

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Lugar de aplicación .....	1
1.2 El problema .....	1
1.3 Áreas de Investigación .....	4
1.4 Área de estudio e instituciones interesadas .....	5
1.5 Objetivo general .....	5
1.6 Objetivos específicos .....	5
2. MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 Aspectos geológicos y geotécnicos de los materiales .....	6
2.1.1 Roca madre .....	6
2.1.2 Discontinuidad .....	6
2.1.3 Resistencia y deformabilidad del macizo rocoso .....	6
2.1.4 Suelo .....	12
2.1.5 Talud .....	12
2.2 Estabilidad de taludes .....	13
2.2.1 Factores que desencadenan fenómenos de inestabilidad ..	14
2.2.2 Mecanismos de rotura en taludes mineros de rajo .....	14
2.2.3 Factor de seguridad ( <i>FS</i> o <i>FoS</i> ) .....	16
2.2.4 Métodos de cálculo estabilidad de taludes .....	17
2.2.5 Criterios de aceptabilidad .....	22
2.3 Tronaduras mineras y daño al macizo rocoso .....	24
2.3.1 Tronaduras mineras .....	24
2.3.2 Afección de las tronaduras al macizo rocoso .....	25
2.4 Análisis de estabilidad de taludes bajo efecto de tronaduras .....	28
2.4.1 Variación del Factor <i>D</i> , <i>blast damage factor</i> .....	28
2.4.2 Análisis dinámico .....	29
3. METODOLOGÍA .....	31
3.1 Recopilación de antecedentes bibliográficos y marco teórico .....	31
3.2 Instalación e instrucción respecto al uso de <i>softwares</i> .....	31
3.3 Propuesta de análisis .....	31
3.4 Definición de parámetros de entrada .....	31
3.5 Simulación y generación de resultados .....	32
3.5.1 Procedimiento de análisis numérico general <i>RS2</i> .....	32

3.5.2	Procedimiento de análisis dinámico en <i>RS2</i> .....	32
3.5.3	Procedimiento de análisis probabilístico en <i>RS2</i> .....	33
3.6	Orden y generación de estadística de los resultados .....	33
3.7	Presentación de resultados, análisis y conclusiones .....	33
3.8	Redacción del documento de memoria de título .....	34
4.	DESARROLLO .....	35
4.1	Parámetros de entrada .....	35
4.1.1	Diseño del talud simplificado .....	35
4.1.2	Materiales.....	36
4.1.3	Modelo del rajo en <i>RS2</i> .....	37
4.1.4	Definición de la función de carga dinámica .....	38
4.1.5	Definición de etapas o fases .....	39
4.1.6	Parámetros análisis dinámico.....	40
4.1.7	Parámetros análisis probabilístico .....	40
4.2	Resultados y análisis .....	41
4.2.1	Validación modelo estático base .....	41
4.2.2	Validación magnitud onda de presión modelo dinámico .....	42
4.2.3	Análisis dinámico tronadura de operación en banco .....	43
4.2.4	Zonificación factor D por daño de tronadura .....	44
4.2.5	Análisis probabilístico de un talud minero post tronadura ...	46
4.3	Discusión .....	48
5.	CONCLUSIÓN .....	50
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52
7.	ANEXOS .....	57
8.	APÉNDICES.....	60

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Colapso o falla de un talud en rajo minero en Bingham Canyon Mine, Utah. ....	2
Figura 1.2: Representación esquemática de la transición entre la masa de roca in situ y la roca tronada que es apta para manipulación. ....	3
Figura 2.1: Envoltente lineal de Mohr-Coulomb.....	11
Figura 2.2: Izquierda, talud natural en Big Bend National Park, USA. Derecha, talud artificial en Valencia, España. ....	12
Figura 2.3: Esquema de taludes mineros con sus principales componentes .....	13
Figura 2.4: Ilustración simplificada de los mecanismos de falla más comunes. ....	15
Figura 2.5: Factor de seguridad y probabilidad de falla de un talud. ....	20
Figura 2.6: Probabilidad de falla versus número de simulaciones de Montecarlo. ....	21
Figura 2.7.1: Muestreo de una distribución Normal por método Monte Carlo .....	22
Figura 2.7.2: Muestreo de una distribución Normal por método LHS.....	22
Figura 2.8: Izquierda, resultado de voladura sin control de daño. Derecha, resultado de voladura con tronadura de contorno.....	24
Figura 2.9: Detonación y su efecto sobre el macizo.....	26
Figura 2.10: Detonación y su efecto sobre el macizo explicado mediante estados tensionales. ....	27
Figura 2.11: Extensión radial de las fracturas hacia la cara libre y desplazamiento del macizo rocoso fracturado. ....	27
Figura 4.1 Diseño de talud de rajo en software <i>AutoCAD 2023</i> , escala métrica. ....	35
Figura 4.2: Modelo de rajo discretizado y restringido en <i>RS2 v11</i> . ....	37
Figura 4.3: Evolución temporal de la presión en las parades de un barreno. Fuente:38	
Figura 4.4: Disposición de cargas distribuidas en modelo numérico.....	38
Figura 4.5: Ciclo de detonación por grupos de pozos, representado por presiones en la dirección del eje X. ....	39
Figura 4.6: Resultado de análisis de Frecuencias Naturales.....	40

