas de acceso en el tajo.
- Sin embargo, en tajos más grandes con taludes más altas, el diseñador de taludes puede optar por proporcionar más flexibilidad o estabilidad incorporando bermas geotécnicas más amplias (bermas de gestión de riesgos) a intervalos de altura prescritos en la pared.
- También se usa con frecuencia para garantizar el acceso a la pendiente para el control de aguas superficiales, la limpieza y la instalación de pozos de drenaje o instalaciones de monitoreo.
- Los ángulos entre rampas normalmente se proporcionan a los planificadores de minas como criterios básicos de diseño de pendientes. Solo cuando se han agregado rampas, el ángulo de inclinación general se hace evidente. Por lo tanto, para el trabajo inicial de diseño y evaluación de la mina, se puede usar un ángulo de talud general que involucre el ángulo entre rampas, aplanado de 2 a 3 ° para tener en cuenta las rampas, para análisis de cono Whittle y estudios similares.

Otros factores en los diseños de taludes podrían incluir:

- Equipo de excavación (controla la altura del banco de operaciones)
- Equipamiento y capacidades del operador
- Requisitos de control de aguas superficiales (ancho del banco)
- Restricciones de planificación minera (control de minerales y altura de extracción resultante)
- Restricciones regulatorias (por ejemplo, ancho mínimo del banco).

Las consideraciones de seguridad (alto potencial de desgarro) también pueden ser un factor que impide el apilamiento de bancos.

#### 2.4.2.2 Análisis de diseño

La formulación de los criterios de diseño de taludes para cada elemento de una pared del tajo implica la realización de análisis de estabilidad al nivel de aceptación requerido (factor de seguridad o probabilidad de falla). El tipo de análisis depende en gran medida por el modo de fallo previsto, la escala del talud, los datos disponibles y el nivel del proyecto. El proceso suele ser iterativo, e implica la interacción con los planificadores de las minas.

Los principales tipos de análisis incluyen:

Análisis cinemático, basado en proyecciones estereográficas y aplicado principalmente a diseños de bancos.

- Análisis de equilibrio límite aplicado a:
  - ✓ Fallas controladas estructuralmente en el diseño de banco e ínter-rampa,
  - ✓ Taludes interrampa y globales donde la estabilidad es controlada por la fuerza del macizo rocoso, con o sin anisotropía estructural
- Análisis numérico utilizando métodos de elementos finitos y de elementos distintos para la evaluación y/o el diseño del talud interrampa y del talud global.

Los análisis de estabilidad pueden constituir la base de una evaluación del riesgo que incorpore factores atenuantes para alcanzar niveles aceptables de riesgo en términos de seguridad y economía.

Los métodos de diseño en cada situación se describen a continuación en dos secciones: análisis cinemáticos, que se ocupan de las fallas de banco e interrampa estructuralmente

controladas; y análisis de masas rocosas, que se ocupan de las fallas interrampa y de las fallas generales de taludes controladas por la fuerza del macizo rocoso o combinaciones

### 2.4.3 Análisis cinemático

#### 2.4.3.1 Bancos

La función principal de los bancos es proporcionar un entorno seguro para el personal y el equipo que debe trabajar cerca a la cara del talud. En consecuencia, deben satisfacer las necesidades de:

- **Confiabilidad:** que requiere caras de banco y crestas de banco estables. Las variables primarias que controlan la estabilidad de las caras y crestas del banco son la geometría de las juntas y la resistencia al corte de las mismas
- **La seguridad:** que requiere anchos de banco suficientes para detener y mitigar el peligro de las rocas y contener cualquier derrame de los bancos anteriores
- **Acceso a largo plazo** a lo largo de los bancos para los operadores implicados en actividades tales como el monitoreo de talud y la limpieza de la roca y el vertido.

Los componentes de un banco son:

- La altura del banco, que es la altura vertical entre los bancos de enganche. Cuando los bancos se apilan esto será un múltiplo de la altura del banco de trabajo
- El ancho del banco
- El ángulo de la cara del banco.

La relación se ilustra en la Figura 24. En la Figura 25, se ilustra un resumen del enfoque típico de los análisis a escala de banco.

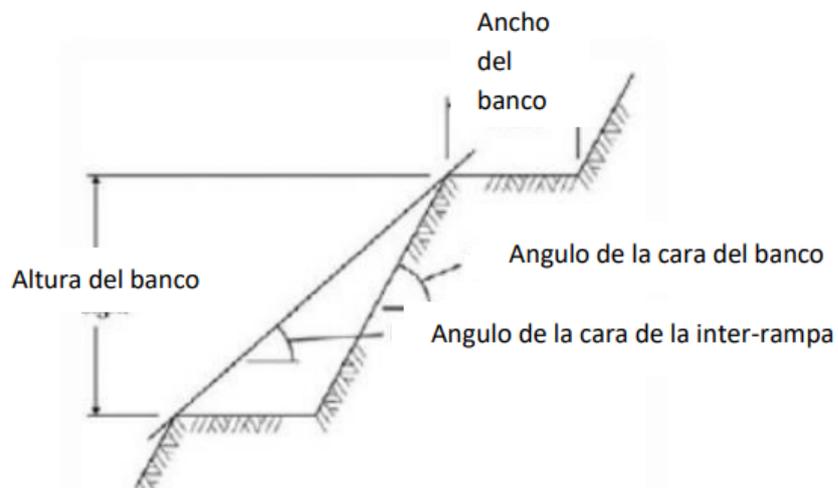


Figura 24: Componentes de configuraciones de banco

Fuente: John Read and Peter Stacey , 2010

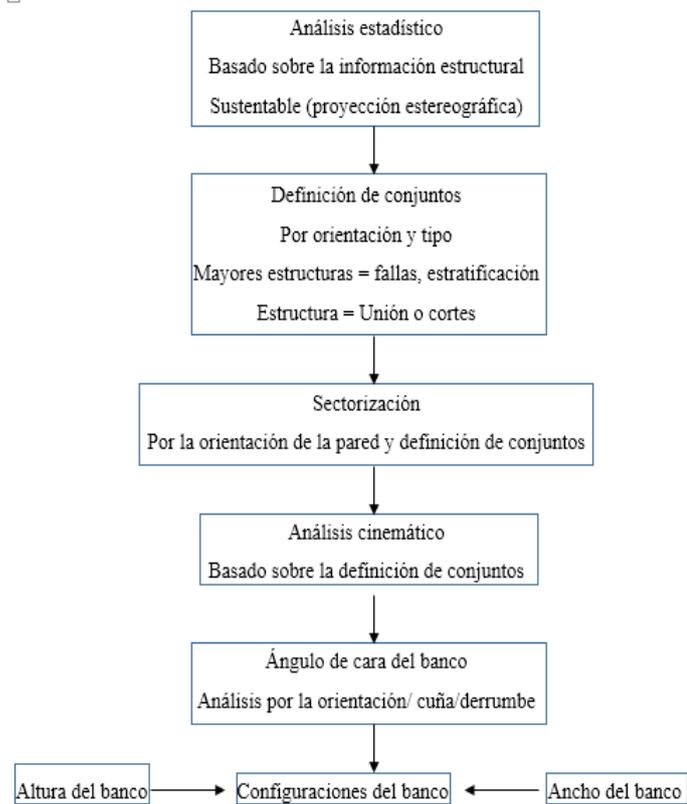


Figura 25: Proceso de diseño del ángulo de la cara del banco para rocas modificadas

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

#### 2.4.3.2 Altura del banco

Las alturas de los bancos de 10–18 m son comunes en la mayoría de las minas a tajo abierto. Quince metros es quizás el más común, pero la decisión final se toma generalmente por la coincidencia de la altura con la capacidad del equipo de excavación (por ejemplo cuerda o palas hidráulicas) que se utilizará en la mina. El apilamiento de bancos para empinar las pendientes ínter-rampa es común cuando la resistencia de la roca y los procedimientos de operación lo permiten.

#### 2.4.3.3 Ancho de banco

Los bancos deben ser lo suficientemente anchos para detener las rocas potencialmente peligrosas y contener cualquier derrumbe de los bancos de arriba. También deben permitir el acceso a largo plazo a elementos como el movimiento de taludes y las estaciones de monitoreo de aguas subterráneas.

En la mayoría de los casos, el ancho mínimo de diseño del banco se basa en una mezcla de la política de la empresa y la experiencia operativa; para alturas de 15 m, rara vez es inferior a 7 m.

La relación empírica desarrollada por Call & Nicholas Inc. define el ancho de banco de captura preferido:

$$\text{Ancho de banco (m)} = 0.2 * \text{Altura de banco} + 2 \text{ m} \quad \text{.....(Ecuación 8)}$$

$$\text{Ancho de banco (m)} = 0.2 * \text{Altura de banco} + 4.5 \text{ m} \quad \text{.....(Ecuación 9)}$$

Una vez que se han considerado las caídas y derrumbes de rocas, el paso final en el proceso de diseño consiste en evaluar la probabilidad de alcanzar el ancho del banco de diseño. Incluso con un buen control de voladuras y excavaciones, la experiencia demuestra que un ancho de banco específico rara vez se puede lograr con 100% de fiabilidad. El ancho que se puede alcanzar en realidad, se controla por la cantidad de retrocesos que se produce a lo largo de la cresta a medida que se excava el banco. La

cantidad de retrocesos es controlada por las mismas características que controlan el ángulo efectivo de la cara del banco (ver Figura 26).

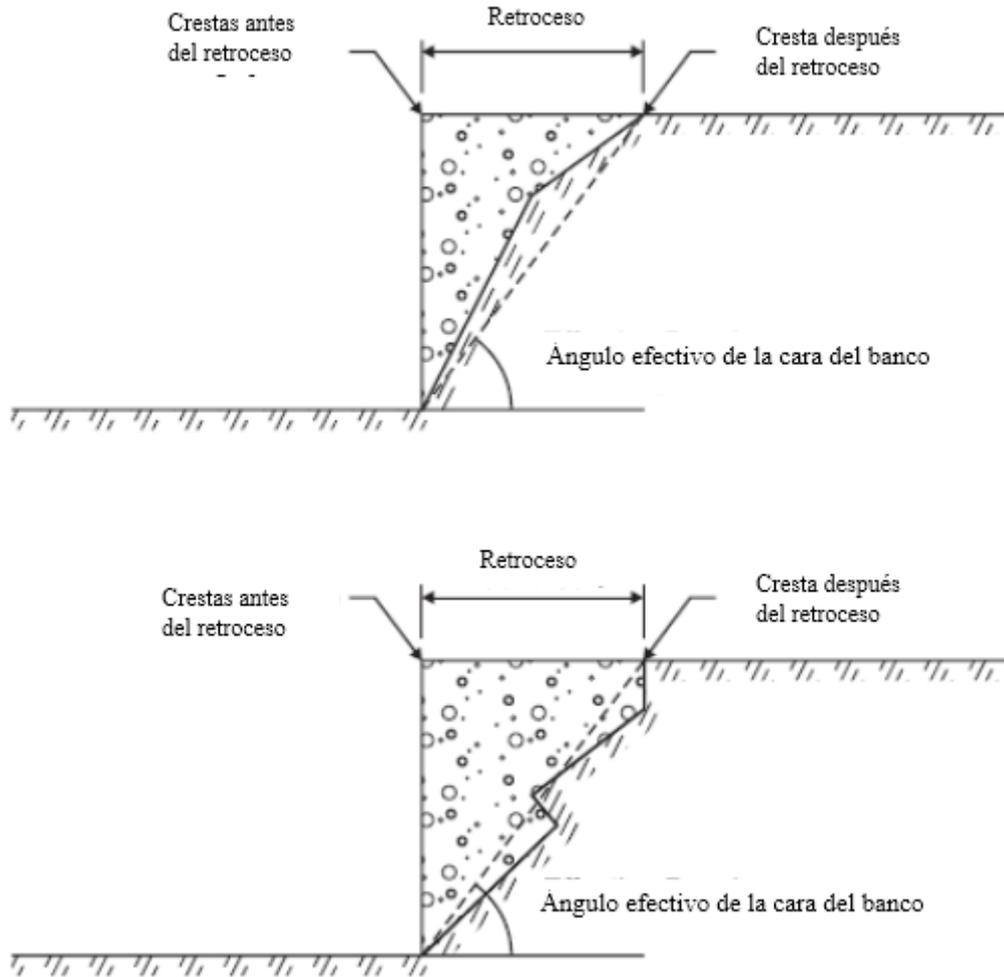


Figura 26: Definición de contragolpe y ángulo efectivo de la cara del banco

Fuente: Ryan TM & Pryor PR, 2000

#### 2.4.3.4 Ángulo de la cara del banco

La cantidad de retroceso y el ángulo efectivo de la cara del banco son controlados por las juntas y fallas que intersectan el banco.

La estabilidad de estas estructuras está controlada por una serie de factores, que incluyen:

- Su orientación en relación con la dirección de la cara del banco.
- La cantidad de socavación que tiene lugar a medida que se excava el banco.
- Daño por explosión y menor resistencia al corte.
- Fracturas inducidas por explosiones en la cara del banco o en la vecindad de la cresta del banco.

La tarea principal de diseño es determinar un ángulo de cara que socave el menor número posible de planos, cuñas o bloques formados estructuralmente.

En estas circunstancias hay una cantidad igual de incógnitas y ecuaciones, lo que significa que el factor de seguridad se puede estimar utilizando procedimientos deterministas y estocásticos basados en la solución de equilibrio límite general para la falla del plano:

$$FoS = \frac{\tan \phi}{\tan \theta} + \frac{2c \sin \beta}{\gamma H \sin(\beta - \theta)} \quad \dots\dots \text{Ecuación 10}$$

Donde:

FS= Factor de Seguridad

$\Phi$ = Ángulo de Fricción

C= Cohesión

$\gamma$ = Peso Unitario del Material

B= Ángulo efectivo de la cara del banco

$\Theta$ = Ángulo de inmersión conjunta

Debido a los daños causados por las explosiones y a las tensiones relativamente bajas, la cohesión de las estructuras a menudo se ignora en los análisis a escala de banco.

En la escala entre rampas, el análisis busca combinaciones de bloques y cuñas (poliedros) potencialmente inestables en todos los bancos que se apilan en la geometría que se evalúa.

#### 2.4.4 Métodos numéricos

Se pueden usar para ayudar a explicar el comportamiento físico observado del macizo rocoso y para evaluar diferentes modelos geológicos, mecanismos de falla y opciones de diseño de taludes. Los modelos numéricos dividen el macizo rocoso en elementos.

A cada elemento se le asigna una relación ideal esfuerzo-deformación y propiedades que describen cómo se comporta el material. Los elementos pueden estar conectados en un modelo continuo o separado por discontinuidades en un modelo discontinuo.

Los modelos discontinuos permiten el deslizamiento y la separación en superficies explícitamente ubicadas dentro del modelo.

##### 2.4.4.1 Modelos de continuo

Los códigos de continuo suponen que el material es continuo en todo el cuerpo. Por lo tanto, en grandes pendientes rocosas, gran parte de la masa rocosa debe estar representada por un continuo equivalente en el que el efecto de las discontinuidades es reducir las propiedades elásticas de la roca intacta y su resistencia a las de la masa rocosa.

Los modelos materiales son relaciones de tensión-deformación que describen cómo se comporta el material.

##### 2.4.4.2 Modelos de discontinuidad.

Los códigos de discontinuidad comienzan con un método diseñado específicamente para modelar fallas y uniones (discontinua) y tratar el comportamiento continuo como un caso especial. Un código de elemento discreto incorpora un algoritmo eficiente para detectar y clasificar contactos. Mantendrá una estructura de datos y un esquema de asignación de memoria que puede manejar cientos o miles de discontinuidades. Las discontinuidades dividen el dominio del problema en bloques. Los bloques dentro de códigos de elementos discretos pueden ser rígidos o deformables, asumiéndose un comportamiento continuo dentro de bloques deformables.

