

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1	1
1 Introducción.....	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.....	3
1.5 Contenidos por capítulo	3
CAPÍTULO 2	4
2 Revisión Bibliográfica	4
2.1 Introducción	4
2.2 Flujo gravitacional	4
2.2.1 Elipsoide de extracción.....	4
2.2.2 Altura de interacción	9
2.2.3 Recuperación minera	12
2.3 Fragmentación	12
2.4 Diseño de mallas y bateas de extracción.....	15
2.5 Colgaduras.....	15
2.5.1 Arcos continuos	15
2.5.2 Arcos de material grueso.....	17
2.6 Modelo físico	19
2.6.1 Análisis de similitud	19
2.6.2 Efecto de la granulometría	19
2.6.3 Escala	20
2.6.4 Estudio de colgaduras mediante modelos físicos.....	20
2.7 Antecedentes Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea	20
2.7.1 Diseño Nivel de Producción.....	21
2.7.2 Estudio de fragmentación	22

2.7.3	Fragmentación primaria	27
2.7.4	Fragmentación secundaria	28
2.8	Conclusiones del capítulo	30
2.8.1	Flujo gravitacional	30
2.8.2	Fragmentación.....	30
2.8.3	Colgadas.....	30
2.8.4	Modelo físico	30
2.8.5	Antecedentes Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea	30
CAPÍTULO 3.....		31
3	Metodología Experimental	31
3.1	Introducción	31
3.2	Procedimiento	31
3.2.1	Condiciones base y variables de entrada	32
3.2.2	Sistema de extracción	32
3.3	Configuración experimental	32
3.4	Construcción de modelo físico	35
3.4.1	Caja	36
3.4.2	Galería zanja y palas mecanizadas	37
3.4.3	Bateas.....	38
3.5	Preparación del material	44
3.6	Experimentos de flujo no confinado	48
3.6.1	Frecuencia de colgadas.....	48
3.6.2	Productividad de balde.....	51
3.6.3	Flujo del material.....	51
3.6.4	Recuperación minera	53
3.6.5	Registro de datos y duración de experimentos.....	54
3.7	Plan experimental	55
3.8	Procedimiento experimental.....	56
CAPÍTULO 4.....		57
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	57
4.1	Introducción	57
4.2	Frecuencia de colgadas.....	58
4.2.1	Masa entre colgadas.....	58
4.2.2	Tipo y altura de colgadas	61

4.3	Análisis de flujo	63
4.3.1	Elipsoides de extracción	63
4.3.2	Tonelaje remanente y recuperación minera	68
4.4	Productividad de balde.....	70
4.5	Determinación teórica del ángulo de fricción del material.....	73
4.5.1	Ángulo de fricción según altura de interacción	73
4.6	Influencia de las variables de estudio.....	74
4.7	Extrapolación de resultados a malla 16x17[m]	75
4.8	Conclusiones del capítulo.....	77
4.8.1	Frecuencia de colgaduras	77
4.8.2	Factor de llenado de balde	77
4.8.3	Análisis de flujo.....	77
4.8.4	Ángulo de fricción.....	77
CAPÍTULO 5.....		78
5	CONCLUSIONES.....	78
5.1	Conclusiones generales	78
5.2	Recomendaciones y trabajo futuro	79
6	BIBLIOGRAFÍA.....	80
ANEXO A.....		82
Estudio de colgaduras mediante modelos físicos.....		82
ANEXO B.....		83
Construcción de curvas		83
Estimación de curva granulométrica		83
Protocolo de construcción de curva en laboratorio		86
ANEXO C.....		89
Elipsoides de flujo		89
ANEXO D.....		93
Altura de interacción.....		93
Pilar mayor.....		93
Pilar menor		95
ANEXO E		97
Productividad de balde		97
ANEXO F		105
Caracterización de material		105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relación entre elipsoides de movimiento y extracción (Kvapil, 2008)	5
Figura 2: Perfiles de distribución de velocidad a)elipsoide de movimiento; b)elipsoide a velocidad fija (Kvapil, 2008)	6
Figura 3: Tipos de material granular (Kvapil, 2008).....	6
Figura 4: Coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008)	7
Figura 5: Ancho de flujo para distintos tipos de material (Kvapil, 2008).....	7
Figura 6: Efecto del tamaño de partícula en la movilidad, excentricidad y forma del elipsoide (Kvapil, 2008).....	8
Figura 7: Experimentos de flujo gravitacional (Marano, 1980)	9
Figura 8: Espaciamiento entre puntos de extracción (Laubscher, 1994)	10
Figura 9: Altura de interacción HIZ (Laubscher, 1994)	10
Figura 10: Altura de interacción HIZ debido al tonelaje remanente (Castro, 2012).....	11
Figura 11: Diagrama de zonas de estabilidad.....	13
Figura 12: Esfuerzos entre contactos en material granular (Craig, 2004)	14
Figura 13: Esquema de etapas de fragmentación (López, 2016)	14
Figura 14: Diagrama de estimación de la forma de un arco.....	17
Figura 15: Esquema de un arco mecánico.....	17
Figura 16: Distribución de esfuerzos en a) arco alto y b) arco bajo	17
Figura 17: Diseño conceptual del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (Codelco, 2009)	21
Figura 18: Malla tipo Teniente, distancia entre calles de 32 [m] (Vicepresidencia de Proyectos, Codelco).....	21
Figura 19: Sección transversal desarrollos subnivel de producción (Vicepresidencia de Proyectos, Codelco).....	22
Figura 20: Nivel superior PMCHS (Codelco, 2009)	23
Figura 21: Unidades geotécnicas básicas (UGTB) yacimiento Chuquicamata (Codelco, 2009)	24
Figura 22: Unidades geotécnicas básicas (UGTB), nivel de hundimiento cota 1841	24
Figura 23: Dominios estructurales y zona de estudio	25
Figura 24: Vista en planta de los dominios estructurales y macro bloques iniciales (SRK, 2011)	26
Figura 25: Curva de fragmentación primaria, Q=S (SRK, 2015).....	28
Figura 26: Procedimiento	31
Figura 27: Esquema batea corta escala mina, dimensiones en [m]	33
Figura 28: Esquema batea larga escala mina, dimensiones en [m].....	33
Figura 29: Perfil batea A-A, malla 16x15	34
Figura 30: Área de influencia de una batea a) teórica, b) en el modelo	37
Figura 31: Vista en planta malla 16x15 con representación de la sección del modelo físico	37
Figura 32: Diseño de balde 14 [yd ³], dimensiones en [mm], escala 1:50	38
Figura 33: Equipo mecanizado, pala 14 [yd ³] escala 1:50.....	38
Figura 34: Vista isométrica hundimiento convencional	39

