



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO MINA
CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

GERSON ISAÍ ELOY SOTOMAYOR ARRIAGADA

PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARÍA ELENA VALENCIA VERA
ÁLVARO ALTAMIRANO CONDOR

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR

AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil de Minas

POR: Gerson Sotomayor Arriagada

FECHA: Diciembre 2016

PROFESOR GUÍA: Raúl Castro Ruiz

RESUMEN

Uno de los principales focos de CODELCO en sus planes de negocio y desarrollo es el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, el cual busca contribuir con una producción de más de 350 [ktmf/año] en régimen y extender la vida de la División por aproximadamente 40 años. La mina subterránea está diseñada para extraer el mineral mediante *block caving*, a través de cuatro niveles en una configuración de macro bloques.

El objetivo principal de este trabajo es recomendar una malla de extracción para los macro bloques centrales N1 y S1 del nivel superior de la mina en función de la influencia del largo de batea y su ángulo hacia el pilar zanja en la frecuencia de colgaduras y el flujo del material fragmentado, esto último se ve representado por la altura de interacción sobre los pilares mayor y menor.

Mediante un modelo físico a escala 1:50 con dimensiones de 40[cm]x70[cm]x100[cm], se realizan experimentos de flujo no confinado. El modelo permite representar las mallas tipo Teniente de 16x15[m] y 16x20[m], con largos de batea de 11[m] y 14[m] y extrapolar los resultados a una malla 16x17[m]. El plan experimental considera 6 experimentos, donde además de los parámetros de diseño se incluye un cambio en la granulometría del material utilizado, permitiendo un rango mayor de análisis y la posibilidad de comparar el comportamiento de las variables de estudio una vez que la columna de mineral se encuentra en su última fase de extracción y la fragmentación secundaria ha generado cambios significativos en la granulometría del mineral.

Respecto a la frecuencia de colgaduras, los resultados muestran que el uso de la batea más larga reduce el número de eventos en torno al 50%, el efecto de la disminución del ángulo de batea en el mismo indicador es de casi un 16%, mientras que la granulometría más fina reduce el índice en un 58%.

Para el caso del flujo, los resultados indican que el tonelaje remanente sobre el *crown pillar* disminuye cuando los experimentos se realizan con la batea larga y al evaluar directamente la recuperación minera ésta aumenta casi un 2%.

Las variables más importantes que afectan los resultados de este estudio son el largo de batea y la granulometría del mineral, siendo la batea larga y la granulometría fina el mejor escenario. No obstante, el uso de malla 16x20 [m] resulta mejor opción respecto a la 16x15 [m] al evaluar la frecuencia de colgaduras.

La recomendación final es el uso de una malla 16x20 [m] con un largo de batea de 14 [m].

Los análisis permiten concluir sobre la influencia significativa del diseño de bateas en la productividad del proceso y sugieren una profundización en materia referente a las colgaduras en el proceso de extracción minera por *block/panel caving*.

RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

ABSTRACT

One of the main projects of CODELCO in their *PND* is the Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS), which seeks to contribute with more than 350 [ktmf / year] and extend the life of the Division for approximately 40 years. The underground mine is designed to extract the ore by block caving, through four levels in a *macroblock* configuration.

The main aim of this work is to recommend an extraction layout for N1 and S1 central macroblocks in the upper level of the mine, based on the influence of the drawbell length and drawbell angle in the hang-up frequency and the ore fragmented flow gravity, represented by the height of interaction zone on the crown and minor pillars. Dilution is not considered.

The experiment is developed by using a model with a scale 1:50; 40 [cm] x70 [cm] x100 [cm]. The model allows to represent drawpoint spacing 16x15 [m] and 16x20 [m], with a drawbell length 11 [m] and 14 [m] and extrapolate then the results to a drawpoint spacing 16x17 [m]. The experimental plan consisted in six experiments, four different kinds of drawbell were tested, allowing a wider range of analysis and the possibility to compare the behavior of the study variables once the column of mineral is in its final phase extraction and the secondary fragmentation has changed the granulometric distribution.

About the hang-up frequency, it was concluded that the use of the 14[m] drawbell length reduces the number of events around 50%, the effect of decreasing drawbell angle on the same indicator were not more than one 16%, while the finest granulometric distribution reduces the indicator by 58%.

About the ore flow gravity, it was concluded that the tonnage remaining over the crown pillar decreases when experiments are performed with 14[m] drawbell, and when the recovery is evaluated, it increases almost 2%.

The most important variables affecting the results of this investigation are the drawbell length and the particle size, being the best scenario the long drawbell and the finest distribution. However, the 16x20 [m] drawpoint spacing is a better option than 16x15 [m] when hang-up frequency is evaluated.

The final recommendation is the drawpoint spacing 16x20 [m] with a 14 [m] drawbell length.

Both hang-up frequency and gravity flow analysis allow to conclude about the significant influence on the drawbell design in the productivity, and suggest deeper investigations concerning the hang-up in block/panel caving method.

RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a mis padres, Edith y Moisés, por el sacrificio de tantos años y su apoyo incondicional, nada habría sido posible sin ustedes. A mi hermano Jonathan por su apoyo, consejo y confianza en cada decisión que he tomado, siempre estaré agradecido por acompañarme en cada etapa que he vivido. A mis sobrinos, Ignacio, Valentina y el bebé que viene en camino, por darme la motivación de ser mejor persona cada día.

A mi Adita, gracias por tanto amor, respeto, alegría y sinceridad. Hemos compartido muchas cosas, pero espero sea solo el comienzo de un largo camino juntos. Te amo.

A mi profesor guía Raúl Castro, por haberme confiado este trabajo y compartir su rigurosidad, conocimientos y motivación por la minería. A María Elena, que siempre ha estado dispuesta a ayudar y aconsejarme en todo este proceso. A Álvaro, por haberme apoyado desde el primer día cuando inició este proyecto.

A mis grandes amigos de la U: Nachito, Chato, Otu, Max, Julio y Camilo, con quien también compartí dos años viviendo juntos. A los grandes mineros: Juanpi, Mati, Francisquito, Gatica, Rupe, López, CZ, Lenin, Acro, Ibarra, Sepu y a todos los compañeros del Departamento de Minas con quienes tuve la oportunidad de compartir.

A Jaiva, Rorro y Panchito; grandes amigos con los que tuve la fortuna de vivir buenos años de esta etapa en el mítico 902. A Michael Colucho Silva, gran amigo y apoyo en mis primeros años viviendo en Santiago; por supuesto también a su familia. Les agradezco no sólo por los años que compartimos juntos, sino por estar siempre presentes cuando los he necesitado.

Al BCLab: Asieh, Sergio, Floyd, Casafont, Jimmy, Yina, Vane y Katherine; hicieron de este trabajo una grata experiencia. David, muchas gracias por tu amistad; estuviste conmigo desde el comienzo de este trabajo y me enseñaste mucho.

Al gran Lefonse, por haber sido un gran amigo y compañero de labores durante todo este trabajo que ahora casualmente, estamos cerrando juntos también.

A mis amigos de Temuco, los que han estado conmigo siempre: Matías, Carlos y Joaquín. Aunque la distancia no nos ha permitido vernos durante mucho tiempo, se que siempre puedo contar con ustedes.

Finalmente, a todos quienes de una u otra forma han formado parte de mi vida y fueron partícipes de tantas etapas y procesos importantes.

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	Colgaduras.....	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 colgaduras	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 colgaduras	58
4.2.1	Masa entre colgaduras	58
4.2.2	Tipo y altura de colgaduras	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

CAPÍTULO 1

1 Introducción

1.1 Introducción

La situación actual de la minería ha provocado el cierre de numerosas faenas y la implementación de mecanismos de gestión en los proyectos que aún poseen margen para optimizar sus procesos, llevando a las empresas a actualizar sus planes de negocios y desarrollo con el fin de aumentar sus productividades y disminuir los costos, volviéndose más competitivas. Suena lógico entonces, pensar que un proceso eficiente debiera estar provisto de estas holguras desde su diseño.

El aumento de la profundidad de los yacimientos minerales sitúa el razonamiento anterior en los métodos de extracción subterránea por hundimiento, incluyendo minas que migran sus operaciones en superficie a subterránea (Carter & Russel, 2000; Flores, 2004). Un caso particular es el de Chuquicamata, propiedad de CODELCO, que realiza un trabajo de transición de su operación a rajo abierto hacia una mina subterránea de cuatro niveles capaz de extraer mediante *block caving*, en configuración de macro bloques, las cuantiosas reservas que el yacimiento aun posee.

La minería por hundimiento se aplica a yacimientos masivos y mediante el flujo gravitacional del material fragmentado este es extraído desde su base a través de bateas. Para inducir el *caving* se requiere socavar la base del bloque o panel hasta que los esfuerzos inducidos por este corte basal desestabilicen el techo y el mineral comience a fracturarse continuamente.

Esta memoria busca establecer la relación de los parámetros de diseño, asociados a la malla de extracción en el nivel de producción de una mina de *block/panel caving*, en la frecuencia de colgaduras y la recuperación minera; factores que apuntan directamente a la continuidad de la operación y al valor del negocio respectivamente.

Para lo anterior se realizan experimentos en un modelo físico a escala de laboratorio que permite extraer el material fragmentado variando tanto características de diseño de las bateas, como el largo y el ángulo hacia la pared de la zanja, como la granulometría del material. Para una mejor representatividad, este último proviene de los desarrollos en la zona de estudio del yacimiento, previa preparación y escalamiento de su granulometría.

1.2 Motivación del trabajo

La situación por la que atraviesa la minería hoy en día, asociada al deceso del súper ciclo del precio del cobre, ha llevado a las empresas a actualizar sus planes de negocios y desarrollo enfocándose principalmente en aumentar la productividad y mejorar los costos y la competitividad.

Para Codelco, uno de los principales focos está en el proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, el cual contribuirá con una producción de mas de 350 [ktmf/año] en régimen y extenderá la vida de la División por aproximadamente 40 años.

El estado actual del proyecto ofrece la posibilidad de estudiar el impacto de los parámetros de diseño, asociados a la malla de extracción, en la productividad; lo que se traduce en evitar problemas que afecten la continuidad de la operación. Bajo este concepto se enmarca el estudio de colgaduras en el proceso productivo, que corresponde a una de las principales interferencias presentes en los puntos de extracción.

El estudio de colgaduras se ha desarrollado tanto en terreno como experimentalmente, enfocado en la predicción del fenómeno y la cuantificación de las principales variables que inciden en su frecuencia. No obstante, aún no se ha desarrollado la aplicabilidad de esta teoría, motivando así la realización de este trabajo de memoria.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de memoria es recomendar una malla de extracción para el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea en función de la frecuencia de colgaduras y la recuperación minera.

1.3.2 Objetivos específicos

Para poder cumplir el objetivo general, se consideran los siguientes objetivos específicos:

- Construir un modelo físico a escala de laboratorio que permita representar la columna de mineral en el entorno del área de influencia de una batea.
- Preparar el material que represente la curva granulométrica de fragmentación primaria del mineral a escala de laboratorio.
- Establecer una relación entre el largo de batea con la frecuencia de colgaduras y el flujo de material fragmentado.
- Establecer una relación entre el ángulo de la batea hacia el pilar zanja con la frecuencia de colgaduras y el flujo del material fragmentado.
- Estudiar el efecto de la granulometría con la frecuencia de colgaduras y el flujo del material fragmentado.

1.4 Alcances

- Se utiliza un modelo físico a escala 1:50 que representa una batea con dos puntos de extracción y una columna de material constante de 50 [m] sobre el entorno del área de influencia de la misma (para lo anterior el modelo fue rellenado durante la experimentación).
- La extracción se realiza de manera alternada entre ambos puntos mediante dos palas mecanizadas que representan equipos LHD de 14 [yd³].
- Los experimentos se realizan en un modelo de bajas cargas
- No se considera humedad.
- No se considera dilución.
- El estudio no busca definir índices específicos a escala mina sino una tendencia en el comportamiento de las variables de estudio.
- La zona de estudio corresponde a los macro bloques N1 y S1 del nivel superior de la mina cota 1841.
- Se evalúan las mallas 16 x 15 [m], 16 x 17 [m] y 16 x 20 [m].
- El material utilizado en la experimentación es proveniente de los desarrollos realizados en los avances del PMCHS.

1.5 Contenidos por capítulo

A continuación se detallan los distintos capítulos mediante el cual se desarrolla el presente trabajo de investigación:

Capítulo 1: Introducción del trabajo. Se precisa: motivación del desarrollo de esta investigación, objetivos, alcances y metodología de investigación.

Capítulo 2: Revisión bibliográfica. Revisión del estado actual de los antecedentes en materia de flujo gravitacional, fragmentación, diseño de mallas y bateas de extracción, estudios de colgaduras y uso de modelos físicos. Se realiza además una descripción del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea, el diseño a nivel de Ingeniería Básica y el estudio de fragmentación del cual se obtuvo información base para este trabajo.

Capítulo 3: Metodología experimental. Detalla el procedimiento mediante el cual se definen las variables de estudio, la construcción del modelo físico, preparación del material, la definición del plan experimental y el protocolo mediante el cual se desarrollan los experimentos.

Capítulo 4: Resultados. Se presentan los resultados obtenidos en cada experimento y los análisis realizados, con foco en la frecuencia de colgaduras y recuperación minera.

Capítulo 5: Conclusiones. Se presentan las conclusiones generales de este trabajo junto con las recomendaciones y el trabajo futuro.

CAPÍTULO 2

2 Revisión Bibliográfica

2.1 Introducción

En el presente capítulo, se describen los estudios que el autor considera relevantes para contextualizar al lector en los tópicos que abarca esta investigación; justificando además, el uso de un modelo a escala para representar el fenómeno de flujo gravitacional de material granular, basado en la extracción de una columna de mineral a través de una batea.

Las áreas de estudio son descritas a continuación:

- Flujo Gravitacional
- Fragmentación
- Diseño de mallas y bateas de extracción
- Colgaduras
- Modelo físico

2.2 Flujo gravitacional

El método de extracción por *block/panel caving* basa su funcionamiento en el fenómeno de flujo gravitacional, entendido como el movimiento de material granular que se desplaza de su posición inicial debido a la acción de la gravedad. Aplicado a la minería, el macizo rocoso se fragmenta y el proceso de hundimiento hace fluir el material hacia los puntos de extracción ubicados en el nivel de producción (Castro, 2006).

Nedderman (1992) definió el material granular como un conglomerado de partículas individuales sólidas que se encuentran en contacto directo entre sí, en el cual, si no existe cohesión entre las partículas, la forma que adopte el material depende solo de las condiciones de borde y la gravedad (Jeager et al., 1996). Es por esto que, con objeto de simular el mecanismo del *caving*, se han desarrollado estudios de flujo utilizando material granular poniendo en evidencia la necesidad de desarrollar un amplio conocimiento en el comportamiento del flujo gravitacional para ser aplicado en el diseño de minas basadas en la extracción por hundimiento. Además, como menciona Chitombo (2010), el comportamiento del flujo gravitacional tiene un impacto significativo no solo en el diseño minero sino en la estrategia de extracción y por ende en la recuperación del método.

2.2.1 Elipsoide de extracción

Las investigaciones de Kvapil (1965) mediante experimentos en modelos físicos a escala de laboratorio, utilizando arena como material granular, concluyeron sobre la existencia de dos volúmenes principales de flujo producto de la extracción del material desde la base del modelo: zona de extracción (E_z) y zona de movimiento (M_z). La zona de extracción se define por el volumen determinado con el material que fluye desde su posición inicial para ser extraído desde un punto basal de extracción, mientras que la zona de movimiento esta definida por el volumen de partículas que varían su posición inicial pero no son extraídas.

Las zonas de extracción y movimiento se definen geoméricamente por elipsoides de revolución. La Figura 1 muestra el elipsoide de extracción (E_E) y de movimiento (E_L) con sus respectivos volúmenes asociados y especifica además la siguiente relación:

$$V_{EE} = V_C = V_F = \frac{1}{15} V_{EL}$$

Ecuación 1: Relación entre volumen de extracción y movimiento (Kvapil, 2008)

Donde V_{EE} corresponde al volumen de extracción y V_{EL} al volumen de movimiento; V_C es el volumen del canal de flujo de salida (embudo) y V_F el volumen del cono de material extraído.

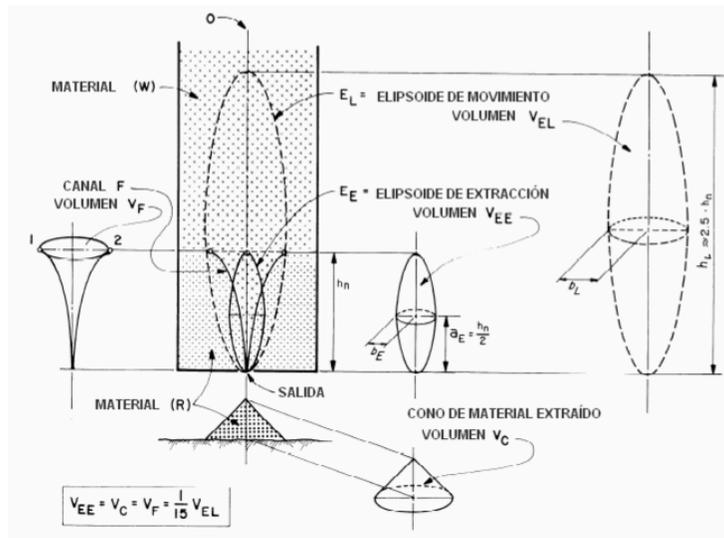


Figura 1: Relación entre elipsoides de movimiento y extracción (Kvapil, 2008)

En la Figura 2 se observa (a) la distribución de velocidades del elipsoide de movimiento y (b) el elipsoide tal que todas las partículas del contorno que lo definen tienen la misma velocidad. Estos perfiles se realizan con la observación de líneas horizontales en los modelos experimentales, con las cuales se puede apreciar el comportamiento del flujo del mineral.

Un material puede contener fragmentos de distintas formas y tamaños, luego es importante poder clasificar los tipos de material. Kvapil (2008), define cuatro tipos de materiales gruesos (Figura 3) los cuales se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1: Clasificación de materiales granulares

Tipo	Característica
1	Material grueso con partículas grandes y redondeadas. Tamaño y forma uniforme.
2	Mezcla de material grueso con una partículas grandes y angulares. Tamaño uniforme
3	Mezcla de partículas grandes, fragmentos de roca, gravilla y arena.
4	Mezcla de fragmentos grandes y partículas y fragmentos de tamaño medio, gravilla, arena y polvo de roca.

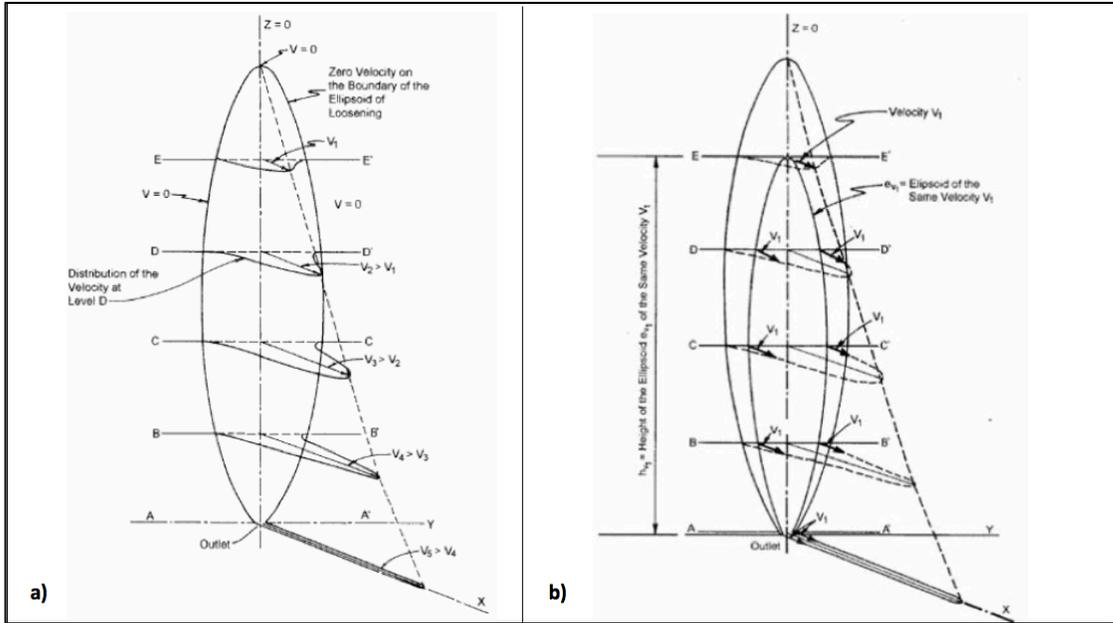


Figura 2: Perfiles de distribución de velocidad a) elipsoide de movimiento; b) elipsoide a velocidad fija (Kvapil, 2008)

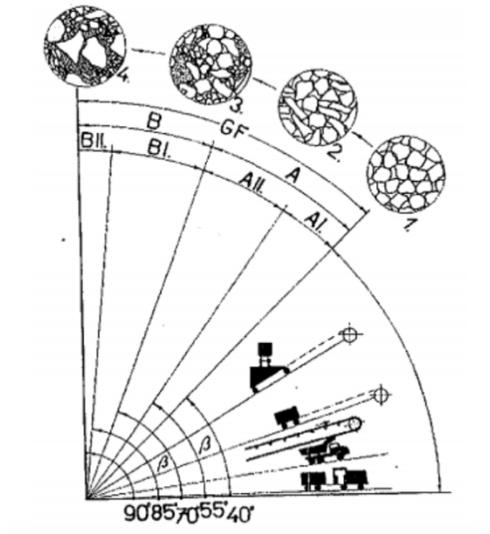


Figura 3: Tipos de material granular (Kvapil, 2008)

Kvapil (2008) define además que el transporte para materiales granulares del tipo B es sólo para piques de traspaso y bateas, tal como sucede en minas de *caving*.

