

# TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Motivación de estudio.....	3
1.3. Objetivos .....	4
1.3.1. Objetivo general .....	4
1.3.2. Objetivos específicos .....	4
1.4. Alcances .....	4
1.5. Contexto .....	5
1.5.1. Proyecto minero .....	5
1.5.2. Características del yacimiento .....	5
1.6. Metodología de investigación .....	8
1.7. Contenidos por capítulo .....	10
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	11
2.1. Introducción .....	11
2.2. Material granular .....	11
2.3. Fragmentación.....	12
2.3.1. Tipos de fragmentación .....	14
2.3.2. Mecanismos de fragmentación .....	14
2.3.3. Monitoreo de la fragmentación .....	16
2.3.4. Modelos predictivos de fragmentación .....	16
2.4. Estudios a escala laboratorio.....	21
2.4.1. Análisis de similitud .....	21
2.4.2. Fuerzas dominantes en el modelo físico.....	22
2.4.3. Estudio fragmentación secundaria con modelo físico .....	23
2.5. Caracterización de material.....	24
2.5.1. Coeficiente de uniformidad y curvatura .....	24
2.5.2. Factor de forma.....	24
2.5.3. Carga puntual.....	26
2.6. Estimación de esfuerzos verticales .....	26
2.7. Modelo de fragmentación secundaria .....	28
2.7.1. Función selección.....	29
2.7.2. Función de quiebre .....	30
2.8. Conclusiones del capítulo .....	33

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	35
3.1. Introducción .....	35
3.2. Descripción modelo físico y equipos .....	35
3.2.1. Modelo físico .....	35
3.2.2. Equipos .....	37
3.3. Procedimiento experimental .....	37
3.3.1. Curvas fragmentación secundaria .....	37
3.3.2. Construcción modelo de conminución .....	39
3.4. Granulometría .....	40
3.5. Plan experimental.....	43
3.6. Conclusiones del capítulo .....	44
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	45
4.1. Introducción .....	45
4.2. Caracterización material.....	45
4.2.1. Coeficiente de uniformidad y curvatura .....	45
4.2.2. Factor de forma.....	45
4.2.3. Ensayo carga puntual.....	46
4.2.4. Análisis caracterización .....	46
4.3. Curvas experimentales de fragmentación secundaria .....	47
4.3.1. Curvas de fragmentación secundaria Q<S, QES y PEK, 4 MPa.....	47
4.3.2. Análisis curvas de fragmentación secundaria para Q<S, QES y PEK, 4 MPa 48	
4.3.3. Curvas de fragmentación secundaria QES, 2 y 4 MPa .....	49
4.3.4. Análisis curvas de fragmentación secundaria QES, 2 y 4 MPa .....	50
4.4. Análisis resultados trabajos previos .....	52
4.5. Modelo de fragmentación secundaria .....	53
4.5.1. Selección parámetros de ajuste .....	54
4.5.2. Construcción y grado de ajuste modelo de conminución .....	54
4.5.3. Análisis de sensibilidad de los parámetros, modelo de conminución .....	58
4.5.4. Aplicación modelo de conminución .....	59
4.5.5. Modelo de conminución con porcentaje de extracción.....	61
4.5.6. Análisis modelo de conminución a partir de datos de mina.....	64
4.6. Conclusiones del capítulo .....	65
4.6.1. Curvas experimentales de fragmentación secundaria .....	65
4.6.2. Modelo de conminución .....	65

CONCLUSIONES .....	66
5.1. Conclusiones generales.....	66
5.2. Recomendaciones para trabajo futuro .....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXO A.....	72
Diseño equipo experimental.....	72
ANEXO B.....	74
Caracterización material.....	74
ANEXO C.....	82
Modelo de conminución .....	82

