

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes y motivación.....	1
1.2 Descripción del problema	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
1.4 Alcances.....	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Modelos numéricos.....	3
2.1.1 Generalidades	3
2.1.2 Método de elementos finitos (FEM)	3
2.1.3 Método de elementos discretos (DEM).....	4
2.1.4 Método de elementos finitos-discretos (FDEM).....	4
2.1.5 <i>Discrete Fracture Network</i>	5
2.2 Mecánica de rocas.....	7
2.2.1 Definición	7
2.2.2 Macizo rocoso.....	7
2.2.3 Anisotropía.....	8
2.2.4 Efecto de escala	8
2.2.5 Rotura frágil del macizo rocoso.....	8
2.2.6 Aplicaciones de la mecánica de rocas en minería.....	9
2.3 Sobreexcavación y estallido de roca.....	10
2.3.1 Generalidades	10
2.3.2 Características.....	12
2.3.3 Tipos de estallido de rocas.....	22
2.3.4 Mecanismos.....	25
3. METODOLOGÍA.....	26

3.1	Revisión bibliográfica	26
3.2	Base de datos	26
3.3	CloudCompare	26
4.	DESARROLLO	27
4.1	Base de datos	27
4.1.1	Eventos sísmicos	27
4.1.2	Perfiles de tronadura	28
4.1.3	Campo de esfuerzo <i>in situ</i>	28
4.1.4	Litología	29
4.2	Visualización de los datos	29
4.2.1	Geometría de la zona de estudio	30
4.2.2	Visualización de eventos sísmicos	30
4.2.3	Visualización campo de esfuerzo <i>in situ</i>	31
4.2.4	Visualización de perfiles de tronadura	34
4.2.5	Visualización de la litología	35
4.3	Zona de estudio	35
4.3.1	Sub zona de estudio uno	36
4.3.2	Sub zona de estudio dos	40
4.3.3	Sub zona de estudio tres	44
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
5.1	Sub zona de estudio uno	49
5.1.1	Sobreexcavación sub zona de estudio uno	49
5.1.2	Sobreexcavación y tronadura	51
5.1.3	Sobreexcavación y sismicidad	51
5.1.4	Sobreexcavación y litología	52
5.1.5	Sobreexcavación y campo de esfuerzo <i>in situ</i>	53
5.2	Sub zona de estudio dos	54
5.2.1	Sobreexcavación sub zona de estudio dos	54
5.2.2	Sobreexcavación y tronadura	56

5.2.3	Sobreexcavación y sismicidad	56
5.2.4	Sobreexcavación y litología.....	57
5.2.5	Sobreexcavación y campo de esfuerzo <i>in situ</i>	58
5.3	Sub zona de estudio tres	58
5.3.1	Sobreexcavación sub zona de estudio tres	58
5.3.2	Sobreexcavación y tronadura.....	60
5.3.3	Sobreexcavación y sismicidad	61
5.3.4	Sobreexcavación y litología.....	62
5.3.5	Sobreexcavación y campo de esfuerzo <i>in situ</i>	62
5.4	Discusiones finales	63
6.	CONCLUSIONES.....	65
7.	REFERENCIAS.....	67
8.	ANEXOS.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: (a) Modelo conceptual del Modo I de falla y modelo análogo del Modo II de falla en roca, (b) modelo teórico del FPZ para el Modo I de falla y modelo análogo del FPZ para el Modo II de falla.	5
Figura 2.2: (a) DFN en tres dimensiones y (b) DFN en dos dimensiones con dos sets de discontinuidades (azul y verde).....	6
Figura 2.3: Parámetros básicos para la construcción de un DFN. (a) Orientación y número de sets de discontinuidades, (b) distribución de tamaños de las discontinuidades y (c) ejemplos de intensidades de fracturas en el espacio.	7
Figura 2.4: Fotografías de túneles subterráneos, dañados por intensos estallidos de roca. .	11
Figura 2.5: Ilustración de la deformación tangencial producida por minería inducida, (a) sacudida debido a las fuerzas de aceleración de un evento sísmico remoto, (b) fractura por esfuerzo estático o <i>strain burst</i> debido a la deformación tangencial y (c) eyección de rocas por transferencia de <i>momentum</i> desde fuentes sísmicas remotas o desde una alta tasa de desplazamiento de volumen durante el <i>strain burst</i>	16
Figura 2.6: Ejemplos típicos de estallidos de roca en túneles de minería subterránea controlados por un plano estructural rígido o un set de planos estructurales rígido.	19
Figura 2.7: Ejemplos típicos de estallidos de roca en túneles de minería subterránea controlados por dos planos estructurales rígidos con diferente azimut o dos set de planos estructurales rígidos.	21
Figura 2.8: Diferentes efectos que puede producir un estallido de roca en diversos pilares: (a) compresión, (b) corte y (c) corte simultáneo.....	23
Figura 4.1: Litología presente a lo largo de la zona de hundimiento.	29
Figura 4.2: Vista en planta del túnel (zona de estudio) a una escala 200:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	30
Figura 4.3: Vista en planta de nube de puntos de eventos sísmicos, con campo escalar de magnitud sísmica en escala de momento. Escala 300:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	30
Figura 4.4: Vista en planta de nube de puntos de campo de esfuerzo in situ, con campo escalar de esfuerzo principal mayor en MPa. Escala 500:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	31
Figura 4.5: Vista en planta de nube de puntos de campo de esfuerzo in situ, con campo escalar de esfuerzo principal intermedio en MPa. Escala 500:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	32