El movimiento de una partícula, asociado al flujo, es una característica propia de cada material, pudiendo ser representada por el coeficiente de fricción interna (f). Este último puede ser estimado de manera simple como la tangente del ángulo de reposo del material (φ) (Figura 4) y luego el coeficiente de movilidad se calcula a partir de f según la Ecuación 2.

$$m = 1 + 2f^2 - 2f^2\sqrt{1 + f^2}$$

Ecuación 2: Coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008)

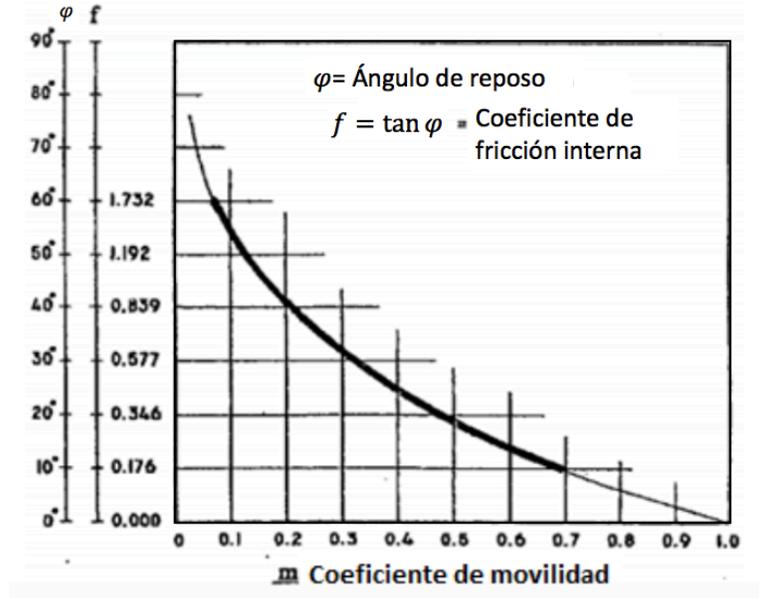


Figura 4: Coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008)

Considerando una misma altura de extracción, la forma del elipsoide varía en función del tipo de material. Como se observa en la Figura 5, un material fino (a) presenta una zona de flujo determinada por un diámetro menor que un material grueso (c).

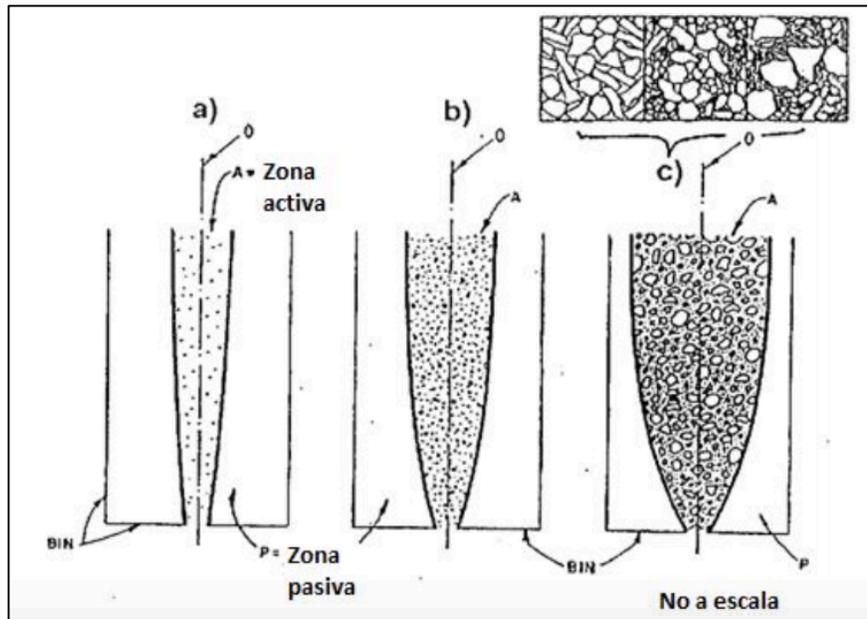


Figura 5: Ancho de flujo para distintos tipos de material (Kvapil, 2008)

Para dimensionar el efecto de la granulometría en la forma del elipsoide se utiliza se emplea el concepto de excentricidad, un término geométrico definido en la Ecuación 3.

$$\varepsilon = \frac{1}{a} \sqrt{(a^2 - b^2)}$$

Ecuación 3: Excentricidad de un elipsoide en función de sus semi-ejes

Donde ε es la excentricidad del elipsoide, a es el semi-eje mayor y b el semi-eje menor del mismo. Luego, para un mismo tipo de material, la excentricidad varía según la altura de extracción; asimismo, otros factores detallados por Kvapil (2008) afectan la excentricidad del elipsoide:

- Forma de los fragmentos.
- Rugosidad superficial y fricción entre partículas.
- Interacción (contacto) local entre partículas.
- Porcentaje de polvo.
- Porcentaje de finos, arenas y arcillas.
- Porcentaje de humedad.
- Compresibilidad, compactación y plasticidad.
- Resistencia de los fragmentos.
- Magnitud, distribución y dirección de cargas y esfuerzos externos.
- Tasa de extracción.

Los factores anteriores tienen un efecto en la movilidad del material, la que a su vez afecta la forma y excentricidad de los elipsoides. Este comportamiento se observa en la Figura 6.

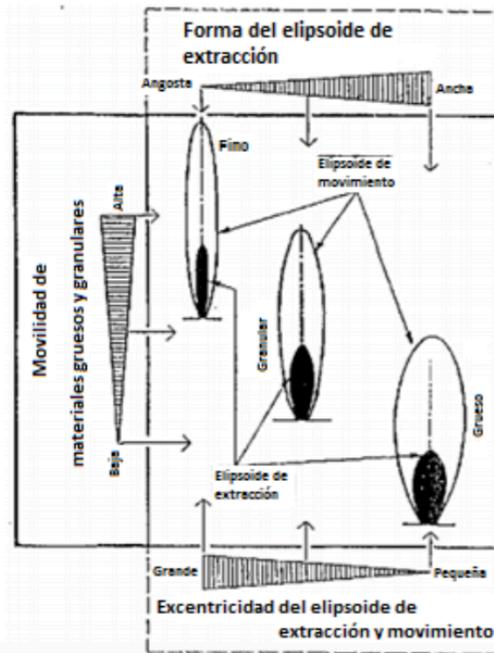


Figura 6: Efecto del tamaño de partícula en la movilidad, excentricidad y forma del elipsoide (Kvapil, 2008)

2.2.2 Altura de interacción

Cuando las zonas de flujo son producidas por la extracción de un solo punto, los volúmenes asociados se denominan zona de extracción aislada (IEZ) y zona de movimiento aislado (IMZ) (Kvapil, 2008; Fuenzalida, 2012). Experimentos desarrollados por Marano (1980) muestran el efecto de la distancia entre puntos de extracción en un modelo tridimensional en la interacción de los elipsoides (ver Figura 7).

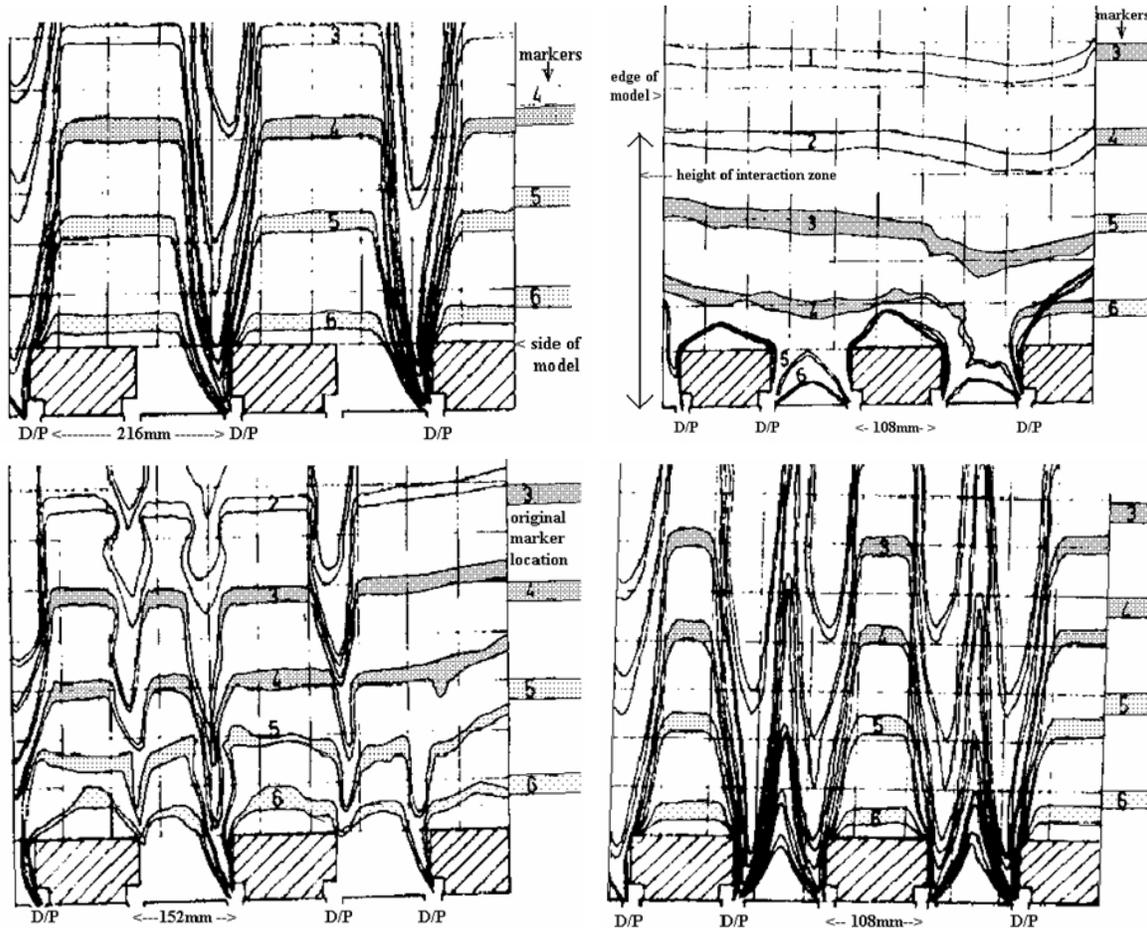


Figura 7: Experimentos de flujo gravitacional (Marano, 1980)

En base a los modelos de arena de Marano, Laubscher (1994) establece la *Teoría de Interacción*: cuando la distancia entre puntos de extracción es menor a 1,5 veces el diámetro de tiraje aislado (DTA), la columna de material desciende de manera uniforme hasta cierta altura, denominada altura de interacción. Cuando se cumple el espaciamiento entre puntos, se considera *flujo interactivo*.

Para determinar la altura de interacción, Laubscher (1994) propone una metodología para el diseño de mallas de extracción mediante ábacos empíricos que relacionan la calidad del macizo rocoso, la granulometría esperada y el DTA con el espaciamiento máximo y mínimo de los puntos de extracción (ver Figura 8).

CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

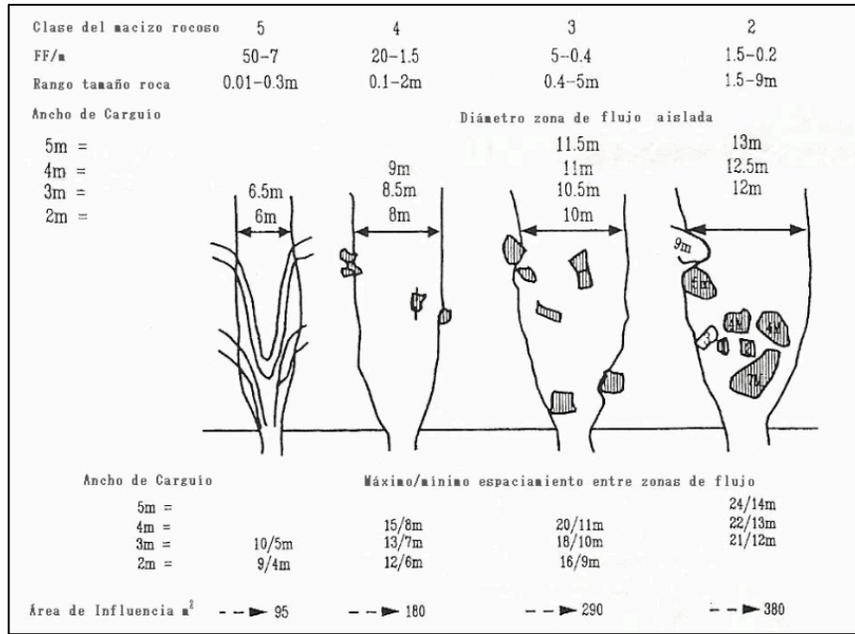


Figura 8: Espaciamiento entre puntos de extracción (Laubscher, 1994)

Una vez obtenido el espaciamiento máximo y mínimo, el ábaco de la Figura 9 permite estimar la altura de interacción HIZ con la calidad del macizo y los espaciamientos definidos anteriormente.

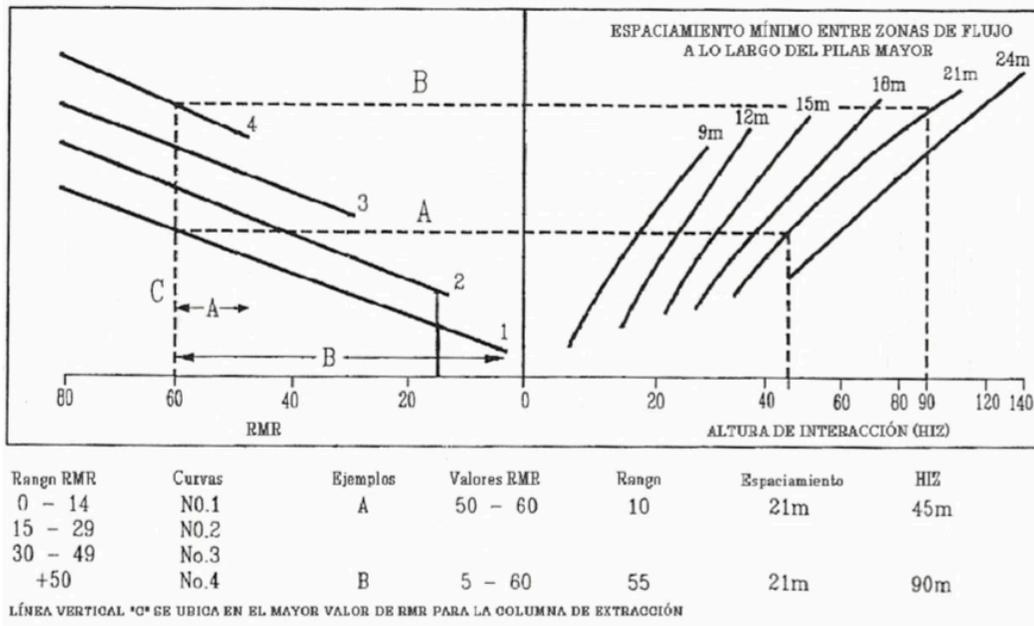


Figura 9: Altura de interacción HIZ (Laubscher, 1994)

Vargas (2010) define el ángulo de flujo de la zona de extracción según la Ecuación 4:

$$\alpha = 45 + \frac{\phi}{2}$$

Ecuación 4: Ángulo de flujo (Vargas, 2010)

Donde ϕ corresponde al ángulo de fricción interna del material.

Según Castro (2012), la zona de flujo desarrollada por el tiraje de un punto de extracción puede ser caracterizada por el ángulo de flujo como:

$$HIZ = \frac{d_p - w_p}{2} \tan \alpha$$

Ecuación 5: Altura de interacción teórica (Castro, 2012)

Donde HIZ es la altura máxima a la cual las zonas de flujo de puntos de extracción adyacentes se interceptan, medida desde el techo del nivel de producción; d_p corresponde a la distancia entre centros de elipsoides de extracción adyacentes y w_p es el ancho del punto de extracción (ver Figura 10).

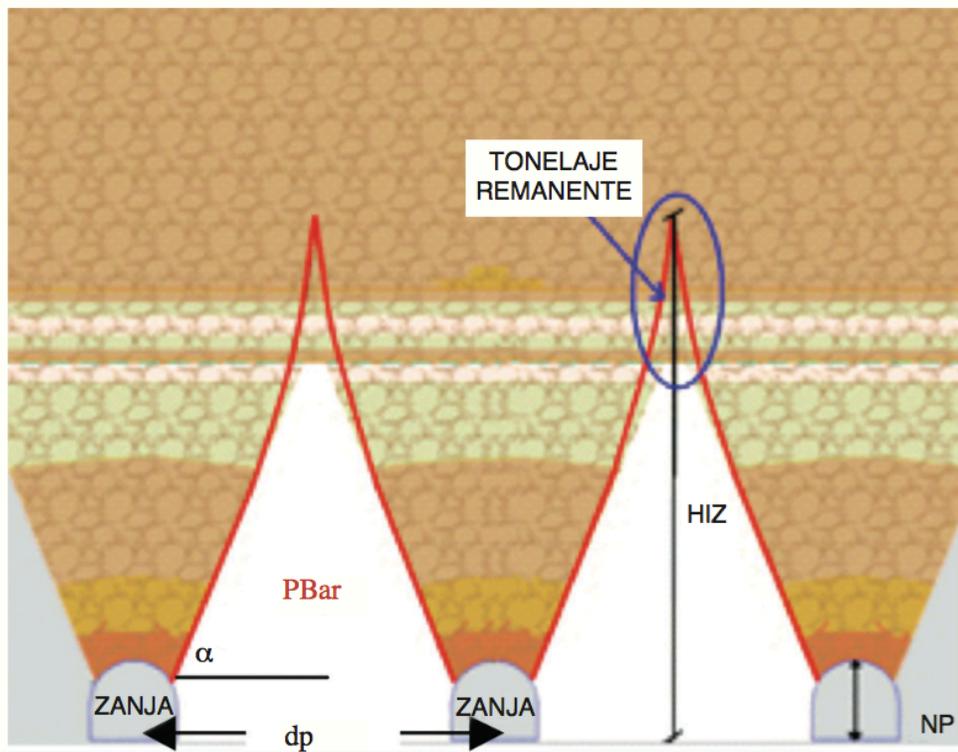


Figura 10 Altura de interacción HIZ debido al tonelaje remanente (Castro, 2012)

2.2.3 Recuperación minera

Debido al ángulo de flujo, la interacción de zonas de extracción ocurre sobre lo proyectado en el nivel de hundimiento, originando así un tonelaje remanente sobre este último. Este material remanente genera una pérdida de eficiencia del método denominada recuperación minera, que se define para un *block/panel caving* como el porcentaje de la columna que finalmente es extraída durante todo el proceso (ver Ecuación 6).

$$\text{Recuperación} = \frac{\text{ton}_{\text{columna}} - \text{ton}_{\text{remanente}}}{\text{ton}_{\text{columna}}} [\%]$$

Ecuación 6: Recuperación minera

2.3 Fragmentación

Cuando el *caving* ha iniciado, una serie de etapas de reducción de tamaño ocurren con los fragmentos, a este proceso se le llama fragmentación. Para que se produzca el hundimiento, los esfuerzos presentes deben generar un ambiente de inestabilidad de las paredes de la roca in-situ. Laubscher (1994) define tres zonas en función de las características del macizo rocoso (*MRMR*) y el radio hidráulico basándose en información de distintas minas (ver Tabla 2), donde el radio hidráulico se define según la Ecuación 7.

$$\text{Radio hidráulico} = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}}$$

Ecuación 7: Radio hidráulico

Tabla 2: Diagrama de estabilidad (Laubscher, 1994)

Zona	Características
Estable	Solo requiere soporte local.
Transición	Zona inestable, intermedia entre la zona estable y de hundimiento.
Hundimiento	Hundimiento progresivo de las paredes del macizo hacia las zonas anteriormente hundidas.

Dado que la hundibilidad depende del *MRMR*, se establece que el *caving* es función de:

- Esfuerzos del macizo rocoso.
- Estructuras geológicas.
- Esfuerzos in-situ.
- Agua.
- Esfuerzos inducidos.

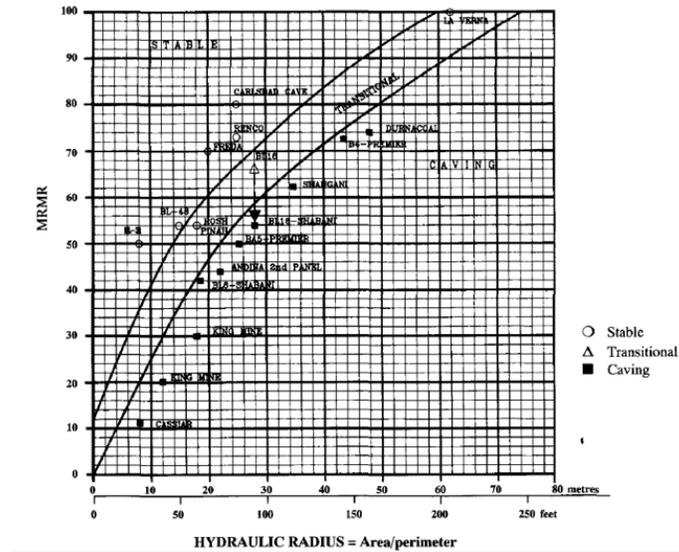


Figura 11: Diagrama de zonas de estabilidad

Laubscher (1994) establece que, para minas de *caving*, la fragmentación del mineral tiene incidencia en:

- Espaciamiento de puntos de extracción.
- Entrada de dilución en la columna de extracción.
- Control de tiraje.
- Productividad de los puntos de extracción.
- Costos de reducción secundaria.
- Daño por reducción secundaria.

Respecto a la productividad de los puntos de extracción, la fragmentación no solo incide directamente sino es el principal factor que la determina.

Debido a la carga generada en el material granular producto del peso de la columna de extracción, se genera una distribución de esfuerzos a través de los fragmentos tal como se aprecia en la Figura 12 (Craig, 2004). Esta distribución favorece la fragmentación del material por compresión de los contactos entre partículas, conocida como *fragmentación secundaria*. Dado que los fragmentos se reducen por el contacto con otros bloques adyacentes, Brady (2004) establece una semejanza entre la fragmentación secundaria y un proceso de molienda autógena.

Según Merino (1986), como el fenómeno de fragmentación secundaria puede ser representada como un proceso de conminución, la probabilidad de que los fragmentos tienen de reducir su tamaño se relaciona con la altura de la columna, luego a mayor altura de columna mayor será la reducción de tamaño que experimenten los bloques.

