

## Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1 Motivación del trabajo .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General .....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Alcances.....	2
1.4 Límite de batería .....	4
1.5 Metodología de trabajo .....	6
1.6 Contenidos por capítulo.....	6
1.7 Términos y definiciones .....	7
Capítulo 2: Antecedentes de la faena .....	8
2.1 Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea .....	8
2.1.1 Reformulación .....	8
2.2 Tasa de incorporación de área socavada.....	11
Capítulo 3: Antecedentes bibliográficos.....	12
3.1 Block caving.....	12
3.1.1 Socavación.....	12
3.1.2 Tasa de incorporación de área socavada .....	14
3.2 Pre acondicionamiento (PA) .....	15
3.2.1 Fracturamiento hidráulico (FH).....	15
3.2.2 Debilitamiento dinámico con explosivos (DDE) .....	16
3.2.3 Preacondicionamiento mixto o intensivo.....	17
3.3 Modelado de sistemas mediante simulación .....	18
3.3.1 La simulación computacional como herramienta de análisis de modelos .....	19
3.3.2 Simulación en minas de block/panel caving.....	21
3.4 Conclusión estado del arte.....	22
Capítulo 4: Metodología simulación.....	23
4.1 Etapa 1: Formulación del problema .....	23
4.2 Etapa 2: Generación de Modelo Conceptual.....	23
4.2.1 Layout .....	23
4.2.2 Elementos principales .....	24

4.2.3	Parámetros de Entrada .....	24
4.2.4	Variables de Salida.....	24
4.2.5	Criterios de decisión y de movimiento .....	24
4.2.6	Modelos Paralelos .....	25
4.3	Etapa 3: Recolección y Análisis de Datos .....	25
4.4	Etapa 4: Generación del Modelo Computacional .....	26
4.4.1	Entidades.....	26
4.4.2	Locaciones .....	26
4.4.3	Rutas.....	26
4.4.4	Recursos .....	26
4.4.5	Llegadas .....	27
4.4.6	Procesamiento.....	27
4.4.7	Asignación de Turnos .....	27
4.4.8	Variables .....	27
4.4.9	Otros Elementos .....	27
4.5	Etapa 5: Verificación del Modelo .....	28
4.6	Etapa 6: Validación del Modelo.....	28
4.7	Etapa 7: Definición de Escenarios y Análisis de Sensibilidad.....	29
4.8	Etapa 8: Documentación.....	29
Capítulo 5: Modelo Conceptual .....		30
5.1	Layout .....	30
5.1.1	Layout subnivel de producción .....	30
5.1.2	Layout subnivel de hundimiento .....	31
5.2	Elementos principales .....	33
5.2.1	Lugares principales .....	33
5.2.2	Actividades del programa de socavación y preacondicionamiento .....	38
5.2.3	Equipos principales y sus características .....	44
5.2.4	Estrategia de socavación y apertura de bateas.....	45
5.2.5	Estrategia de preacondicionamiento .....	46
5.2.6	Estrategia de incorporación de área en conjunto.....	47
5.2.7	Estrategia de traslado de material tronado .....	49
5.3	Parámetros de Entrada .....	50
5.4	Variables de Salida .....	52

5.5	Criterios de decisión y de movimiento .....	52
5.6	Modelos Paralelos .....	53
Capítulo 6: Modelo Computacional .....		54
6.1	Entidades .....	54
6.2	Locaciones .....	55
6.3	Rutas .....	57
6.4	Recursos.....	59
6.5	Llegadas .....	59
6.6	Procesamiento .....	60
6.7	Asignación de Turnos .....	63
6.8	Variables .....	65
6.8.1	Variables de entrada .....	65
6.8.2	Variables de salida .....	67
6.9	Otros Elementos .....	68
6.9.1	Tiempo .....	68
6.9.2	Número de réplicas.....	68
6.10	Verificación del Modelo .....	68
Capítulo 7: Resultados .....		69
7.1	Definición de Escenarios y Análisis de Sensibilidad .....	69
7.1.1	Escenarios .....	69
7.1.2	Análisis de sensibilidad.....	70
7.2	Resultados simulación determinística.....	70
7.3	Resultados simulación estocástica .....	71
7.4	Resultados sensibilización.....	72
7.4.1	Altura de socavación .....	72
7.4.2	Horas operativas .....	73
7.4.3	Rendimiento jumbos .....	73
7.4.4	Producción .....	74
7.5	Análisis de resultados .....	75
Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones .....		78
Capítulo 9: Bibliografía .....		80
Anexos .....		83