#### 2.4.4.3 Consideraciones de modelado tamaño del elemento

Para capturar adecuadamente los gradientes de esfuerzos y deformación dentro del talud, es necesario utilizar discretizaciones relativamente finas. Por experiencia, se ha encontrado que se requieren al menos 30 elementos de orden inferior.

Esta sección se centra en los esfuerzos in situ, que tradicionalmente se han ignorado en los análisis de taludes.

La práctica de diseño a tajo abierto, supone que el efecto del esfuerzo in situ es un problema solo cuando los esfuerzos en los taludes de la cara del tajo son lo suficientemente sustanciales como para aproximarse o superar la resistencia del macizo rocoso. Esto podría provocar daños en el macizo rocoso, produciendo una zona ampliada de roca debilitada que puede fallar posteriormente, principalmente en el corte bajo carga por gravedad.

Una ventaja de los modelos numéricos radica en su capacidad para incluir estados de tensión inicial previos a la extracción en los análisis de estabilidad y evaluar su importancia a través de relaciones constitutivas que simulan el comportamiento de las rocas en condiciones de esfuerzos inducidos por la extracción

##### 2.4.4.3.1 Secuencia de excavación

La cantidad de esfuerzo requerido para construir un modelo depende directamente del número de etapas de excavación simuladas. Por lo tanto, la mayoría de los análisis prácticos buscan reducir ese número. Las soluciones más precisas se obtienen utilizando el mayor número de pasos de excavación, ya que se seguirá de cerca la ruta de carga real para cualquier elemento en el talud. Sin embargo, para muchas taludes, la estabilidad parece depender principalmente de las condiciones del talud como la geometría y la distribución de la presión de poros en el momento del análisis, y muy poco en la ruta de carga tomada para llegar allí.

Se ha desarrollado un enfoque razonable para el número de etapas de excavación en el que solo se modelan una, dos o tres etapas de excavación. Se toman dos pasos de cálculo para cada etapa.

- En el primer paso, el modelo se ejecuta elásticamente para eliminar cualquier efecto de inercia causado por la eliminación repentina de una gran cantidad de material.
- En el segundo paso, el modelo se ejecuta permitiendo que se desarrolle el comportamiento plástico. Con este enfoque se han obtenido soluciones razonables para una gran cantidad de problemas de estabilidad de taludes. Sin embargo, las soluciones elásticas pueden involucrar tensiones bien fuera de la envoltura de falla para estructuras y / o masas rocosas. El camino de regreso a las tensiones admisibles puede no ser realista en todos los casos.

#### 2.4.4.3.2 Análisis sísmico

Los análisis sísmicos con modelos numéricos se pueden realizar de dos maneras:

- Análisis pseudoestático utilizando un coeficiente sísmico derivado de los registros de terremotos
- Análisis en el dominio del tiempo utilizando registros de terremotos aplicados.

El primer método implica un análisis pseudoestático con una aceleración horizontal aplicada.

Los análisis de dominio de tiempo calculan esfuerzos y desplazamientos utilizando registros de terremotos como entrada. En estos análisis, el tiempo es real y los esfuerzos y desplazamientos se calculan en puntos discretos en el tiempo (cada milisegundo más o menos).

Las ventajas de utilizar modelos numéricos para realizar análisis dinámicos Glass (2000) son que:

- Los métodos numéricos incorporan movimientos sísmicos realistas.
- Los modelos numéricos permiten el uso de propiedades realistas para suelos y taludes de rocas
- Los modelos numéricos calculan el historial de tiempo de desplazamiento de la pendiente, lo que permite evaluar el impacto del desplazamiento en el comportamiento final del talud.

La desventaja de usar el análisis en el dominio del tiempo para el análisis dinámico es que no se determinan los factores de seguridad. Por el contrario, los desplazamientos pueden calcularse para terremotos de diferente magnitud y la probabilidad de exceder un desplazamiento límite puede estar relacionada con la probabilidad de que ocurra un terremoto de magnitud suficiente para causar el desplazamiento limitante durante la vida útil de la mina.

#### 2.4.5 Implementación del diseño

Los diseños de taludes se incorporan al diseño de la mina a través de la planificación minera, que generalmente es un proceso iterativo entre el diseñador de taludes y el planificador de la mina.

La posterior implementación operativa de los diseños de taludes de acuerdo con el plan de la mina suele incluir requisitos de voladura controlada, control de excavación, escalamiento y, ocasionalmente, apoyo de taludes para garantizar que los diseños se logren de forma segura y económica.

##### 2.4.5.1 Aspectos de planificación minera del diseño de taludes

Los insumos y productos necesarios para el proceso de planificación de las minas cambian con la naturaleza del depósito y la etapa de desarrollo del proyecto. Asimismo, la forma y el uso de la información geotécnica utilizada por un planificador de minas cambian con

la etapa del proyecto. En general, las aportaciones geotécnicas al proceso de planificación de las minas comienzan con hipótesis de alto nivel cuando los proyectos se encuentran en una etapa inicial de análisis. Se necesitan insumos más complejos para el análisis y las operaciones de las etapas finales.

Al determinar el nivel de insumos geotécnicos necesarios para una determinada etapa del análisis de los proyectos, es necesario abordar la cuestión del impacto material o financiero.

#### 2.4.5.2 Proceso de diseño de tajo abierto

El desarrollo de un diseño de tajo definitivo se basa en general en una serie de fases intermedias del tajo que reflejan recortes sucesivos. Este desarrollo de tajos por etapas permite que los criterios finales de diseño de la pared del tajo se basan en el rendimiento operativo de cada fase anterior.

La comprensión de los problemas geotécnicos se mejora progresivamente y el riesgo asociado se reduce mediante la implementación de diseños de ingeniería y prácticas de operación apropiadas. Con este fin, las observaciones y los resultados de la experiencia pasada y presente deben aplicarse a la planificación minera futura. Específicamente, esto incluye:

- La definición de los dominios geotécnicos establecidos sobre la base de las propiedades consistentes de la estructura y de la masa rocosa, como base para la formulación de los respectivos diseños de taludes.
- Documentación en curso de la excavación y rendimiento operativo de los taludes para juzgar la validez del modelo geotécnico y sus supuestos subyacentes. El proceso de conciliación debe involucrar a todos los departamentos asociados con el diseño, la planificación y la ejecución de los muros de la mina;
- Monitoreo y evaluación técnica de la inestabilidad de taludes para entender su relación con el diseño de taludes.

Implícito en el enfoque de diseño está el compromiso con la mejora continua y la revisión continua del proceso de diseño y las consideraciones operativas.

El proceso de diseño y ejecución del tajo debe seguir los principios aceptados de ingeniería y operación en línea con la filosofía que se está adoptando.

#### 2.4.6 Aplicación de los criterios de diseño de taludes en el diseño de la mina

El proceso para decidir si un proyecto minero debe ser construido o rechazado requiere una serie de estudios (por ejemplo, técnicos, económicos, ambientales, sociales y comerciales) para aumentar el conocimiento de los aspectos críticos del proyecto y minimizar los riesgos de inversión. Dado que estos estudios son costosos y llevan tiempo, los proyectos mineros se desarrollan generalmente en varias etapas relacionadas con el nivel de información disponible, la precisión requerida de la estimación de ingeniería y el nivel de los costos planificados. Este enfoque proporciona suficiente información para tomar una decisión sin comprometer la inversión total.

Aunque la definición de las etapas del estudio minero varía, los términos 'conceptual', 'pre factibilidad', 'factibilidad', 'diseño y construcción' y 'operaciones'.

##### 2.4.6.1 Fase de identificación del objetivo

La etapa de identificación del objetivo confirma que la mineralización es de suficiente consistencia y ley como para justificar una perforación de exploración adicional, geofísica y otras investigaciones a nivel de exploración. La identificación del objetivo se centra en la comprensión del paquete de roca o mineral para que las investigaciones posteriores puedan concentrarse en determinadas estructuras geológicas o trazas de mineralización.

##### 2.4.6.2 Nivel 1: Diseño conceptual

Este nivel de estudio puede subdividirse en dos partes, aunque a menudo se combinan o superponen. Las subdivisiones son:

- Estudios de orden de magnitud.
- Estudios de alcance.

#### 2.4.6.2.1 Estudios de orden de magnitud

El propósito de esta etapa es determinar, dentro de un orden de magnitud, si el estilo de mineralización tiene una economía potencialmente positiva. Desde la etapa de identificación del objetivo se han realizado más perforaciones de exploración, con algunas investigaciones sobre la logística del distrito y el costo de hacer negocios en el área. Se desarrolla un orden de magnitud en cuanto al potencial de negocio.

Desde una perspectiva geotécnica, esta etapa es similar a la etapa de identificación del objetivo.

#### 2.4.6.2.2 Estudios de alcance

El objetivo de los estudios de alcance es buscar defectos fatales. En etapas anteriores se ha establecido una buena mineralización en el distrito, pero no se han investigado las evidentes fallas fatales. Las fallas fatales pueden ocurrir en formas tales como técnicas, comerciales, sociales o políticas. Rara vez los problemas geotécnicos se considerarían un defecto fatal, aunque los aspectos geotécnicos pueden contribuir a una gran variabilidad en la economía del proyecto.

En general, los objetivos de ingeniería de minas en este nivel tienen dos vertientes:

- Probar la sensibilidad relativa de la economía del proyecto a las principales variables técnicas, comerciales y sociales
- Para ver si alguna de estas variables representa un defecto fatal.

El ingeniero de minas determinará los factores críticos que dictan los resultados financieros de una operación potencial. Esa investigación fijará el centro de las

investigaciones futuras a este nivel y en las etapas futuras. Programas como el nivel de perforación, pruebas o investigación adicional pueden planificarse y justificarse en función del nivel de impacto de cada conductor en la decisión de autorización.

En este nivel, hay muy poca actividad geotécnica. Los dominios geotécnicos se crean utilizando muestras de tronco o chip basadas en litología o alteración. El conocimiento estructural del yacimiento es relativamente escaso debido a la falta de datos geotécnicos de perforación (por ejemplo, núcleo orientado) y normalmente se basa sólo en el mapeo de superficies. Las recomendaciones iniciales sobre la pendiente se hacen generalmente con pocas o ninguna prueba geotécnica. Los planificadores de minas incorporan los ángulos de inclinación basados en el dominio en los programas de optimización de límites de tajo.

#### 2.4.6.3 Nivel 2: Prefactibilidad

El objetivo del Nivel 2 es asegurar que exista un caso de negocio sólido antes de pasar al Nivel 3, la etapa de viabilidad. El Nivel 2 no busca optimizar el proyecto, el capital o el plan operativo. La etapa pondrá a prueba rápidamente las principales opciones operativas y tratará de establecer un caso de negocio sólido. Por lo general, se requerirá un informe geotécnico detallado en los estudios de Nivel 2. Los datos deben ser detallados, resumiendo la metodología y las conclusiones sobre los ángulos de inclinación.

El nivel de detalle en la guía del ángulo de inclinación aumentará en el Nivel 2. Típicamente, los ángulos de inclinación se especificarán por dominio geotécnico junto con las configuraciones de banco, como se muestra en la Figura 27.

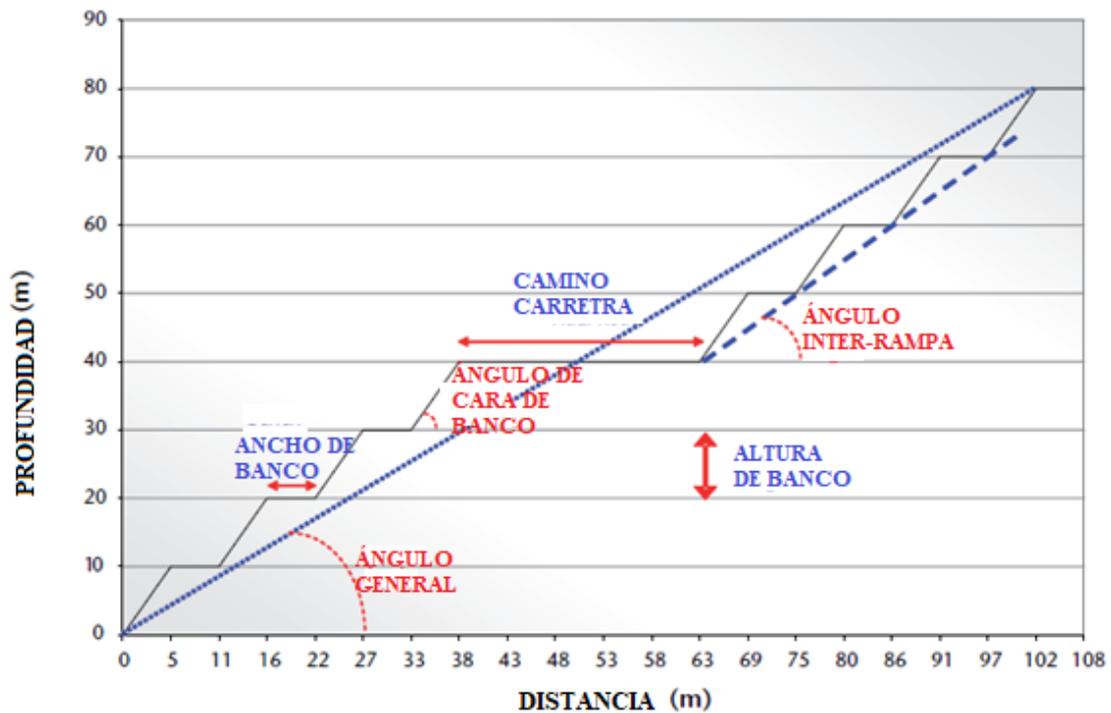


Figura 27: Geometrías entre rampas y bancos utilizadas en evaluaciones a tajo abierto

Fuente: John Read and Peter Stacey, 2010

#### 2.4.6.4 Nivel 3: Viabilidad

El análisis de Nivel 3 contiene un estudio de límite de tajo y un estudio de escala de operaciones. Estos estudios requieren ángulos de inclinación por dominios geotécnicos. Se espera que las pruebas de resistencia se hayan realizado a este nivel y que los resultados se hayan incorporado a la lógica espacial del dominio y a la caracterización de la resistencia. Las configuraciones de banco no son necesarias para el análisis de límites de tajo.

Los profesionales geotécnicos deben ayudar a los desarrolladores de software a limitar los tajos con la complejidad de la lógica de taludes alrededor de las estructuras principales. La Figura 28 muestra una sección transversal típica de un tajo con resultados alternativos. Asumiendo que la roca de campo general tiene el mismo ángulo de inclinación, tratar con la falla puede implicar permanecer delante de ella, correr el riesgo de socavar la falla en el tajo o seguir la falla hacia abajo, o una combinación de estas.

Después de los estudios de límite de tajo y escala de operaciones, se desarrolla un diseño de tajo y fase final más formal. En el diseño formal del tajo, el grupo geotécnico debe suministrar configuraciones de banco específicas para las áreas del tajo. Dado que no se dispone de datos de producción, la guía de configuración del banco está sujeta a cambios, por lo que no debe ser demasiado compleja. La configuración compleja del banco probablemente no será necesaria hasta que la operación se encuentre en la etapa media o tardía de la excavación.

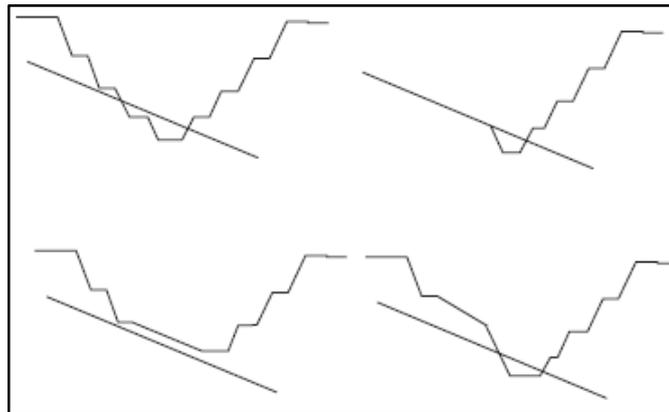


Figura 28: Configuraciones alternativas para lidiar con una falla

Fuente: Guidelines for open pit slope design

El diseño formal del tajo y la fase requerirá las siguientes aportaciones del grupo geotécnico:

- Modelado de dominios e importación en el paquete de planificación minera.
- Modelado estructural e importación en el paquete de planificación minera.
- Configuración del banco por dominio.
- Pistas de pista por dominio.
- Estructuras geológicas en áreas de tajo.
- Reconciliación de diseño para ángulos y estructura.