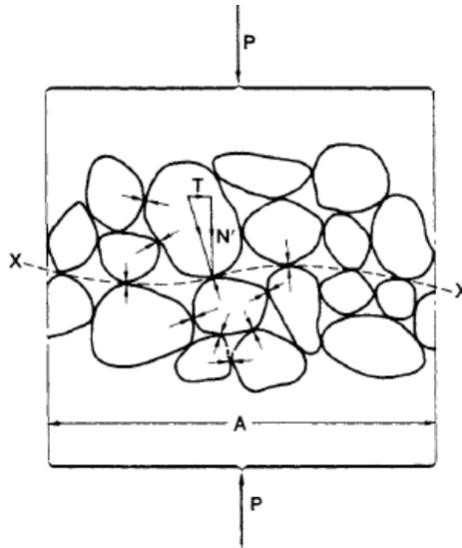


Figura 12: Esfuerzos entre contactos en material granular (Craig, 2004)

En la Figura 13 se aprecian las etapas de fragmentación en una columna de mineral donde la roca in-situ que posee sus propias fracturas se fragmenta al entrar en el proceso de *caving* y posteriormente se reduce por el movimiento y fricción entre partículas (López, 2016)

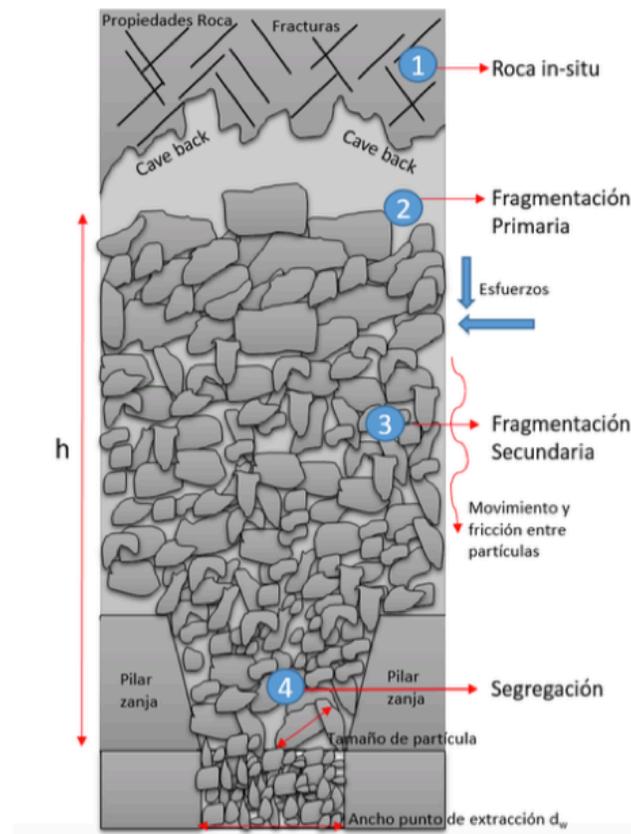


Figura 13: Esquema de etapas de fragmentación (López, 2016)

2.4 Diseño de mallas y bateas de extracción

La influencia de la movilidad del material en el diámetro del elipsoide es un fenómeno de gran importancia en el diseño de mallas de extracción para minería de *caving* dado que la teoría convencional está basada en el comportamiento de flujo interactivo de elipsoides (Burton et al, 2012).

2.5 Colgaduras

A medida que fluye el material, existe una sucesiva formación de arcos donde todo el peso que se apoye sobre estos es repartido en sus apoyos laterales, dejando el área bajo el arco libre de esfuerzos. Estas estructuras tienen la característica de ser muy inestables y cualquier perturbación puede producir una redistribución total de fuerzas (Jeager, 1996).

Materiales con gran movilidad producen que la formación de arcos sea poco frecuente, mientras que materiales con gran movilidad aumentan la frecuencia de formación de arcos, los cuales forman grandes cavidades y el tiempo que estas permanecen estables puede ser mayor (Olivares, 2014).

En base a la observación de este fenómeno en modelos, Kvapil (2008) concluye lo siguiente:

- La generación de arcos que interrumpen el flujo gravitacional se relaciona directamente con la presencia de material grueso.
- La formación de arcos es un fenómeno usual en el flujo de material a través de un punto de extracción que resulta del material intentando recuperar el equilibrio.

Cuando se forma un arco estable tal que impide el flujo gravitacional, se considera que se ha producido una colgadura. Estas interrupciones del proceso productivo producen el cierre del punto de extracción (Troncoso, 2006) y un aumento en los costos mina (Gómez, 2014) debido al uso de reducción secundaria (explosivos) para re abrir el punto.

2.5.1 Arcos continuos

Debido a la extracción, los esfuerzos se distribuyen alrededor de la zona hundida, generando en su base una zona de concentración de esfuerzos (ver imagen) conocida como *abutment*. Cuando se forma un arco la tensión de corte en la parte inferior del mismo produce que el material se desprenda formando una separación entre el arco y el material fragmentado. En algunos casos, el arco corresponde a la parte superior del elipsoide de movimiento (Kvapil, 2008).

La movilidad del material, que depende del ángulo de fricción interna, es uno de los principales factores que determinan la geometría de los arcos. En particular, la altura del arco (h) varía según el ángulo de fricción interna (ϕ) del material de la siguiente forma:

- Si $\phi \rightarrow 90^\circ$, $h \rightarrow 0$
- Si $\phi \rightarrow 0^\circ$, $h \rightarrow \infty$

La resistencia del material es proporcional al ángulo de fricción interna. Así, un material con $\phi \rightarrow 90^\circ$ se denomina de alta resistencia; mientras que un material con $\phi \rightarrow 0^\circ$ se denomina de baja resistencia o débil.

A medida que aumenta la profundidad a la cual se forma un arco (H), la sobrecarga de material aumenta y con ello el esfuerzo vertical in-situ (Ecuación 8)

$$\sigma_v = \gamma H$$

Ecuación 8: Esfuerzo vertical

Donde σ_v es el esfuerzo vertical y γ la densidad del material.

La carga vertical disminuye el ángulo de fricción interna del material en función del ángulo Ψ , el cual se determinó empíricamente mediante la Ecuación 9.

$$\Psi = \frac{\sigma_v \cos(\phi) 9,81}{S \sin(\phi) 3}$$

Ecuación 9: Ángulo de reducción

Donde Ψ es el ángulo de reducción y S la resistencia al corte de la roca.

Finalmente se define el ángulo de fricción aparente ϕ_{ap} como:

$$\phi_{ap} = \phi - 2\Psi$$

Ecuación 10: Ángulo de fricción interna aparente

Para calcular la altura del arco (h), se evalúan dos casos:

Si $\phi \leq 45^\circ$,

$$h = l \frac{4 \cos(\phi_{ap})}{2,415 \sin(\phi_{ap})}$$

Ecuación 11: Altura de arco para materiales débiles

Si $\phi \geq 45^\circ$,

$$h = l \frac{4 \cos(\phi_{ap})}{1 + \sin(\phi_{ap})}$$

Ecuación 12: Altura de arco para materiales resistentes

Donde l corresponde al ancho de la colgadura.

La Figura 14 corresponde a un ábaco mediante el cual puede determinarse la forma que posee un arco (h/l) en función de ϕ_{ap} . Este diagrama posee cuatro zonas:

1. Arcos altos.
2. Arcos altos medios.
3. Arcos bajos.
4. Arcos planos.

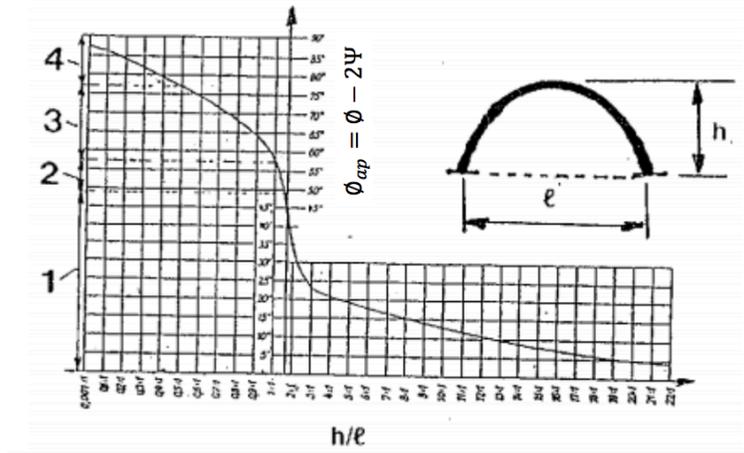


Figura 14: Diagrama de estimación de la forma de un arco

2.5.2 Arcos de material grueso

También llamados arcos mecánicos, estos se producen por la forma en que se distribuyen los esfuerzos entre los contactos de fragmentos gruesos (ver Figura 15)

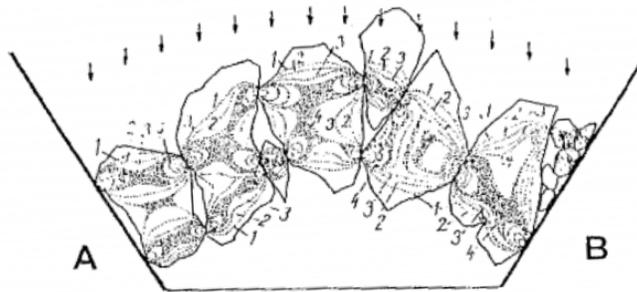


Figura 15: Esquema de un arco mecánico

En la Figura 16 se observa la geometría y distribución de esfuerzos que presenta un arco alto (a) y un arco bajo (b) de rocas.

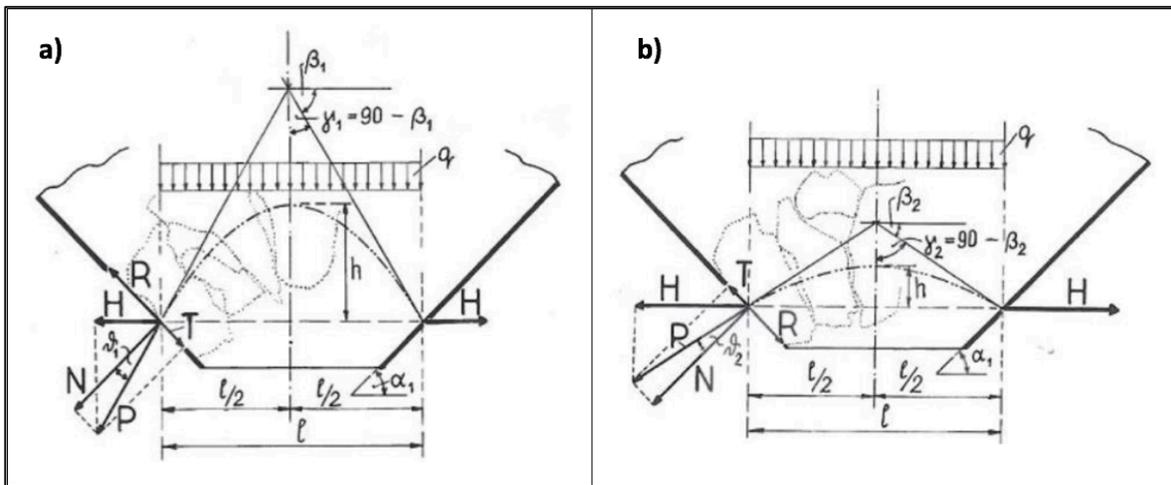


Figura 16: Distribución de esfuerzos en a) arco alto y b) arco bajo

En la Figura 16 se observa la descomposición de las fuerzas principales que actúan en la formación de un arco en función de la inclinación de las paredes de la batea (α). La fuerza de roce (R) se opone al movimiento natural de los fragmentos y es paralela a las paredes. P es la tangente a la línea media en la base del arco y N la normal al plano de la pared de la batea; ϑ se define como el ángulo entre N y P.

La componente horizontal del esfuerzo producido por el arco sobre las paredes (H) puede estimarse como:

$$H = \frac{ql}{2 \tan(\beta)}$$

Ecuación 13: Esfuerzo horizontal producido por el arco sobre las paredes

Donde, como se observa en la Figura 16, q es la distribución de carga aplicada sobre el arco; l es el ancho del arco y β es el ángulo formado por la tangente a la línea media en la base del arco con respecto a la horizontal.

Fuenzalida (2012) propone utilizar la ecuación derivada de la fórmula de Janssen para determinar la distribución de carga sobre el arco (q):

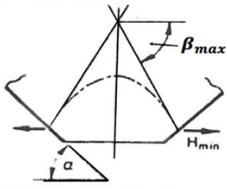
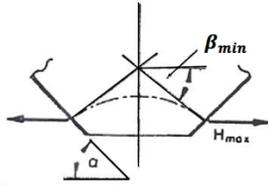
$$q = \frac{R_h \gamma}{k \tan(\phi)} \left(1 - \exp \left(- \frac{k \tan(\phi)}{R_h} z \right) \right)$$

Ecuación 14: Carga generada por la columna de mineral (Nedderman, 1992)

Donde R_h es el radio hidráulico; γ el peso específico del material; k es la relación entre los esfuerzos vertical y horizontal; ϕ es el ángulo de fricción interna del material y z corresponde a la altura de a columna de mineral.

La geometría del arco, en particular la altura, puede variar dentro de un rango definido por β sin perturbar el equilibrio del arco, luego $\beta_{min} < \beta < \beta_{max}$. Las fórmulas para estimar los límites de β se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Estimación de esfuerzo máximo y mínimo sobre las paredes producidos por un arco de roca

	Esquema	β	H
Altura máxima de arco de roca		$\beta_{max} = 90^\circ - \alpha + \phi.$	$H_{min} = ql \tan(\alpha + \phi)$
Altura mínima de arco de roca		$\beta_{min} = 90^\circ - \alpha - \phi$	$H_{max} = ql \tan(\alpha - \phi)$

2.6 Modelo físico

Con el objetivo de comprender los principios que gobiernan el flujo de material granular, se han realizado diversos experimentos con modelos físicos. Peters (1984) observa que la granulometría del material utilizado en los experimentos en su modelo 2D no influye en la geometría del flujo. Power (2004) cuestiona los resultados en modelos de dos dimensiones respecto al comportamiento del flujo y Orellana (2012) concluye que si bien estos modelos resultan más simples en construcción, su aplicación debiera ser en evaluaciones preliminares y recomienda el uso de modelos 3D para representar la geometría involucrada en el fenómeno de flujo gravitacional.

2.6.1 Análisis de similitud

Castro (2006) indica que para que los análisis en un modelo físico sean similares a los de un prototipo – que incluye un mayor número de variables – debe cumplirse un análisis de similitud con los parámetros indicados en la Tabla 4.

Tabla 4: Análisis de similitud

Parámetro	Similitud
Geométrica	Altura y área de columna, geometría del punto de extracción y distribución de tamaños del material.
Cinemática	Tasa de extracción del material a través del punto.
Dinámica	Misma distribución granulométrica en el modelo y en el prototipo.
	Misma masa específica entre partículas del modelo y el prototipo.
	Mismo ángulo de fricción del material en el modelo y el prototipo.

En la Tabla 5 se presentan las variables que pueden ser escaladas en función del análisis de similitud anterior.

Tabla 5: Factores de escala del análisis de similitud

Variable	Factor de escala
Largo	λ_L
Área	λ_L^2
Volumen	λ_L^3
Tiempo	$\lambda_L^{1/2}$
Peso	λ_L^3
Esfuerzos	λ_L
Ángulo de fricción	1

2.6.2 Efecto de la granulometría

Para un material seco y en un ambiente casi libre de humedad, la fricción y la interacción entre partículas y bordes del modelo son las fuerzas principales en el comportamiento del material granular (Gómez, 2014). En escala mina, las fuerzas gobernantes en hundimiento son la gravedad y la fricción, luego un modelo físico debe buscar replicar esta condición, pero a escala de laboratorio otras fuerzas más débiles cobran mayor importancia.

Pineda (2012) realizó un estudio donde se incluye la variación de las fuerzas principales en función de la granulometría; sus resultados mostraron que el límite inferior de una curva granulométrica utilizada en un modelo físico en laboratorio debe ser a lo mas 0,3 [mm], esto último equivale a un tamiz #50. El argumento de este límite es la disminución de la diferencia en magnitud entre la gravedad y las fuerzas de Van der Waals, contradiciendo el escenario ideal que se menciona en el párrafo anterior. Esto último lleva a eliminar los finos de los materiales utilizados en experimentos con modelos físicos a escala de laboratorio.

2.6.3 Escala

Peters (1984) y Rustan (1990) utilizaron grava como material granular en sus experimentos debido a las dudas sobre las observaciones obtenidas en modelos de arena que buscan representar el comportamiento del flujo de material en minas de *caving*. Sus conclusiones apuntan que es posible obtener resultados comparables con escala mina al realizar en modelos en laboratorio; más aún, Power (2004) concluye mediante sus experimentos que a escalas mayores a 1:30 los resultados obtenidos son cercanos a la escala mina.

2.6.4 Estudio de colgaduras mediante modelos físicos

El estudio de colgaduras mediante modelos físicos ha sido realizado por algunos autores como objetivo principal de sus trabajos (Gómez, 2014; López, 2016) y otros como objetivos secundarios complementarios (Orellana, 2012; Olivares, 2014). Un resumen de sus principales resultados en materia de colgaduras se encuentra en el ANEXO A.

2.7 Antecedentes Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea

La mina Chuquicamata, propiedad de Codelco, se encuentra a 15 [km] al norte de Calama y es actualmente la mina a rajo abierto mas grande del mundo. Esto último ha traído consigo un aumento elevado de los costos de producción dada la profundidad del rajo y la razón estéril mineral del mismo.

El Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) nace debido a la necesidad de extraer los recursos minerales que aún se encuentran en este gran yacimiento. Se trata de uno de los proyectos estructurales y estratégicos mas importantes para la Corporación y contempla la transición del rajo a una mina subterránea, esto permitirá la recuperación de alrededor de 1700 [Mton] de mineral, con leyes en torno a 0,70% de Cu, 450 ppm de Mo y 450 ppm de As. Su producción en régimen se ha estimado en 140 [ktpd] posterior a un *ramp-up* de 9 años, lo que equivale a mas de 350 [ktmf/año] y permite extender la vida de la División en aproximadamente 40 años.

El método considerado para la extracción del mineral corresponde un *block caving* configurado en macro bloques en una mina con cuatro niveles de producción, los cuales serán explotados en forma descendente desde el nivel superior (cota 1841).

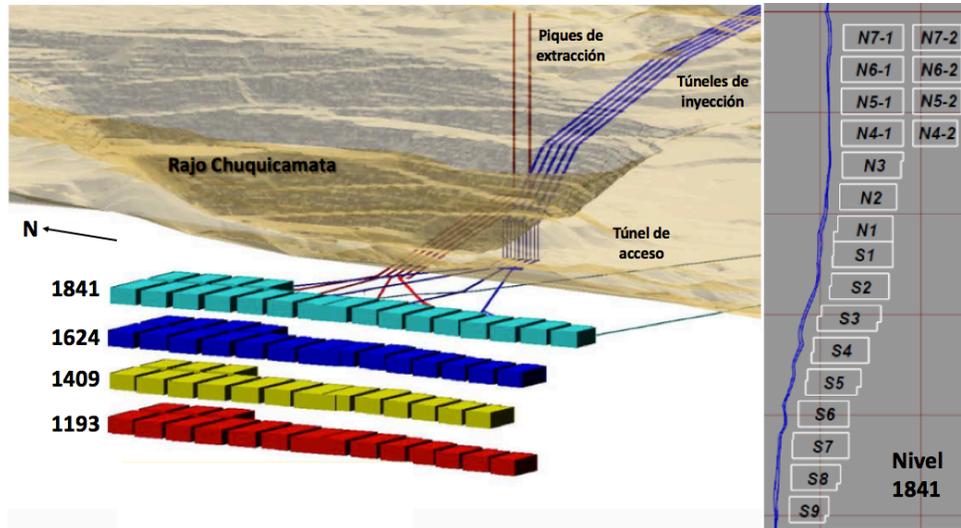


Figura 17: Diseño conceptual del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (Codelco, 2009)

2.7.1 Diseño Nivel de Producción

El diseño minero del subnivel de producción elevación 1823 (Vicepresidencia de Proyectos, Codelco) establece una malla de extracción tipo Teniente con distancia entre calles de 32 [m], tal como se aprecia en la Figura 18, lo anterior corresponde a una distancia entre calles paralela a la zanja ($D_{c\parallel z}$) de 37 [m].

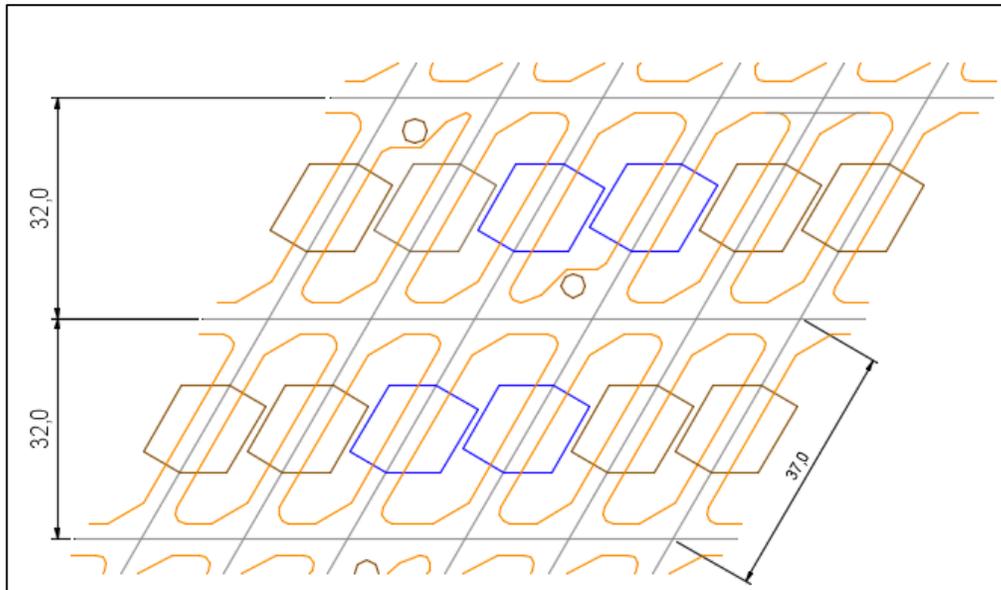


Figura 18: Malla tipo Teniente, distancia entre calles de 32 [m] (Vicepresidencia de Proyectos, Codelco)

La Figura 19 muestra que las dimensiones de galería utilizadas en el nivel de producción, en particular en las galerías zanja, corresponde a una sección libre de 4,8 [m] x 4,25 [m].

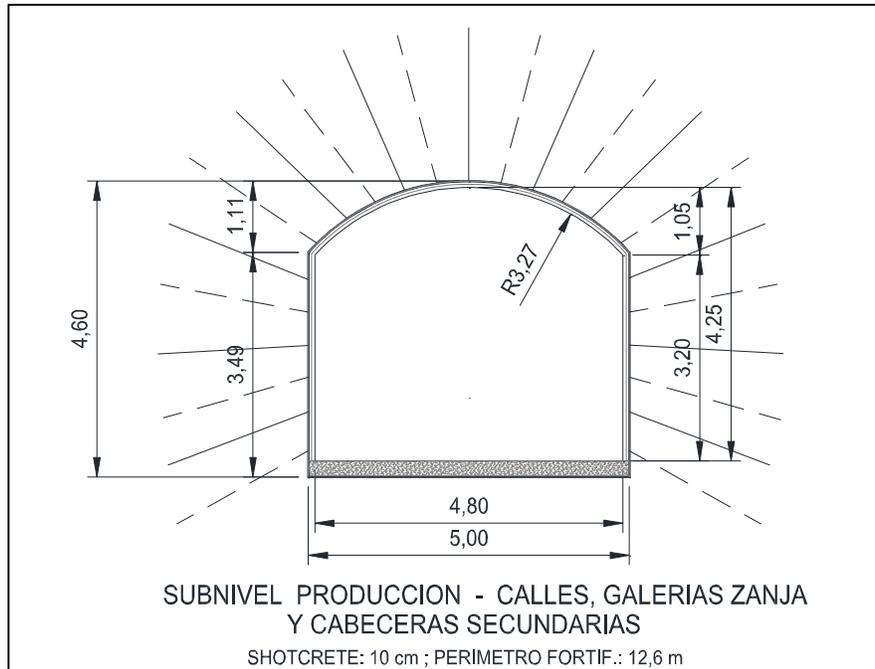


Figura 19: Sección transversal desarrollos subnivel de producción (Vicepresidencia de Proyectos, Codelco)

2.7.2 Estudio de fragmentación

El estudio de fragmentación para el proyecto fue realizado por *SRK Consulting (Canada) Inc.*, en colaboración con *Itasca International Inc.* y su última actualización corresponde a junio de 2015.

