

Tabla de contenidos

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
CAPÍTULO 1	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Motivación del Trabajo	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Alcances del Estudio	3
1.5 Estructura del Trabajo de Investigación	3
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES.....	4
2.1 Antecedentes Generales sobre Panel Caving	4
2.1.1 Hundibilidad.....	4
2.1.2 Modelo Conceptual del Proceso de Hundimiento.....	6
2.1.3 Tipos de Panel Caving	7
2.2 Modelamiento Numérico en Mecánica de Rocas	11
2.2.1 Tipos de Modelamiento Numérico.....	12
2.2.2 Modelamiento Numérico del Hundimiento	19
2.3 Sismicidad	23
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	26
CAPÍTULO 4: MODELAMIENTO NUMÉRICO MEDIANTE <i>3DEC</i>	29
4.1 Construcción de modelo caso base en <i>3DEC</i>	29
4.1.1 Modelo constitutivo	29
4.1.2 Propiedades del macizo rocoso	30
4.1.3 Propiedades de la falla principal	31
4.1.4 Tamaño del modelo.....	31
4.1.5 Tamaño de la zonificación	33
4.1.6 Condiciones de borde.....	34

4.1.7	Estado tensional In-Situ	35
4.1.8	Construcción de socavación inicial.....	37
4.1.9	Avance en dirección hacia la falla	40
4.1.10	Equilibrio de fuerzas en estado pre-minería.....	42
4.1.11	Excavación de socavación inicial.....	44
4.1.12	Excavación de avance de socavación.....	45
4.1.13	Cálculo de sismicidad	46
4.2	Construcción de modelo con hundimiento en <i>3DEC</i>	47
4.2.1	Modelo constitutivo	47
4.2.2	Tamaño de la zonificación	48
4.2.3	Construcción malla de extracción de socavación inicial.....	48
4.2.4	Construcción malla de extracción de socavación de avance.....	50
4.2.5	Plan de extracción	51
4.2.6	Hundimiento.....	52
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD		55
5.1	Modelo base	55
5.1.1	Caso inicial.....	55
5.1.2	Casos con diferente manto y dirección de manto	59
5.1.3	Casos con diferentes parámetros de resistencia y rigidez	63
5.2	Modelo con Hundimiento.....	72
5.2.1	Caso inicial.....	72
5.2.2	Casos con diferente manto	76
5.2.3	Casos con distintos parámetros de calidad geomecánica	82
5.2.4	Caso con distinto plan de producción	90
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		97
6.1	Conclusiones del estudio	97
6.1.1	Modelo Base	97
6.1.2	Modelo con Hundimiento	98
6.2	Recomendaciones	99
Bibliografía		100

ANEXO A.....A-1
ANEXO B.....B-1
ANEXO C.....C-1

Listado de figuras

Figura 2-1: Gráfico de hundibilidad de Laubscher (Barlett, 1998).....	5
Figura 2-2: Modelo conceptual de un hundimiento (Duplancic & Brady, 1999)	6
Figura 2-3: Panel Caving con hundimiento convencional (Roja et al, 2000)	7
Figura 2-4: Esfuerzos inducidos Panel Caving con hundimiento convencional (Karzulovic, 1998)	8
Figura 2-5: Panel Caving con hundimiento previo (Rojas et al, 2000).....	9
Figura 2-6: Esfuerzos inducidos Panel Caving con hundimiento previo (Karzulovic, 1998)	9
Figura 2-7: Panel Caving con hundimiento avanzado (Jofré et al, 2000).....	10
Figura 2-8: Esfuerzos inducidos Panel Caving con hundimiento avanzado (Karzulovic, 1998)	10
Figura 2-9: Comparación de métodos diferenciales (Vallejos, 2015; apuntes curso MI6061)	14
Figura 2-10: Método de elementos de borde.....	14
Figura 2-11: Atributos de métodos de elementos discretos (Cundall y Hart, 1992).....	17
Figura 2-12: Cronología de métodos de elementos distintos	19
Figura 2-13: Tipos de comportamiento del macizo (Vallejos, 2015; apuntes curso MI4060).....	20
Figura 2-14: Diagrama de flujo de simulación de un hundimiento en programa FLAC3D (Board & Pierce, 2009)	23
Figura 3-1: Resumen de metodología	28
Figura 4-1: Vista isométrica de las regiones de zonificación	34
Figura 4-2: Condiciones de borde del modelo	35
Figura 4-3: Gráfico de hundibilidad de Laubscher (Barlett, 1998).....	38
Figura 4-4: Socavación inicial en modelo caso base, vista isométrica	39
Figura 4-5: Socavación inicial en modelo caso base, vista plano YZ.....	39
Figura 4-6: Socavación inicial en modelo caso base, vista plano XY	40
Figura 4-7: Modelo caso base de avance en dirección a la estructura, vista isométrica.	41
Figura 4-8: Modelo caso base de avance en dirección a la estructura, plano YZ.	41
Figura 4-9: Modelo caso base de avance en dirección a la estructura, plano XY.....	42
Figura 4-10: Gráfico de fuerzas desbalanceadas en modelo elástico.....	43
Figura 4-11: Gráfico de fuerzas desbalanceadas en modelo CaveHoek.	44
Figura 4-12: Extracción de socavación inicial en modelo caso base, plano YZ.....	45
Figura 4-13: Extracción de avance de 80 metros en modelo caso base, plano YZ.....	46
Figura 4-14: Algoritmo de cálculo de sismicidad	47
Figura 4-15: Malla de extracción de 20 x 15 m sin operativizar	49
Figura 4-16: Puntos de extracción de socavación inicial	50
Figura 4-17: Puntos de extracción del plan de avance.....	51
Figura 4-18: Modelo con hundimiento en el periodo 3, vista isométrica	52

