

# INDICE

1. CAPITULO I: Introducción.....	1
1.1 Problematización.....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 Metodología .....	4
1.3.1 Metodología General .....	4
1.3.2 Herramientas de análisis: .....	5
2. CAPÍTULO II: Marco Teórico.....	6
2.1 Clasificación de macizos rocoso .....	6
2.1.1 RQD-Deere (1967).....	6
2.1.2 RMR-Bieniawski (1989). .....	6
2.1.3 GSI-Hoek (2000).....	7
2.1.4 Criterio de rotura de Hoek-Brown .....	8
2.5 Criterio de Mohr Coulomb.....	12
2.2 Análisis de estabilidad.....	13
2.2.1 Metodologías de análisis de estabilidad. ....	13
2.2.2 Análisis de equilibrio límite.....	14
2.2.3 Factor de seguridad .....	15
2.2.4 Métodos de equilibrio límite. ....	17
3. Capítulo III: Caso de estudio. ....	22
3.1 Antecedentes del caso de estudio: .....	22
3.1.1 Criterio de diseño de Talud.....	22
3.1.2 Unidades geotécnicas.....	24
3.2. Propuesta de análisis.....	25

3.2.1	Área de daño por tronaduras. ....	25
3.2.2	Tipos y técnicas de tronaduras. ....	26
3.4	Modelamiento.....	34
3.4.1	Modelación numérica.....	34
3.4.2	Modelación Roca granito .....	35
3.4.3	Propiedades de los materiales.....	36
3.4.4	Escenarios del modelo de simulación.....	40
3.5	Estimaciones de Factor de Seguridad vía MEL. ....	42
3.5.1	Modelos iniciales.....	44
3.5.2	Simulaciones considerando la zona de influencia de la tronadura. ....	47
3.6	Análisis y evaluación de resultados. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.6.1	Resultados material granito. ....	56
3.6.2	Resultados material Dacita. ....	58
3.6.3	Resultados material Andesita. ....	60
3.6.4	Resultados para los modelos con disminución de la resistencia por capas. ....	62
3.3.7	Comparación de resultados. ....	67
4.	Capitulo IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	69
5.	Bibliografía .....	71
6.	ANEXOS .....	74
6.1	Geometría general de un talud a nivel banco. ....	94
6.2	Mecanismos de fracturamiento de roca. ....	95
6.3	Trituración de la roca .....	96
6.4	Agrietamiento radial .....	96
6.5	Reflexión de onda de choque. ....	97
2.4.4	Extensión y apertura de las grietas radiales .....	97
2.4.5	Fracturación por liberación de carga.....	98
2.4.6	Fracturación por cizallamiento .....	98
2.4.7	Rotura por Flexión y colisión.....	98

2.5 Propagación de la onda de choque a través de la roca. ....	99
2.6 Comportamiento energético de las voladuras .....	102

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 1: Esquema resumen de metodología. ....	4
Ilustración 2.1: Determinación del GSI de Hoek (Hoek y Marinos, 2000) 8	
Ilustración 2.2: Valor para la constante $m_i$ para rocas intactas (1997, Hoek).....	10
Ilustración 2.3: Directrices para estimar el factor de perturbación D (Hoek, 2002)	11
Ilustración 2.4: Representación del criterio de rotura de Hoek-Brown, en el espacio de tensiones normal y tangencial (ejemplo RocData) .....	12
Ilustración 2.5: Criterio de rotura de Mohr Coulomb (Sanz, 2017). ....	13
Ilustración 2.6: resumen metodologías más frecuentes libro deslizamiento.....	14
Ilustración 2.7: Superficie de falla (Duncan y Wright, 2005).....	16
Ilustración 2.8: Formas en que fallan las superficies (Duncan y Wright, 2005). ....	17
Ilustración 2.9: Esquema de un sistema típico de análisis con tajadas o dovelas (Duncan y Wright, 2005). ....	18
Ilustración 2.10: Esquema de las fuerzas sobre una dovela en el método de Bishop Simplificado (Duncan y Wright, 2005) .....	19
Ilustración 2.11: Paralelismo de las fuerzas entre dovelas en el método de Spencer (Duncan y Wright, 2005). ....	20
Ilustración 2.12: Fuerzas que actúan sobre las dovelas en el método de Spencer (Duncan y Wright, 2005). ....	20
Ilustración 3.1: Parámetros principales de un talud minero (Morales Cabrera, 2000). 22	
Ilustración 3.2: Modelo a escala de banco (creación propia). ....	24
Ilustración 3.3: Modelo a escala de banco, talud de Fase Andina 4(creación propia). ....	24
Ilustración 3.4: Configuración tipo de tronadura de remate (Revista seguridad minera, año 2018). ....	28