El análisis de fragmentación del Estudio de Ingeniería de Detalle (DES, de sus siglas en inglés) se enfoca en los macro bloques N1 y S1 (nivel superior, cota 1841) que representan la primera fase de extracción de mineral (inicio del *caving*) y definen la zona de estudio de este trabajo (Figura 20).

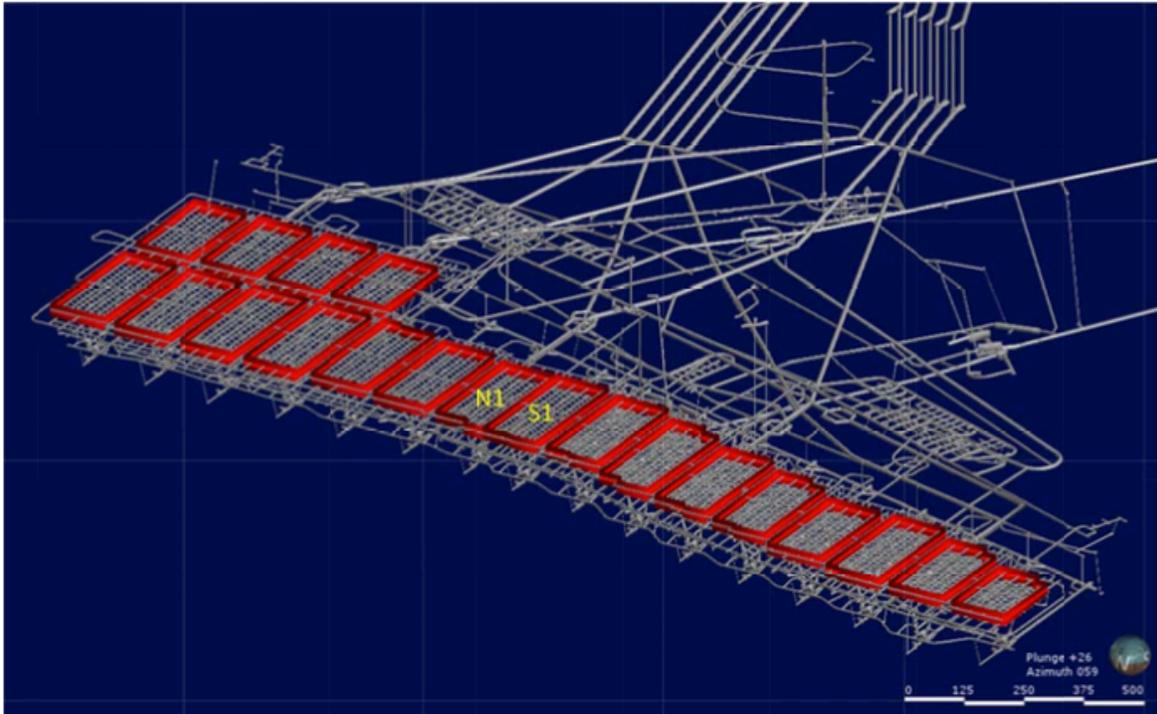


Figura 20: Nivel superior PMCHS (Codelco, 2009)

En el estado actual de la geología del yacimiento destacan cuatro unidades geotécnicas principales: roca cuarzo sericítica (RQS), pórfido este sericítico (PES), pórfido este potásico (PEK) y pórfido este clorítico (PEC) (Ver Figura 21). La roca cuarzo sericítica posee además una clasificación en cuanto a su contenido de cuarzo respecto a la sericita, teniendo así:

- Cuarzo menor sericita (QMES / $Q < S$)
- Cuarzo igual sericita (QIS / $Q = S$)
- Cuarzo mayor sericita (QMS / $Q > S$)

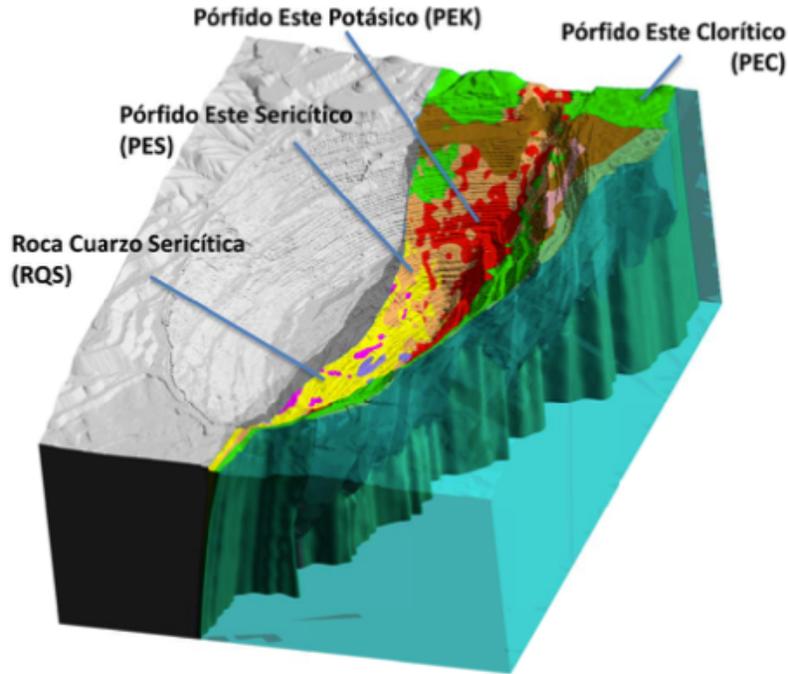


Figura 21: Unidades geotécnicas básicas (UGTB) yacimiento Chuquicamata (Codelco, 2009)

Enfocándose en la zona de estudio, las unidades geotécnicas que predominan en los macro bloques centrales son RQS y PES, en particular la roca Q=S (Figura 22). Por lo tanto, el material utilizado en el estudio de este trabajo de memoria corresponde a este dominio.

Desde el punto de vista estructural, los dominios presentes en el yacimiento se observan en la Figura 23. Es posible apreciar que la zona de estudio se emplaza en los dominios Americana Norte y Americana Central.

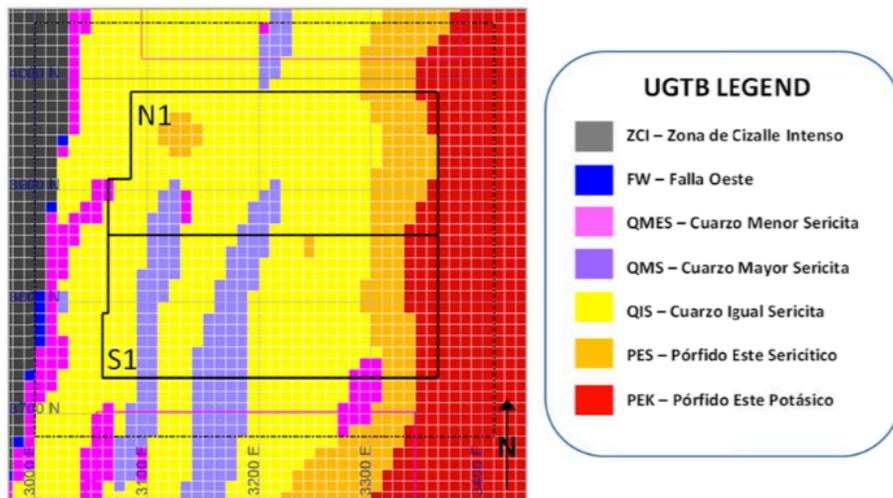


Figura 22: Unidades geotécnicas básicas (UGTB), nivel de hundimiento cota 1841

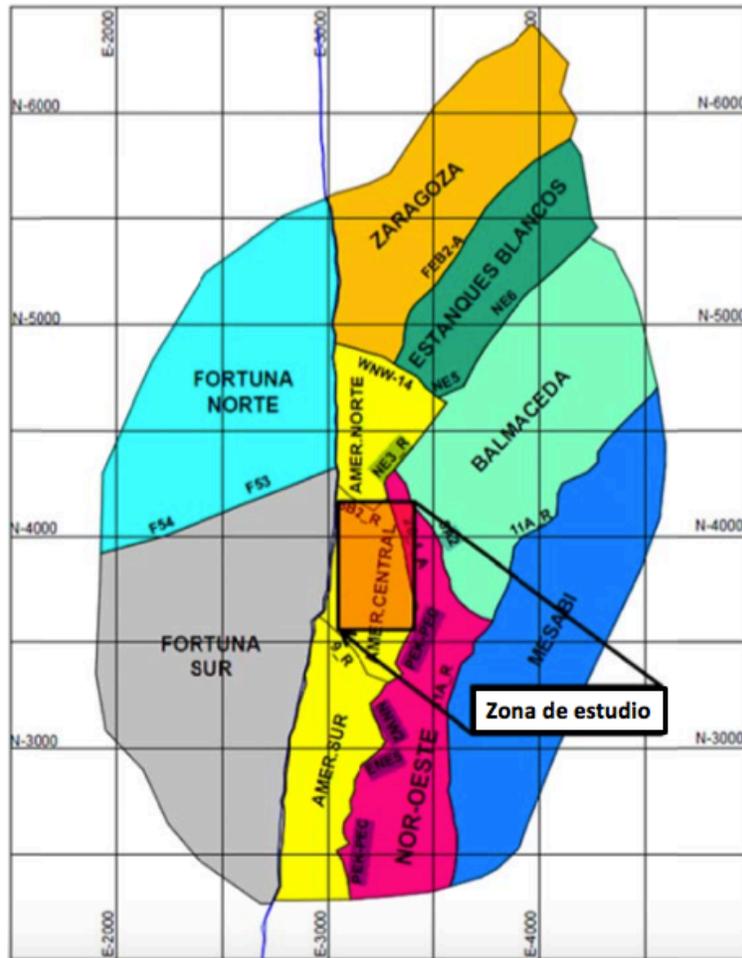


Figura 23: Dominios estructurales y zona de estudio

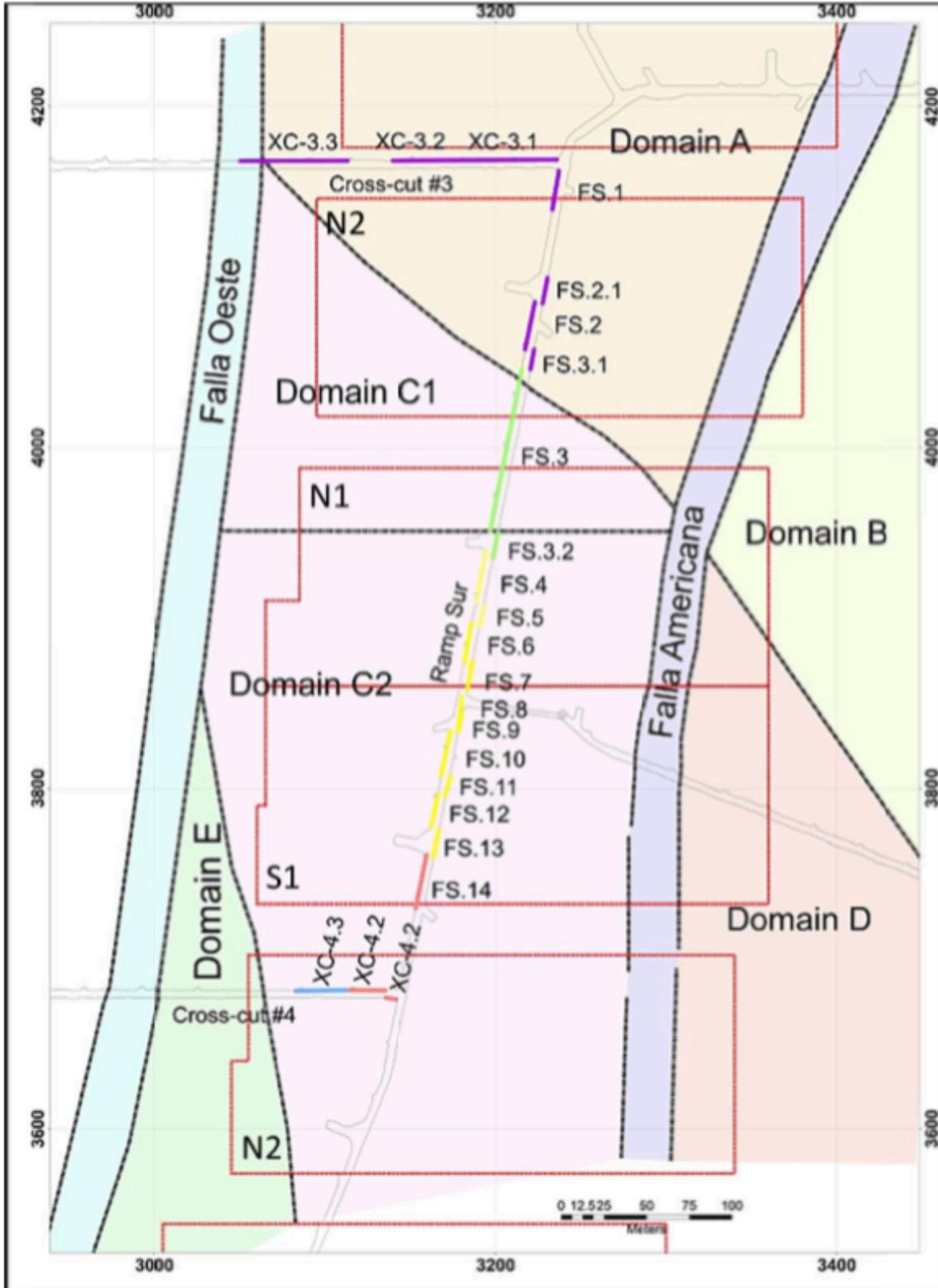


Figura 24: Vista en planta de los dominios estructurales y macro bloques iniciales (SRK, 2011)

La Tabla 6 describe la orientación preferente de las estructuras en los distintos dominios del yacimiento.

Tabla 6: Orientación preferente de estructuras por dominio (SRK, 2011a)

Dominio	Orientación de fracturas
A	SE
B	SE
C	NE
D	NE
E	ff/m ligeramente elevada entre dominio C y Falla Oeste
Falla Oeste	-
Falla Americana	variable

Si bien la orientación de estructuras en el dominio C es preferentemente hacia NE, el mapeo de túneles permitió observar una diferencia significativa en la separación de las fracturas, lo anterior determinó una subdivisión del dominio dando origen a los dominios C1 y C2 (Figura 24). Finalmente, los macro bloques iniciales N1 y S1 se emplazan en el dominio C2.

2.7.3 Fragmentación primaria

Para el desarrollo de la curva de fragmentación primaria, SRK (2015) considera los siguientes parámetros geotécnicos:

- Esfuerzos sobre el macizo rocoso
- Descripción de discontinuidades
- *Mining Rock Mass Rating* (MRMR)
- Esfuerzos inducidos por el *caving*

En la Tabla 7 se presentan los parámetros del macizo rocoso utilizados para el desarrollo de las curvas de fragmentación.

Tabla 7: Parámetros del macizo rocoso (SRK, 2015).

Dominio C1/C2	UCS [MPa]	MRMR	mb	ff/m
Q=S	66	46	3,3	25
Q>S	85	50	4,3	25
PES	83	60	4,9	10

Mediante el uso del software BCF (v3.05), SRK reporta la curva de fragmentación primaria para la unidad geotécnica Q=S que se observa en la Figura 25.

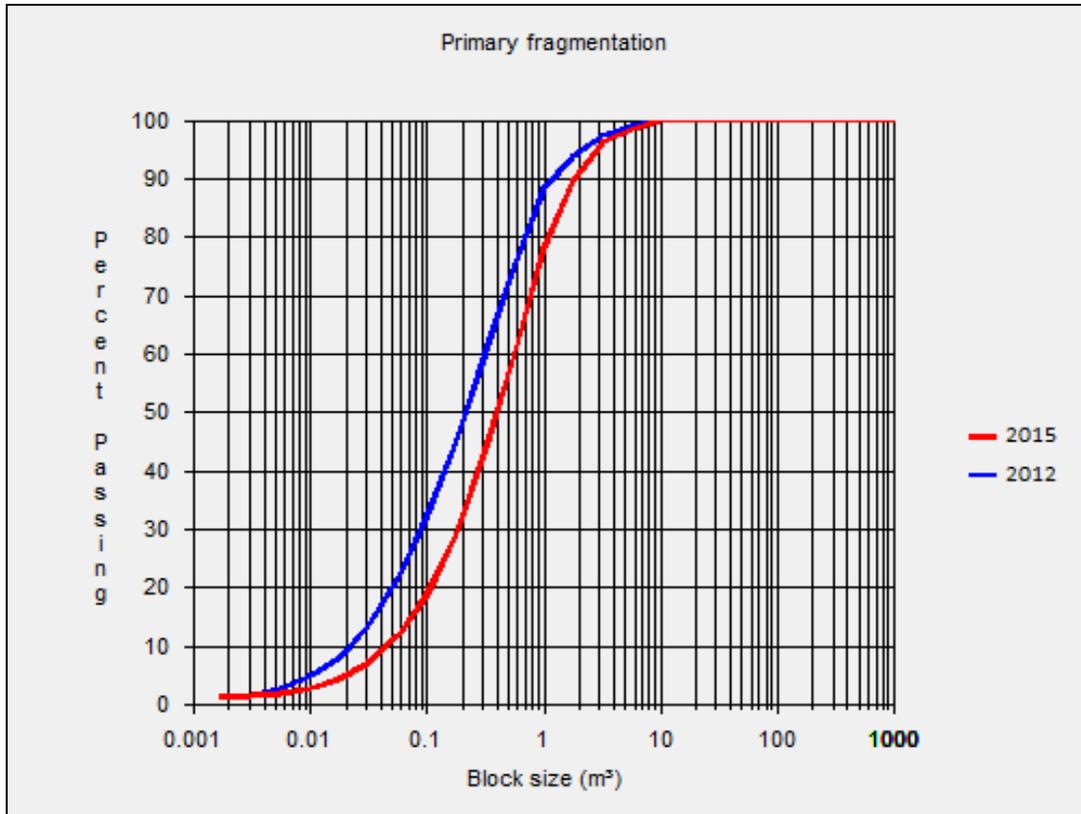


Figura 25: Curva de fragmentación primaria, $Q=S$ (SRK, 2015)

Los esfuerzos estimados por Itasca en 2015 son significativamente mas bajos que los del modelo utilizado en el Estudio de Ingeniería Básica (Itasca,2009 2012) Por este motivo, la curva de fragmentación primaria obtenida con BCF resulta mas gruesa en esta última actualización.

2.7.4 Fragmentación secundaria

Considerando los resultados de la simulación de fragmentación primaria (BCF), SRK (2015) considera cuatro alturas de columna: 20, 120, 220 y 300 [m] para simular el fenómeno de fragmentación secundaria en cada dominio presente en la zona de estudio.

Los parámetros utilizados para la simulación realizada por SRK se especifican en la Tabla 8.

Tabla 8: Parámetros utilizados para simulación de fragmentación secundaria en BCF, SRK (2015)

Altura de extracción [m]	20, 120, 220, 300
Altura de columna máxima [m]	400
Factor de esponjamiento	1,4
Densidad de la roca [kg/m ³]	2700
Tasa de extracción [cm/día]	15
Ancho superior de batea [m]	15
Ancho inferior de batea [m]	5

CAPÍTULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los resultados de la simulación de fragmentación secundaria esperada para la unidad geotécnica Q=S se especifican en la Tabla 9.

Tabla 9: Resultados simulación de fragmentación secundaria Q=S, SRK (2015)

Dominio estructural	Fragmentación	Altura de extracción	% pasante < 2m ³
C2	Primaria	-	89%
	Secundaria	20	100%
		120	100%
		220	100%
		300	100%

2.8 Conclusiones del capítulo

A continuación se presentan las principales conclusiones respecto a la revisión del estado del arte actual.

2.8.1 Flujo gravitacional

- Los estudios realizados en materia de flujo gravitacional se han desarrollado durante décadas, con el foco en la forma de los volúmenes de extracción y la configuración geométrica que debe existir entre puntos de extracción (bateas) para que se produzca interacción entre estos volúmenes.
- Una interacción óptima de elipsoides de flujo maximiza la extracción de los recursos en minería por hundimiento.

2.8.2 Fragmentación

- La geometría de los elipsoides de extracción depende fuertemente del tipo de material utilizado y esto último tiene relación con el rango de granulometría que presenta la fragmentación primaria y secundaria de la roca.
- Por lo anterior la fragmentación secundaria que experimenta el mineral durante su proceso de hundimiento debe ser estudiada y considerada al momento de realizar un diseño de malla de extracción.

2.8.3 Colgaduras

- Se han desarrollado amplios estudios en materia de colgaduras tanto en terreno como experimentales, enfocados en predecir el fenómeno y en estudiar las principales variables que lo afectan. Pero estos estudios no han tenido aplicabilidad directa con el diseño de un nivel de producción para minería de *caving*.
- Esto último genera la inquietud de complementar los estudios con un caso aplicable en minería para generar guías respecto a las variables de diseño que permitan proveer de holguras a la operación.

2.8.4 Modelo físico

- Los modelos físicos a escala de laboratorio superiores a 1:30 logran representar de buena forma el fenómeno de hundimiento del material fragmentado, cuando el objetivo de estos está en la geometría de los elipsoides de extracción y movimiento.

2.8.5 Antecedentes Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea

- La zona de estudio de este trabajo de memoria esta emplazada en el dominio estructural C2 (Americana Central) y la unidad geotécnica predominante es Q=S (Cuarzo igual Sericita).
- La roca a hundir en los macro bloques iniciales posee un UCS de 66 [Mpa] y MRMR=46.

CAPÍTULO 3

3 Metodología Experimental

3.1 Introducción

Este capítulo describe en detalle el procedimiento utilizado para realizar los experimentos de flujo no confinado – en ausencia de cargas externas – a escala de laboratorio que permite evaluar distintas geometrías de bateas, variando la granulometría del material. Además, incluye la configuración experimental necesaria para representar la extracción de material a través de una batea mediante dos palas mecanizadas que representan los equipos LHD utilizados en la operación.

3.2 Procedimiento

La metodología empleada para el desarrollo de este trabajo es presentada esquemáticamente en la Figura 26.