Figura 4-19: Modelo con hundimiento en el periodo 3, plano YZ	53
Figura 4-0-20: Modelo con hundimiento en el periodo 9, vista isométrica	53
Figura 4-21: Modelo con hundimiento en el periodo 9, plano YZ	54
Figura 5-1: Etapa pre-excavación	55
Figura 5-2: Etapa con un avance de socavación de 70 m.	56
Figura 5-3: Etapa con un avance de socavación de 80 m.	56
Figura 5-4: Etapa con un avance de socavación de 100 m.	57
Figura 5-5: Etapa con un avance de socavación de 120 m.	57
Figura 5-6: Potencia sísmica Caso 1.1.....	58
Figura 5-7: Magnitud de sismos Caso 1.1.....	59
Figura 5-8: A: Caso 1.1 & B: Caso 1.2, plano YZ.....	60
Figura 5-9: A: Caso 1.3 & B: Caso 1.4, plano YZ.....	60
Figura 5-10: Potencia sísmica acumulada casos 1.1-1.4 con GSI 70.....	61
Figura 5-11: Potencia sísmica acumulada casos 1.1-1.4 con GSI 55.....	61
Figura 5-12: Esquema distancia mínima entre frente y la falla con manteo 60°	62
Figura 5-13: Esquema distancia mínima entre frente y falla con manteo 30°	62
Figura 5-14: Potencia sísmica acumulada casos 1.5-1.8 con GSI 70.....	64
Figura 5-15: Potencia sísmica acumulada casos 1.5-1.8 con GSI 55.....	65
Figura 5-16: Pendiente de potencia sísmica con GSI 70	65
Figura 5-17: Pendiente potencia sísmica con GSI 55	66
Figura 5-18: Área deslizante acumulada con GSI 70.....	67
Figura 5-19: Área deslizante acumulada con GSI 55.....	68
Figura 5-20: Potencia sísmica variando rigidez Casos 1.9-1.10 con GSI 70.....	69
Figura 5-21: Potencia sísmica variando rigidez Casos 1.9-1.10 con GSI 55	69
Figura 5-22: Área deslizante acumulada variando rigidez Casos 1.9-1.10 con GSI 70..	70
Figura 5-23: Área deslizante acumulada variando rigidez Casos 1.9-1.10 con GSI 55..	70
Figura 5-24: Plan de avance en el caso con hundimiento.	73
Figura 5-25: Periodos a1m1(A) y a1m2 (B) del Caso 2.1	73
Figura 5-26: Periodos a1m3(A) y a1m4 (B) del Caso 2.1	74
Figura 5-27: Periodos a1m5(A) y a1m6 (B) del Caso 2.1	74
Figura 5-28: Periodos a1m7(A) y a1m8 (B) del Caso 2.1	74
Figura 5-29: Periodos a1m9(A) y a1m10 (B) del Caso 2.1	75
Figura 5-30: Periodos a1m11(A) y a1m12 (B) del Caso 2.1	75
Figura 5-31: Potencia sísmica acumulada Caso 2.1.....	75
Figura 5-32: Propagación del hundimiento en el periodo a1m11 de los casos 2.1 (A) y 2.2 (B) con GSI 70	77
Figura 5-33: Propagación del hundimiento en el periodo a1m11 de los casos 2.3 (A) y 2.4 (B) con GSI 70	77
Figura 5-34: Propagación del hundimiento en el periodo a1m11 de los casos 2.1 (A) y 2.2 (B) con GSI 55	78