## Índice de tablas

Tabla 1-1 Condiciones Propuestas .....	3
Tabla 1-2 Términos utilizados .....	7
Tabla 2-1 Tasa de Incorporación de Área .....	11
Tabla 3-1 Benchmark tasas de socavación (Rivero Abarca, 2008) .....	15
Tabla 5-1 Simbología de esquema de secuencia de incorporación de área, bateas y DDE..	35
Tabla 5-2 Distancia desde punto de extracción al chancador .....	37
Tabla 5-3 Resumen actividades .....	43
Tabla 5-4 Equipos según actividad .....	44
Tabla 5-5 Leyenda secuencia de incorporación de área y bateas general .....	45
Tabla 5-6 Leyenda figuras secuencia de incorporación de área, bateas y DDE .....	48
Tabla 5-7 Programa de obras del mes .....	49
Tabla 5-8 Rendimientos promedio actividades (CODELCO, 2017) .....	50
Tabla 5-9 Rendimientos promedio LHD (Hatch, 2017) .....	51
Tabla 5-10 Parámetros tiros socavación emulsión (Codelco Chile V. C., 2017) .....	51
Tabla 5-11 Parámetros bateas emulsión (Codelco Chile V. C., 2017) .....	51
Tabla 5-12 Normalización de diseño de tronadura de socavación para ANFO .....	51
Tabla 5-13 Normalización de diseño de tronadura de bateas para ANFO .....	51
Tabla 5-14 Parámetros chimeneas (Codelco Chile V. C., 2017) .....	52
Tabla 5-15 Características del material tronado .....	52
Tabla 6-1 Simbología locaciones con capacidad 1 modelo de simulación .....	55
Tabla 6-2 Simbología locaciones con capacidad infinita modelo de simulación .....	56
Tabla 6-3 Recursos definidos para modelo computacional .....	59
Tabla 6-4 Relación entre entidades y recursos .....	61
Tabla 6-5 Rendimientos actividades .....	66
Tabla 6-6 Rendimientos LHD .....	66
Tabla 7-1 Escenarios definidos para simulación .....	69
Tabla 7-2 Escenarios sensibilización .....	70
Tabla 7-3 Últimas actividades por calle .....	70
Tabla 7-4 Resultados escenarios principales .....	71
Tabla 7-5 Resultados sensibilización altura de socavación .....	72
Tabla 7-6 Resultados sensibilización horas operativas .....	73
Tabla 7-7 Resultados sensibilización rendimiento jumbos .....	73
Tabla 7-8 Nuevos escenarios de producción para sensibilización .....	75
Tabla 7-9 Resultados sensibilización programa de producción .....	75
Tabla 10-1 Cubicación tonelaje chimeneas .....	85
Tabla 10-2 Factores de corrección emulsión - ANFO .....	86
Tabla 10-3 Tiempos operativos y pérdidas operacionales .....	86
Tabla 10-4 Desglose instalación guirnalda y tacos .....	86
Tabla 10-5 Nombres abreviados de actividades cartas Gantt .....	88

## Índice de figuras

Figura 1-1 Vista en planta subnivel de hundimiento MB centrales .....	5
Figura 1-2 Vista en planta subnivel de producción MB centrales .....	5
Figura 2-1 Macro bloques Chuquicamata Subterráneo .....	8
Figura 2-2 Configuración de MB para reformulación de PMCHS.....	9
Figura 2-3 Diseño de 2 MB según reformulación.....	10
Figura 2-4 Vista isométrica cámara de chancado.....	11
Figura 2-5 Vista isométrica continuación sistema de chancado.....	11
Figura 3-1 Vista 3D de explotación por block caving con sistema LHD .....	12
Figura 3-2 Diagrama de estabilidad (Laubscher, 1994) .....	13
Figura 3-3 Secuencia constructiva en el método de hundimiento convencional (Rivero Abarca, 2008) .....	14
Figura 3-4 Proceso de preacondicionamiento (Gottreux Vollet, 2016).....	15
Figura 3-5 Pasos para llevar a cabo el fracturamiento hidráulico.....	16
Figura 3-6 Metodología DDE en métodos por Hundimiento.....	17
Figura 3-7 Esquema de la utilización de PA mixto (Catalan, Onederra, & Chitombo, 2012) .....	18
Figura 3-8 Esquema general de proceso de modelado.....	18
Figura 5-1 Vista en planta superposición NH con NP para MB N01 y S01 .....	30
Figura 5-2 Vista en planta de subnivel de producción MB N01 y S01 .....	31
Figura 5-3 Vista en planta de subnivel de hundimiento MB N01 y S01 .....	32
Figura 5-4 Vista en planta de diseño original de subnivel de hundimiento .....	32
Figura 5-5 Disposición de bateas en subnivel de producción y hundimiento, vista en planta .....	33
Figura 5-6 Secuencia de incorporación de área, bateas y DDE 1 mes subnivel de hundimiento.....	34
Figura 5-7 Secuencia de incorporación de área, bateas y DDE 1 mes subnivel de producción .....	34
Figura 5-8 Accesos al subnivel de producción.....	36
Figura 5-9 Accesos al subnivel de hundimiento .....	36
Figura 5-10 Entradas al chancador.....	37
Figura 5-11 Procesamiento de actividades de socavación.....	41
Figura 5-12 Procesamiento de actividades de apertura de bateas .....	42
Figura 5-13 Procesamiento de actividades de preacondicionamiento con DDE .....	42
Figura 5-14 Secuencia de incorporación de área y bateas general.....	45
Figura 5-15 Esquema de diseño de PA por DDE.....	46
Figura 5-16 Ejemplo diseño de DDE (Marín, 2012) .....	47
Figura 5-17 Secuencia de incorporación de área, bateas y DDE 1 mes subnivel de hundimiento.....	48
Figura 5-18 Secuencia de incorporación de área, bateas y DDE 1 mes subnivel de producción .....	49
Figura 5-19 Ejemplo movimiento por etapas.....	52
Figura 5-20 Sectores de subnivel de hundimiento (NH) .....	53