El ingeniero geotécnico debe verificar que los diseños final y de fase cumplan con los criterios de diseño de la pendiente y que no haya problemas de estabilidad como resultado de la colocación de la pared.

La coordinación continua y estrecha entre las disciplinas de ingeniería y geotécnica es especialmente importante en este proceso.

El siguiente paso para la ingeniería de minas es producir un plan de producción, que constituirá la base de un plan operativo de vida de la mina (LOM). Los departamentos de Procesos, Recursos Humanos, Geotecnia, Tierras y todos los demás departamentos del sitio basan sus planes en el plan de producción del ingeniero de minas.

El grupo geotécnico también trabaja con la planificación minera y las operaciones mineras en las áreas de planificación de instalaciones y estimación de costos desde la Etapa 3 hasta el cierre. Un programa geotécnico debe estimar lo siguiente:

- Caracterización de la resistencia y de la masa rocosa
- Modelado de dominios e importación en el paquete de planificación minera;
- Modelado estructural e importación en el paquete de planificación minera;
- Análisis, cantidad, infraestructura y encaminamiento de aguas superficiales y subterráneas;
- Contenido del programa geotécnico y costo desde la Etapa 3 hasta el cierre (personal, equipos, consumibles) por período.

En este nivel es particularmente importante mantener una estrecha coordinación entre los ingenieros geotécnicos y los planificadores de minas.

#### 2.4.6.5 Nivel 4: Diseño y construcción

El propósito de esta etapa es desarrollar los planes de acción necesarios por disciplina o función con el suficiente detalle para asegurar una implementación sin problemas durante los primeros años del proyecto. Clásicamente, este nivel implica la "ingeniería de detalle", que es el refinamiento de un diseño conceptual en dibujos de diseño, cálculo de costes de componentes y programación de proyectos de construcción. En términos simples - qué construir, cómo construirlo, cuándo construirlo, cuánto costará y cómo administrar todo el proceso. Como tal, la Etapa 4 puede constituir la base del compromiso del propietario con los fondos de construcción.

El grupo geotécnico necesita ser parte del análisis de Nivel 4. Su participación incluye:

- Flujo de trabajo externo (determinación de datos y vínculos de proceso con otros departamentos desde la construcción hasta el cierre).
- Determinación del flujo de trabajo interno (más allá del alcance de este libro).
- Planes de acción por periodos (más allá del alcance de este libro),
- Calendario del proyecto (más allá del alcance de este libro).
- Calendario de dotación de personal y determinación del nivel de habilidades (más allá del alcance de este libro).

#### 2.4.6.6 Nivel 5: Operaciones

El objetivo de esta etapa es llevar los planes de producción de la mina al nivel más eficiente posible, incluyendo la salud, la seguridad y la prevención de pérdidas, al tiempo que se maximiza el retorno de la inversión.

El grupo geotécnico está involucrado en las siguientes áreas: diseño minero, planificación de la producción minera y producción diaria.

##### 2.4.6.6.1 Diseño de la mina

El diseño de la mina es un proceso continuo. En las primeras etapas de desarrollo, el diseño de la mina puede cambiar con frecuencia debido a la perforación de exploración del yacimiento de mineral. En operaciones maduras, los diseños de la mina cambian a medida que se comprende mejor la naturaleza de las limitaciones geotécnicas de los segmentos de las paredes del tajo, la influencia del agua subterránea y de las aguas pluviales en las paredes del tajo. Los precios de los metales pueden cambiar los diseños de las minas, pero no deben cambiar los ángulos de inclinación, sólo la colocación de las paredes.

Los tajos abiertos grandes o profundos pueden cambiar como resultado de la prueba de la altura de la pared en función del ángulo de inclinación.

#### 2.4.6.6.2 Planificación de la producción minera

Una planificación de la producción bien fundamentada requiere la participación de muchos departamentos. El grupo geotécnico suele contribuir a la orientación del plan de producción en las siguientes áreas:

- Retraso de altura o distancia máxima entre fases.
- Tasa de avance vertical.
- Desección o despresurización necesaria para ángulos de inclinación estables;
- Tasa de desagüe e infraestructura necesaria para alcanzar la tasa de minería vertical.
- Reconciliación de la explosión con respecto a los daños causados por la explosión.
- Reconciliación de la excavación para la excavación por encima o por debajo de los dedos de los pies, la cara y la cresta;
- Enfrenta la reconciliación de escalamiento para determinar si las técnicas operativas están funcionando.
- Guía de prácticas operativas (configuración de chorro, cara de banco y cierre),
- Programa de vigilancia de taludes.
- Cómo manejar la inestabilidad de las paredes.
- Cómo manejar las fallas de las paredes.
- Cómo operar bajo o alrededor de peligros de desprendimiento de rocas, inestabilidad o fallas.
- Distancia de operación segura bajo paredes normales, altas, inestables o con fallas.
- Planificando el acceso al pozo para pruebas, recolección de datos, monitoreo del desempeño u otras iniciativas geotécnicas.
- Conciliación del rendimiento de la pared con el diseño.

#### 2.4.6.6.3 Planificación diaria de la producción

Las actividades de producción diarias requieren procedimientos para garantizar un área de trabajo segura y eficiente. Se requiere una estrecha coordinación entre las Operaciones Mineras, la Ingeniería de Minas y los grupos Geotécnico e Hidrológico. El grupo geotécnico contribuye en las siguientes áreas:

- Mitigación de áreas inestables (volumen, riesgo y enfoque)
- Mitigación de áreas fallidas (volumen, riesgo y enfoque)
- Monitoreo de explosiones para detectar daños en paredes, bancos de captura y superficies de bancos
- Monitoreo de daños en excavaciones
- Monitorización de taludes de tajo
- Monitoreo de la tasa de reducción del caudal de agua subterránea en comparación con la tasa de avance vertical de la mina e impactos en los ángulos de inclinación si están fuera de sincronía;
- Monitoreo y análisis estructural de fosas y superficies de cimentación;
- Monitoreo y análisis de resistencia de muros en tajos, vertederos y presas
- Monitoreo de resistencia en cimientos de vertederos y pilas de lixiviación
- Mapas diarios, semanales y mensuales de áreas fallidas o inestables tales como peligros de caídas de rocas, controles de ingeniería (bunds), permisos de excavación especiales y áreas sin excavación
- Manual de procedimiento para lo anterior
- Capacitar a los supervisores de turno en la detección temprana de fallas.

#### 2.4.6.7 Cierre

La planificación de cierre de minas puede comenzar años antes de que comience la explotación minera. El diseño para el cierre de minas es una parte muy importante para proporcionar sostenibilidad a la comunidad local o a los futuros inquilinos de tierras y puede ser considerado durante el estudio de factibilidad original.

Las siguientes áreas tienen aspectos geotécnicos y generalmente forman parte de un plan de cierre:

- Tajo, vertedero, plataforma de lixiviación y estabilización de taludes de carreteras
- Control de aguas superficiales y desviación o estabilidad de zanjas.
- Estabilidad del relleno del pozo.
- Desagüe en foso.
- Formación y estabilidad de lagos de foso.
- Estabilidad de la revegetación.

Los criterios de diseño del cierre pueden ser dictados por regulaciones locales o federales, estándares de la compañía o estándares establecidos por las compañías de préstamos que ayudan a financiar el capital inicial, y varían considerablemente. En todas las situaciones, el ingeniero geotécnico debe prestar especial atención a la clase de instalación que se está diseñando (temporal o permanente), y si una instalación temporal tiene el potencial de convertirse en permanente.

#### 2.4.7 Evaluación y monitoreo del desempeño

##### 2.4.7.1 Evaluación del rendimiento del talud

El diseño del talud del tajo se basa en diversos grados en la ciencia empírica, la filosofía de diseño implementada en la mina, el juicio del diseñador y comentarios basados en el desempeño real.

Dada esta realidad, son necesarias calibraciones empíricas continuas de los factores clave que influyen en el diseño y la validación de la metodología y los criterios de diseño.

En este contexto, el diseño del talud debe considerarse como un proceso iterativo mediante el cual:

- Los criterios de diseño se basan en la mejor información disponible y una metodología defendible.

- Los diseños de pendientes se implementan de acuerdo con los criterios establecidos.
- Las condiciones geológicas reales, la geometría de la pendiente construida y el comportamiento de la pendiente son monitoreados y documentados.
- Se comparan las condiciones y el comportamiento documentados versus los predichos, y los criterios de diseño de la pendiente se modifican en consecuencia, completando el ciclo.

Este proceso requiere monitoreo y documentación sistemáticos de las condiciones geológicas y el rendimiento de la pendiente, y revisiones periódicas y actualizaciones de los criterios de diseño y el plan de la mina a medida que se desarrolla la mina (Ramírez y Alejano, 2004).

#### 2.4.7.2 Validación y refinamiento del modelo geotécnico

El modelo geotécnico desarrollado durante el estudio de factibilidad del proyecto se basa principalmente en la interpretación de exposiciones limitadas como afloramientos de superficie, pozos de prueba, zanja y perforación limitada.

Las posiciones y actitudes de las principales estructuras geológicas, como fallas, pliegues y contactos que forman límites críticos del modelo, pueden no estar bien establecidas. Además, la naturaleza de los datos puede introducir incertidumbres y sesgos de interpretación, como el sesgo de línea debido a orientaciones de perforaciones o trabajos subterráneos, o diferencias de escala que pueden ocurrir al mapear estructuras en afloramientos de superficie versus núcleo orientado, por lo tanto, es importante que el modelo geotécnico se valide a través de programas de mapeo y perforación a medida que avanza la minería.

#### 2.4.7.3 Desempeño del banco

##### Documentación del banco

La documentación sistemática y la evaluación del desempeño de los bancos es un componente importante de cualquier programa de evaluación de taludes. Los bancos son

los bloques de construcción fundamentales del tajo abierto, su geometría y comportamiento a menudo controlan el diseño entre bancos, y por lo tanto, el talud general.

#### 2.4.7.4 Aspectos operativos

La ejecución de los diseños de los taludes suele requerir el uso de procedimientos operativos que garanticen un riesgo mínimo en cuanto a la seguridad del personal y la recuperación de las reservas, entre otras cosas:

- La aplicación coherente de la voladura controlada efectiva
- control de excavación y escalado de superficies
- Apoyo artificial

También puede ser necesario considerar el impacto potencial en los factores de producción, tales como la tasa de extracción y la eficiencia de la excavación. La aplicación de soporte artificial, ya sea como parte del diseño o para estabilizar una pendiente móvil, se ha utilizado durante varias décadas. A escala de banco, se utilizan pernos de roca, malla, hormigón proyectado, correas y tacos para asegurar la estabilidad o reducir la degradación de las caras. Estos métodos se han adaptado en gran medida del entorno de la minería subterránea, donde la tecnología está bien desarrollada.

Sin embargo, la longitud práctica de 30 m de cables es una restricción importante y ha habido varios casos cerca del límite en los que el apoyo simplemente ha actuado para unir una masa mayor, que posteriormente fracasó.

#### 2.4.7.5 Gestión de riesgos

El factor de determinación de la seguridad, que se originó en el campo de la mecánica de suelos, es el criterio tradicional y ampliamente practicado para el diseño de taludes. Sin embargo, el concepto de probabilidad en un sentido geotécnico no es fácil de entender

por personas no técnicas. Con la creciente necesidad de que la dirección participe en el proceso de toma de decisiones para el diseño de los taludes, se ha desarrollado un requisito para la cuantificación de los riesgos.

Para abordar este problema, se han aplicado procesos de evaluación y gestión de riesgos a los diseños de taludes. Los métodos de evaluación de riesgos van desde el análisis cualitativo de modos de falla y efectos hasta el análisis cuantitativo detallado de riesgos/consecuencias, dependiendo del nivel de definición que prefieran la dirección, los reguladores o los profesionales.

#### 2.4.8 Cierre

La estabilidad durante el proceso de cierre, por ejemplo mientras se está formando el lago del tajo, También podría ser un tema que requiere consideración y monitoreo continuo, particularmente si la estabilidad de los taludes se ha logrado a través de un programa activo de despresurización de taludes. En este caso, la rápida represurización de los taludes en relación con la formación del lago podría provocar la inestabilidad de las paredes. Por lo general, esto se puede evitar manteniendo el sistema de despresurización hasta que se establezca el equilibrio.

Se puede esperar que el monitoreo de la estabilidad de los taludes continúe durante el cierre inicial y, en muchos casos, de manera continua después del cierre, particularmente si el público tiene acceso al área de tajo abierto.

### 2.5 Formulación de hipótesis

#### 2.5.1 Hipótesis general

El mejoramiento del proceso constructivo influye significativamente en el corte de taludes en tajo abierto, Mina Rosarina, Yauli – Junín

## 2.5.2 Hipótesis específicas

- a) Los parámetros geotécnicos y geomecánicos influyen en los taludes de la mina de tajo abierto
- b) La estabilidad de taludes influye a nivel banco, ángulos interrampa y ángulos globales en condiciones estáticas y pseudo estáticas.
- c) El diseño de taludes influye en el mejoramiento del proceso constructivo de corte de taludes.

## 2.5.3 Variables

### 2.5.3.1 Definición conceptual de las variables

- **Variable Dependiente:**

Proceso constructivo: Es el conjunto de procedimientos consecutivos que se debe de seguir al momento de realizar cualquier tipo de infraestructura o proyecto minero, estos procedimientos se deben de hacer de forma eficiente y organizada para ahorrar tiempo y dinero.

- **Variable Independiente:**

Corte de taludes en tajo abierto: Es el corte de cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal de una mina y se desarrollan a partir de la superficie del terreno continuando con la excavación hasta lograr encontrar la beta, con medios mecánicos o con explosivos

### 2.5.3.4 Operacionalización de las variables

En la tabla 13 mostramos nuestras Variables dependientes y variable independientes

Tabla 13: *Operacionalización de las variables*

<b>Variables</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Definición Conceptual</b>	<b>Definición Operacional</b>
<b>Variable Dependiente: Proceso Constructivo</b>	D1: Topografía	Levantamientos Topográficos y altimétricos	Ensayo en campo	Ensayo en campo
		Replanteos y cubicaciones	Ensayo en campo	Ensayo en campo
	D2: Recolección de datos de campo	Mapeo y registro de afloramientos	Cartografía	Cartografía
		Registro de suelos sobrecargados	Capacidad portante	RMR, Bieniawski
<b>Variable Independiente: Corte de taludes en tajo abierto</b>	D3: Análisis de estabilidad	Diseño del talud con el software Autocad y Slide	Modelamiento de talud	Modelamiento de talud
		Análisis de datos	Parámetros Geomecánicos	Calicatas
	D4: Elección del proceso constructivo	Cortas	Método minero	Método minero

Fuente: Propia

## **CAPITULO III: DISEÑO METODOLÓGICO**

### 3.1 Tipo y nivel

#### 3.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación según las condiciones metodológicas es de tipo aplicado con un enfoque cuantitativo porque se utilizaron los conocimientos de las Ciencias geológicas, Geotécnicas y de la ingeniería por software, a fin de aplicarlas en los diseños y analizar la estabilidad de taludes en tajo abierto.

#### 3.1.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación es descriptivo, porque está orientada a la descripción a las características particulares de los hechos o problemáticas al momento en que se quiere explorar una mina de taludes muy altos.