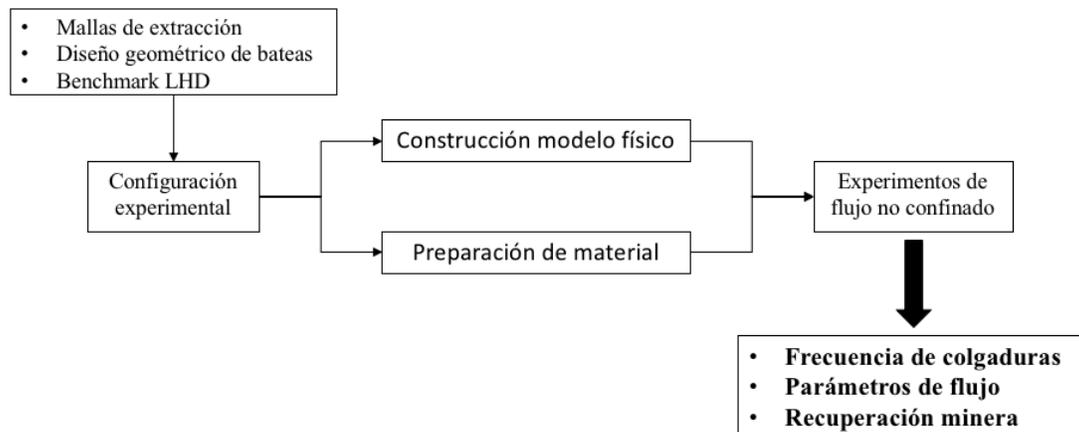


Figura 26: Procedimiento

La configuración experimental se establece considerando las mallas de extracción que serán evaluadas, el diseño geométrico de bateas que permite obtener un modelo simplificado para ser representado a escala y el largo de estocada definido por *benchmark* de equipos LHD.

La recomendación final se basa en una decisión técnica que depende de la frecuencia de colgaduras asociada a la batea, los parámetros de flujo del material y la recuperación minera de la configuración.

3.2.1 Condiciones base y variables de entrada

El contexto de este trabajo, el PMCHS considera en su diseño ciertos parámetros fijos que afectan directamente la configuración experimental.

Condiciones base:

- Distancia entre calles de 32 [m]
- Distancia entre nivel de producción y nivel de hundimiento 18 [m]
- Altura de batea 10,5 [m]
- Malla tipo Teniente
- Hundimiento convencional
- Galerías zanja nivel de producción de sección libre 4,8 [m] x 4,25 [m]

Luego, para evaluar la geometría de bateas y el flujo del material, las variables de estudio de este trabajo son:

- Largo de batea
- Ancho de batea
- Granulometría

3.2.2 Sistema de extracción

El cambio de mineral secundario a primario en minería por hundimiento trae consigo una roca de mayor competencia y menor ley. Este cambio en las características del mineral modificó los principios del sistema de transporte en el nivel de producción, lo cual introdujo el uso de equipos LHD en la industria minera.

Con una distancia entre calles predeterminada, el largo de batea queda definido por el largo de galería zanja. Este último depende del equipo LHD, por lo cual resulta necesario realizar una comparación de equipos considerando su capacidad y dimensiones.

Debido a la tendencia por aumentar la productividad de las operaciones en minería por hundimiento (Flores, 2014), la extracción del material se realiza mediante dos palas mecanizadas que representan equipos LHD de 14 [yd^3].

3.3 Configuración experimental

El largo de batea experimental se calcula en función del largo del equipo y su maniobrabilidad, luego se considera una batea caso base de largo 14 [m] y una batea mas corta que permite equipos mas grandes.

Con lo anterior, se definen dos largos de batea (ver Figura 27 y Figura 28):

- Batea corta: 11 [m]
- Batea larga: 14 [m]

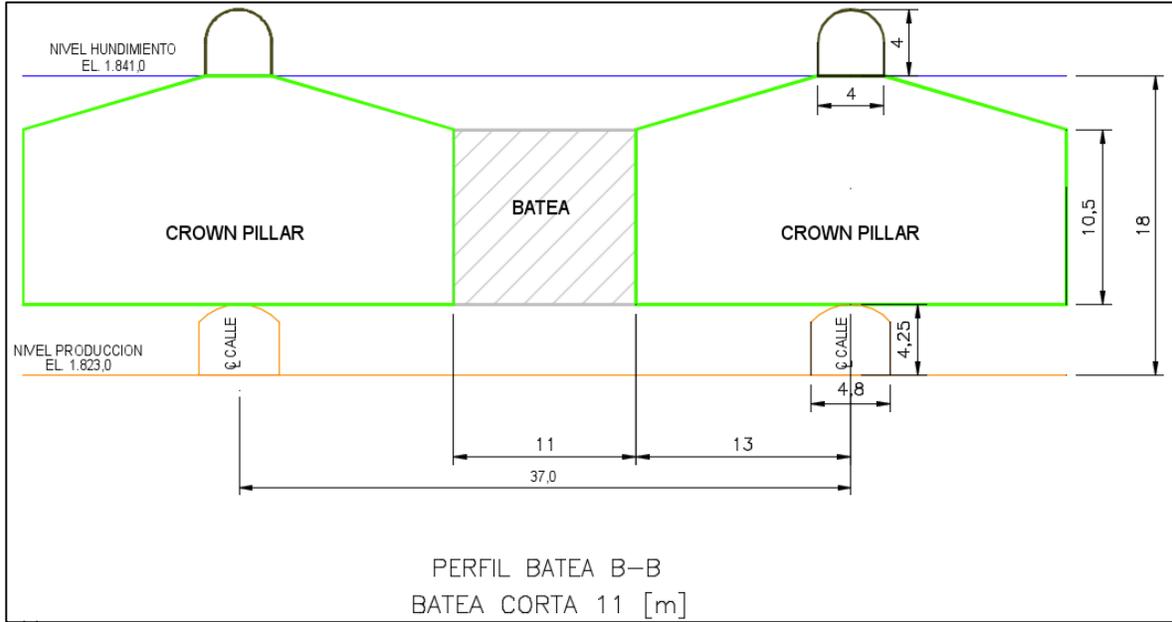


Figura 27: Esquema batea corta escala mina, dimensiones en [m]

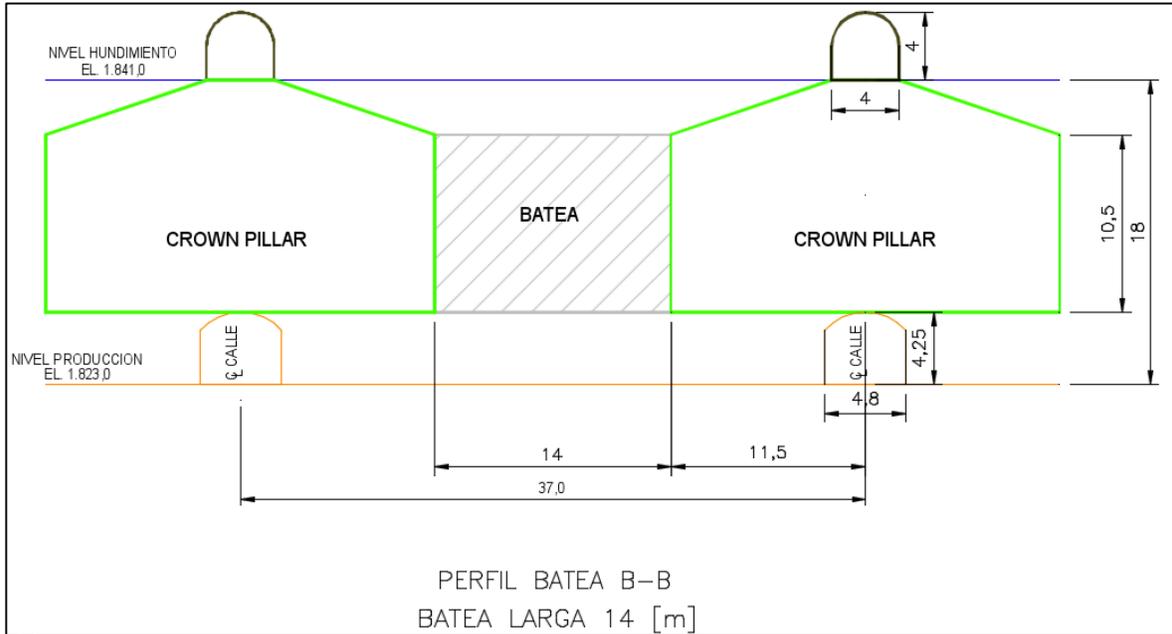


Figura 28: Esquema batea larga escala mina, dimensiones en [m]

Por otra parte, la holgura entregada por el proyecto, en términos de la distancia entre zanjas, permite estudiar el comportamiento del ancho de batea. Como se aprecia en la Figura 29, la distancia entre zanjas determina el ancho de batea y con ello el ángulo de la misma hacia el pilar zanja (α). Luego para evaluar las mallas establecidas en los alcances y considerando un *minor apex* de 1 [m], el análisis anterior permite definir tres anchos de batea con sus respectivos ángulos.

Tabla 10: Dimensión de las bateas, escala mina

Parámetros	16x15	16x17	16x20
Alto [m]	10,5	10,5	10,5
Ancho [m]	11,6	13,4	15,7
Ángulo	70°	67°	63°

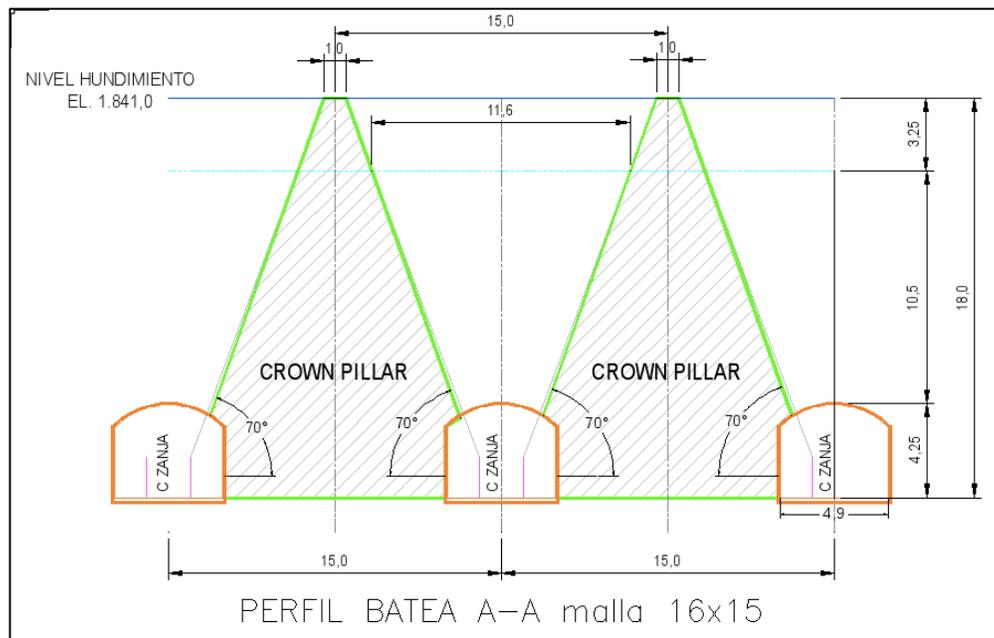


Figura 29: Perfil batea A-A, malla 16x15

De la sección 2.2.2 la altura de interacción a través del pilar menor es (Castro, 2012):

$$HIZ = \frac{(d_p - w_p)}{2} \tan \alpha$$

Ecuación 15: Altura de interacción, HIZ

Asumiendo que para una misma granulometría el ángulo de flujo no cambia y el ancho de la galería zanja es fijo en todas las configuraciones, la altura de interacción sobre el pilar menor depende sólo de la distancia entre zanjas.

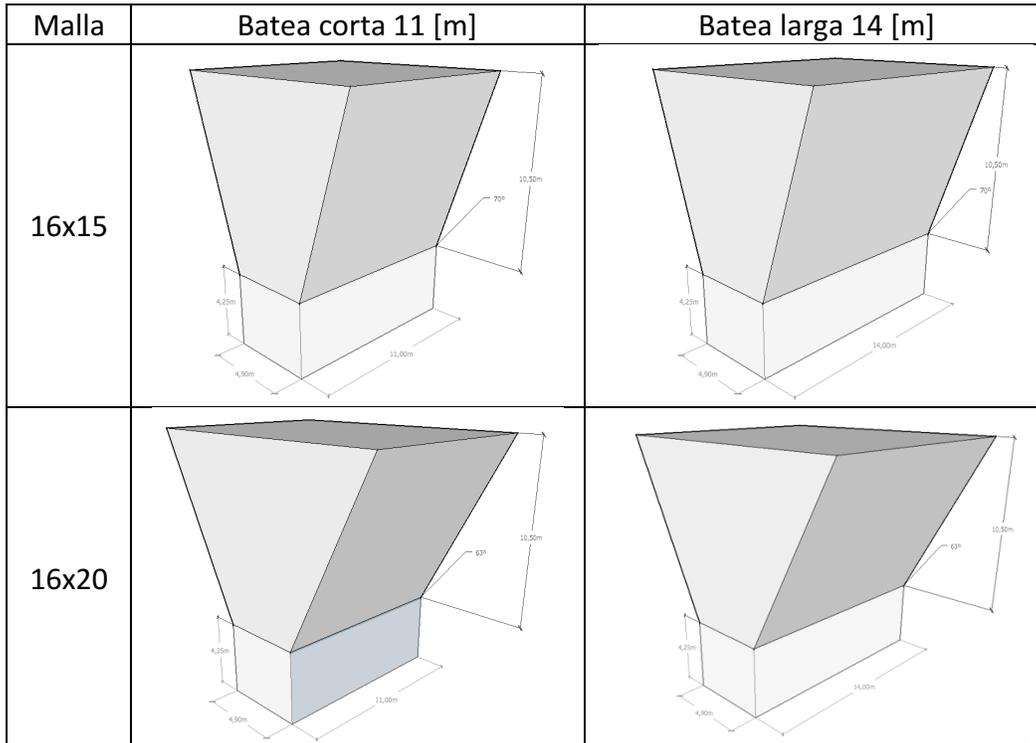
Esto último es equivalente a suponer que el HIZ, con las condiciones base de este estudio, es una función lineal respecto a la malla a evaluar. Luego, por temas prácticos, la experimentación se realizará solo con los casos extremos.

El análisis anterior concluye en la siguiente matriz de bateas presentadas en la Tabla 11 y su representación geométrica a escala mina en la Tabla 12.

Tabla 11: Matriz de bateas utilizadas en la experimentación

Malla	Largo	Ángulo	Batea
16x15	Corta	70°	B1
	Larga	70°	B2
16x20	Corta	63°	B3
	Larga	63°	B4

Tabla 12: Representación geométrica de bateas experimentales, escala mina



3.4 Construcción de modelo físico

El modelo físico utilizado para la experimentación se diseña considerando:

- Área de influencia de la batea en estudio, incluyendo los dos puntos de extracción.
- Simetría existente respecto a la malla de extracción.
- Altura representativa del fenómeno de estudio.
- Bateas
- Galería zanja y palas mecanizadas

Power (2004) observa que modelos físicos con escala mayor a 1:30 resultan ser representativos con la escala mina y posteriormente Castro (2007) corrobora lo anterior concluyendo respecto a la representatividad de los modelos físicos, señalando que no es necesario desarrollar modelos a gran escala cuando el objetivo del estudio es el flujo gravitacional del material. En base a estas conclusiones, López (2016) desarrolla un modelo a escala experimental 1:50 que permite estudiar las colgaduras y resulta ser ventajoso en términos de la facilidad para representar y construir los elementos mecánicos y geométricos del equipo de laboratorio. Por lo anterior, la escala elegida para este trabajo es 1:50.

Para un mayor detalle, la construcción del modelo físico se divide en tres partes (ver Tabla 13).

Tabla 13: Componentes del modelo físico

Sección	Características
Caja	Sección principal donde se carga el material y representa la columna de mineral sobre la batea.
Galería zanja y palas mecanizadas	Corresponde a la galería en la zona inferior del modelo mediante la cual se extrae el material del punto.
Bateas	Descritas en la sección anterior. Desmontables para la realización de los experimentos.

3.4.1 Caja

El área de influencia de un punto de extracción se define con el polígono formado al interceptar las bisectrices de los triángulos elementales que se forman por los puntos contiguos al punto de extracción (Chacón, 1980), tal como se aprecia en la Figura 30-a. Al tratarse de una malla tipo Teniente, el área de influencia se define según la Ecuación 16:

$$AI = \frac{D_{c\perp c} * D_{z\parallel c}}{2} [m^2]$$

Ecuación 16: Área de influencia de un punto de extracción (Chacón, 1980)

Donde;

$D_{c\perp c}$: Distancia entre calles, perpendicular a la calle.

$D_{z\parallel c}$: Distancia entre zanjas, paralela a la calle.

En la Figura 30-b la sección achurada representa el área de influencia de cada punto de extracción, mientras que la línea azul corresponde a la sección transversal del modelo físico. Se observa que esta sección presenta simetría con la malla de extracción pudiendo representar por completo la malla mediante el teselado de este polígono y por otra parte incluye casi por completo el área de influencia de la batea.

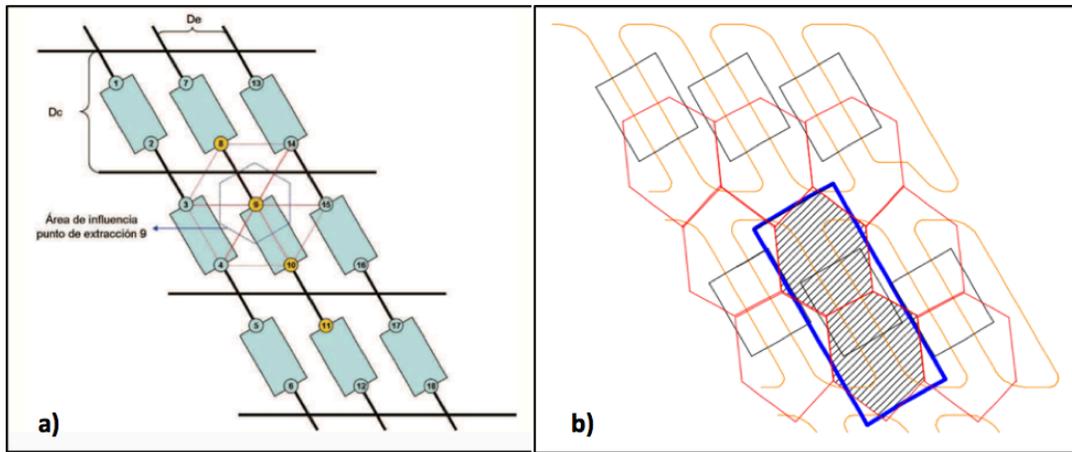


Figura 30: Área de influencia de una batea a) teórica, b) en el modelo

Para que las relaciones anteriores se cumplan en todas las bateas, el ancho del modelo físico corresponde al necesario para representar la malla con mayor distancia entre zanjas, luego el análisis de resultados debe considerar un ajuste en el caso de bateas con un ancho menor para estudiar el traslape con las bateas contiguas (ver Figura 31). Con lo anterior, se utiliza la distancia entre zanjas de 20 [m] para diseñar el modelo.

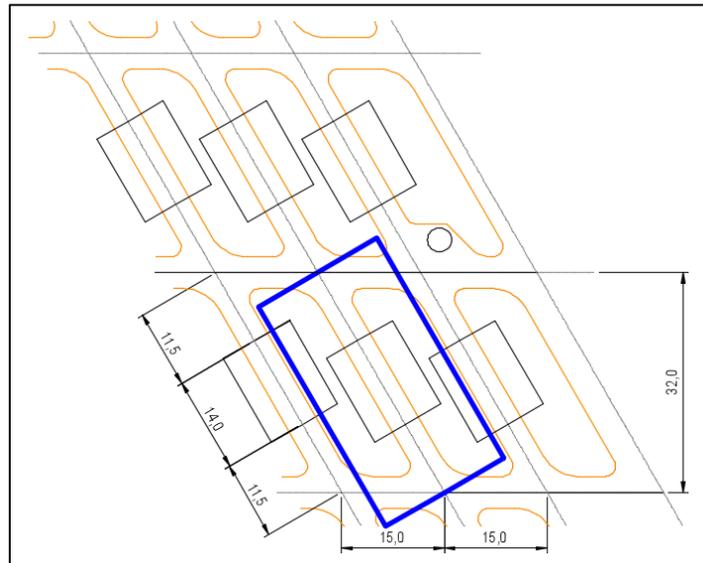


Figura 31: Vista en planta malla 16x15 con representación de la sección del modelo físico

3.4.2 Galería zanja y palas mecanizadas

Para extraer el mineral de cada punto, en el modelo se incluye la galería zanja utilizando las dimensiones del proyecto. Esta galería es representada considerando la distancia entre calles a través de la zanja y la zona de traspaso a través de la cual el material extraído del punto es descargado. Lo anterior es representado en la Figura 33.

Mediante la revisión de catalogo de equipos LHD, se obtienen las dimensiones de un balde de 14 [yd³], el cual es escalado e incluido en el equipo mecanizado (Figura 32 y Figura 33).

El Artículo 119 del Código de seguridad Minera expresa: “ El ancho útil de la labor por la cual transiten los vehículos será tal que deberá existir un espacio mínimo de cincuenta centímetros (0,50 [m]), a cada costado del equipo y desde la parte mas elevada de la cabina hasta el techo de la labor.” La revisión de equipos fue realizada considerando que se cumplieran las condiciones de seguridad establecidas anteriormente.

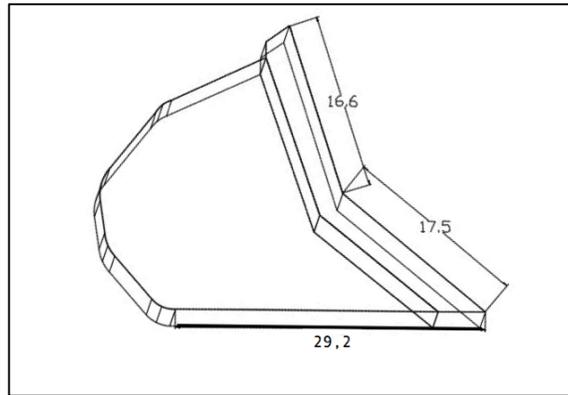


Figura 32: Diseño de balde 14 [yd³], dimensiones en [mm], escala 1:50

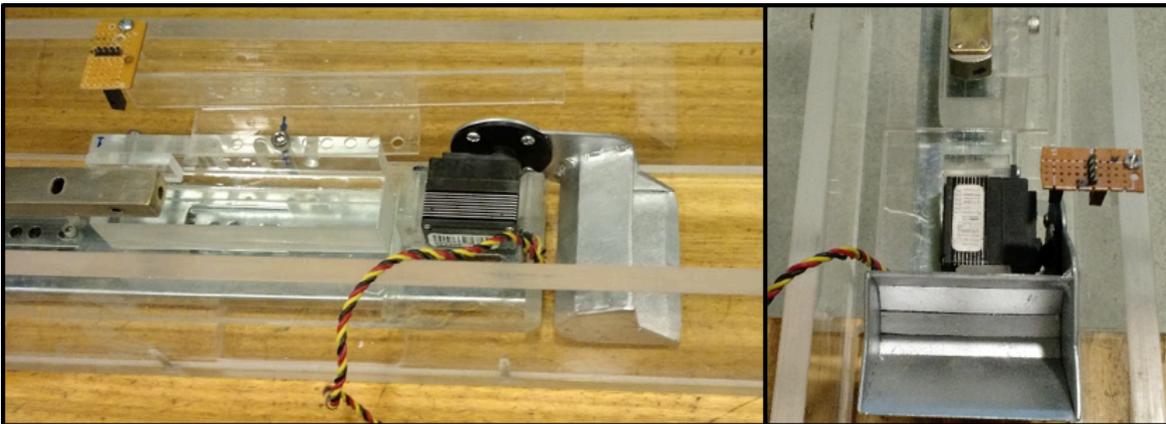


Figura 33: Equipo mecanizado, pala 14 [yd³] escala 1:50

3.4.3 Bateas

Las condiciones base del estudio establecen el uso de hundimiento convencional como estrategia de socavación. En este tipo de hundimiento, la batea es construida en dos fases: la primera desde la galería zanja en el nivel de producción y la segunda desde el nivel de hundimiento por medio de perforación radial (Ver Figura 34 y Figura 35).