Figura 4.6: Vista en planta de nube de puntos de campo de esfuerzo in situ, con campo escalar de esfuerzo principal menor en MPa. Escala 500:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	33
Figura 4.7: Vista en planta de nube de puntos del perfil de tronadura en la totalidad de la zona de hundimiento. Escala 400:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	34
Figura 4.8: Vista en planta de nube de puntos del perfil de tronadura en la zona de estudio (túnel). Escala 250:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	34
Figura 4.9: Visualización de la litología de la zona de hundimiento. Escala 250:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	35
Figura 4.10: Litología presente en la zona del túnel (zona de estudio).	35
Figura 4.11: Delimitación de la primera sub zona de estudio en el túnel. Escala 200:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	36
Figura 4.12: Perfiles de tronadura dentro de la sub zona de estudio uno. Escala 150:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	36
Figura 4.13: Eventos sísmicos dentro de la sub zona de estudio uno. Escala 200:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	37
Figura 4.14: Litología delimitada en la sub zona de estudio uno. Escala 250:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	38
Figura 4.15: Leyenda presente en la sub zona de estudio uno.	38
Figura 4.16: Campo de esfuerzos in situ (esfuerzo principal mayor) dentro de la sub zona de estudio uno. Escala 200:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	39
Figura 4.17: Delimitación de la segunda sub zona de estudio en el túnel. Escala 200:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	40
Figura 4.18: Perfiles de tronadura dentro de la sub zona de estudio dos. Escala 150:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	40
Figura 4.19: Eventos sísmicos dentro de la sub zona de estudio dos. Escala 200:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	42
Figura 4.20: Litología delimitada en la sub zona de estudio dos. Escala 250:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	42
Figura 4.21: Campo de esfuerzos in situ (esfuerzo principal mayor) dentro de la sub zona de estudio dos. Escala 200:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	43
Figura 4.22: Delimitación de la tercera sub zona de estudio en el túnel. Escala 200:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	44
Figura 4.23: Perfiles de tronadura dentro de la sub zona de estudio tres. Escala 150:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	44
Figura 4.24: Eventos sísmicos dentro de la sub zona de estudio tres. Escala 200:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).	46