Figura 5-35: Propagación del hundimiento en el periodo a1m11 de los casos 2.3 (A) y 2.4 (B) con GSI 55	78
Figura 5-36: Potencia sísmica casos 2.1-2.4 con GSI 70	79
Figura 5-37: Potencia sísmica casos 2.1-2.4 con GSI 55	79
Figura 5-38: Pendientes de potencia sísmica Casos 2.1-2.4 con GSI 70	80
Figura 5-39: Pendientes de potencia sísmica Casos 2.1-2.4 con GSI 55	80
Figura 5-40: Área deslizante casos 2.1-2.4 con GSI 70	81
Figura 5-41: Área deslizante casos 2.1-2.4 con GSI 55	82
Figura 5-42: Potencia sísmica acumulada casos 2.5-2.8 con GSI 70.....	83
Figura 5-43: Potencia sísmica acumulada casos 2.5-2.8 con GSI 55.....	84
Figura 5-44: Pendientes de potencia sísmica Casos 2.5-2.7 con GSI 70	84
Figura 5-45: Pendientes de potencia sísmica Casos 2.5-2.7 con GSI 55	85
Figura 5-46: Área deslizante casos 2.5-2.7 con GSI 70	85
Figura 5-47: Área deslizante casos 2.5-2.7 con GSI 55	86
Figura 5-48: Potencia sísmica variando rigidez Casos 2.8-2.9 con GSI 70	87
Figura 5-49: Potencia sísmica variando rigidez Casos 2.8-2.9 con GSI 55	87
Figura 5-50: Área deslizante variando rigidez Casos 2.8-2.9 con GSI 70	88
Figura 5-51: Área deslizante variando rigidez Casos 2.8-2.9 con GSI 55	88
Figura 5-52: Plan de avance con plan de producción retardado	91
Figura 5-53: Caso 2.3 con GSI 70; (A) Periodo a1m6 & (B) Periodo a1m8	91
Figura 5-54: Caso 2.3 con plan de producción retardado con GSI 70; (A) Periodo a1m6 & (B) Periodo a1m8.....	92
Figura 5-55: Caso 2.3 con GSI 70; (A) Periodo a1m10 & (B) Periodo a2m1	92
Figura 5-56: Caso 2.3 con plan de producción retardado con GSI 70; (A) Periodo a1m10 & (B) Periodo a2m1	92
Figura 5-57: Caso 2.3 con GSI 55; (A) Periodo a1m6 & (B) Periodo a1m8	93
Figura 5-58: Caso 2.3 con plan de producción retardado con GSI 55; (A) Periodo a1m6 & (B) Periodo a1m8.....	93
Figura 5-59: Caso 2.3 con GSI 55; (A) Periodo a1m10 & (B) Periodo a2m1	93
Figura 5-60: Caso 2.3 con plan de producción retardado con GSI 55; (A) Periodo a1m10 & (B) Periodo a2m1	94
Figura 5-61: Potencia sísmica Caso 2.2 plan de producción retardado con GSI 70	94
Figura 5-62: Potencia sísmica Caso 2.2 plan de producción retardado con GSI 55	95
Figura 5-63: Área deslizante Caso 2.2 plan de producción retardado con GSI 70	95
Figura 5-64: Área deslizante Caso 2.2 plan de producción retardado con GSI 55	96
Figura A-1: Avance de socavación desde los 10 m a 60 m de izq. a derecha.....	A-1
Figura A-2: Avance de socavación desde los 70 m a 120 m de izq. a derecha.....	A-1