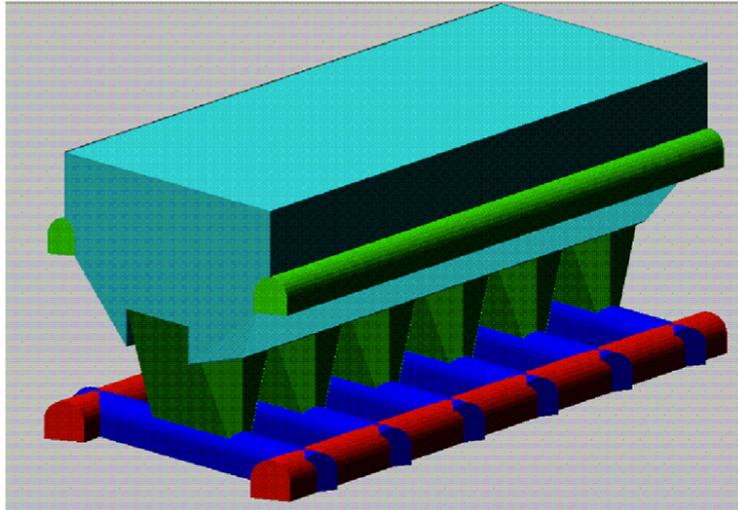


Figura 34: Vista isométrica hundimiento convencional

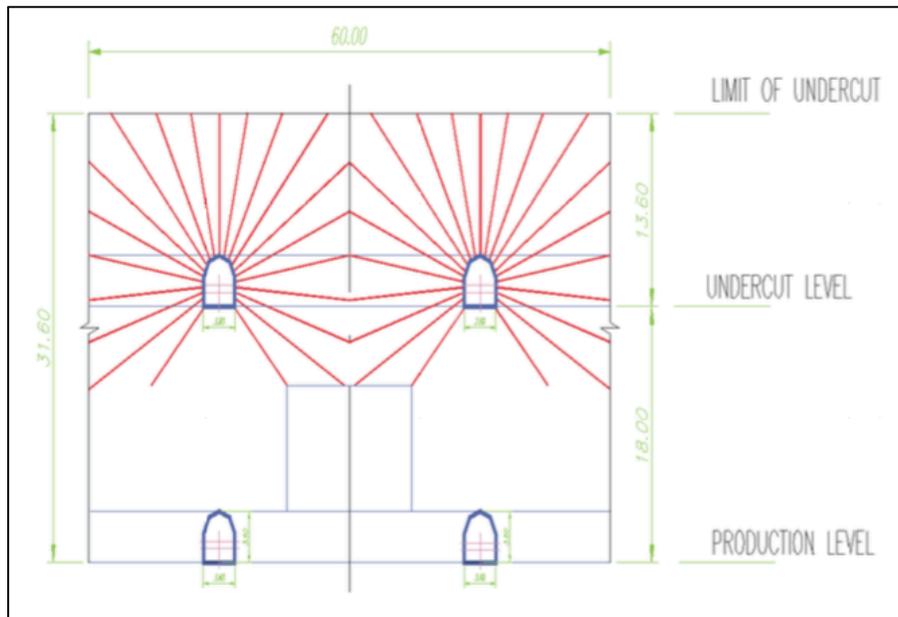


Figura 35: Esquema de socavación radial en hundimiento convencional (Jofré, 2000)

Basado en la Ingeniería Básica, la galería zanja tiene dimensiones 4,8 [m] x 4,25 [m]; en términos prácticos, la sección transversal de una galería resulta difícil de replicar en un modelo físico – en particular el arco de la sección de la galería – luego es necesario considerar ciertas simplificaciones. Como parte del escalamiento de laboratorio, no se considera el arco en el contorno de la galería. En la Figura 36 se observan las simplificaciones de diseño de bateas y sus diferencias numéricas se presentan en la Tabla 14.

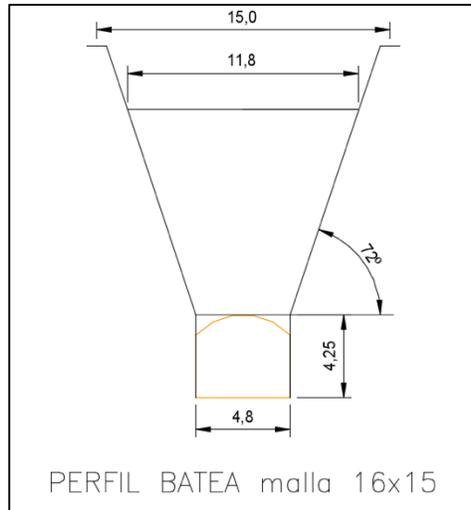


Figura 36: Simplificación del modelo para perfil batea, malla 16x15

Tabla 14: Diferencias entre ángulo de batea diseño real y simplificado, escala mina [m]

	Diseño real		Diseño simplificado	
	Ángulo de batea	Ancho de batea	Ángulo de batea	Ancho de batea
16x15	70°	11,6	72°	11,8
16x17	67°	13,2	68°	13,4
16x20	63°	15,7	63°	15,7

Dado que para la construcción de bateas el ángulo es un resultado del diseño, se aproxima el valor del ancho superior de cada batea a su entero mas cercano y el nuevo ángulo es el que determina las dimensiones finales de la batea experimental (Tabla 15), con excepción de la malla 16x17[m] que como no se construye, sus valores no se aproximan.

Tabla 15: Dimensiones finales de batea para el modelo experimental, escala mina [m]

	Diseño final	
	Ancho de batea [m]	Ángulo de batea
16x15	12	71°
16x17	13,4	68°
16x20	16	62°

Finalmente, el *crown pillar* no se representa en el modelo físico dado que el ángulo de flujo α del material es mayor al ángulo del pilar (ver Figura 37), por lo mismo este último no influye en el desarrollo de los experimentos (López, 2016).

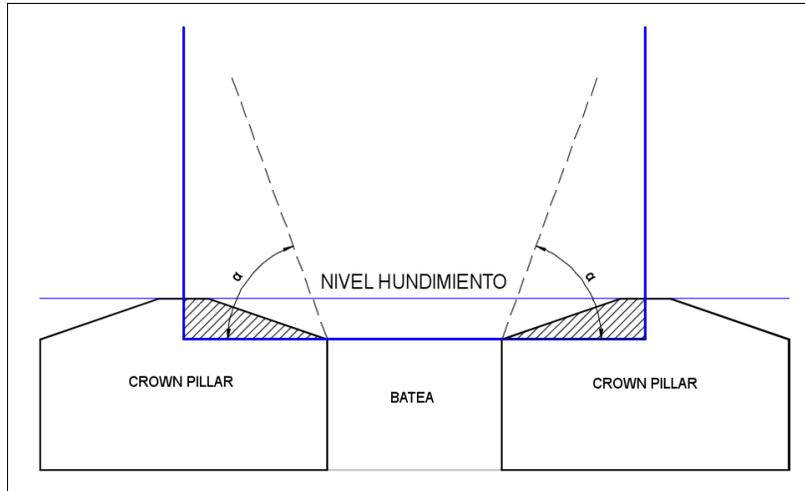


Figura 37: Simplificación del crown pillar en modelo físico

Las dimensiones finales del modelo físico se presentan en la Tabla 16 y la Figura 38. Una representación del modelo a escala mina se presenta en la Figura 39 y Figura 40.

Tabla 16: Dimensiones del modelo físico

Dimensiones del modelo físico	
Alto	100 [cm]
Ancho	40 [cm]
Largo	74 [cm]

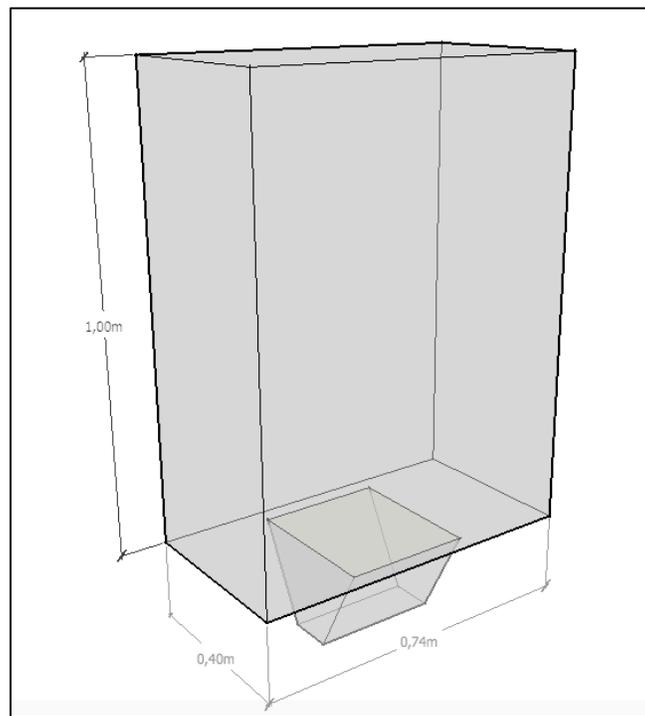


Figura 38: Esquema final del modelo físico, escala 1:50

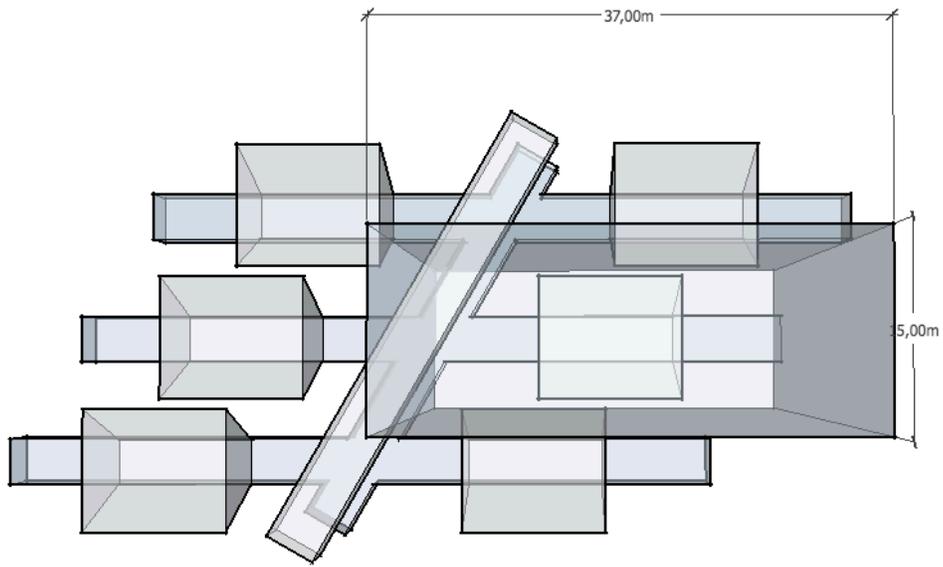


Figura 39: Representación del modelo a escala mina, vista en planta

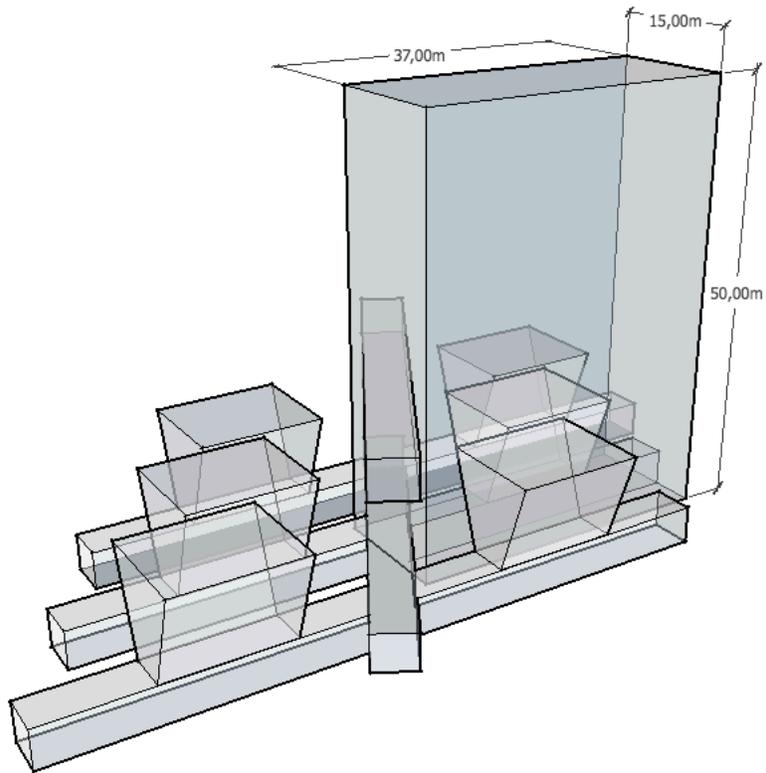


Figura 40: Representación del modelo escala mina

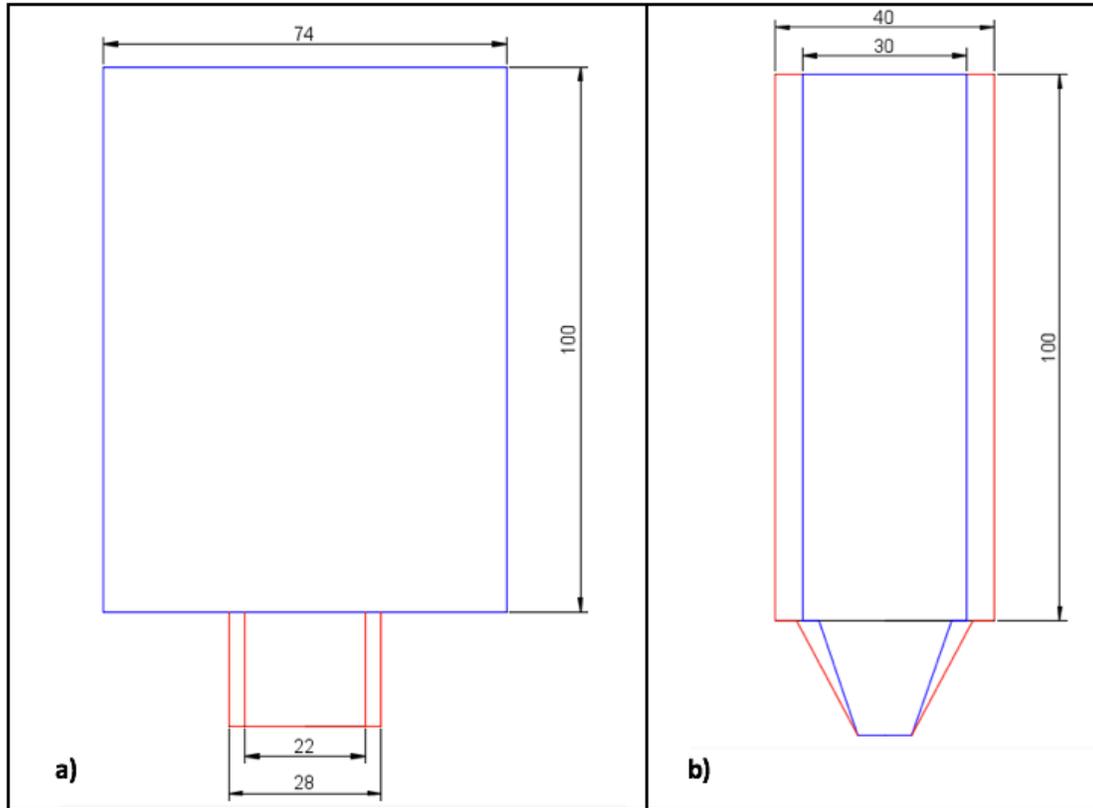


Figura 41: Vista a) frontal y b) perfil del modelo físico, escala laboratorio [cm]

La base del modelo es adaptable, permitiendo así variar la geometría de la batea dependiendo del experimento. En la Figura 41 se observa una vista frontal del modelo (izquierda) donde se representa el cambio del largo de batea – batea corta 22 [cm] y batea larga 28 [cm] – y una vista en perfil (derecha) donde se representa el cambio del ángulo de la batea directamente relacionado con la distancia entre zanjas. Como se menciona anteriormente, el modelo se diseña en función de la mayor distancia entre zanjas; por lo tanto, cuando se realizan experimentos que representan la malla 16x15 [m] (línea azul en Figura 41 b) el análisis de resultados debe considerar ajustar los límites del modelo a un ancho teórico de 30 [cm].

3.5 Preparación del material

Los materiales mas utilizados en modelamiento físico son arena o gravilla, los cuales no representan la propiedades de la roca fragmentada que se forma en los métodos extracción por hundimiento. Luego, para una mejor representatividad del flujo en los experimentos a escala, el material utilizado en este trabajo corresponde al mismo que se encuentra en la zona de estudio de esta investigación, Q=S.

La curva de fragmentación primaria para Q=S (SRK, 2015) está expresada en función del volumen (Figura 25), pero para representar una curva en escala de laboratorio es necesario que esté expresada en función de una longitud. (En el ANEXO B se detalla el procedimiento mediante el cual se definen las curvas granulométricas y cómo se prepara el material).

Considerando la relación de aspecto entre los ejes de los fragmentos (0,66: 1: 1,83), el diámetro equivalente se calcula de la siguiente forma:

$$d_e = 1,0932 \sqrt[3]{V_e}$$

Ecuación 17: Diámetro equivalente en función del volumen

Con lo anterior se obtiene la curva granulométrica del material con el que se realizarán los experimentos (ver Figura 42).

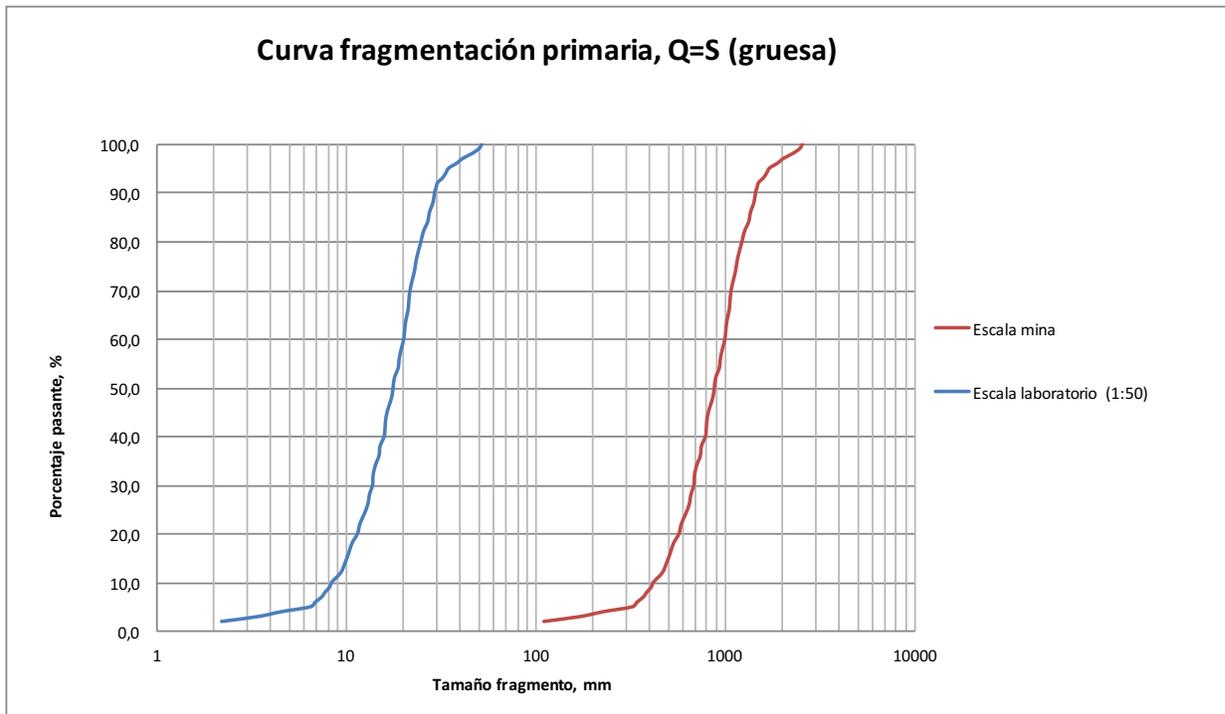


Figura 42: Curva de fragmentación primaria, tamaño de fragmento en función del diámetro equivalente (gruesa)

La unidad de longitud utilizada para representar el volumen equivalente de un fragmento debe estar dada por cómo se construye la curva de fragmentación; en este caso, mediante harneros y tamices. Como se detalla en el anexo, la metodología utilizada para la elaboración de las curvas granulométricas en laboratorio implica un largo tiempo de residencia de las partículas en el equipo y, mas aún, varias réplicas del procedimiento.

Lo anterior indica que existe un error al considerar el diámetro equivalente para representar el volumen del fragmento. Como se observa en la Figura 43, un fragmento podrá, a lo más, atravesar la abertura de una malla en la posición definida por sus planos menor y medio, por lo tanto se utiliza el largo medio para escalar el volumen, luego:

$$L_2 = 0,94\sqrt[3]{V_e}$$

Ecuación 18: Largo medio en función del volumen

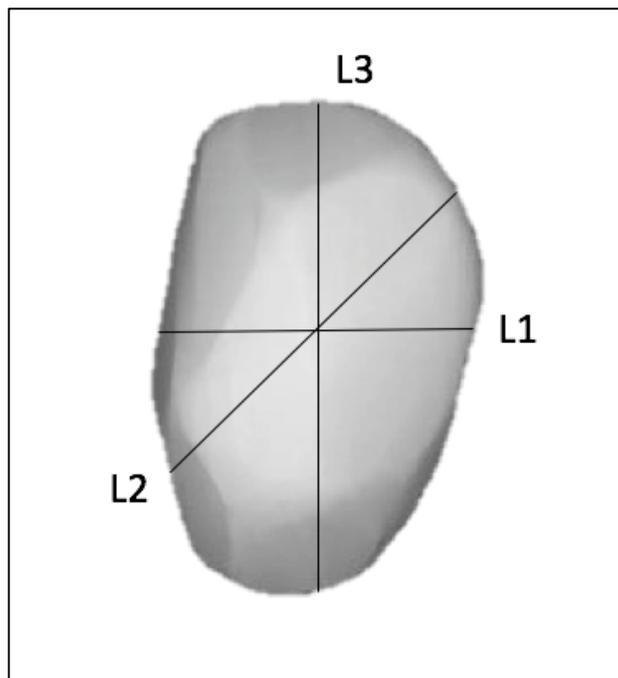


Figura 43: Largos principales de un fragmento

Esta relación origina una curva mas fina respecto a la inicial, tal como se observa en la Figura 44. Las dos curvas utilizadas en la experimentación se refieren en adelante como *curva gruesa* y *curva media*.