Figura 35: Esquema de socavación radial en hundimiento convencional (Jofré, 2000).....	39
Figura 36: Simplificación del modelo para perfil batea, malla 16x15.....	40
Figura 37: Simplificación del crown pillar en modelo físico	41
Figura 38: Esquema final del modelo físico, escala 1:50	41
Figura 39: Representación del modelo a escala mina, vista en planta.....	42
Figura 40: Representación del modelo escala mina.....	42
Figura 41: Vista a) frontal y b) perfil del modelo físico, escala laboratorio [cm].....	43
Figura 42: Curva de fragmentación primaria, tamaño de fragmento en función del diámetro equivalente (gruesa)	44
Figura 43: Largos principales de un fragmento	45
Figura 44: Curva de fragmentación primaria, comparación granulometría gruesa-media	46
Figura 45: Curvas finales utilizadas en la experimentación.....	47
Figura 46: Esquema altura de colgadura	50
Figura 47: Colgadura tipo 2, altura a) sobre 4 [cm] y b) bajo 4 [cm]	50
Figura 48: Planta disposición de marcadores en el modelo, caja.....	51
Figura 49: Disposición de marcadores con respecto a los bordes del modelo	52
Figura 50: Disposición de marcadores en batea corta, malla 16x15.....	52
Figura 51: Disposición de marcadores, vista frontal [cm]	54
Figura 52: Colgadura tipo 1 vista a) frontal b) lateral, experimento 3	58
Figura 53: Tonelaje entre colgaduras en función de la malla de extracción	59
Figura 54: Masa entre colgaduras en función de la granulometría.....	60
Figura 55: Colgaduras > 4 [cm] en función de la granulometría, malla 16x15	62
Figura 56: Colgaduras > 4 [cm] en función de la granulometría, malla 16x20	62
Figura 57: Vista isométrica elipsoide de extracción, exp 6, 160 [kg].....	63
Figura 58: Elipsoide de extracción experimento 5, vista a) lateral b) frontal, 160 [kg]	64
Figura 59: a) Vista lateral y b) Vista frontal de los elipsoides de extracción	64
Figura 60: Ajuste del modelo debido al nivel de hundimiento (UCL).....	65
Figura 61: Ángulo de flujo en función de los marcadores extraídos a)malla 16x15; b)malla 16x20.....	66
Figura 62: Efecto de la pared en el flujo del material, experimento 6 (inicio, 500 y 1200 extracciones)	67
Figura 63: Factor de llenado granulometría media-fina.....	71
Figura 64: Distribución granulométrica, curva fina [m3].....	75
Figura 65: Extrapolación de frecuencia de colgaduras, malla 16x17[m] curva media	75
Figura 66: Altura de interacción para malla 16x17 [m]	76
Figura 67: Curva de fragmentación primaria, Q=S (SRK, 2015).....	83
Figura 68: Medida del largo máximo de un fragmento.....	84
Figura 69: Curva de fragmentación en función del diámetro equivalente.....	85
Figura 70 Curva de fragmentación en función del diámetro equivalente, escala 1:50	86
Figura 71: Harnero manual, malla de 2"	87
Figura 72: Cortador rotatorio	87
Figura 73 Curva de fragmentación primaria, comparación granulometría gruesa-media .	88
Figura 74: Flujo experimento 1 (inicio y 500 extracciones).....	89
Figura 75: Flujo experimento 2 (inicio, 500 y 800 extracciones).....	89
Figura 76: Flujo experimento 3 (inicio, 500 y 800 extracciones).....	90