Figura 4.7: Resultado de desplazamientos totales en modelo numérico estático, reproducción perfil S-9 Cerro Corona. SRF crítico modelo original: 1.46. ....	41
Figura 4.8: Aceleración x producto de la secuencia de tronadura en punto de control cercano al banco de estudio.....	42
Figura 4.9: Deformación cortante máxima (sólido) etapas finales del análisis dinámico. ....	43
Figura 4.10: $\sigma_1$ (kPa) en zona de falla de la resultante del análisis dinámico (izquierda) versus la replicada por la zonificación propuesta de daño (derecha). ....	44
Figura 4.11: Diseño de zonificación propuesta (color verde) para la variación del <i>factor</i> $D/GSI$ en un banco minero (color amarillo). ....	45
Figura 4.12: Resultados análisis de estabilidad LEM en talud de prueba basado en rajo Cerro Corona. Izquierda: .....	47
Figura 7.1: Perfil S-9 rajo Cerro Corona. ....	58
Figura 7.2: Registro de aceleración de una detonación de tronadura minera de mediana envergadura .....	59
Figura 8.1: Esfuerzos principales de las zonas Silicificada y Silicificada D. ....	61
Figura 8.2: Esfuerzo de corte versus esfuerzo normal de la zona Silicificada y Silicificada D.....	62
Figura 8.3: Esfuerzos principales de las zonas Potásica C y Potásica C D .....	63
Figura 8.4: Esfuerzo de corte versus esfuerzo normal de la zona Potásica C y Potásica C D. ....	64
Figura 8.5: Esfuerzos principales de las zonas Potásica NC y Potásica NC D .....	65
Figura 8.6: Esfuerzo de corte versus esfuerzo normal de la zona Potásica NC y Potásica NC D.....	66
Figura 8.7: Esfuerzos principales de las zonas Caliza C y Caliza C D.....	67
Figura 8.8: Esfuerzo de corte versus esfuerzo normal de la zona Caliza C y Caliza C D.....	68
Figura 8.9: Esfuerzos principales de las zonas Caliza NC y Caliza NC D.....	69
Figura 8.10: Esfuerzo de corte versus esfuerzo normal de las zonas Caliza C y Caliza C D. ....	70
Figura 8.11: Esfuerzos principales de la zona Argílica 2 NC.....	71

Figura 8.12: Esfuerzo de corte versus esfuerzo normal de la zona Argílica 2 NC.....	72
Figura 8.13: Resultado <i>máxima deformación de corte (sólido)</i> de análisis dinámico por etapas. ....	74
Figura 8.14: Resultado <i>máxima aceleración x (dinámica)</i> de análisis dinámico por etapas. Secuencia de tronadura en el banco de estudio.....	75
Figura 8.15: Medición de la <i>máxima deformación cortante</i> en un punto medio de la cara lateral afectada por la tronadura de prueba.....	76
Figura 8.16: Medición de la <i>máxima deformación cortante</i> en un punto medio de la base o piso remanente afectado por la tronadura de prueba.....	76
Figura 8.17: Zonificación continua del <i>factor D</i> en basada en resultados de análisis dinámico. Reducción de parámetros <i>factor D</i> y <i>GSI</i> según Tabla 8.3.....	77
Figura 8.18: Comparativa <i>máxima deformación cortante</i> momento post tronadura (resultado análisis dinámico) versus replicación en base a zonificación de <i>factor D/GSI</i> (resultado análisis estático).....	78
Figura 8.19: Comparativa <i>Sigma 1</i> (kPa) momento post tronadura (resultado análisis dinámico) versus replicación en base a zonificación de <i>factor D/GSI</i> (resultado análisis estático).....	78
Figura 8.20: Comparativa <i>desplazamientos horizontales (m)</i> momento post tronadura (resultado análisis dinámico) versus replicación en base a zonificación de <i>factor D/GSI</i> (resultado análisis estático).....	79
Figura 8.21: Comparativa <i>desplazamientos totales (m)</i> momento post tronadura (resultado análisis dinámico) versus replicación en base a zonificación de <i>factor D/GSI</i> (resultado análisis estático).....	79
Figura 8.22: Resultados análisis de estabilidad probabilístico (izquierda) y determinístico (derecha) en <i>Slide v9.023</i> por método de Spencer.....	80
Figura 8.23: Distribución FoS análisis probabilístico zonificación T de Hoek.....	81
Figura 8.24: Distribución FoS análisis probabilístico zonificación propuesta por el autor. ....	81

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Cuadro básico del GSI .....	8
Tabla 2.2: Criterio de aceptación para factores de seguridad en rajos mineros.....	23
Tabla 2.3: Criterio de aceptación para probabilidad de falla en rajos mineros. ....	23
Tabla 4.1: Listado de materiales empleados en la modelación numérica del talud...	36
Tabla 4.2: Preferencias de diseño para el modelo numérico en <i>RS2 v11.015</i> .....	37
Tabla 4.3: Etapas o fases de análisis dinámico de tronadura propuesta. ....	40
Tabla 4.4: Valores <i>factor D</i> y <i>GSI</i> para cada zona ordenados desde el exterior hacia el interior del macizo rocoso.....	46
Tabla 4.5: Resumen comparativo resultados análisis determinístico versus probabilístico. ....	48
Tabla 7.1: Guía para estimar el factor de alteración D.....	57
Tabla 8.1: Listado de materiales y sus propiedades estándar o medias. ....	60
Tabla 8.2: Parámetros variables análisis probabilístico.....	73
Tabla 8.3: Disminución de las propiedades de la Caliza C para la zonificación propuesta. ....	77