### 3.2 Diseño de investigación

El diseño empleado en la investigación es cuasi experimental, debido a que solo se ha tomado la propuesta del mejoramiento de proceso constructivo para el corte de taludes de la Mina Rosarina.

### 3.3 Población y muestra

#### 3.3.1 Población

La población para la investigación corresponde al área total que conforman las 100 hectáreas de la Mina Rosarina, Santa Rosa de Sacco, distrito de Yauli, región Junín

### 3.3.2 Muestra

El muestreo de estudio es de tipo intencional. El alcance muestral cubre el análisis de 1 sector del talud del tajo.

### 3.4 Técnicas de recolección de datos

#### 3.4.1 Tipos de técnicas e instrumentos

Técnicas para su topografía: Hacer el levantamiento topográfico del sector a investigar, utilizando los instrumentos como: Estación total, prisma, brújula, Gps, Software AUTOCAD, con el fin de hallar curvas de nivel.

Técnicas de información: Tomar muestras de rocas por cada capa diferente del talud, para después llevarlo al laboratorio y poder hallar los parámetros geomecánicos de la roca. De las excavaciones a profundidades hechos con excavadoras de la minera se observara la geología del talud.

#### 3.4.2 Criterio de validez y confiabilidad de los instrumentos

Los criterios de validez y confiabilidad estarán sujetos a la necesidad del estudio de investigación.

#### 3.4.3 Técnicas para el procesamiento y análisis de datos

- Obtener las curvas de nivel del mapeo de afloramientos en la mina
- Analizar las discontinuidades mayores y menores del macizo rocoso
- Determinar los parámetros geomecánicos y geotécnicos de los ensayos para la introducción del modelamiento al programa Slide.
- Modelamiento del talud en AUTOCAD
- Diseñar y analizar la estabilidad de taludes del tajo



#### 4.1.3 Ubicación geográfica:

Latitud: 11° 34' 0" Sur

Longitud: 75° 57' 23" Oeste

Altitud: 4014 m.s.n.m

#### 4.1.4 Clima

El clima es polar porque se encuentra a varios metros sobre el nivel del mar, siendo sus temporadas de extremo friaje en los meses de noviembre a marzo donde la temperatura se encuentra en los 10 °C por el día y a menos de 0°C por las noches.

#### 4.2 Corte del talud sin diseño

Para lograr la extracción del mineral no metálico en la mina actualmente se está trabajando por el método observacional, realizando voladuras con la utilización de maquinarias pesada (compresora, perforadora y martillo hidráulica) y para las excavaciones, excavadoras sobre oruga (ver Figura 30).



Figura 30: Extracción de la materia prima con el martillo hidráulico

Fuente: Elaboración Propia

### 4.3 Topografía de la zona de estudio

Para determinar la topografía de la zona de estudio, se realizó el levantamiento topográfico para luego importar los puntos del talud en AutoCAD, con los equipos necesarios (estación total, mira, jalones, brújula, nivel) donde se observa la separación de capas en el talud. Se ha concluido que la topografía del tajo es montañoso por que más del 30% de pendiente suben y bajan.

Por la continua extracción del mineral no metálico que se va generando pendientes más relevantes a su topografía natural (ver Figura 31 y 32).

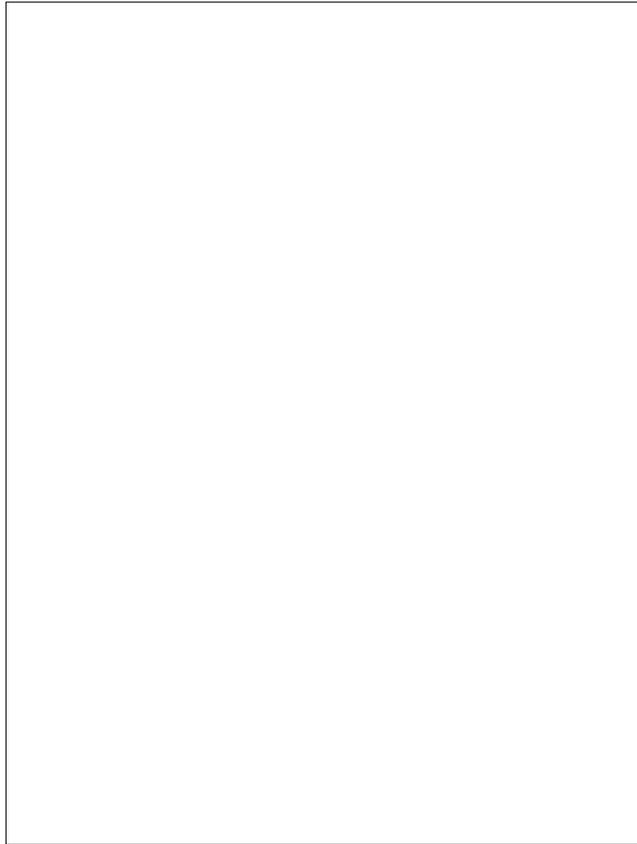


Figura 31: Levantamiento topográfico de la zona de estudio

Fuente: Elaboración Propia

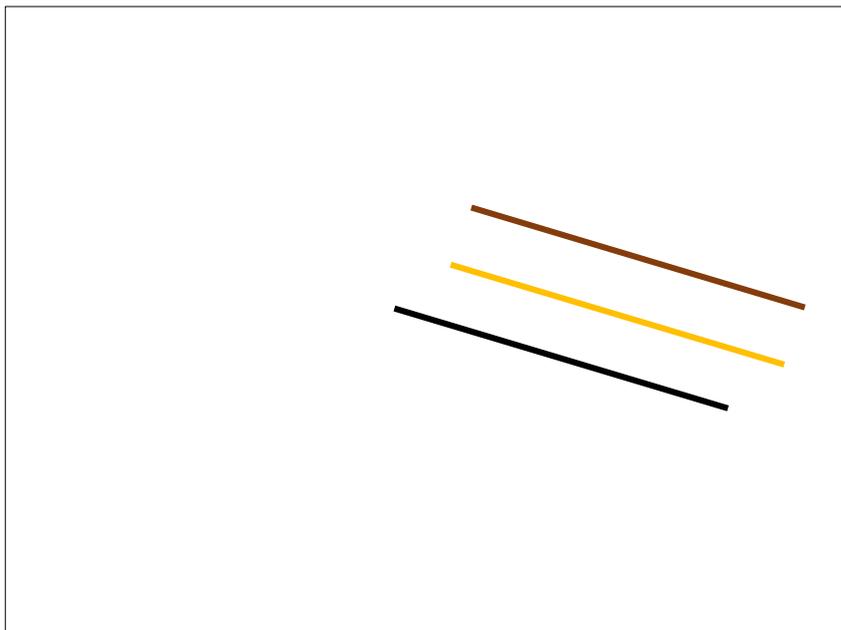


Figura 32: Observación de estratos

Fuente: Elaboración propia

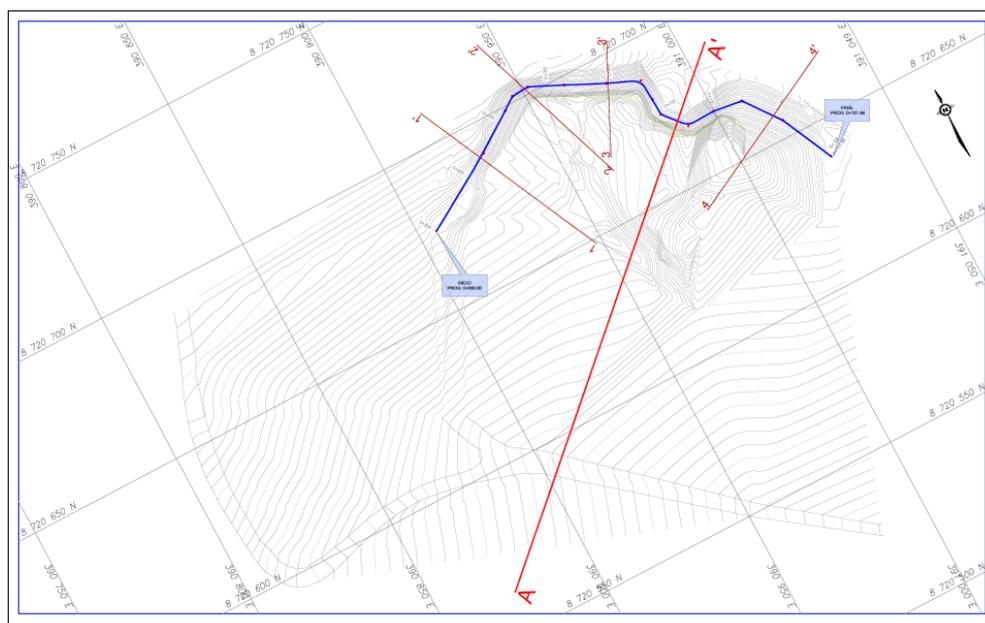


Figura 33: Levantamiento topográfico en planta de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia – AutoCAD 2018

En la figura 33 se muestra las curvas de nivel de la zona correspondiente a su levantamiento topográfico, ahí la cuadrícula nos también nos permite obtener la orientación del norte y la ubicación de los puntos importantes mediante por coordenadas.

#### 4.4 Modelo geológico

##### 4.4.1 Reconocimiento

Según la geología regional por INGEMMET en la carta geológica nacional, cuadrángulo 24-k, el área del presente estudio está conformada por secuencias calcáreas asignadas a una edad Cretáceo superior (Formación Jumasha) con una edad Cretáceo superior al Paleógeno (Formación Casapalca), siendo el depósito asignado al holoceno los materiales fluvio-glaciales (ver figura 34).

Formación Jumasha (Ks-j): Comprende desde su base calizas y dolomías macizas, pobres en materia orgánica y Cher, seguido en su parte media por calizas en estratos delgados de

color gris amarillento algo margoso, y en la parte superior las calizas marrones intercalan entre estratos delgados a gruesos.

Formación Casapalca (KsP-ca): Representada por una alternancia de areniscas, limoarcillitas de tonos rojizos y conglomerados.

Depósitos Fluvioglaciales (Qh-fl): Son acumulaciones de material heterométricos y polimíctico asociados a las márgenes del río Yauli

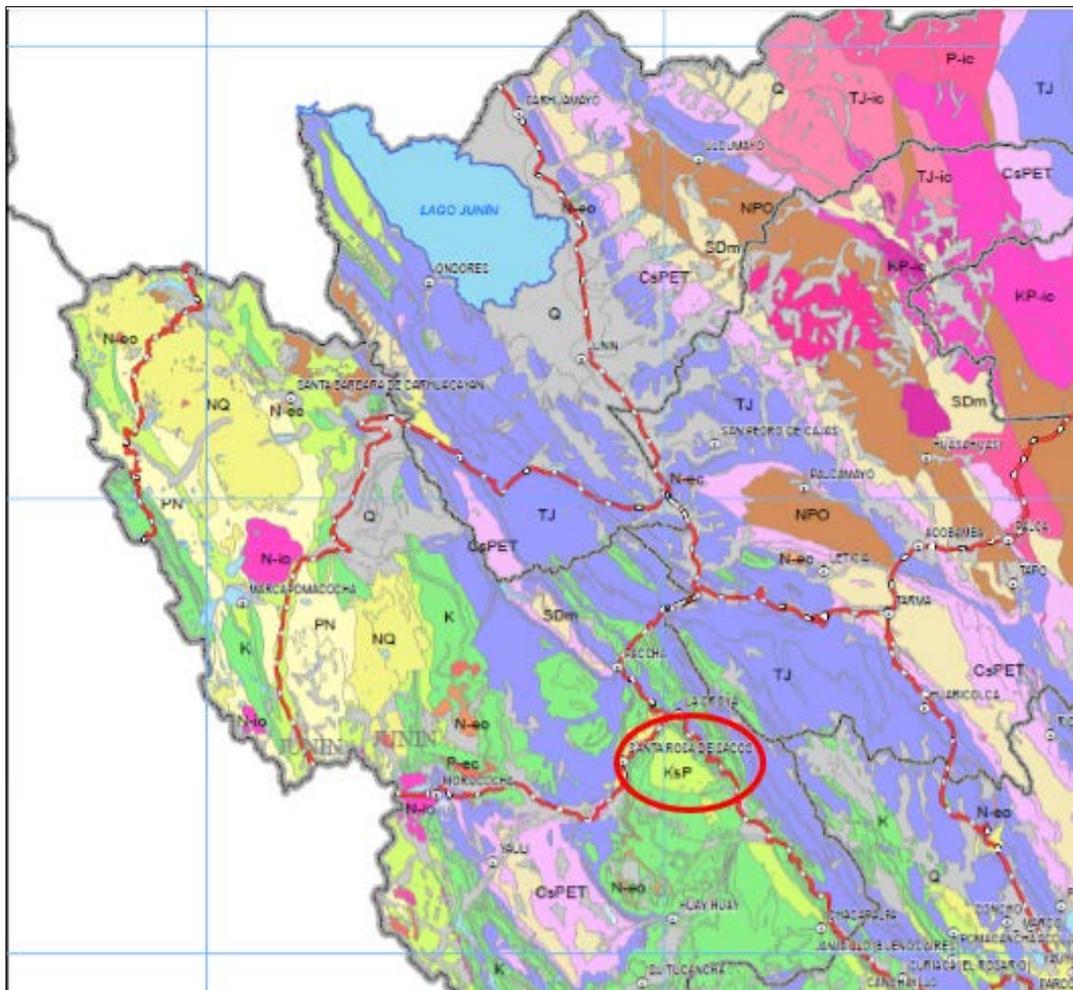


Figura 34: Mapa Geológico de Junín

Fuente: Instituto Geológico minero y metalúrgico, 2017

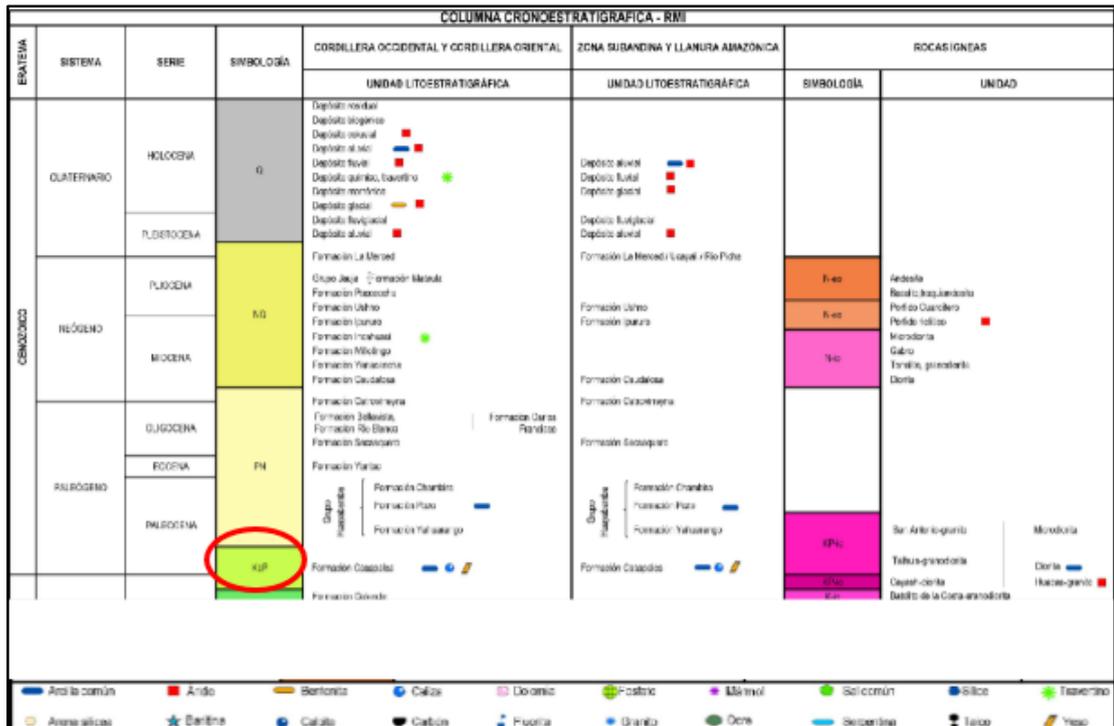


Figura 35: Columna cronoestratigráfica – (Rocas y minerales industriales) RMI

Fuente: Instituto Geológico minero y metalúrgico, 2017

#### 4.4.2 Mapeo geológico

Macizo del 390+044 conformado por roca caliza de la formación Jumasha y Casapalca de la Era Cenozoico y Mesozoico para las 3 capas que se encuentran por encima del yeso piedra.