Ilustración 3.5: Índice de resistencia Geológica (GSI).....	32
Ilustración 3.6: Propuestas de extensión de daño por tronadura en función de la distancia, (creación propia). ....	32
Ilustración 3.7: Propuestas de extensión de daño por tronadura en función de la distancia, (creación propia). ....	34
Ilustración 3.8: Modelación numérica criterio de H-, Roca Granito – GSI:25. ....	35
Ilustración 3.9: Modelación numérica para roca Granito, función exponencial.....	36
Ilustración 3.10: Interfaz de definición de materiales en software Slide. ....	36
Ilustración 3.11: Propuestas de extensión de daño por tronadura en función de la distancia. (creación propia) .....	37
Ilustración 3.12: Grafica de la envolvente de rotura para el granito aplicada la función Exponencial en sus 4 fases-Software RocData (Intacta, Zona1, Zona2 y Zona3).....	39
Ilustración 3.13: Grafica de la envolvente de rotura para el granito aplicada la función lineal en sus 4 fases -Software RocData (Intacta, Zona1, Zona2 y Zona3). .....	39
Ilustración 3.14: Grafica de la envolvente de rotura para el granito aplicada la función logaritmo en sus 4 fases -Software RocData (Intacta, Zona1, Zona2 y Zona3).....	40
Ilustración 3.15: Escenario 0 (previo a la tronadura), (creación propia). ....	41
Ilustración 3.16: Escenario 1 (Post tronadura), (creación propia).....	41
Ilustración 3.17: Escenario 2(Retirada la masa tronada), (creación propia).....	42
Ilustración 3.18: Factor de seguridad del talud en el momento T0, (creación propia). ....	43
Ilustración 3.19: Factor de seguridad en el momento T1, (creación propia).....	43
Ilustración 3.20: Factor de seguridad en el momento T2, (creación propia).....	44
Ilustración 3.21: Modelo inicial previo a la tronadura (Granito), (Creación propia).45	
Ilustración 3.22: Modelo inicial previo a la tronadura (Andesita), (creación propia). .....	46
Ilustración 3.23: Modelo inicial previo a la tronadura (Dacita), (creación propia). .	47

Ilustración 3.24: Modelo teórico de simulación de zonas de influencia de la tronadura, (creación propia). .....	48
Ilustración 3.25: Aplicación de la zona de influencia en las simulaciones, (creación propia). .....	48
Ilustración 3.26: Simulación en software Slide-Granito-Zona 1, (creación propia). 49	
Ilustración 3.27: Simulación en software Slide-Granito-Zona 2, (creación propia). 50	
Ilustración 3.28: Simulación en software Slide-Granito-Zona 3, (creación propia). 51	
Ilustración 3.29: Simulación en software Slide-Granito-Zona 1, (creación propia). 52	
Ilustración 3.30: Simulación en software Slide-Granito-Zona 2, (creación propia). 53	
Ilustración 3.31: Simulación en software Slide-Granito-Zona 3, (creación propia). 54	
Ilustración 3.32: Factor de seguridad vs reduction ratio-función Exponencial-Granito .....	57
Ilustración 3.33: Factor de seguridad vs reduction ratio-función Lineal-Granito. ....	57
Ilustración 3.34: Factor de seguridad vs reduction ratio-función Logaritmo-Granito. ....	58
Ilustración 3.35: Factor de seguridad vs reduction ratio-función Exponencial-Dacita .....	59
Ilustración 3.36: Factor de seguridad vs reduction ratio-función Lineal-Dacita. ....	59
Ilustración 3.37: Factor de seguridad vs reduction ratio-función logaritmo-Dacita. 60	
Ilustración 3.38: Factor de seguridad vs reduction ratio-función Exponencial-Andesita. ....	61
Ilustración 3.39: Factor de seguridad vs reduction ratio-función Lineal-Andesita.. 61	
Ilustración 3.40: Factor de seguridad vs reduction ratio-función Logaritmo-Andesita .....	62
Ilustración 3.41: Simulación de la roca granito por medio del criterio de H-B, considerando el factor D para cada una de las capas.....	63
Ilustración 3.42: Simulación de la roca dacita por medio del criterio de H-B, considerando el factor D para cada una de las capas.....	64
Ilustración 3.43: Simulación de la roca andesita por medio del criterio de H-B, considerando el factor D para cada una de las capas.....	65

Ilustración 3.44: Comportamiento del factor de seguridad frente a las distintas propuestas de simulación aplicadas.....	67
---	----

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Clasificación de macizos rocosos - GSI de Hoek.....	8
Tabla 2.2: Límites de factor de seguridad para un talud según su temporalidad (Osinergmin, 2017).....	16
Tabla 3.1: Dimensiones del talud minero .....	23
Tabla 3.2: Dimensiones de precorte en Andina Fase 4.....	23
Tabla 3.3: Tabla resumen de las propiedades de las rocas .....	25
Tabla 3.4: extensión de la zona dañada por la explosión como resultado de la voladura de producción de una mina a cielo abierto .....	30
Tabla 3.5: Rangos de radio según la zona de influencia.....	31
Tabla 3.6: Obtención de GSI y RR (Ratio reduction).....	34
Tabla 3.7: Parámetros de Hoek-Brown y Mohr Coulomb para las distintas zonas identificadas. ....	38
Tabla 3.8: Parámetros de criterio de Hoek-Brown para roca granito intacto. ....	45
Tabla 3.9: Parámetros de criterio de Hoek-Brown para roca Andesita intacto. ....	46
Tabla 3.10: Parámetros de criterio de Hoek-Brown para roca Dacita intacto .....	47
Tabla 3.11: Resumen resultados por medio del método de Spencer.....	55
Tabla 3.12: Resumen resultados por medio del método de Bishop .....	55
Tabla 3.13: Resultados obtenidos por medio del método clásico del criterio de rotura de Hoek-Brown .....	56
Tabla 3.14: Resumen de resultados de factor de seguridad para la roca granito. ....	56
Tabla 3.15: Resumen de resultados de factor de seguridad para roca Dacita. ....	58
Tabla 3.16: Resumen de resultados de factor de seguridad para roca Andesita. ....	60
Tabla 3.17: Resultados simulaciones utilizando las funciones de decrecimiento de la resistencia por capas.....	66
Tabla 3.18: Resultados simulaciones utilizando el criterio de Hoek-Brown para el decrecimiento de la resistencia por capas .....	66