Listado de tablas

Tabla 4-1: Parámetros de la roca.....	30
Tabla 4-2: Parámetros de falla principal	31
Tabla 4-3: Dimensiones del modelo general.....	32
Tabla 4-4: Dimensiones de la zona de interés dentro del modelo.....	33
Tabla 4-5: Coordenadas zonificación de 15 metros.....	33
Tabla 4-6: Coordenadas de zonificación de 30 metros	33
Tabla 4-7: Coordenadas de zonificación de 60 metros	34
Tabla 4-8: Valores de constantes y gradientes de esfuerzos in-situ en 3DEC	37
Tabla 4-9: Coordenadas socavación inicial.....	38
Tabla 4-10: Coordenadas zonificación de 20 metros.....	48
Tabla 4-11: Coordenadas de zonificación de 40 metros	48
Tabla 5-1: Casos con distinto manto y dirección de manto.....	59
Tabla 5-2: Distancia mínima entre frente y falla	63
Tabla 5-3: Casos con distintos parámetros de resistencia	64
Tabla 5-4: Magnitud de sismos con GSI 70.....	66
Tabla 5-5: Magnitud de sismos con GSI 55.....	67
Tabla 5-6: Casos con distintos parámetros de rigidez.....	68
Tabla 5-7: Cuadro comparativo de variación de rigidez con GSI 70.....	71
Tabla 5-8: Cuadro comparativo de variación de rigidez con GSI 55.....	71
Tabla 5-9: Magnitud de sismos caso 2.1	76
Tabla 5-10: Casos con distinto manto	76
Tabla 5-11: Casos con distintos parámetros de resistencia.....	83
Tabla 5-12: Casos con distintos parámetros de rigidez.....	86
Tabla 5-13: Cuadro comparativo de variación de rigidez GSI 70	89
Tabla 5-14: Cuadro comparativo de variación de rigidez GSI 55	90
Tabla B-1: Ubicación espacial de puntos de extracción de socavación inicial.....	B-1
Tabla B-2: Ubicación espacial de puntos de extracción de socavación inicial.....	B-2
Tabla B-3: Ubicación espacial de puntos de extracción de socavación inicial.....	B-3
Tabla B-4: Ubicación espacial de puntos de extracción de socavación inicial.....	B-4
Tabla C-1: Ubicación espacial de los puntos de extracción de socavación de avance .C-1	
Tabla C-2: Ubicación espacial de los puntos de extracción de socavación de avance .C-2	
Tabla C-3: Ubicación espacial de los puntos de extracción de socavación de avance .C-3	

Listado de ecuaciones

Ecuación 2-1: Radio Hidraulico.....	4
<i>Ecuación 2-2: Deformación de un cuerpo.</i>	20
Ecuación 2-3: Momento sísmico determinado por Heaton & Heaton, 1989	24
Ecuación 2-4: Potencia sísmica (Ben-Zion & Rice, 1981)	24
Ecuación 2-5: Momento sísmico (Mendecki, 1993).....	24
Ecuación 2-6: Magnitud local (Gutenberg & Richter, 1956).....	24
Ecuación 2-7: Energía sísmica (Mendecki, 1993)	24
Ecuación 2-8: Esfuerzo aparente (Wyss & Brune, 1968)	24
Ecuación 2-9: Magnitud local	24
Ecuación 2-10: Magnitud local (Hanks & Kanamori, 1979)	25
Ecuación 4-1: Módulos de deformación volumétrica	30
Ecuación 4-2: Módulo de corte	30
Ecuación 4-3: Parámetros Hoek-Brown modificado (Hoek et al, 2002)	31
Ecuación 4-4: Solución analítica alrededor de un túnel circular simplificada en un campo hidrostática, σ_r	31
Ecuación 4-5: Solución analítica alrededor de un túnel circular simplificada en un campo hidrostática, σ_θ	32
Ecuación 4-6: Solución analítica alrededor de una esfera simplificada en un campo hidrostática, σ_r	32
Ecuación 4-7: Solución analítica alrededor de una esfera simplificada en un campo hidrostática, σ_θ	32
Ecuación 4-8: Gradiente de esfuerzos in-situ en 3DEC	35
Ecuación 4-9: Gradiente de esfuerzos in-situ en 3DEC simplificado	36
Ecuación 4-10: Sistema de ecuaciones para eje z en 3DEC	36
Ecuación 4-11: Cálculo de constantes para ecuaciones de esfuerzos in-situ en 3DEC ..	36
Ecuación 4-12: Relación entre RMR y MRMR (Flores y Karzulovic 2002)	37