#### 4.4.3 Mapeo geotécnico

Se realizó el mapeo geotécnico por líneas de detalle, determinando que el macizo tiene discontinuidades poco persistentes del tipo planar sistemática de la familia de juntas J1 o diaclasas con poco espaciado (ver figura 36).

Equipo utilizado para el mapeo geotécnico:

- Brújula geológica Brunton
- Cinta métrica de 10 metros
- Spray de pintura
- Martillo geológico
- Cámara fotográfica
- Regla plegable de 2m de longitud (graduada en milímetros).



Figura 36: Mapeo geomecánico por líneas de detalle de la cara del talud

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.3.1 Tipo de discontinuidades

Por la observación in situ se determinó la existencia de discontinuidades planares sistemáticas de juntas o diaclasas divididas en 3 familias: 2 familias de juntas con apertura menor a 10 mm y 1 familia de juntas mayor a 10 mm, con sus iguales a sus respectivos ángulos de buzamiento y dirección de buzamiento permitirán el análisis cinemático

#### 4.4.3.2 Orientación de discontinuidades

Con la metodología recomendada por la Sociedad Internacional de Mecánica de rocas (ISMR) para describir el macizo rocoso y el uso de la brújula Brunton mediremos el buzamiento y dirección de buzamiento de las 3 estaciones geomecánicas.

En la tabla 14 se muestra las mediciones tomadas en campo de las estaciones geomecánica.

Tabla 14: *Ángulos de Buzamiento y Dirección de Buzamiento*

<b>ESTRUCTURA</b>	<b>ALTURA (m)</b>	<b>Az (°) PROMEDIO</b>	<b>Buzamiento (°) PROMEDIO</b>	<b>Dirección de buzamiento (°) PROMEDIO</b>
Talud	15.00	240	59	060
Familia Junta 1	.-	.-	52	334
Familia Junta 2	.-	.-	56	138
Familia Junta 3	.-	.-	21	265

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.3.6 Coeficiente sísmico

Para efecto de análisis pseudo estático se ha considerado un tercio del factor de la zona sísmica, de acuerdo a su ubicación la mina se encuentra en una zona sísmica 3 con un factor de zona o aceleración máxima horizontal de 0.35 y el tiempo de retorno será de 475 años según lo establecido en la Norma E 030.

### 4.5 Modelo estructural

#### 4.5.1 Fallas

No existen fallas Neotectónicas (activas) en los 50 km que representan el tramo del presente trabajo de investigación, pero si existen fallas tectónicas (inactivas) que

requieren un tratado especial en el caso de la ocurrencia de un sismo por la aceleración y el movimiento del terreno. El talud estudiado no está afectado por fallas.

#### 4.5.2 Entorno geológico-Rocas Metamórficas

Afloramiento de roca caliza de color beis, amarillento y color gris y yeso piedra en la base.

#### 4.6 Modelo del macizo rocoso

##### 4.6.1 Muestreo de rocas

Con el objetivo de determinar los parámetros de propiedades físicas y de resistencia a la compresión uniaxial de los materiales, se ha retirado muestras de los diferentes estratos que conforman el talud, iniciando en la corona del talud hasta llegar a la base del mismo. Se tomaron medidas de las diferentes potencias de los estratos considerando medidas relativas, siendo la corona del talud la posición 0.00 m, después se ha colocado los materiales en bolsas plásticas etiquetándolos (ver Figura 37 y 38). Asimismo se logró obtener muestras cúbicas inalteradas con medidas de 20x20x20 cm como lo requiere el ensayo de compresión uniaxial (ver Figura 39).



Figura 37: Muestra representativa del estrato 1

Fuente: Elaboración propia



Figura 38: Muestra representativa del estrato 2

Fuente: Elaboración propia

Figura 39: Muestra cúbica representativa del estrato 2

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6.2 Propiedades índices

De la toma de muestra se obtuvo la muestra de la roca representativa del talud con un corte mayor a los 20x20x20 cm (ver Tabla 15 y 16).

Tabla 15: *Propiedades físicas de la roca*

ITEM	ENSAYO	NORMA
1	Determinación de las propiedades físicas de roca (porosidad, densidad y absorción)	ASTM D2937

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: *Resultados de las propiedades físicas de la roca*

Zona	Litología	Peso Específico	Absorción (%)	Porosidad (%)
M - 1	Caliza beis	2.7	1.06	1.05
M - 2	Caliza amarillenta	2.68	1.12	1.11
M - 3	Caliza gris	2.73	1.26	1.24

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6.3 Propiedades mecánicas

De los resultados de la resistencia de la compresión Uniaxial se obtiene las propiedades mecánicas (ver tabla 17 y 18).

Tabla 17: *Propiedades mecánicas de la roca*

ITEM	ENSAYO	NORMA
1	Resistencia a la Compresión Uniaxial	ASTM D2938-95

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18: *Resultados de las propiedades mecánicas de la roca*

Muestra 1	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga de rotura (KN)	Resistencia a la compresión uniaxial (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión uniaxial (MPA)
M-1	4.41	9.14	322.4	2162	212
M-2	4.40	10.01	315.2	1820	178
M-3	4.04	9.05	312.4	1250	122.58

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6.4 Clasificación del macizo rocoso utilizando el GSI de Hoek

De la observación en campo se identificó en la tabla GSI, la clasificación cualitativa y valoración cuantitativa, obteniéndose los siguientes resultados

Tomando en consideración la tabla 10, La estructura se encuentra como Bloques y Capas (BC) y es equivalente a un macizo rocoso persistente en estratificación y esquistosidad. La condición del macizo rocoso es equivalente a MUY BUENA (B) con superficies muy rugosas, superficies frescas sin alterar, se tiene que el valor medio del GSI es equivalente a 70.

#### 4.6.5 Parámetros de diseño

##### 4.6.5.1 Ensayo de resistencia compresión Uniaxial:

El ensayo para la muestra 1 se realizó en el laboratorio de mecánica de rocas de la UNI y los ensayos siguientes se hicieron en laboratorios particulares, los resultados que se obtuvieron se encuentran en el rango de dureza de 100-250 MPa (véase tabla 18) son rocas muy fuertes (R5), la muestra requiere de muchos golpes del martillo geológico para ser fracturada, en el caso de muestras 2 y 3 se ha trabajado con datos de informe de ensayos cerca de la zona, en los resultados se indica que son rocas muy fuertes aunque menores a la resistencia de los estratos.

Para la muestra 4, la materia prima que en este caso es el yeso piedra sus parámetros son:

- Peso específico = 2.06 gr/cm<sup>3</sup>
- Resistencia a la compresión = 35 kg/cm<sup>2</sup>
- $C = 0.1 \text{ Mpa}$ ,  $\phi = 35^\circ$ .

Determinación de parámetros geotécnicos con el programa Rocklab:

**GSI:** Sistema para la estimación de las propiedades geomecánicas del macizo rocoso a partir de observaciones geológicas de campo tomando en consideración tabla 9 y 10 es igual a 50.

**m:** variable que asume el valor de 10 del software que corresponde a calizas y el tipo de roca a sedimentarias Duncan 2004.

**D:** valor asumido de 1 para taludes debido a que se utiliza voladura y excavaciones y el talud es un macizo rocoso con alteraciones

**Ei:** el módulo de elasticidad para la caliza sedimentaria.

**Peso Unitario:** Del ensayo de propiedades físicas de rocas se ha obtenido:

#### 4.7 Modelo Hidrogeológico

Para las grandes precipitaciones en los meses de noviembre a febrero su alta permeabilidad del material base como lo es el yeso, origina un rápido drenaje del agua.

El yeso evita los fenómenos de condensación superficial y la humectación de las paredes del talud gracias a su poder de absorción. Su estructura le permite acumular gran cantidad de agua cuando la concentración de la misma en el ambiente es alta y devolverla cuando se reseca el ambiente.

Según las características litológicas:

Acuíferos fisurados y/o kársticos: Tipo de rocas que presentan diaclasas, fracturación y/o disolución (rocas ígneas, metamórficas, detríticas bien consolidadas). Poseen permeabilidad debido a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución.

#### 4.8 Modelo geotécnico

El talud estudiado es predominantemente un afloramiento caliza con sus claras y bien definidas múltiples discontinuidades persistentes por lo que sólo no se puede sectorizar por familias de discontinuidades que dan anisotropía del macizo, superficies frescas sin alterar, por lo tanto, las discontinuidades están agrupadas por el buzamiento y la dirección de buzamiento y no siempre son idénticas.

Para el diseño y análisis de la estabilidad del talud en estudio se tomó en cuenta toda la información conseguida en las anteriores.

##### 4.8.1 Análisis cinemático

Buscamos el mecanismo de rotura por medio del análisis cinemático utilizando el programa Dips



## Rotura por vuelco flexural

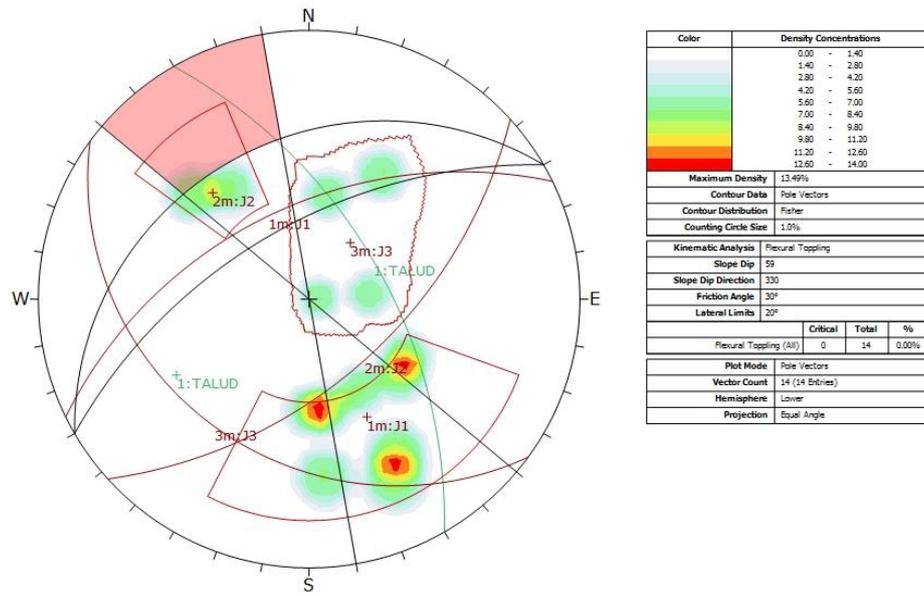


Figura 42: Estereograma de rotura por vuelco

Fuente: Elaboración propia

No existen roturas por vuelco

## **CAPÍTULO V: PROPUESTA O APLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

### 5.1 Antecedentes

En la actualidad la extracción de los minerales no metálicos como son el: yeso, arcilla, carbonatos de calcio, talco, baritina, sílices, etc., no tienen un sistema constructivo adecuado de cortes de talud, realizan su trabajo empíricamente, realizando cortes de talud con grandes alturas y ángulo mínimos, sin tener en cuenta el tipo de suelo y roca, pudiendo causar deslizamientos y caída de rocas, causando pérdidas humanas y pérdidas materiales.

Esta tesis de investigación propone un mejoramiento en su proceso constructivo para el corte de taludes en mina de tajo abierto, proponiendo las siguientes partidas.

### 5.2 Sistema de seguridad e identificación de riesgos.

Se realizó la identificación de todas las etapas y sus riesgos que involucran cada partida que se realiza para la extracción del yeso en la mina rosarina, como se muestra a continuación:

### 5.3 Estudio de suelos y de rocas:

Se realizaron Calicatas para identificar los tipos de suelos y de rocas en la área de la concesión minera, para ello se excavaron calicatas de profundidad de 10 m a 15 m de altura y 1 m de ancho (ver Figura 43).

Las calicatas se realizaron con una excavadora sobre oruga, donde se realizó 6 calicatas en diferentes puntos abarcando las 100 hectáreas de la concesión (ver Tabla 19).

Tabla 19: *Relación de calicatas*

Nº CALICATA	COORDENADAS		DESCRIPCIÓN
	WGS 84		
	NORTE	ESTE	
1	8723646.8	388880.38	ARENISCA, CALIZA, CALCITA Y YESO A 10 METROS
2	8723680.1	388966.12	ARENISCA, CALIZA, CALCITA Y YESO A 15 METROS
3	8723837.3	389117.36	ARENISCA, CALCITA
4	8723687.8	388999.76	CALIZA
5	8723633.8	388826.68	CALIZA
6	8723796.5	389087.87	CALIZA

Fuente: Elaboración propia

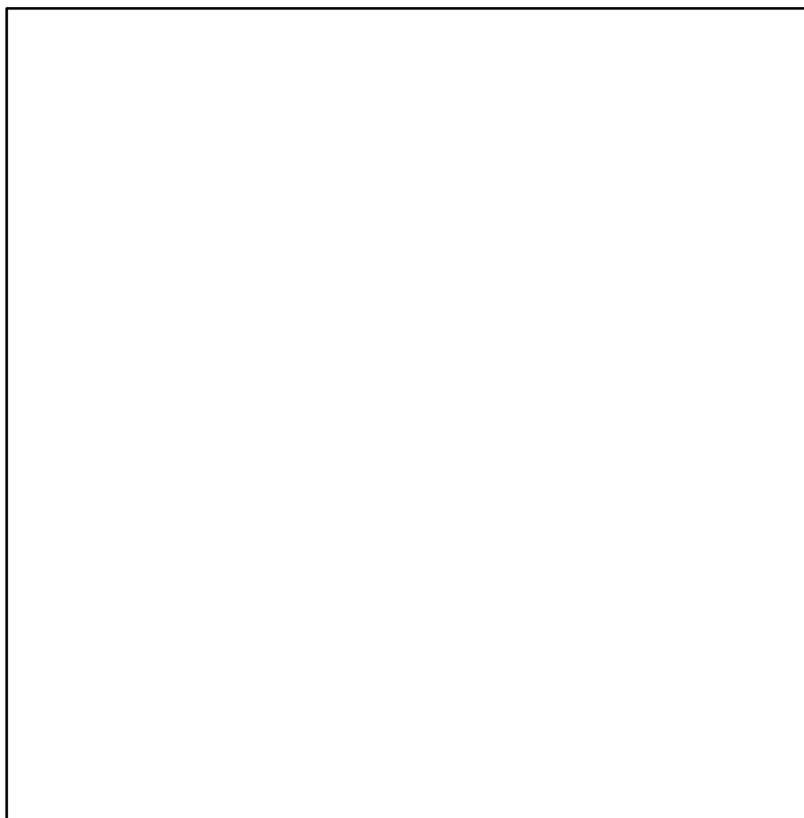


Figura 43: Excavación de la calicata

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4 Identificación de suelos y rocas

Se identificó los tipos de rocas que existen en talud, para luego obtener su dureza en el laboratorio y obtener los parámetros para el diseño del tajo (ver Figura 44).