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Recursos minerales del yacimiento Chuquicamata (Codelco, 2009) .....	5
Figura 2: Caracterización yacimiento (Codelco, 2009) .....	6
Figura 3: Vista isométrica Chuquicamata, dominios geotécnicos (Codelco, 2009) .....	6
Figura 4: Vista en planta de los dominios estructurales y macro bloques (SRK, 2015) .....	7
Figura 5: Vista en planta, cota 1841, macro bloques N1 y S1 (Codelco, 2009) .....	7
Figura 6: Esquema metodología de investigación .....	9
Figura 7: Distribución de esfuerzos, material granular .....	12
Figura 8: Modelo conceptual de caving (Duplancic y Brady, 1999) .....	13
Figura 9: Distribución de tamaños de material quebrado, Laubscher (1994) .....	17
Figura 10: Curvas de fragmentación ( $d_{50}=8$ mm), Gómez (2014) .....	23
Figura 11: Definición radios en una partícula, esfericidad .....	25
Figura 12: Matriz de clasificación, esfericidad y redondez (Hoz, 2007) .....	25
Figura 13: Esquema general proceso de conminución .....	28
Figura 14: Esquema del proceso de conminución, funciones selección y quiebre, (Casali, 2012) .....	30
Figura 15: Modelo de flujo pistón .....	31
Figura 16: Dimensiones modelo físico (Olivares, 2014) .....	36
Figura 17: Modelo físico con sistema de manejo de materiales .....	36
Figura 18: Esquema metodología experimental .....	38
Figura 19: Montaje modelo físico (Gómez, 2014) .....	39
Figura 20: Diagrama construcción modelo de conminución .....	40
Figura 21: Curva de fragmentación primaria esperada, QES (SRK Consulting, 2015) ....	41
Figura 22: Esquema columna de extracción discretizada .....	61
Figura 23: Secuencia de extracción, columna de 300 m .....	62
Figura 24: Vista isométrica y planta de batea, modelo físico (Olivares, 2014) .....	72
Figura 25: Dimensiones batea, modelo físico (Olivares, 2014) .....	72
Figura 26: Vista isométrica pala escalada, modelo físico .....	73
Figura 27: Vista isométrica y planta pala escalada, Autocad .....	73
Figura 28: Clasificación fragmentos, dominio QES .....	77
Figura 29: Clasificación fragmentos, dominio PEK .....	77
Figura 30: Clasificación fragmentos, dominio $Q<S$ .....	78

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen modelos predictivos de fragmentación secundaria .....	20
Tabla 2: Listado de condiciones de similitud, Pineda M. (2012) .....	22
Tabla 3: Parámetros ecuación de Janssen-Nedderman .....	27
Tabla 4: Características modelo físico .....	35
Tabla 5: Mallas seleccionadas para replicación curva fragmentación primaria .....	42
Tabla 6: Plan experimental .....	43
Tabla 7: Coeficiente de uniformidad y curvatura .....	45
Tabla 8: Factor de forma según dominio .....	45
Tabla 9: Clasificación dominio según matriz de esfericidad y redondez .....	46
Tabla 10: Is(50) según dominio geotécnico .....	46
Tabla 11: Resumen caracterización material .....	46
Tabla 12: Fragmentación secundaria, 3 dominios geotécnicos estudiados (4 MPa) .....	48
Tabla 13: Fragmentación secundaria, dominio QES (2 y 4 MPa) .....	49
Tabla 14: D50 y D80, dominio QES, escala mina .....	51
Tabla 15: Resumen factor de forma, trabajos previos .....	53
Tabla 16: Resumen índice de carga puntual, trabajos previos .....	53
Tabla 17: Combinaciones de parámetros buscados para el modelo de conminución .....	54
Tabla 18: Parámetros de ajuste, modelo de conminución .....	55
Tabla 19: Ajuste por intervalo, QES (2 MPa), modelo de conminución .....	56
Tabla 20: Ajuste por intervalo, QES (4 MPa), modelo de conminución .....	56
Tabla 21: Análisis de sensibilidad, caso 1 a 4 .....	58
Tabla 22: Análisis de sensibilidad, caso 5 a 7 .....	59
Tabla 23: Parámetros BCF para estimación fragmentación secundaria .....	59
Tabla 24: Comparación fragmentación secundaria, SRK (2015) vs modelo de conminución .....	60
Tabla 25: Reducción fragmentos según avance extracción, ejemplo modelo de conminución .....	63
Tabla 26: Reducción según porcentaje extracción .....	64
Tabla 27: Esfericidad y redondez, dominio QES .....	74
Tabla 28: Esfericidad y redondez, dominio PEK .....	75
Tabla 29: Esfericidad y redondez, dominio Q<S .....	76
Tabla 30: Ensayo de carga puntual, dominio PEK .....	79
Tabla 31: Ensayo de carga puntual, dominio QES .....	80
Tabla 32: Ensayo de carga puntual, dominio Q<S .....	81
Tabla 33: EC para los 7 casos, ajuste modelo de conminución .....	82
Tabla 34: ECM para los 7 casos, ajuste modelo de conminución .....	82
Tabla 35: Masa extraída según experimento .....	82