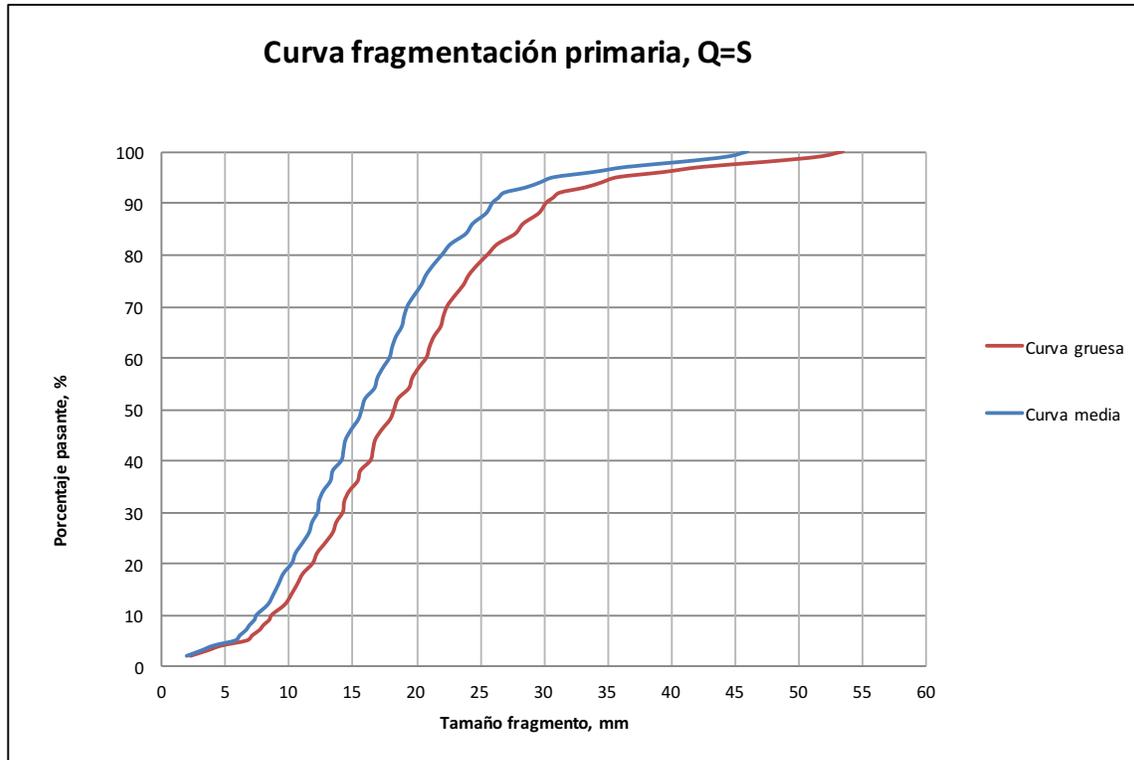


Figura 44: Curva de fragmentación primaria, comparación granulometría gruesa-media

Dentro de los objetivos de este trabajo se encuentra analizar la influencia de la granulometría en los parámetros de estudio. Aunque las curvas anteriores no están en función de la misma variable (d_e y L_2), es posible comparar resultados cuando el interés se centra identificar *una tendencia* en el comportamiento de los parámetros, considerando como variable independiente la granulometría.

Por otra parte, si se desea observar el efecto en particular para el PMCHS, entonces es necesario desarrollar una nueva curva para efectos de este estudio que si esté en función de la misma unidad de longitud. El criterio de selección de la nueva distribución granulométrica se basa en el modelo predictivo de Abarca (2016) – que establece la fragmentación secundaria del material – en particular para el último tercio de extracción de la columna. Finalmente se elabora la *curva fina* en función de L_2 (ver Figura 45).

Una vez que se obtiene la curva, esta debe ajustarse a los tamices disponibles en laboratorio para su construcción. Los reportes indican que la mayor cantidad de colgadas en puntos de extracción provienen de minas que extraen el mineral mediante hundimiento de cuerpos competentes y con fragmentación gruesa (Gómez, 2014), luego este estudio se centra en las colgadas de arcos mecánicos. Para esto, considerando los resultados de Pineda (2012), los finos se eliminan de las curvas preparadas.

La Figura 45 muestra las curvas finales utilizadas en esta investigación; la Tabla 17 y Tabla 18 comparan las tres curvas para distintos tamaños característicos a escala mina y laboratorio respectivamente.

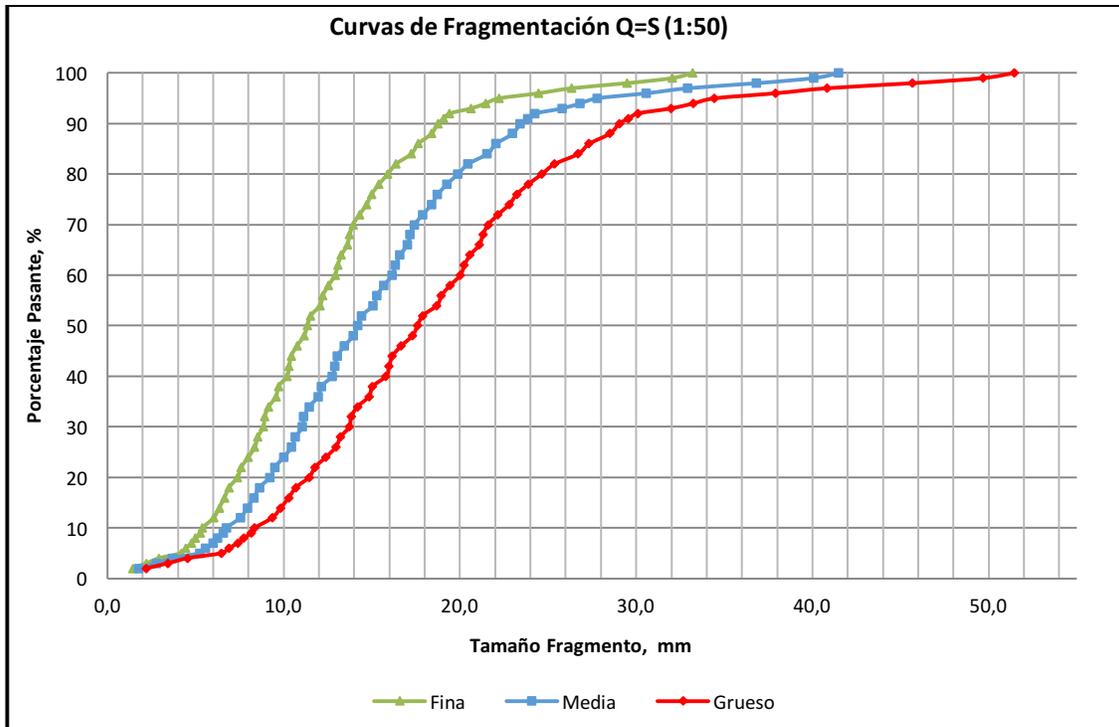


Figura 45: Curvas finales utilizadas en la experimentación

Tabla 17: Comparación entre curvas granulométricas, escala mina [m]

	d20 [m]	d50 [m]	d80[m]
Gruesa	0,59	0,91	1,28
Media	0,51	0,78	1,10
Fina	0,37	0,58	0,80

Tabla 18: Comparación entre curvas granulométricas, escala laboratorio [mm]

	d20 [mm]	d50 [mm]	d80[mm]
Gruesa	11,88	18,24	25,56
Media	10,21	15,69	21,99
Fina	7,5	11,5	16,0

Tabla 19: Curvas finales utilizadas en los experimentos

	d20 [mm]	d50 [mm]	d80[mm]
Gruesa	11,5	17,15	24,5
Media	9,3	14,3	20,0
Fina	7,5	11,5	16,0

3.6 Experimentos de flujo no confinado

Los experimentos se realizan en un modelo que no está sometido a cargas externas, luego la gravedad y fricción son las fuerzas principales que afectan los experimentos de este estudio.

Dentro de los objetivos específicos de este trabajo se encuentra establecer una relación entre los parámetros de diseño de las bateas con la frecuencia de colgaduras y el flujo del material fragmentado. A continuación se detalla la metodología experimental realizada en función de cumplir este objetivo.

3.6.1 Frecuencia de colgaduras

La frecuencia de colgaduras es un índice que se define como la cantidad de eventos por cada 1000 toneladas de mineral extraído. Cada vez que ocurre una colgadura durante el experimento se registra su tipo (descripción en Tabla 20 y esquema en Tabla 21) .

El punto se define como colgado cuando no es posible seguir extrayendo material de el.

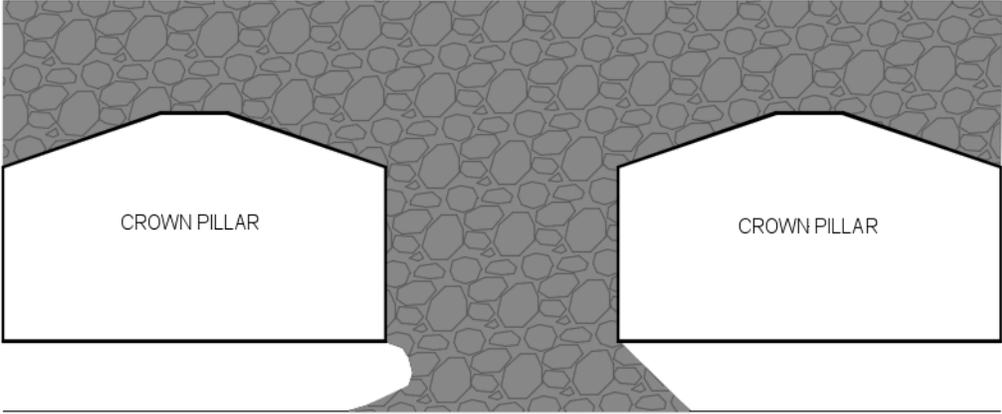
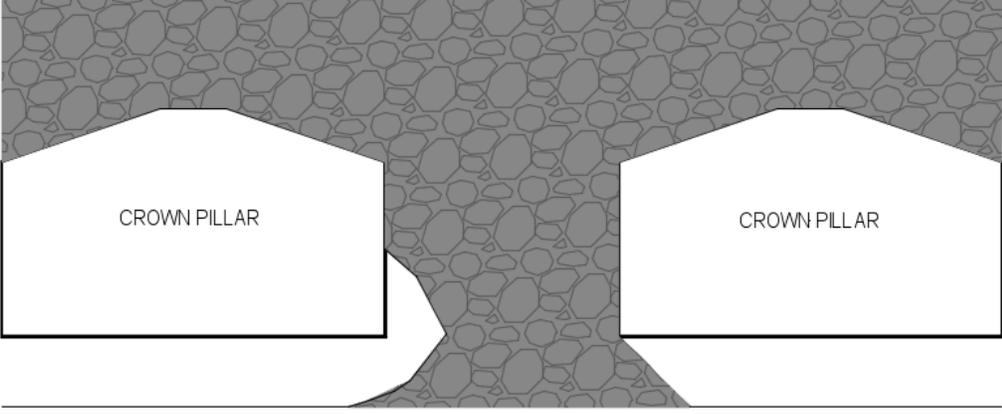
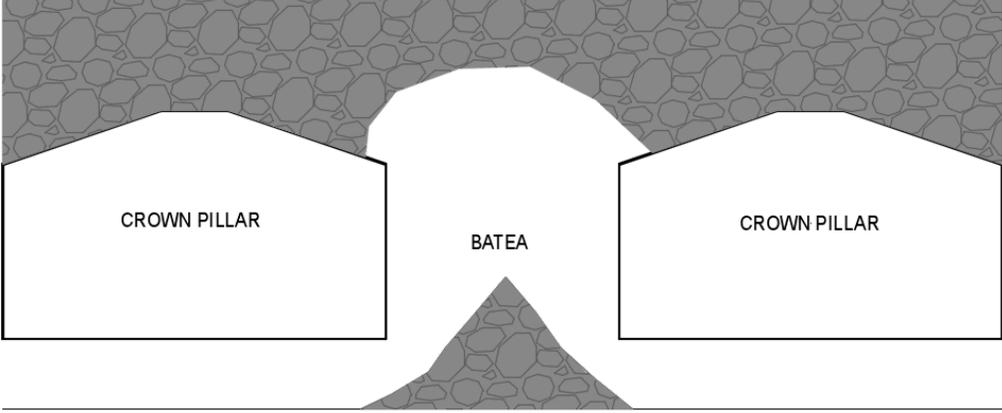
$$Frec_{colgaduras} = \frac{eventos}{1000 [ton]}$$

Ecuación 19: Frecuencia de colgaduras

Tabla 20: Descripción de tipos de colgadura (Olivares, 2014)

Tipo colgadura	Ubicación	Descripción
1	Punto de extracción	La colgadura ocurre por la formación de un arco estable entre el plano definido por el flujo de mineral y la visera o las paredes del punto de extracción.
2	Batea	Formación de un arco estable entre las paredes de la batea.
3	Sobre la batea	Formación de un arco estable soportado por los <i>crowns</i> contiguos definidos por la batea.

Tabla 21: Esquema de tipos de colgadura

Tipo	Esquema
1	 <p>The diagram shows a cross-section of a wall with a stone-like texture. Two white, trapezoidal shapes labeled 'CROWN PILLAR' are positioned side-by-side. There is a clear gap between the two pillars. Below the pillars, a horizontal line is drawn, and a small, dark, triangular shadow is cast on the surface below the gap between the pillars.</p>
2	 <p>The diagram shows a cross-section of a wall with a stone-like texture. Two white, trapezoidal shapes labeled 'CROWN PILLAR' are positioned side-by-side. There is a clear gap between the two pillars. Below the pillars, a horizontal line is drawn, and a small, dark, triangular shadow is cast on the surface below the gap between the pillars.</p>
3	 <p>The diagram shows a cross-section of a wall with a stone-like texture. Two white, trapezoidal shapes labeled 'CROWN PILLAR' are positioned side-by-side. Between them is a white, semi-circular shape labeled 'BATEA'. Below the pillars and the BATEA, a horizontal line is drawn, and a dark, triangular shadow is cast on the surface below the BATEA.</p>

Además del tipo de colgadura, se registra también la altura a la que esta se produce. Como se observa en la Figura 46, la altura de la colgadura se mide desde la visera.

Maass (2013) grafica la distribución de colgaduras en función de la altura observando que la mayor ocurrencia se encuentra entre los 4 y 6 [m]. En este caso la altura de la colgadura es medida desde el nivel de la calle hasta el arco, lo que se traduce en una altura aproximada de 2 [m] sobre la visera (4 [cm] según la escala del modelo). Por lo anterior, en este trabajo se hará distinción entre las colgaduras tipo 2 mayores a 4 [cm] (Ver Figura 47).

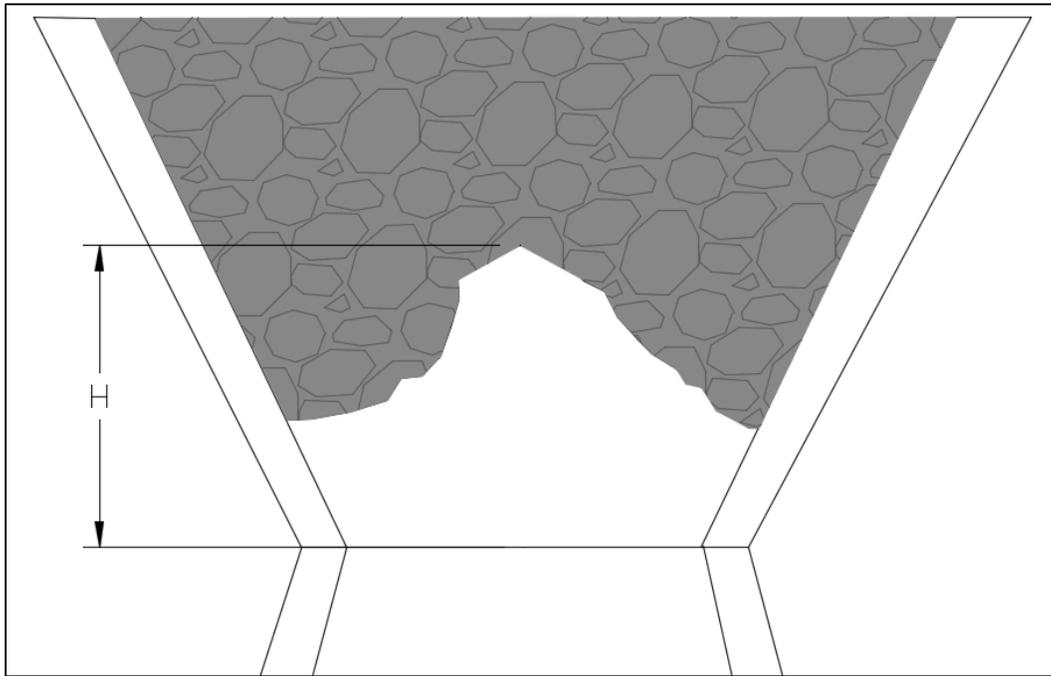


Figura 46: Esquema altura de colgadura

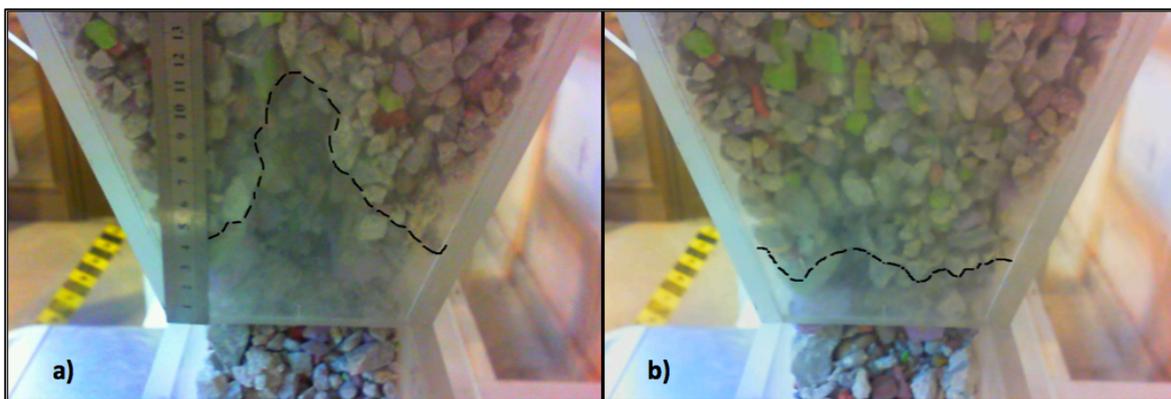


Figura 47: Colgadura tipo 2, altura a) sobre 4 [cm] y b) bajo 4 [cm]

3.6.2 Productividad de balde

La fase experimental de este trabajo permite analizar la productividad del equipo mecanizado en función del tonelaje transportado en cada ciclo. Con lo anterior se define el factor de llenado, índice que corrige la capacidad nominal de llenado del balde por la capacidad real de éste.

El índice de factor de llenado se calcula según la Ecuación 20. Con este parámetro se busca estudiar la influencia de las variables de estudio en la productividad de la pala.

Ecuación 20: Factor de llenado

$$\text{Factor de llenado} = \frac{\text{capacidad real}}{\text{capacidad nominal}} [\%]$$

3.6.3 Flujo del material

Para estudiar el flujo del material fragmentado asociado a cada configuración, el modelo es cargado con marcadores – fragmentos con un color y código de identificación específicos – que son registrados al momento de ser extraídos por alguna de las dos palas mecanizadas. Lo anterior permite generar una matriz que relaciona la posición inicial y final del marcador y la masa acumulada extraída al momento de su aparición en el punto.

El uso de marcadores permite conocer la forma del elipsoide de extracción y la altura de interacción entre elipsoides contiguos mediante la interpolación de los marcadores en función de la masa acumulada registrada al momento de su extracción. La Figura 48 representa la disposición en planta de los marcadores en la caja; estos se ubican cada 10 [cm] desde la base del modelo. En la Figura 49 se observa con mayor detalle la distancia entre los marcadores y el borde con el modelo (las líneas azul y roja representan la distancia entre zanjas de 15 y 20 [m] respectivamente).



Figura 48: Planta disposición de marcadores en el modelo, caja

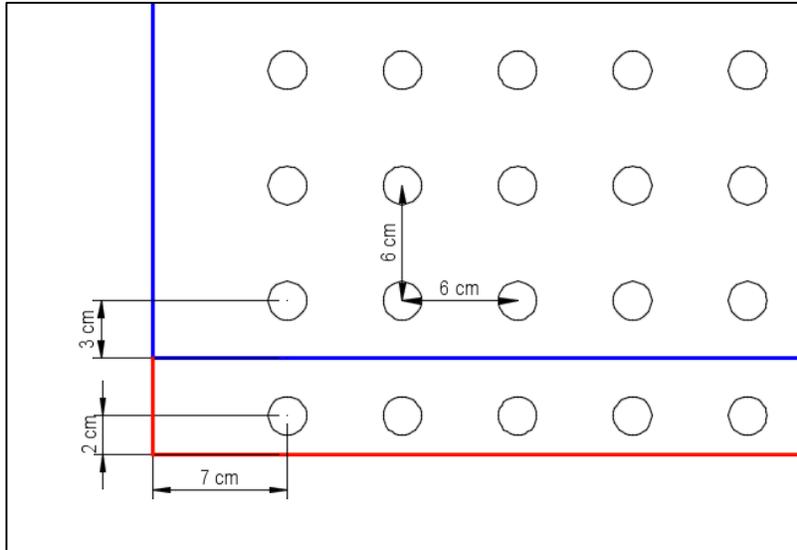


Figura 49: Disposición de marcadores con respecto a los bordes del modelo

Con el fin de identificar con mayor certeza la altura de interacción entre elipsoides en la galería zanja, la densidad de marcadores en las bateas se aumenta respecto a los marcadores de la caja. La disposición de marcadores en la batea corta, malla 16x15 [m], se observa en la Figura 50.



Figura 50: Disposición de marcadores en batea corta, malla 16x15

La Tabla 22 resume el número de marcadores cargados en el modelo según la configuración en estudio, dependiendo de las dimensiones de cada batea.