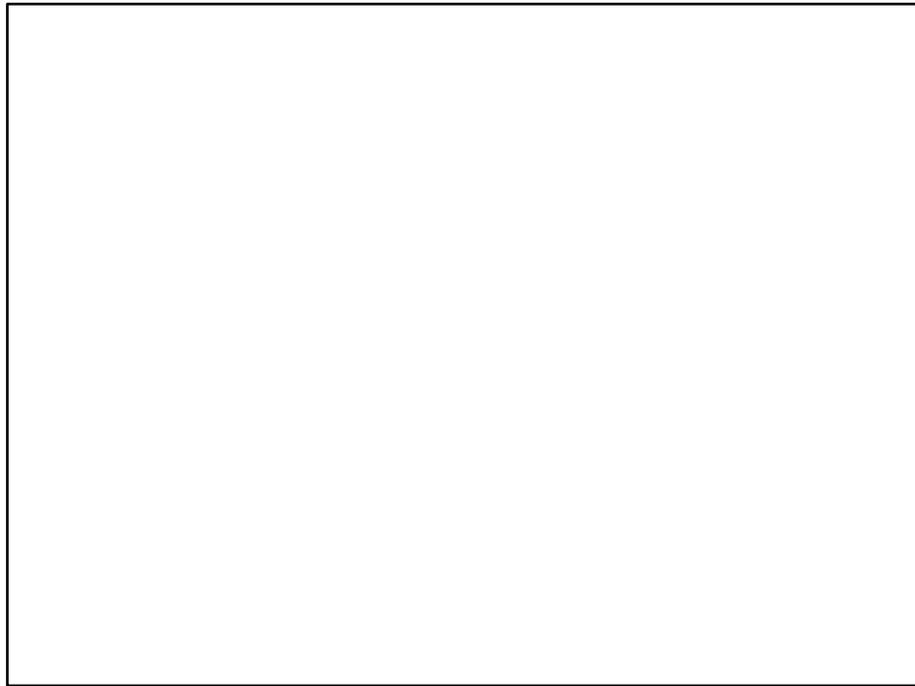


Figura 44: Estratificación del talud

Fuente: Elaboración propia

#### 5.5 Inicio de corte de talud según diseño

Luego de obtener los parámetros de diseño, y modelarlo en el programa Slide. Se obtuvieron los datos para nuestro diseño de corte en bancos:

Altura de banco = 10 m

Ángulo de banco =  $60^\circ$

Ancho de berma = 3.5 m

Ancho de rampa = 5 m

Con estos datos se da el inicio para el corte de talud con la maquinaria pesada y el personal capacitado para la realización de esta partida. Realizando el corte desde parte superior hacia la parte inferior del talud con una excavadora para el corte de talud y volquetes de 15 m<sup>3</sup> para el desmonte que se lleva aun botadero ubicado a 800 metros del tajo abierto. Realizando cortes en bancos de 10 metros de altura y un ángulo de 60° de inclinación, hasta llegar a la parte de la extracción del mineral no metálico (ver Figura 45 y 46),



Figura 45: Inicio del corte de talud según el diseño

Fuente: Elaboración propia



Figura 46: Continuación del corte de talud según resultados del diseño del tajo

Fuente: Elaboración propia

## 5.6 Mejoramiento de la señalización y sistema de seguridad

- Se realizó charlas de seguridad al personal que opera la maquinaria pesada y al personal encargado de la extracción.
- Señalización de toda la mina Rosarina.
- Identificación de riesgos in situ.

## CAPÍTULO VI: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 Resultados de la investigación

#### 6.1.1 Obtención de los Parámetros Geotécnicos (ver figura 47):

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Phi	Water Surface	Ru
CALIZA BEIS		26.49	Mohr-Coulomb	39.53	45.1	None	0
CALIZA AMARILLENTO		26.29	Mohr-Coulomb	34.92	42.3	None	0
CALIZA GRIS		26.78	Mohr-Coulomb	27.27	44	None	0
YESO PIEDRA		20.17	Mohr-Coulomb	5.5	35	None	0

Figura 47: Parámetros Geotécnicos del talud

Fuente: Elaboración propia

#### 6.1.2 Obtención de los parámetros geomecánicos

Tomando en consideración la figura 47, la estructura se encuentra como de Bloques y Capas (BC) es equivalente a un macizo rocoso persistente en estratificación y esquistosidad y el valor del GSI es 70. La muestra requiere de muchos golpes del martillo geológico para ser fracturada por lo que la roca es de muy fuerte y es de grado R5.

### 6.2 Análisis e interpretación de los resultados

#### 6.2.1 Análisis de los parámetros geomecánicos del macizo rocoso

- La condición del macizo rocoso es equivalente a MUY BUENA (B) con superficies muy rugosas, superficies frescas sin alterar.
- La calidad de la roca en relación al valor RQD se encuentra entre el rango de 90-100%, la roca es muy buena.

- De acuerdo a la tabla de los criterios de aceptación para la estimación de resistencia del material se ha determinado que se encuentra en el rango de 100-250, se considera de grado R5.

### 6.2.2 Análisis de estabilidad por el método de equilibrio limite

Luego de introducir los parámetros de clasificación de las rocas en el Rocklab y obtener los parámetros geotécnicos se analizara la estabilidad del talud como se encuentre en campo con el software SLide utilizando el criterio de Hoek-Brow y utilizando el postulado de Spencer. Para estos análisis hemos tomado dos secciones transversales del corte A-A' del talud, demostrando que el valor del factor de seguridad cumpla con el valor establecido en la tabla N° 12.

#### a) Condición estática

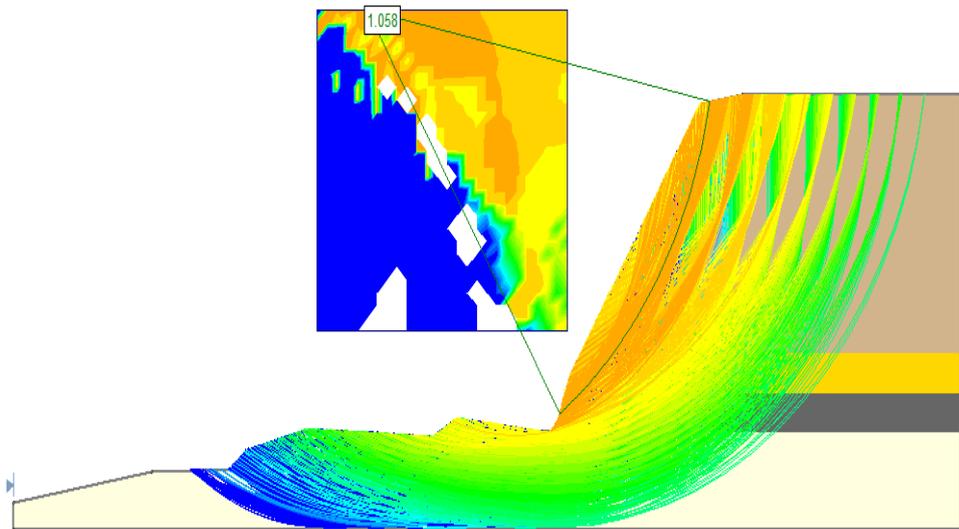


Figura 48: Modelamiento y análisis estático de la sección 2-2'

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 48 se muestra que el FS de la sección transversal 2-2 no cumple con el mínimo requerido,  $FS < 1.5$  por lo tanto es inestable.

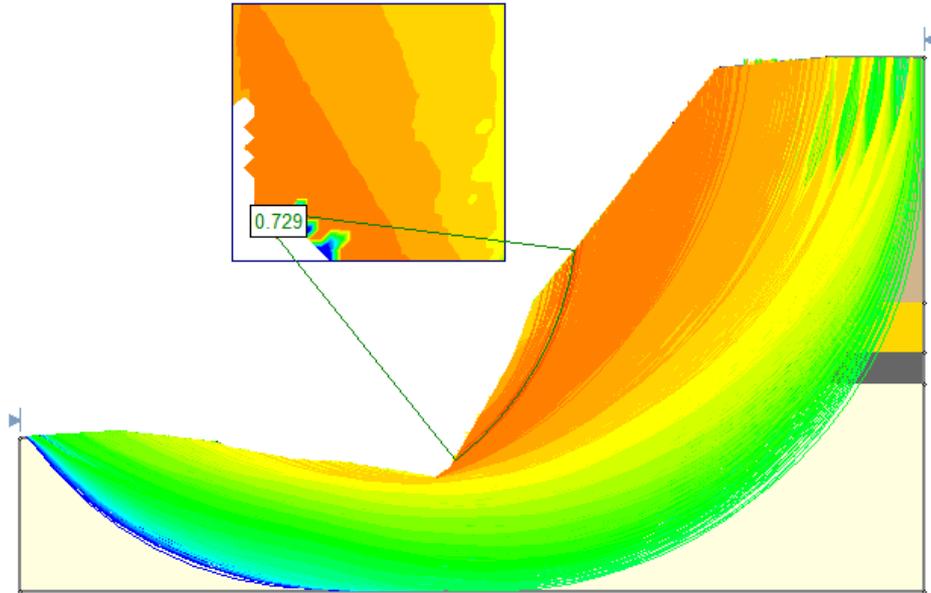


Figura 49: Modelamiento y análisis estático de la sección 3-3'

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 49 se muestra que el FS de la sección transversal 3-3 no cumple con el mínimo requerido,  $FS < 1.5$  por lo tanto es inestable.

b) Condición pseudo estática:

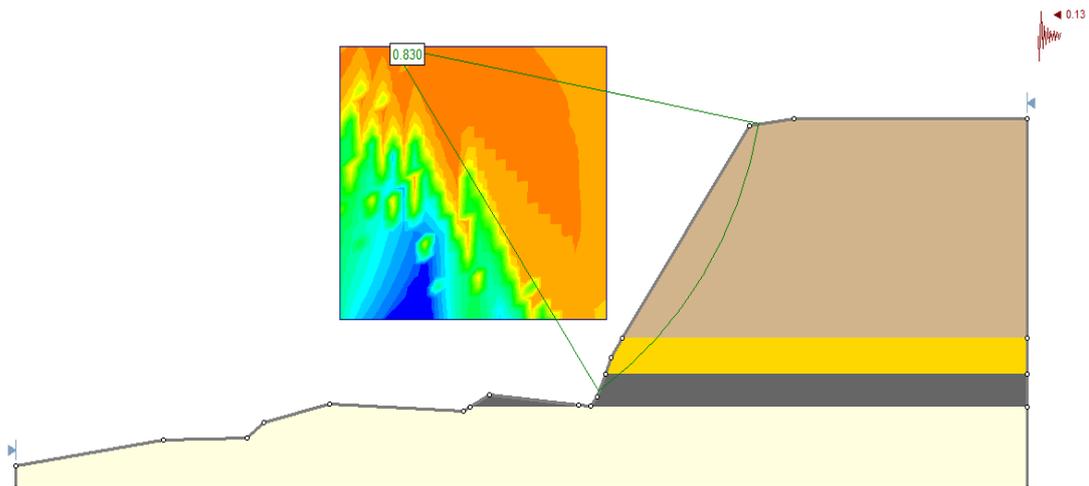


Figura 50: Modelamiento y análisis pseudo estático de la sección 2-2'

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 50 se muestra que el FS de la sección transversal 2-2 no cumple con el mínimo requerido,  $FS < 1$  por lo tanto es inestable.

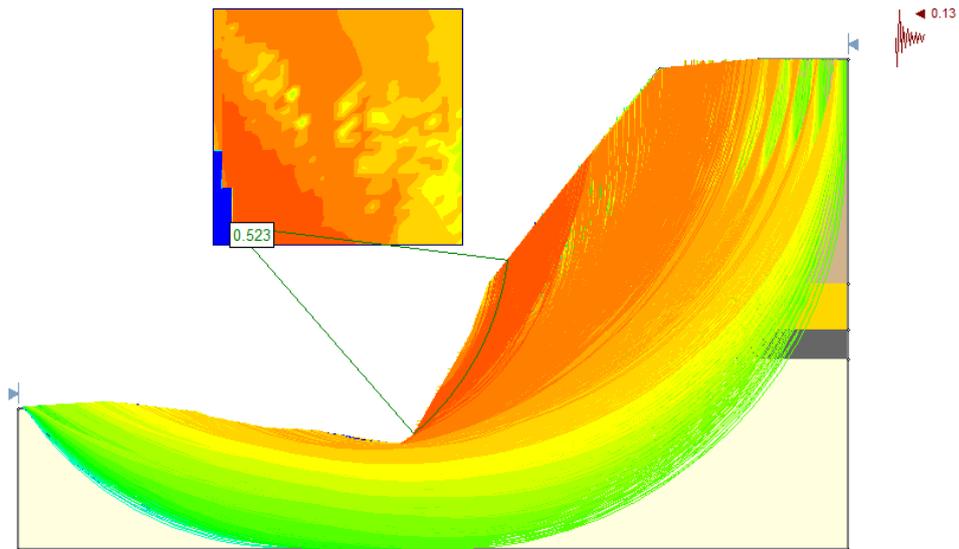


Figura 51: Modelamiento y análisis pseudo estático de la sección 3-3'

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 51 se muestra que el FS de la sección transversal 3-3 no cumple con el mínimo requerido,  $FS < 1$  por lo tanto es inestable.

### 6.2.3 Diseño del talud con bancos:

Al no cumplir los factores de seguridad del talud como se encuentra en campo, se realiza un nuevo análisis de estabilidad creando un modelo por bancos con parámetros de diseño que se requiere para el diseño de taludes de tajo abierto, y se continúa con el mismo procedimiento para su análisis de estabilidad. Los parámetros de diseño que se ha tomado para dibujar el modelamiento de tajo abierto son:

Altura de banco = 10 m

Ángulo de banco =  $60^\circ$

Ancho de banco = 3.5 m

Ancho de rampa = 5 m

a) Condición estática

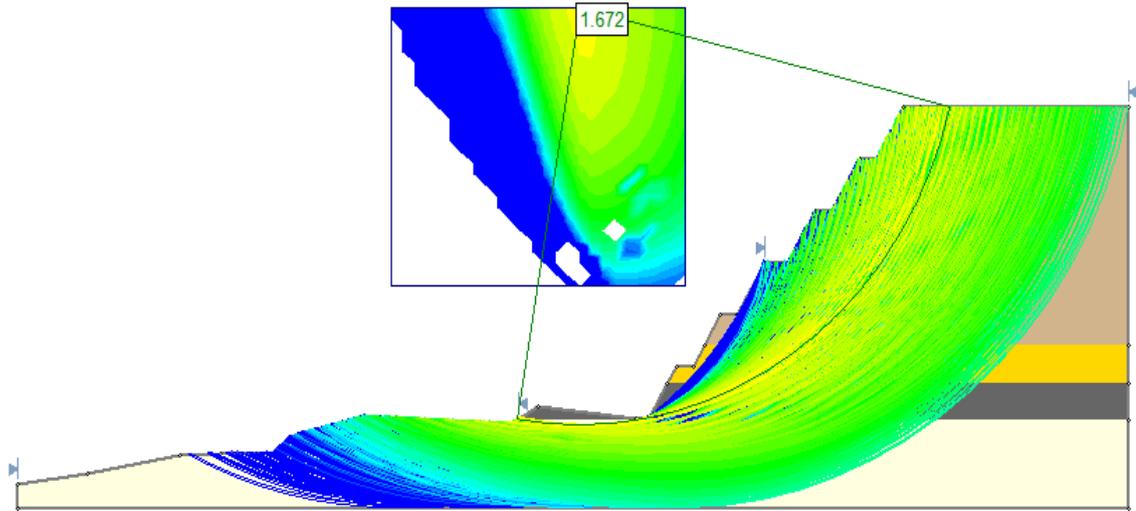


Figura 52: Modelamiento en bancos y análisis estático de la sección de 2-2'

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 52 se muestra que el FS de la sección transversal 2-2 si cumple con el mínimo requerido,  $FS > 1.5$  por lo tanto es inestable.