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Modelo empírico, Bridgewater (2003).....	18
Ecuación 2: Coeficiente de uniformidad.....	24
Ecuación 3: Coeficiente de curvatura .....	24
Ecuación 4: Definición esfericidad partícula (Cho et all., 2006) .....	25
Ecuación 5: Definición redondez partícula (Cho et all., 2006) .....	25
Ecuación 6: Índice de carga puntual no corregido .....	26
Ecuación 7: Índice de carga puntual corregido .....	26
Ecuación 8: Conversión $I_s(50)$ a UCS.....	26
Ecuación 9: Fórmula de Janssen-Nedderman .....	27
Ecuación 10: Función selección .....	29
Ecuación 11: Razón de quiebre original .....	30
Ecuación 12: Nueva razón de quiebre, incluyendo carga vertical .....	30
Ecuación 13: Forma acumulativa, función de quiebre .....	30
Ecuación 14: Expresión general conminución.....	31
Ecuación 15: Ecuación cinética general de la molienda batch .....	32
Ecuación 16: Resolución matricial de la ecuación de conminución.....	32

## ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1: Estimación de esfuerzos según área de flujo y profundidad.....	28
Gráfico 2: Curva de fragmentación primaria, escala laboratorio y mina.....	41
Gráfico 3: Curva de fragmentación primaria replicada, escala laboratorio .....	42
Gráfico 4: Curvas fragmentación secundaria, 3 dominios geotécnicos estudiados (4 MPa) .....	47
Gráfico 5: Curva fragmentación secundaria, dominio QES (2 y 4 MPa) .....	49
Gráfico 6: Curvas experimentales fragmentación secundaria QES, escala mina .....	50
Gráfico 7: Curvas experimentales fragmentación secundaria QES, escala mina con desviación estándar .....	51
Gráfico 8: Comparación D50, resultados actuales con trabajos previos .....	52
Gráfico 9: Comparación D80, resultados actuales con trabajos previos .....	52
Gráfico 10: Ajuste modelo de conminución, curva QES (2 MPa) .....	55
Gráfico 11: Ajuste modelo de conminución, curva QES (4 MPa) .....	56
Gráfico 12: Evolución D80 y D50, estimado por el modelo de conminución para QES, escala laboratorio .....	57
Gráfico 13: Reducción porcentual D80 y D50, estimado por el modelo de conminución para QES, escala mina.....	58
Gráfico 14: Comparación fragmentación secundaria, SRK (2015) vs modelo de conminución.....	60
Gráfico 15: Fragmentación secundaria final según avance de extracción, ejemplo modelo de conminución .....	62
Gráfico 16: Modelo de conminución con porcentajes extracción vs BCF .....	63
Gráfico 17: Curvas granulométricas de muestras, QES (2 MPa).....	83
Gráfico 18: Curvas granulométricas de muestras, QES (4 MPa) .....	83
Gráfico 19: Curvas granulométricas de muestras, $Q < S$ (4 MPa).....	84

Gráfico 20: Curvas granulométricas de muestras, PEK (4 MPa).....	84
Gráfico 21: Fragmentación secundaria bajo un rango de esfuerzos, QES, modelo de conminución.....	85
Gráfico 22: Evolución D80 y D50, estimado por el modelo de conminución para QES, escala mina .....	85
Gráfico 23: 33% extracción columna, avance bloque I.....	86
Gráfico 24: 66% extracción columna, avance bloque II.....	86
Gráfico 25: 100% extracción columna, avance bloque III.....	87
Gráfico 26: 25% extracción columna, avance bloque I.....	87
Gráfico 27: 50% extracción columna, avance bloque II .....	88
Gráfico 28: 75% extracción columna, avance bloque III.....	88
Gráfico 29: 100% extracción columna, avance bloque IV .....	89