Figura 77: Flujo experimento 4 (inicio, 500 y 800 extracciones).....	90
Figura 78: Flujo experimento 5 (inicio, 500 y 700 extracciones).....	91
Figura 79: Flujo experimento 6 (inicio, 500, 800 y 1250 extracciones).....	91
Figura 80: Perfil elipsoide de flujo visto desde la batea, experimento 6	92
Figura 81; Interacción elipsoide de flujo con pared lateral, experimento 6 1250 extracciones	92
Figura 82: Altura de interacción pilar mayor, experimento 1	93
Figura 83: Altura de interacción pilar mayor, experimentos 2 y 3	94
Figura 84: Altura de interacción pilar mayor, experimentos 4 y 5	94
Figura 85: Altura de interacción pilar mayor, experimento 6	95
Figura 86: Altura de interacción pilar menor, malla 16x15 [m].....	96
Figura 87: Altura de interacción pilar menor, malla 16x20 [m].....	96
Figura 88: Histograma productividad de balde experimento 1.....	97
Figura 89: Histograma productividad de balde experimento 2.....	98
Figura 90: Histograma productividad de balde experimento 3.....	98
Figura 91: Histograma productividad de balde experimento 4.....	99
Figura 92: Histograma productividad de balde experimento 5.....	99
Figura 93: Histograma productividad de balde experimento 6.....	100
Figura 94: Factor de llenado experimento 1	101
Figura 95: Factor de llenado experimento 2	101
Figura 96: Factor de llenado experimento 3	102
Figura 97: Factor de llenado experimento 4	102
Figura 98: Factor de llenado experimento 5	103
Figura 99: Factor de llenado experimento 6	103
Figura 100: Factor de llenado granulometría media-fina.....	104
Figura 101: Definición radios en una partícula, esfericidad	106
Figura 102: Matriz de clasificación, esfericidad y redondez (Hoz, 2007)	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de materiales granulares	5
Tabla 2: Diagrama de estabilidad (Laubscher, 1994)	12
Tabla 3: Estimación de esfuerzo máximo y mínimo sobre las paredes producidos por un arco de roca.....	18
Tabla 4: Análisis de similitud	19
Tabla 5: Factores de escala del análisis de similitud	19
Tabla 6: Orientación preferente de estructuras por dominio (SRK, 2011a).....	27
Tabla 7: Parámetros del macizo rocoso (SRK, 2015).	27
Tabla 8: Parámetros utilizados para simulación de fragmentación secundaria en BCF, SRK (2015)	28
Tabla 9: Resultados simulación de fragmentación secundaria Q=S, SRK (2015).....	29
Tabla 10: Dimensión de las bateas, escala mina	34
Tabla 11: Matriz de bateas utilizadas en la experimentación	35
Tabla 12: Representación geométrica de bateas experimentales, escala mina.....	35
Tabla 13: Componentes del modelo físico	36
Tabla 14: Diferencias entre ángulo de batea diseño real y simplificado, escala mina [m] ..	40
Tabla 15: Dimensiones finales de batea para el modelo experimental, escala mina [m] ..	40
Tabla 16: Dimensiones del modelo físico	41
Tabla 17: Comparación entre curvas granulométricas, escala mina [m]	47
Tabla 18: Comparación entre curvas granulométricas, escala laboratorio [mm]	47
Tabla 19: Curvas finales utilizadas en los experimentos	47
Tabla 20: Descripción de tipos de colgadura (Olivares, 2014)	48
Tabla 21: Esquema de tipos de colgadura.....	49
Tabla 22: Cantidad de marcadores en el modelo para cada configuración	53
Tabla 23: Tonelaje de la columna de mineral en función de la malla	53
Tabla 24: Parámetros requeridos para el análisis	54
Tabla 25: Plan experimental.....	55
Tabla 26: Análisis de experimentos.....	57
Tabla 27: Masa entre colgaduras, escala laboratorio.....	58
Tabla 28: Frecuencia de colgaduras	59
Tabla 29: Influencia de las variables de estudio en frecuencia de colgaduras.....	60
Tabla 30: Tipo de colgadura por experimento	61
Tabla 31: Clasificación de altura de colgaduras tipo 2	61
Tabla 32: Número de colgaduras mayores a 4 [cm].....	61
Tabla 33: Influencia de las variables de estudio en frecuencia de colgaduras sobre 4 [cm]	63
Tabla 34: Ángulo de flujo.....	65
Tabla 35: Ángulo de flujo en función de la extracción de marcadores	66
Tabla 36: Influencia de las variables de estudio en el ángulo de flujo	67
Tabla 37: Tonelaje remanente y recuperación minera	68
Tabla 38: Altura de interacción sobre nivel de hundimiento, <i>HIZUCL</i>	69
Tabla 39: Influencia de las variables de estudio en la recuperación minera.....	69