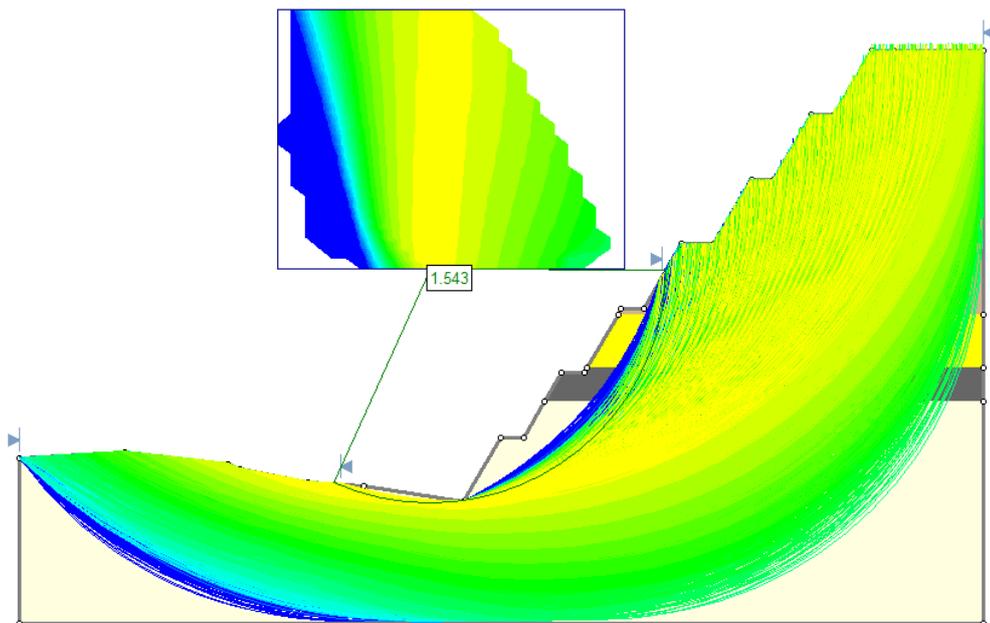


Figura 53: Modelamiento en bancos y análisis estático de la sección de 3-3'

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 53 se muestra que el FS de la sección transversal 3-3 si cumple con el mínimo requerido,  $FS > 1.5$  por lo tanto es inestable.

b) Condición pseudo estática:

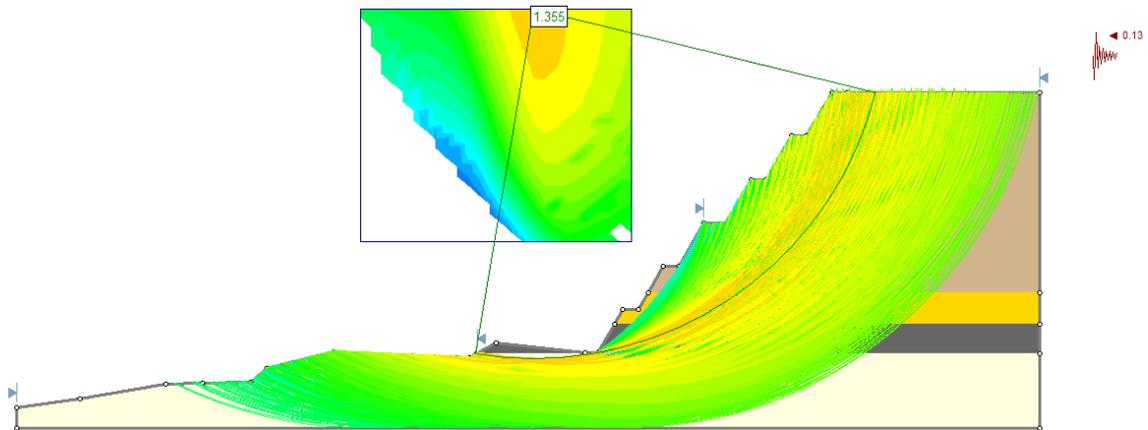


Figura 54: Modelamiento en bancos y análisis pseudo estático de la sección de 2-2'

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 54 se muestra que el FS de la sección transversal 2-2 si cumple con el mínimo requerido,  $FS > 1$  por lo tanto es inestable.

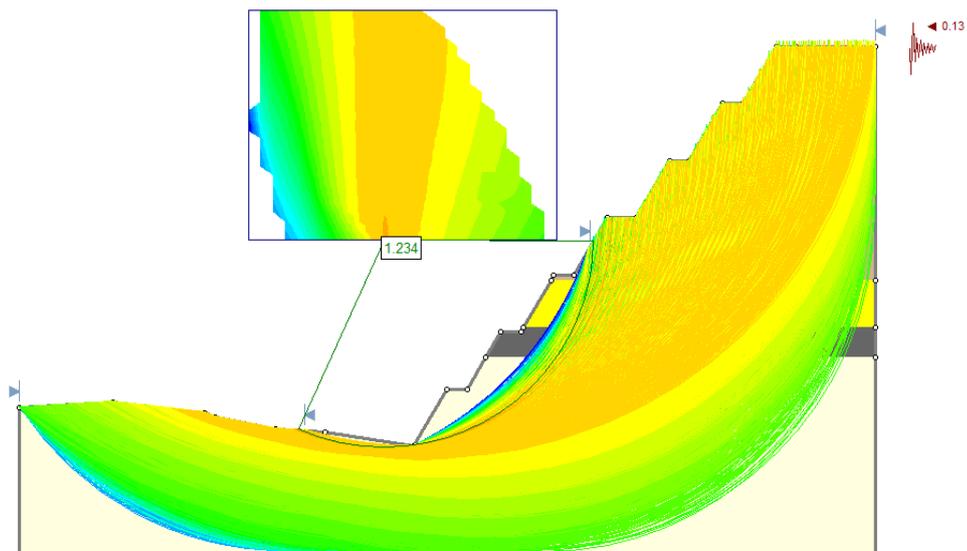


Figura 55: Modelamiento y análisis pseudo estático de la sección de 3-3'

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 55 se muestra que el FS de la sección transversal 3-3 si cumple con el mínimo requerido,  $FS > 1$  por lo tanto es inestable.

### 6.3 Contrastación de hipótesis

- Al realizar los cortes del talud con la excavadora y el martillo hidráulico, la forma de excavar para encontrar el mineral no metálico no sigue un procedimiento recomendado, para mejorar la extracción del mineral se debe tener un conocimiento técnico de los lineamientos de diseño de tajo por bancos y lograr que la excavación sea segura.
- De los ensayos de resistencia de compresión uniaxial se determinó los parámetros geomecánicos que básicamente son propiedades importantes para la distinción del tipo de roca y la determinación de los parámetros geotécnicos que luego será necesario para determinar la estabilidad de taludes.
- Al determinar la estabilidad del talud actual resultado no ser estable por el factor de seguridad menor a lo requerido para rocas, ya modificando al modelo del diseño del talud por bancos se logró obtener el análisis de estabilidad a nivel banco con un factor de seguridad que cumple con lo requerido.
- Con el diseño de tajos por bancos el proceso de cortes de taludes mejorara ya que se tendrá una idea más clara del corte y se hará técnicamente más fácil.

## CONCLUSIONES

- 1) El mejoramiento del proceso constructivo resuelve la necesidad de mejorar los trabajos de corte de taludes en campo, con el fin de evitar desprendimientos de rocas y fallas en el talud generadas por excavaciones y esfuerzos de las maquinarias.
- 2) El diseño de taludes en minas a tajo abierto o subterráneo es un trabajo multidisciplinario, donde los que intervienen deben poseer conocimiento y práctica sobre las estructuras geológicas, el comportamiento del macizo rocoso, el comportamiento del flujo de agua subterránea y conocimientos sobre estabilidad de taludes.
- 3) La obtención de los parámetros geotécnicos y geomecánicos son determinantes para el análisis de estabilidad y comportamiento del talud continuamente. Para el caso de parámetros geotécnicos es importante conocer los valores de cohesión, ángulo de fricción y peso específico, para el caso de parámetros geomecánicos es importante conocer la resistencia y discontinuidades de la roca.
- 4) Para el diseño por un modelo de bancos se ha considerado los siguientes parámetros: altura de banco = 10 m, ángulo de banco =  $60^\circ$ , ancho de berma = 3.5 m, ancho de rampa = 5 m, estos parámetros logra estabilizar el talud en condiciones estáticas y pseudo estáticas. La estabilidad podemos verificarlo con los resultados del programa Slide, de acuerdo a la forma del talud actual este se encuentra inestable con un FS en condición estático de 1.058 (véase fig. 42) y en condición pseudo estático de 0.709 (véase fig. 44), igualmente ocurre para las demás secciones, después del diseño, el factor de seguridad si cumple en ambas condiciones, en condición estático es 1.672 ( $FS \geq 1.5$ , véase fig. 46) y condiciones pseudo estático 1.355 ( $FS \geq 1$ , véase fig. 48).
- 5) Del mapeo por líneas de detalle se obtuvo las discontinuidades como persistencia ( $p=0.02\text{mm}$ ) y espaciamiento (0.03 mm) de la estación geomecánica de la cara del talud concluyendo que la roca tiene poca persistencia y del ensayo de resistencia

de compresión uniaxial se obtuvo que la resistencia del muestro para todos los estratos se encuentran en el rango de 100-200 Mpa concluyendo que la roca es muy fuerte y con grado de fracturación R5 (véase tabla 1).

- 6) El análisis cinemático por medio del uso del programa Dips nos permitió determinar los mecanismos de rotura de los estereogramas, teniendo como resultado la no existencia de roturas por vuelco, planar y cuña.
  
- 7) El procedimiento constructivo de extracción que se sigue en la actualidad es por el método observacional, este método genera la inestabilidad del talud por sus cortes con mucha pendiente ( $\alpha > 80^\circ$ ) y alturas mayores a los 40 m, esto podría causar los desprendimientos, fallas del talud (véase fig. 38). Con el diseño por modelo de bancos se realizara el mejoramiento del proceso constructivo de corte de taludes para que los trabajos sean más seguros y económicamente rentable.

## RECOMENDACIONES

- 1) Para la recopilación e información de datos en campo se debe tener cuidado de lo contrario esto causaría sesgos en la medición, para eso se recomienda el uso correcto de la brújula y métodos que nos garantice la información más real.
- 2) Para su aplicación racional de los diferentes métodos de cálculos y parámetros geomecánicos, es necesario que el macizo rocoso esté dividida en áreas por características estructurales, mecánicas similares y homogéneas.
- 3) Para obras de gran envergadura como el tajo abierto en minas se debe procurar contar con laboratorio propio de suelos y rocas provistas de herramientas e instrumentos básicos como martillo Schmidt, instrumentos para realizar los ensayos de carga puntual, la resistencia a la compresión uniaxial y la resistencia a la compresión triaxial que son fundamentales para la obtención de los parámetros de resistencia del macizo rocoso.
- 4) Se deberá realizar el monitoreo de taludes con las mejores prácticas de la ingeniería geotecnia en operaciones de tajo abierto con el fin de mejorar la seguridad del personal, equipos y garantizar la continuidad de las operaciones para asegurar el cumplimiento de los programas de producción.
- 5) Se debe continuar con la investigación implementando otros métodos y herramientas de diseño para minas a tajo abierto con sus características geológicas, estructurales y si es que hay presencia de nivel freático considerarlo.
- 6) Se recomienda para una siguiente investigación hacer más ensayos de investigaciones directas e indirecta como por ejemplo refracción sísmica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bieniawski, Z. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. Rotterdam.
- Blyth FGH & deFreitas MH. (1984). A Geology for Engineers, 7th edn. London.
- Brabb, E. a. (1989). Deslizamientos de tierras: alcance e importancia económica.
- CANMET. (1977). Pit Slope Manual. Canadá.
- Costa, C. H. (2012). Curso de fallas activas . Universidad Nacional de San Luis Argentina.
- Cuba, C. Z. (2015). DISEÑO DE MINAS A CIELO ABIERTO. Universidad de Chile.
- David, R. J. (2003). Evaluación de la estabilidad de taludes en la mina Lourdes. Tacna.
- Duncan C. W. & Christopher W. M. . (2004). Rock slope Engineering Civil and Mininig. Spon Press 4ta edición.
- Escobar, P. C. (2017). Geotecnia para el trópico andino.
- Garrido, y. G. (2013). Propuesta de Estabilización del talud ubicado en Boulevard Raúl Leoni, El Cafetal, Caracas. Colombia.
- Gonzales de V., Luis I., Ferrer M., Ortuño L., Oteo C. . (2002). Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Educación S.A.
- Hoek E, Carranza C. & Corkum B. (2002). Hoek-Brown failure criterion. Toronto.
- Instituto Geológico minero y metalúrgico. (2017). Prospección de recursos de rocas y minerales industriales de la región Junín. Perú
- John, K. (1968). Proceedings of American Society of Civil Engineers.
- Karzulovic, A. (2006). Fundamentals of Geomechanics (in Spanish). Universidad de los Andes.
- Laubscher DH & Jakubec J. (2001). The MRMR rock mass classification for jointed rock masses. New York .
- Leandro, R. O. (2004). "Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de taludes".

- Marinos P & Hoek E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysh .
- Mendoza, J. (2016). ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES DE SUELOS DE GRAN ALTURA EN LA MINA ANTAPACCAY. LIMA.PERÚ
- Naranjo, R. N. (2012). Modelo de Riesgo .
- Norma E 030, 2016. (s.f.). Diseño Sismo Resistente. Reglamento Nacional de Edificaciones .
- Pacheco, E. (2018). Investigaciones geotecnicas de estabilidad de taludes en macizos rocosos de pizarras para el mejoramiento de seguridad energetica del pais y desarrollo del gasoducto sur peruano.
- Ramírez O. P. y Alejano M. L. (2004). Mecánica de rocas: Fundamentos e Ingeniería de taludes. (Tesis de Pregrado) Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.España
- Read J. and Peter S. . (2010). Guidelines for open pit slope design.
- Ryan TM & Pryor PR. (2000). Designing catch benches and slopes.
- Tomlinson, M. (1978). Foundation Design and Construction.

## ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Consistencia.

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Metodología
¿En qué medida el mejoramiento del proceso constructivo influye en el corte de taludes a tajo abierto, en la Mina Rosarina, Yauli – Junín?	Determinar la influencia del mejoramiento del proceso constructivo en el corte de taludes en tajo abierto, Mina Rosarina, Yauli – Junín	El mejoramiento del proceso constructivo influye significativamente en el corte de taludes en tajo abierto, Mina Rosarina, Yauli – Junín	Variable dependiente: Proceso constructivo Variable independiente: Corte de taludes en tajo abierto D1: Topografía D2: Recolección de datos de campo D3: Análisis de estabilidad D4: Diseño de taludes Se tomara en cuenta para la recolección: la geología, geotecnia, las propiedades del macizo rocoso y la hidrogeología	El enfoque de esta tesis es cuantitativa porque consiste en: 1. Levantamientos topográficos y altimétricos 2. Replanteos y ubicaciones 3. Mapeo y registro de afloramientos 4. Registro de suelos sobrecargados 5. Diseño del talud con software y Slide 6. Análisis de resultados 7. Cortes del talud
¿De qué manera la determinación de los parámetros geotécnicos y geomecánicos influye en los taludes de la mina Rosarina?	Determinar los parámetros geotécnicos y geomecánicos que influyen en los taludes de la mina Rosarina.	Los parámetros geotécnicos y geomecánicos influyen en los taludes de la mina de tajo abierto		
¿De qué manera influye la estabilidad de taludes a nivel banco, ángulos interrampa y ángulos globales en condiciones estáticas y pseudo estáticas?	Analizar la influencia de la estabilidad de taludes a nivel banco, ángulos interrampa y ángulos globales en condiciones estáticas y pseudo estáticas.	La estabilidad de taludes a nivel banco influye en los ángulos interrampa y ángulos globales en condiciones estáticas y pseudo estáticas.		
¿El diseño de tajos influye en el mejoramiento del proceso constructivo de corte de taludes?	Determinar la influencia del diseño de tajos en el mejoramiento del proceso constructivo de corte de taludes.	El diseño de tajos influye en el mejoramiento del proceso constructivo de corte de taludes.		