Tabla 3.19: Porcentaje de disminución del factor de seguridad en relación a la roca intacta.....	68
Tabla 3.20: Porcentaje de disminución del factor de seguridad en relación a la roca intacta- Modelos por capas. ....	68

## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1: Criterio de Hoek-Brown generalizado .....	9
Ecuación 2.2: Cálculo de constante “mb” para el criterio de Hoek.Brown .....	9
Ecuación 2.3: Cálculo de constante “s” para el criterio de Hoek.Brown. ....	9
Ecuación 2.4: Cálculo de constante “a” para el criterio de Hoek.Brown. ....	9
Ecuación 2 5: Criterio de Mohr Coulomb.....	12
Ecuación 2.6: relación de esfuerzos para el cálculo de factor de seguridad. ....	15
Ecuación 2.7: Ecuación de Fellenius.....	18
Ecuación 2.8: Método simplificado de Bishop. ....	19
Ecuacion 3.1: Modelo de Hustrulid .....	30

## INDICE DE ANEXOS

Ilustración 6.1: Simulación en software Slide-Granito-Zona 1, (creación propia) .	74
Ilustración 6.2: Simulación en software Slide-Granito-Zona 2, (creación propia) .	75
Ilustración 6.3: Simulación en software Slide-Granito-Zona 3, (creación propia) .	76
Ilustración 6.4: Simulación en software Slide-Dacita-Zona 1, (creación propia)....	77
Ilustración 6.5: Simulación en software Slide-Dacita-Zona 2, (creación propia)....	78
Ilustración 6.6: Simulación en software Slide-Dacita-Zona 3, (creación propia)....	79
Ilustración 6.7: Simulación en software Slide-Dacita-Zona 1, (creación propia)....	80
Ilustración 6.8: Simulación en software Slide-Dacita-Zona 2, (creación propia)....	81
Ilustración 6 9: Simulación en software Slide-Dacita-Zona 3, (creación propia)....	82
Ilustración 6 10: Simulación en software Slide-Dacita-Zona 1, (creación propia)..	83
Ilustración 6.11: Simulación en software Slide-Dacita-Zona 2, (creación propia)..	84
Ilustración 6.12: Simulación en software Slide-Dacita-Zona 3, (creación propia)..	85

Ilustración 6.13: Simulación en software Slide-Andesita-Zona 1, (creación propia).	86
Ilustración 6.14: Simulación en software Slide-Andesita-Zona 2, (creación propia).	87
Ilustración 6.15: Simulación en software Slide-Andesita-Zona 3, (creación propia).	88
Ilustración 6.16: Simulación en software Slide-Andesita-Zona 1, (creación propia).	89
Ilustración 6.17: Simulación en software Slide-Andesita-Zona 2, (creación propia).	90
Ilustración 6.18: Simulación en software Slide-Andesita-Zona 3, (creación propia).	91
Ilustración 6.19: Simulación en software Slide-Andesita-Zona 1, (creación propia).	92
Ilustración 6.20: Simulación en software Slide-Andesita-Zona 2, (creación propia).	93
Ilustración 6.21: Simulación en software Slide-Andesita-Zona 3, (creación propia).	94
Ilustración 6.22: Geometría general de un talud minero.....	95
Ilustración 6.23: Esquema de Agrietamiento Radial.....	97
Ilustración 6.24: Agrietamiento radial, onda de choque y zona de pulverización en una tronadura de rocas .....	98
Ilustración 6.25: Mecanismo de Rotura por Flexión. ....	99
Ilustración 6.26: Mecanismo de fragmentación por colisión .....	99
Ilustración 6.27: Diagrama de presión versus volumen de gases .....	103
Ecuación 6.1: Presión de detonación.....	100
Ecuación 6.2: Presión máxima transmitida .....	100
Ecuación 6.3: Relación de impedancia entre la roca y el explosivo .....	100
Ecuación 6.4: Tensión radial generada .....	101
Ecuación 6.5: Calculo de la impedancia en relación al medio.....	101
Ecuación 6.6: presión de onda reflejada. ....	101



Tabla 6.1: Rendimiento energético de explosivos. ....	102
Tabla 6.2: Propiedades de resistencia de las rocas más comunes.....	104