Figura 6-1 Locaciones subnivel de hundimiento .....	56
Figura 6-2 Locaciones subnivel de producción.....	57
Figura 6-3 Rutas subnivel de hundimiento.....	58
Figura 6-4 Rutas subnivel de producción.....	58
Figura 6-5 Procesamiento de actividades de socavación.....	62
Figura 6-6 Procesamiento de actividades de apertura de bateas .....	62
Figura 6-7 Procesamiento de actividades de preacondicionamiento con DDE.....	63
Figura 6-8 Calendario equipos .....	64
Figura 6-9 Calendario recursos tronadura .....	65
Figura 7-1 Gráfico de resultados escenarios principales .....	71
Figura 7-2 Gráfico de resultados sensibilización altura de socavación .....	72
Figura 7-3 Gráfico de resultados sensibilización horas operativas .....	73
Figura 7-4 Gráfico de resultados sensibilización rendimiento jumbos.....	74
Figura 7-5 Gráfico incremental tasas de incorporación de área .....	74
Figura 7-6 Gráfico de resultados sensibilización programa de producción .....	75
Figura 10-1 Diseño batea.....	84
Figura 10-2 Diseño socavación 10 m.....	85
Figura 10-3 Sectores de subnivel de hundimiento (NH) .....	87
Figura 10-4 Nomenclatura calles subnivel de producción (NP) .....	87
Figura 10-5 Carta Gantt de calle 1 Oeste, subnivel de hundimiento .....	89
Figura 10-6 Carta Gantt de calle 2 Oeste, subnivel de hundimiento .....	89
Figura 10-7 Carta Gantt de calle 3 Oeste, subnivel de hundimiento .....	89
Figura 10-8 Carta Gantt de calle 4 Oeste, subnivel de hundimiento .....	90
Figura 10-9 Carta Gantt de calle 5 Oeste, subnivel de hundimiento .....	90
Figura 10-10 Carta Gantt de calle 6 Oeste, subnivel de hundimiento .....	91
Figura 10-11 Carta Gantt de calle 8 Oeste, subnivel de hundimiento .....	91
Figura 10-12 Carta Gantt de calle 1 Este, subnivel de hundimiento.....	91
Figura 10-13 Carta Gantt de calle 2 Este, subnivel de hundimiento.....	92
Figura 10-14 Carta Gantt de calle 3 Este, subnivel de hundimiento.....	92
Figura 10-15 Carta Gantt de calle 4 Este, subnivel de hundimiento.....	92
Figura 10-16 Carta Gantt de calle 5 Este, subnivel de hundimiento.....	93
Figura 10-17 Carta Gantt de calle 6 Este, subnivel de hundimiento.....	93
Figura 10-18 Carta Gantt de calle 7 Este, subnivel de hundimiento.....	93
Figura 10-19 Carta Gantt de calle 8 Este, subnivel de hundimiento.....	93
Figura 10-20 Carta Gantt de calle 1, subnivel de producción .....	94
Figura 10-21 Carta Gantt de calle 2, subnivel de producción .....	95
Figura 10-22 Carta Gantt de calle 3, subnivel de producción .....	96
Figura 10-23 Carta Gantt de calle 4, subnivel de producción .....	96
Figura 10-24 Carta Gantt de calle 5, subnivel de producción .....	97
Figura 10-25 Carta Gantt de calle 6, subnivel de producción .....	97
Figura 10-26 Carta Gantt de calle 7, subnivel de producción .....	97
Figura 10-27 Carta Gantt de calle 8, subnivel de producción .....	98