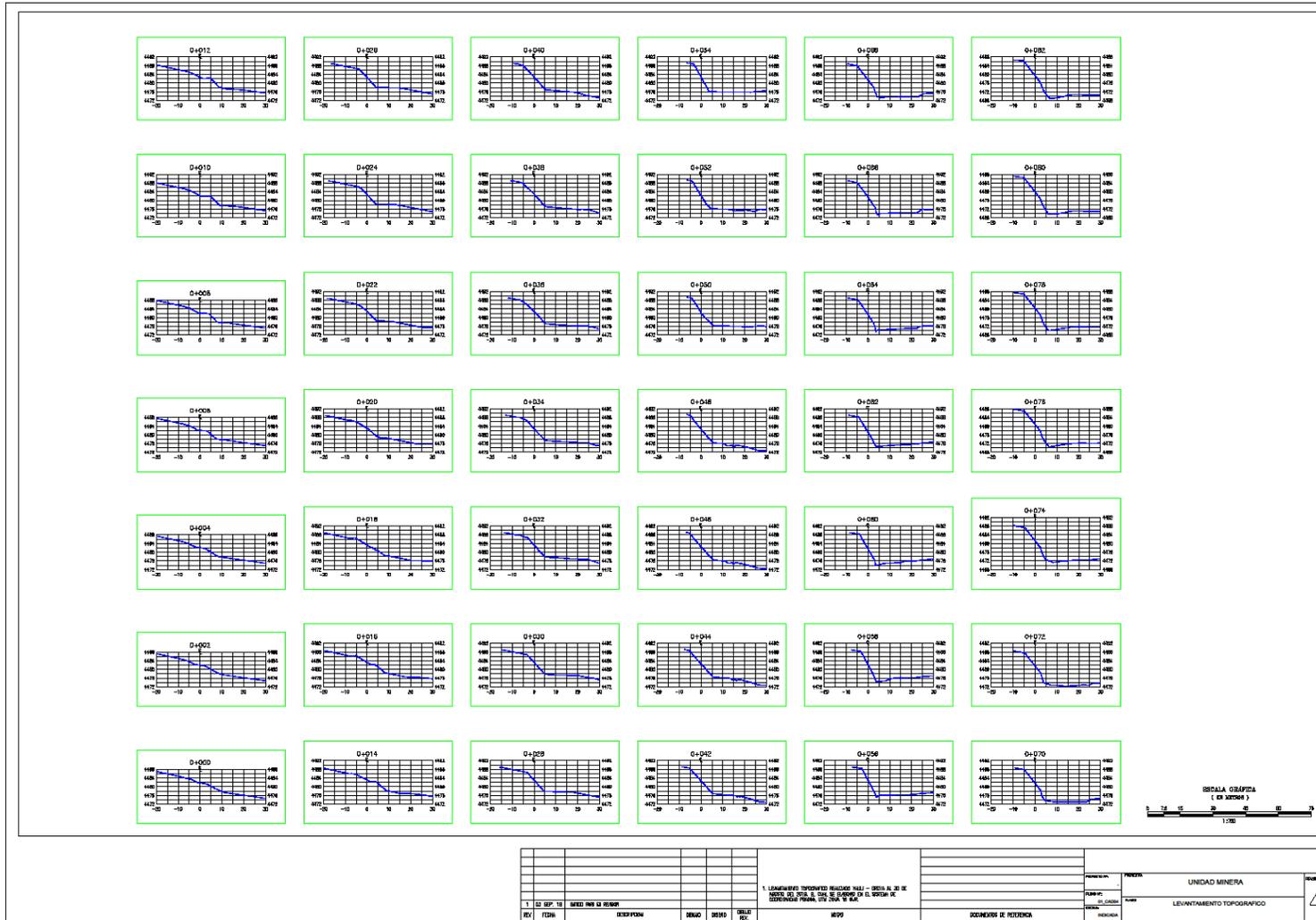
Anexo 2: Matriz de Operacionalización de variables.

<b>Variables</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Definición Conceptual</b>	<b>Definición Operacional</b>
<b>Variable Dependiente:Proceso Constructivo</b>	D1: Topografía	Levantamientos Topográficos y altimétricos	Ensayo en campo	Ensayo en campo
		Replanteos y cubicaciones	Ensayo en campo	Ensayo en campo
	D2: Recolección de datos de campo	Mapeo y registro de afloramientos	Cartografía	Cartografía
		Registro de suelos sobrecargados	Capacidad portante	RMR, Bieniawski
<b>Variable Independiente: Corte de taludes en tajo abierto</b>	D3: Análisis de estabilidad	Diseño del talud con el software Autocad y Slide	Modelamiento de talud	Modelamiento de talud
		Análisis de datos	Parámetros Geomecánicos	Calicatas
	D4: Elección del proceso constructivo	Cortas	Método minero	Método minero



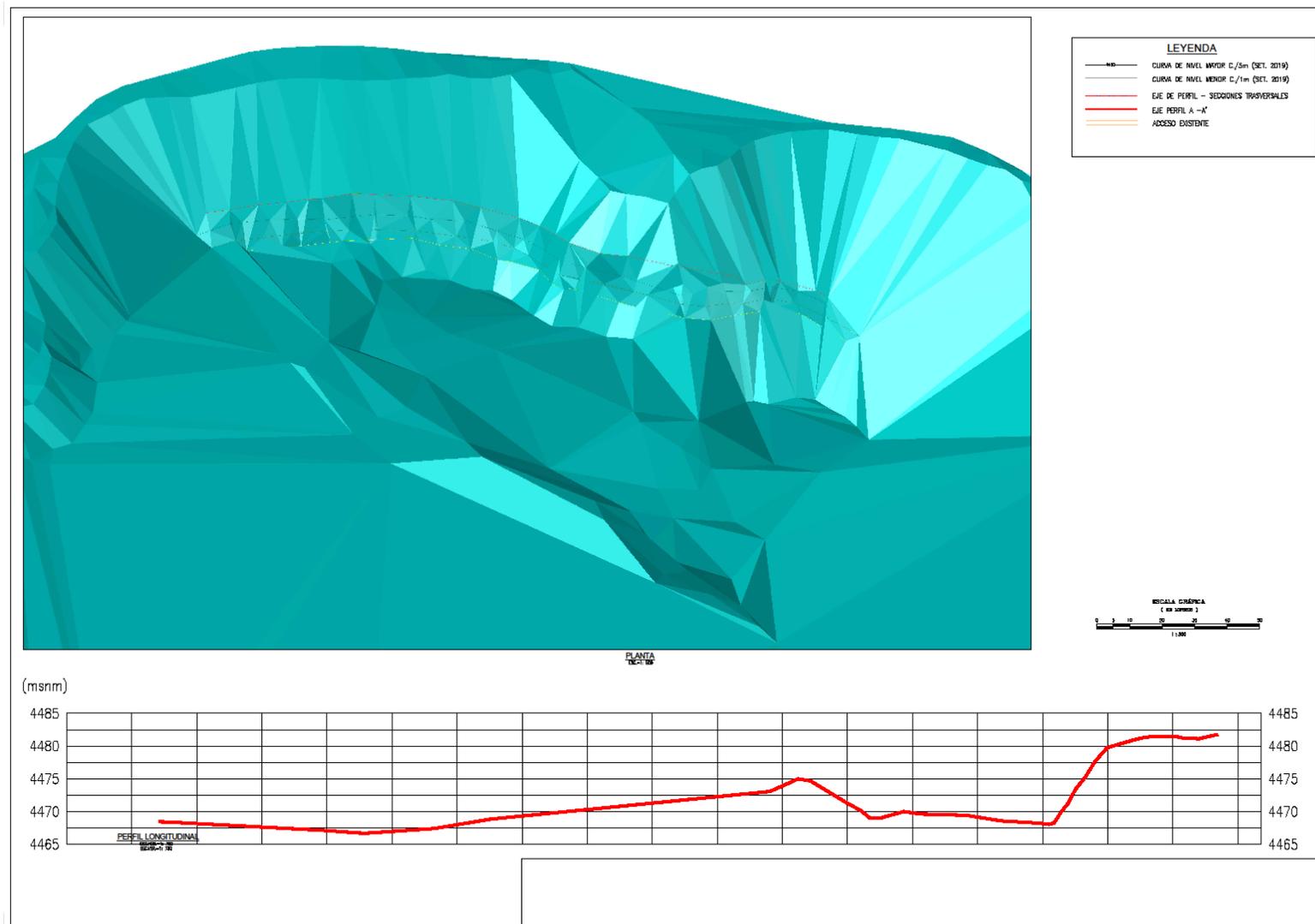


# Anexo 5: Plano de Secciones

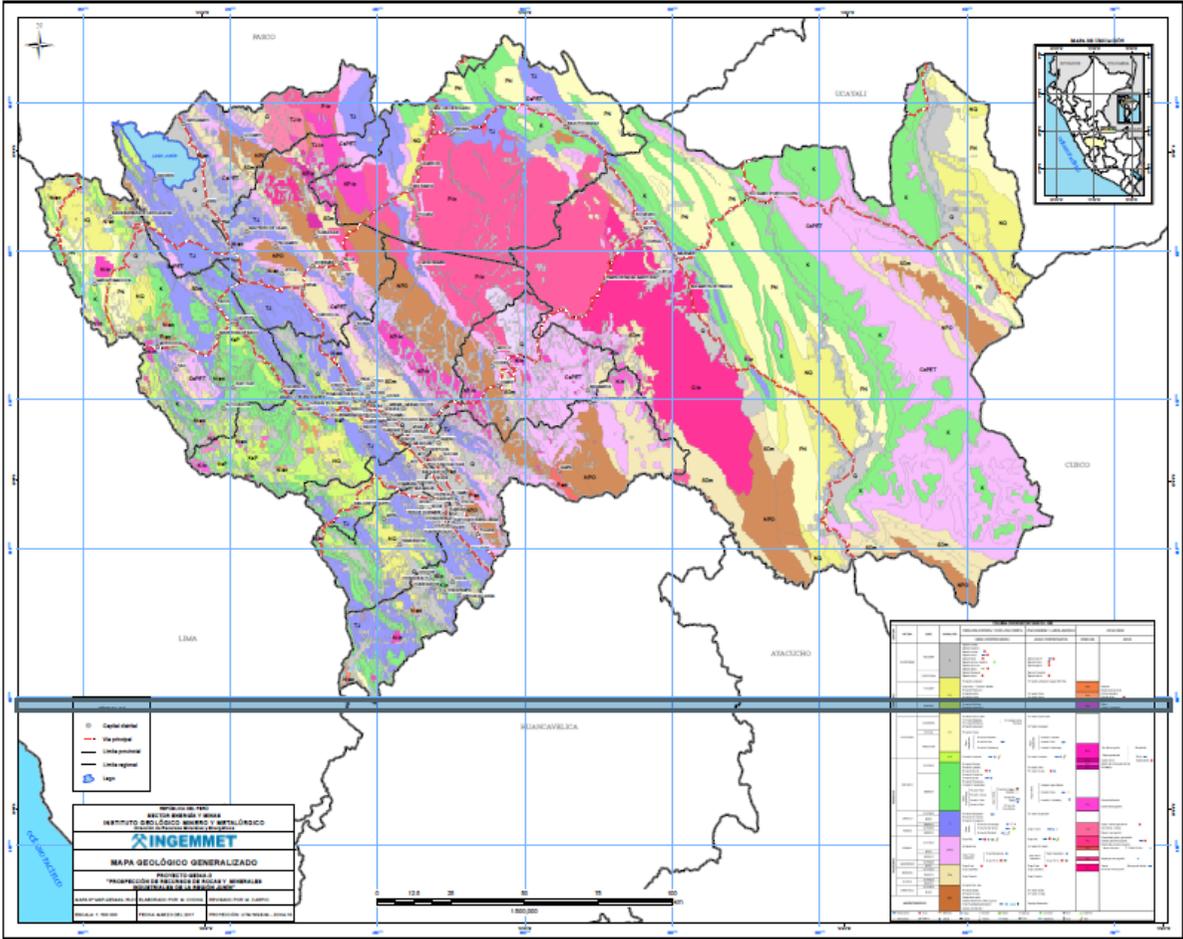




### Anexo 6: Plano del tajo en 3D



Anexo 7: Plano prospección de recursos de rocas y minerales industriales"



Anexo 8: Relación de Calicatas

DESCRIPCIÓN DE CALICATAS

N° CALICATA	COORDENADAS WGS 84		DESCRIPCION
	NORTE	ESTE	
1	8723646.8	388880.38	ARENISCA, CALIZA, CALCITA Y YESO A 10 METROS
2	8723680.1	388966.12	ARENISCA, CALIZA, CALCITA Y YESO A 15 METROS
3	8723837.3	389117.36	ARENISCA, CALCITA
4	8723687.8	388999.76	CALIZA
5	8723633.8	388826.68	CALIZA
6	8723796.5	389087.87	CALIZA

Anexo 9: Calicatas para la identificación de material



## Anexo 10: Ensayo de compresión uniaxial – Muestra 1



### UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

---

#### Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica

#### Laboratorio de Mecánica de Rocas

**Informe:** N° 181/19/LMR/UNI  
**Empresa:** CONSTRUCTORA Y SERVICIOS GENERALES HUAMAN E.I.R.L.  
**Proyecto:** "TESIS URP"  
**Fecha:** 25/09/2019

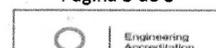
#### ENSAYO DE COMPRESION UNIAXIAL

Los ensayos se realizaron según la norma ASTM D2938-95, dando los siguientes resultados:

Muestra	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga de rotura (kN)	Resistencia a la Compresión Uniaxial (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la Compresión Uniaxial (MPa)
M-1	4.41	9.14	322.4	2162	212.0

**Nota:**

- La empresa solicitante es responsable de la toma de muestra en campo.
- La información correspondiente a las muestras fue proporcionada por el solicitante.





# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

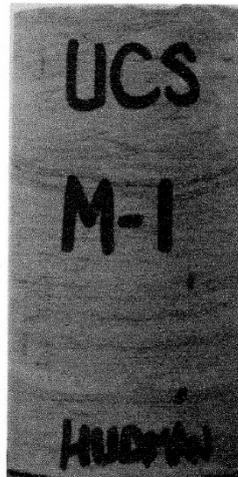
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica

Laboratorio de Mecánica de Rocas

## FOTOS: COMPRESION UNIAXIAL

Muestra: M-1

Antes



Después



Anexo 11: Ensayo de compresión uniaxial – Muestra 2 y Muestra 3

---

**LABORATORIO DE INGENIERIA JBT**

**Muestra** : M-2-TESIS URP; M-3-TESIS URP  
**Analizada Titular** : HUAMAN ROJAS, JIMMI; HUAMANLAZO ANCHIRAICO, YOSELIN  
**Fecha Recepción** : Miércoles, 10 de Setiembre del 2010  
**Fecha Entrega** : Viernes, 25 de Setiembre del 2010

**Metodología:** Determinación del Ensayo de Compresión Uniaxial

**Resultados de los Análisis Físico según Norma ASTM**

<b>NOMBRE MUESTRA</b>	<b>ALTURA</b>	<b>DIAMETRO</b>	<b>CARGA DE ROTURA (KN)</b>	<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (KG/CM2)</b>	<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN UNIAXIAL (Mpa)</b>
<b>M-2-TESIS URP</b>	10.01	4.4	315.2	1820	<b>178.00</b>
<b>M-3-TESIS URP</b>	9.05	4.04	312.4	1250	<b>122.58</b>



**Ing. Juan B. Trillo Campos**  
Dpto. de Aseguramiento de Calidad