Figura 4.25: Litología delimitada en la sub zona de estudio tres. Escala 250:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	46
Figura 4.26: Leyenda presente en la sub zona de estudio 3.	47
Figura 4.27: Campo de esfuerzos in situ (esfuerzo principal mayor) dentro de la sub zona de estudio tres. Escala 200:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	47
Figura 5.28: Primera sección de sobreexcavación en la sub zona de estudio 1. Escala 4:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada Z línea azul).....	49
Figura 5.29: Sección intermedia de sobreexcavación en la sub zona de estudio 1. Escala 4:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada Z línea azul).....	50
Figura 5.30: Última Sección de sobreexcavación en la sub zona de estudio 1. Escala 4:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada Z línea azul).....	50
Figura 5.31: Visualización de perfiles de tronadura y sobreexcavación en la primera sub zona de estudio. Escala 55:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	51
Figura 5.32: Visualización de la sismicidad en el túnel y sobreexcavación en la primera sub zona de estudio. Escala 55:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	52
Figura 5.33: Visualización de la litología en el túnel y sobreexcavación en la primera sub zona de estudio. Escala 50:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	52
Figura 5.34: Visualización del campo de esfuerzo <i>in situ</i> y sobreexcavación en la primera sub zona de estudio. Escala 55:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	53
Figura 5.35: Primera sección de sobreexcavación en la sub zona de estudio 2. Escala 4:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada Z línea azul).....	54
Figura 5.36: Sección intermedia de sobreexcavación en la sub zona de estudio 2. Escala 4:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada Z línea azul).....	55
Figura 5.37: Última sección de sobreexcavación en la sub zona de estudio 2. Escala 4:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada Z línea azul).....	55
Figura 5.38: Visualización de perfiles de tronadura y sobreexcavación en la segunda sub zona de estudio. Escala 55:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	56
Figura 5.39: Visualización de la sismicidad en el túnel y sobreexcavación en la segunda sub zona de estudio. Escala 55:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	57
Figura 5.40: Visualización de la litología en el túnel y sobreexcavación en la segunda sub zona de estudio. Escala 50:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	57
Figura 5.41: Visualización del campo de esfuerzo <i>in situ</i> y sobreexcavación en la segunda sub zona de estudio. Escala 55:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	58
Figura 5.42: Primera sección de sobreexcavación en la sub zona de estudio 3. Escala 4:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada Z línea azul).....	59
Figura 5.43: Sección intermedia de sobreexcavación en la sub zona de estudio 3. Escala 4:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada Z línea azul).....	59

Figura 5.44: Última sección de sobreexcavación en la sub zona de estudio 3. Escala 4:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada Z línea azul).....	60
Figura 5.45: Visualización de perfiles de tronadura y sobreexcavación en la tercera sub zona de estudio. Escala 55:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	60
Figura 5.46: Visualización de la sismicidad en el túnel y sobreexcavación en la tercera sub zona de estudio. Escala 55:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	61
Figura 5.47: Visualización de la litología en el túnel y sobreexcavación en la tercera sub zona de estudio. Escala 50:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	62
Figura 5.48: Visualización del campo de esfuerzo <i>in situ</i> y sobreexcavación en la tercera sub zona de estudio. Escala 55:1. (Coordenada Y línea verde, coordenada X línea roja).....	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Descripción del estallido de roca en función de la magnitud (Hudyma, 2004).....	24
Tabla 4.1: Extracto base de datos de registro de eventos sísmicos.....	27
Tabla 4.2: Extracto base de datos de perfiles de tronadura.....	28
Tabla 4.3: Extracto base de datos de campo de esfuerzo <i>in situ</i>	29
Tabla 4.4: Listado de perfiles de tronadura ocurridos dentro de la sub zona de estudio uno.	37
Tabla 4.5: Campo de esfuerzo <i>in situ</i> en la primera sub zona de estudio.	39
Tabla 4.6: Extracto de perfiles de tronadura ocurridos dentro de la sub zona de estudio dos.	41
Tabla 4.7: Campo de esfuerzo <i>in situ</i> en la segunda sub zona de estudio.	43
Tabla 4.8: Extracto de perfiles de tronadura ocurridos dentro de la sub zona de estudio tres.	45
Tabla 4.9: Campo de esfuerzo <i>in situ</i> en la tercera sub zona de estudio.....	47