Tabla 40: Influencia de las variables de estudio en la altura de interacción	69
Tabla 41: Productividad de balde (escala laboratorio).....	70
Tabla 42: Factor de llenado	70
Tabla 43: Prueba t de Student, influencia de la granulometría en el factor de llenado.....	71
Tabla 44: Factor de llenado en función de la granulometría	72
Tabla 45: Influencia de las variables de estudio en el factor de llenado.....	72
Tabla 46: Determinación del ángulo de fricción.....	73
Tabla 47: Ángulo de fricción del material.....	73
Tabla 48: Influencia de las variables de estudio.....	74
Tabla 49: Extrapolación de resultados a malla 16x17[m].....	76
Tabla 50: Principales conclusiones respecto a colgaduras obtenidas de experimentos en modelos físicos.....	82
Tabla 51: Determinación del factor de forma de los fragmentos	84
Tabla 52: Parámetros estimación altura de interacción pilar mayor	93
Tabla 53: Parámetros estimación altura de interacción pilar menor.....	95
Tabla 54: Productividad de balde (escala laboratorio).....	100
Tabla 55: Factor de llenado	104
Tabla 56: Resumen caracterización material	105
Tabla 57: Tamaños característicos para Coeficiente de uniformidad y curvatura, curvas de fragmentación (1:50).....	105
Tabla 58: Coeficientes de uniformidad y curvatura	106
Tabla 59: Factor de forma de las partículas	107
Tabla 60: Ensayo de carga puntual, Q=S (Abarca, 2016).....	108
Tabla 61: Esfericidad y Redondez, Q=S (Abarca, 2016).....	109

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Relación entre volumen de extracción y movimiento (Kvapil, 2008).....	5
Ecuación 2: Coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008).....	6
Ecuación 3: Excentricidad de un elipsoide en función de sus semi-ejes	8
Ecuación 4: Ángulo de flujo (Vargas, 2010).....	11
Ecuación 5: Altura de interacción teórica (Castro, 2012).....	11
Ecuación 6: Recuperación minera	12
Ecuación 7: Radio hidráulico	12
Ecuación 8: Esfuerzo vertical.....	16
Ecuación 9: Ángulo de reducción	16
Ecuación 10: Ángulo de fricción interna aparente	16
Ecuación 11: Altura de arco para materiales débiles	16
Ecuación 12: Altura de arco para materiales resistentes.....	16
Ecuación 13: Esfuerzo horizontal producido por el arco sobre las paredes.....	18
Ecuación 14: Carga generada por la columna de mineral (Nedderman, 1992).....	18
Ecuación 15: Altura de interacción, HIZ	34
Ecuación 16: Área de influencia de un punto de extracción (Chacón, 1980).....	36
Ecuación 17: Diámetro equivalente en función del volumen	44
Ecuación 18: Largo medio en función del volumen	45
Ecuación 19: Frecuencia de colgaduras.....	48
Ecuación 20: Factor de llenado	51
Ecuación 21: Tonelaje remanente.....	53
Ecuación 22: Recuperación minera	53
Ecuación 23: Conversión a tonelaje entre colgaduras, Escala 1:50.....	58
Ecuación 24: Altura de interacción HIZ sobre el crown pillar.....	68
Ecuación 25: Altura de interacción respecto al nivel de hundimiento (UCL)	68
Ecuación 26: Capacidad nominal de balde (escala laboratorio).....	70
Ecuación 27: Ángulo de fricción en función del ángulo de flujo	73
Ecuación 28: Capacidad nominal de balde (escala laboratorio).....	100
Ecuación 29: Coeficiente de uniformidad (Craig, 2004)	105
Ecuación 30: Coeficiente de curvatura (Craig, 2004)	105
Ecuación 31: Esfericidad de partícula (Cho et al, 2006)	106
Ecuación 32: Redondez de partícula (Cho et al, 2006).....	106
Ecuación 33: Índice de carga puntual no corregido	107
Ecuación 34: Índice de carga puntual corregido	108