Tabla 22: Cantidad de marcadores en el modelo para cada configuración

	Largo batea	Ancho superior batea	Caja	Batea	Total
16x15	22 [cm]	24 [cm]	693	79	772
	28 [cm]	24 [cm]		101	794
16x20	22 [cm]	32 [cm]		107	800
	28 [cm]	32 [cm]		137	830

3.6.4 Recuperación minera

Para determinar la recuperación minera es necesario calcular el tonelaje remanente sobre el nivel de hundimiento proyectado en el modelo. El tonelaje remanente se calcula según la Ecuación 21:

$$ton_{remanente} = mne * V_m * \rho_{ap}$$

Ecuación 21: Tonelaje remanente

Donde mne es el número de marcadores no extraídos durante todo el experimento y V_m corresponde al volumen asociado a cada marcador, el cual es determinado por la densidad del arreglo de marcadores presentes en el modelo (Tabla 22). Como se menciona anteriormente, es necesario estandarizar el volumen asociado a cada marcador dependiendo del ancho de batea utilizado – lo cual se relaciona con la distancia entre zanjas de la malla en estudio – luego existe una corrección del tonelaje remanente dependiendo del experimento. La recuperación se calcula según la Ecuación 22.

Ecuación 22: Recuperación minera

$$Recuperación = \frac{ton_{columna} - ton_{remanente}}{ton_{columna}}$$

Donde $ton_{columna}$ corresponde al tonelaje asociado a la columna de mineral, calculado según las características de la malla y los supuestos de altura de columna y densidad de mineral que se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23: Tonelaje de la columna de mineral en función de la malla

Malla	Área malla [m]	Altura de columna [m]	Densidad [ton/m ³]	Tonelaje columna [ton]
16x15	240	250	2,7	162000
16x20	320			216000

3.6.5 Registro de datos y duración de experimentos

En la Tabla 24 se enumeran y describen los parámetros requeridos para el análisis. Como se especifica mas adelante en el procedimiento (sección 3.8), el registro de los datos se realiza una vez concluido el ciclo de extracción.

Tabla 24: Parámetros requeridos para el análisis

Parámetro	Comentario	Unidad
Masa	Masa extraída por baldada	[gr]
Colgadura	Tipo de colgadura	-
Altura Colgadura	Altura de la colgadura medida desde la visera	[cm]
Sobre tamaño	Largo mayor del fragmento (sólo si $L \geq 4$ [cm])	[cm]
Marcador	Código de identificación	-
Comentario	Descuelgue natural/manual	-

Para estudiar el comportamiento del flujo del material, el experimento se detiene una vez extraído el primer marcador del nivel superior del modelo (Ver Figura 51).

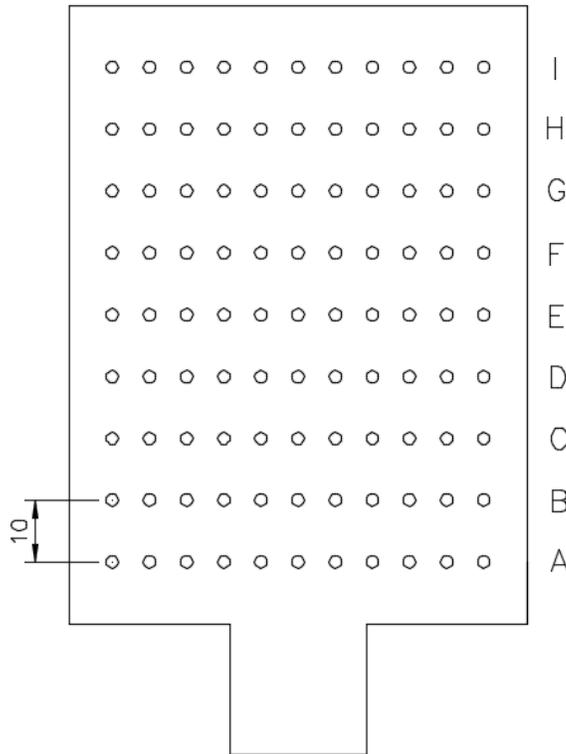


Figura 51: Disposición de marcadores, vista frontal [cm]

3.7 Plan experimental

Una vez realizada la configuración, se define el plan experimental. Este considera un *trade off* entre los experimentos mínimos para cumplir los objetivos del estudio y el tiempo requerido para preparar un experimento (descarga del modelo, homogenización del material y carga del modelo con sus respectivos marcadores).

Como se describe en la sección 4.5, la curva de fragmentación granulométrica se modifica en función del largo equivalente utilizado para su elaboración. Por lo cual el caso base se repite con la nueva curva. Posterior a esto, se realiza la variación del largo de batea y la malla utilizada. Finalmente, se estudia la influencia de la granulometría fina en el mejor escenario de las cuatro bateas en estudio. La Tabla 25 resume el plan experimental.

Tabla 25: Plan experimental

Experimento	Granulometría, d80 [mm]	Malla	Largo batea
1 (caso base)	24,5(gruesa)	16x15	Corta
2 (caso base)	20,0(media)	16x15	Corta
3	20,0(media)	16x15	Larga
4	20,0(media)	16x20	Corta
5	20,0(media)	16x20	Larga
6	16,0(fina)	16x15	Larga

3.8 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental se encuentra estandarizado para la obtención de datos necesarios para el análisis. El procedimiento se describe a continuación:

- I. Preparación del modelo y carga de material
 1. Posicionar batea correspondiente en el modelo.
 2. Cargar el material homogeneizado en el modelo desde su base (galería zanja), respetando la configuración de marcadores tanto en la batea como en la caja. En la caja, las líneas de flujo se realizan posterior a la colocación de los marcadores de ese nivel.
- II. Extracción y toma de datos
 1. Iniciar extracción con pala 1.
 2. La carga no puede realizarse mas allá de la proyección de la visera en la galería zanja.
 3. Descarga del material a través del sistema de traspaso.
 4. Registrar masa de material asociado a la extracción de la pala.
 5. Si ocurre una colgadura, registrar su tipo.
 6. Si ocurre una colgadura, registrar su altura.
 7. Si se extrae un sobre tamaño, registrar su largo máximo.
 8. Si se extrae un marcador, registrar su código de identificación.
 9. Si se realiza un descuelgue natural/manual, registrar como comentario.
 10. Iniciar extracción con pala 2 y repetir procedimiento.
- III. Criterio de término de experimento
 1. El experimento se da por finalizado en el momento que aparece el primer marcador del último nivel (marcadores I).
- IV. Observaciones
 1. Si el sistema mecanizado falla antes de llegar a la zona de descarga, el material se considera como parte del ciclo y continúa según procedimiento sección II.4-9.
 2. Si el punto se descuelga producto de la extracción del otro punto se considera descuelgue natural y se registra en el ciclo de extracción anterior asociado al punto descolgado.
 3. Si el punto se descuelga producto de movimiento inesperado del modelo se considera descuelgue manual con el fin de no sobre estimar el tonelaje entre colgaduras.
 4. Posterior a 50 extracciones por punto el modelo se recarga con el material extraído.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Introducción

Este capítulo muestra los resultados obtenidos en la experimentación según el plan establecido y el análisis experimental desarrollado. Los resultados se presentan a continuación según el registro de datos:

- Masa
- Colgadura
- Altura de colgadura
- Marcadores

La Tabla 26 resume los análisis realizados para estudiar las variables comparando distintos experimentos, con foco en los objetivos específicos.

Tabla 26: Análisis de experimentos

Análisis experimentos	Parámetros fijos	Variable de estudio	Objetivo estudio
2-4	Batea corta Granulometría	Malla	Influencia de la malla de extracción
3-5	Batea larga Granulometría	Malla	
2-3	Malla 16x15 Granulometría	Largo batea	Influencia del largo de batea
4-5	Malla 16x15 Granulometría	Largo batea	
1-2	Malla 16x15 Batea corta	Granulometría	Influencia de la granulometría
3-6	Malla 16x15 Batea larga	Granulometría	

Con la siguiente información es posible realizar una comparación del efecto de la malla de extracción y largo de batea en las variables de estudio. Este análisis debe ser únicamente con los experimentos 2, 3, 4 y 5 dado que mantienen una granulometría fija; si se desea observar el comportamiento en función de la granulometría se fijan las características de la batea y se analizan los experimentos 1-2 y 3-6 por separado.

Al analizar los resultados se observa que el comportamiento de las variables de estudio se mantiene constante posterior a las 500 extracciones. Por lo tanto, para estandarizar el análisis estadístico, se consideran las primeras 500 extracciones de cada experimento (aproximadamente 12500 toneladas por batea a escala mina).

4.2 Frecuencia de colgaduras

En cada ciclo se registra la masa extraída por las palas, lo anterior permite obtener la masa acumulada entre colgaduras; lo que escalado a mina se traduce como el tonelaje entre colgaduras y con esto, la frecuencia de colgaduras asociada a cada experimento.

En la Figura 52 se aprecia la formación de una colgadura tipo 1 (en la visera) durante la realización del experimento 3

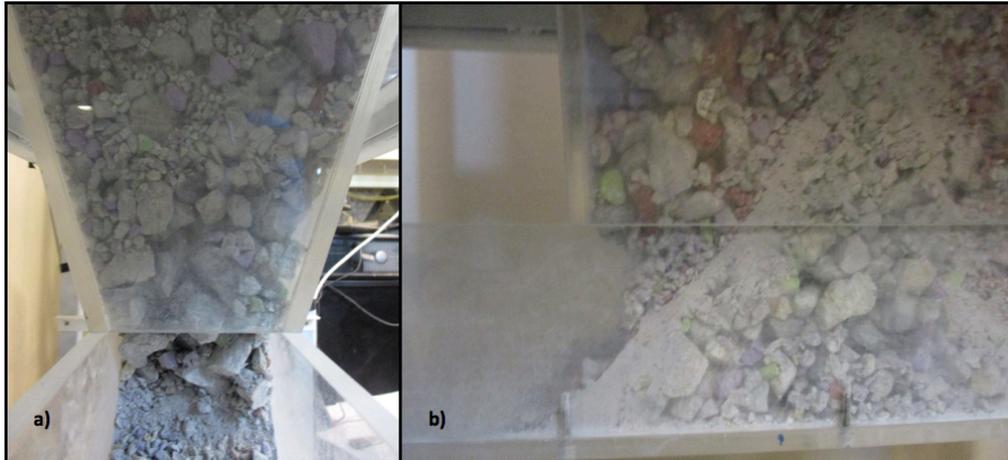


Figura 52: Colgadura tipo 1 vista a) frontal b) lateral, experimento 3

4.2.1 Masa entre colgaduras

La Tabla 27 presenta la masa extraída entre colgaduras para 500 ciclos de extracción por punto. En la Tabla 28 se observan los datos escalados a mina y el índice de frecuencia de colgaduras para cada experimento.

La Ecuación 23 se utiliza para obtener el tonelaje entre colgaduras en función de la masa extraída entre colgaduras durante cada experimento.

$$\text{Tonelaje entre colgaduras [ton]} = \frac{\text{Masa entre colgaduras [kg]} * 50^3}{1000}$$

Ecuación 23: Conversión a tonelaje entre colgaduras, Escala 1:50

Tabla 27: Masa entre colgaduras, escala laboratorio

Experimento	Malla	Batea	d80 [mm]	Masa entre colgaduras [kg]
1	16x15	Corta	24,5(gruesa)	0,97±0,45
2		Corta	20,0(media)	1,26±0,45
3		Larga	20,0(media)	2,56±0,20
4	16x20	Corta	20,0(media)	1,48±0,52
5		Larga	20,0(media)	2,87±1,54
6	16x15	Larga	16,0(fina)	6,21±1,28

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tabla 28: Frecuencia de colgaduras

Experimento	Malla	Batea	d80 [m]	Tonelaje entre colgaduras [ton]	Frecuencia de colgaduras
1	16x15	Corta	1,28(gruesa)	121,25±79,54	8,2
2		Corta	1,10(media)	157,09±79,53	6,4
3		Larga	1,10(media)	321,16±35,35	3,1
4	16x20	Corta	1,10(media)	185,84±91,92	5,4
5		Larga	1,10(media)	359,63±272,23	2,8
6	16x15	Larga	0,8(fina)	775,82±159,67	1,3

Al graficar el tonelaje entre colgaduras en función de la malla de extracción (Figura 53) se observa que en ambas bateas el tonelaje entre colgaduras aumentó y con ello disminuye el índice de frecuencia de colgaduras. La variación con respecto a la malla 16x15 [m] es de un 18% para la batea corta y un 12% para la batea larga.

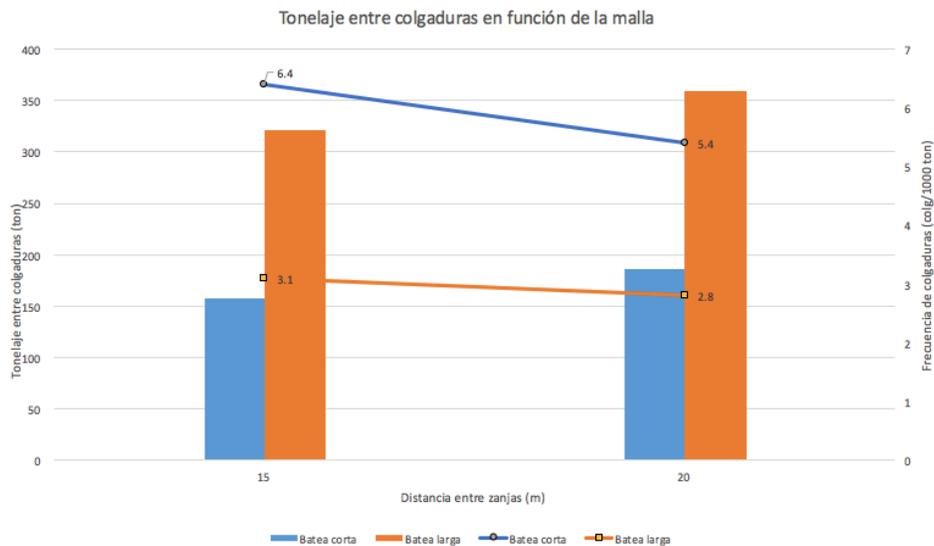


Figura 53: Tonelaje entre colgaduras en función de la malla de extracción

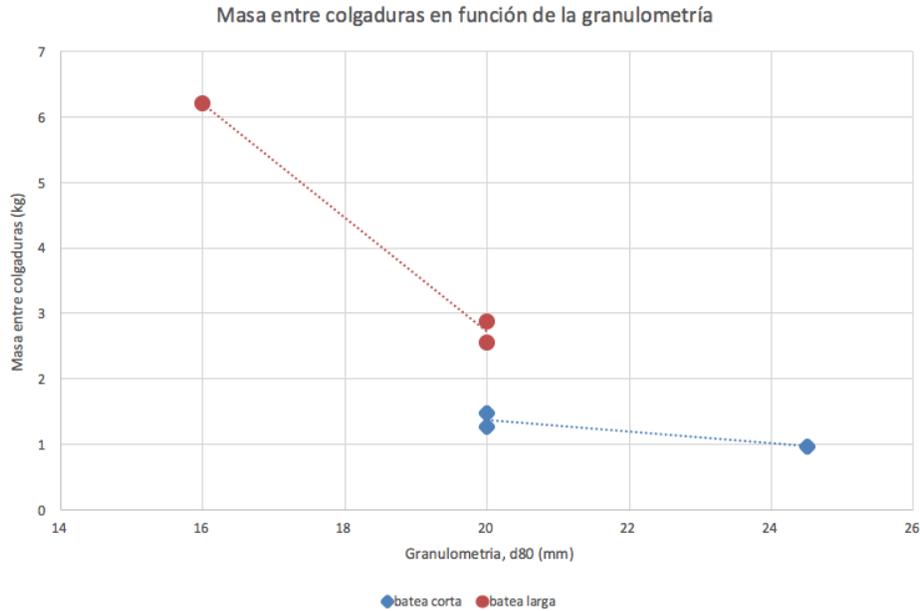


Figura 54: Masa entre colgaduras en función de la granulometría

Al observar el gráfico de masa entre colgaduras en función del d_{80} (Figura 54), se puede apreciar que tanto para la batea corta como para la batea larga la masa entre colgaduras aumenta al disminuir la granulometría. Tomando como referencia la curva media ($d_{80} = 20$ [mm]), cuando se considera la granulometría fina ($d_{80} = 16$ [mm]), la masa aumenta más de un 120% en promedio entre colgaduras para la batea larga; mientras que respecto a la curva gruesa ($d_{80} = 24,5$ [mm]), la masa disminuye en un 30% en promedio para la batea corta.

En la Tabla 29 se presenta la influencia de las variables de estudio en la frecuencia de colgaduras.

Tabla 29: Influencia de las variables de estudio en frecuencia de colgaduras

Análisis experimentos	Objetivo estudio	Influencia en colgaduras
2-4	Influencia de la malla de extracción	Si
3-5		
2-3	Influencia del largo de batea	Si
4-5		
1-2	Influencia de la granulometría	Si
3-6		

4.2.2 Tipo y altura de colgaduras

Del número total de colgaduras, es importante conocer la zona en la cual estas ocurrieron (Tabla 30) y para el caso de las colgaduras de tipo 2, cuántas de ellas son mayores a 4 [cm] (Tabla 31).

Tabla 30: Tipo de colgadura por experimento

Experimento	malla	batea	d80 [mm]	Número de colgaduras	Tipo 1 [%]	Tipo 2 [%]
1	16x15	Corta	24,5(gruesa)	97	69	31
2		Corta	20,0(media)	76	80	20
3		Larga	20,0(media)	41	39	61
4	16x20	Corta	20,0(media)	66	73	27
5		Larga	20,0(media)	38	47	53
6	16x15	larga	16,0(fina)	16	50	50

Tabla 31: Clasificación de altura de colgaduras tipo 2

Experimento	malla	batea	d80 [mm]	Mayor a 4[cm] [%]	Menor a 4[cm] [%]
1	16x15	Corta	24,5(gruesa)	57	43
2		Corta	20,0(media)	53	47
3		Larga	20,0(media)	60	40
4	16x20	Corta	20,0(media)	33	67
5		Larga	20,0(media)	69	31
6	16x15	larga	16,0(fina)	55	45

Es importante también observar de manera clara el número de colgaduras tipo 2 mayores a 4 [cm] que ocurrieron en cada experimento. Los resultados se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32: Número de colgaduras mayores a 4 [cm]

Experimento	malla	batea	d80 [mm]	Número de colgaduras	Número de colgaduras mayores a 4 [cm]
1	16x15	Corta	24,5(gruesa)	97	17
2		Corta	20,0(media)	76	8
3		Larga	20,0(media)	41	15
4	16x20	Corta	20,0(media)	66	6
5		Larga	20,0(media)	38	14
6	16x15	Larga	16,0(fina)	16	5

Al graficar el número de colgaduras sobre 4 [cm] en función de la granulometría (Figura 55 y Figura 56) se observa que en el caso de la malla 16x15 [m] la disminución de la granulometría tiene un efecto considerable. Para la batea corta, al reducir la granulometría gruesa a media se reducen las colgaduras sobre 4 [cm] en un 53%; en el caso de la batea larga, al reducir la granulometría media a fina se reducen las colgaduras sobre 4 [cm] en un 67%. Al comparar el largo de batea con granulometría media, se produce una reducción de 47% al usar batea corta.

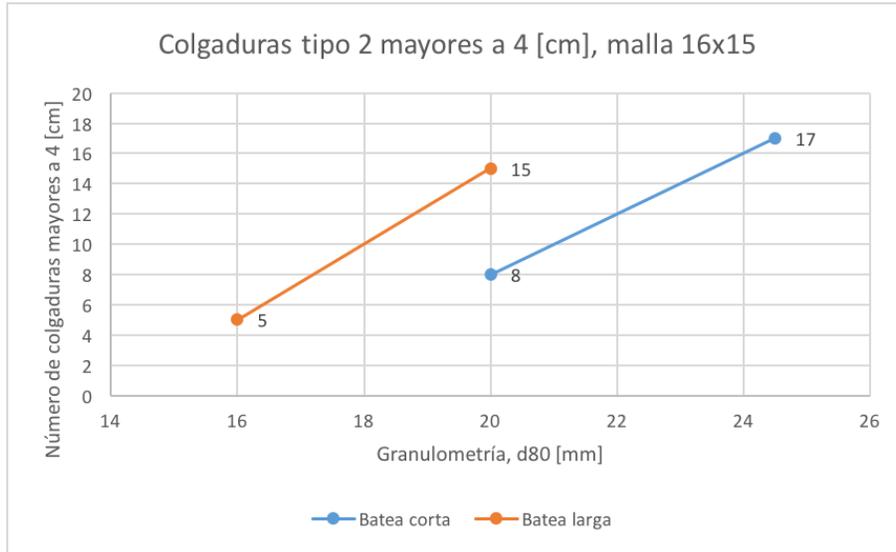


Figura 55: Colgaduras > 4 [cm] en función de la granulometría, malla 16x15

En el caso de la malla 16x20 [m] solo se realizan experimentos con granulometría media. En este caso al utilizar batea corta se produce una reducción de 57%.

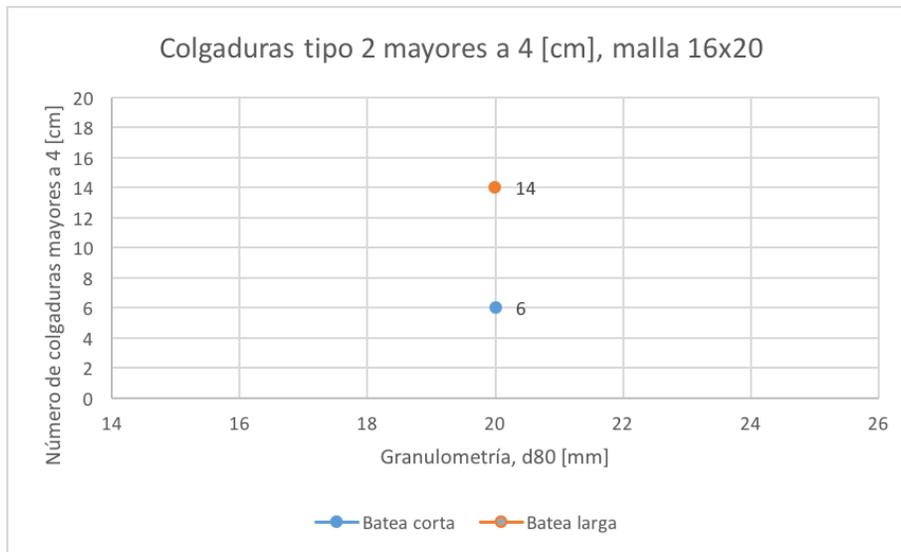


Figura 56: Colgaduras > 4 [cm] en función de la granulometría, malla 16x20

En la Tabla 33 se presenta la influencia de las variables de estudio en la frecuencia de colgaduras tipo 2 sobre 4 [cm]

Tabla 33: Influencia de las variables de estudio en frecuencia de colgaduras sobre 4 [cm]

Análisis experimentos	Objetivo estudio	Influencia en colgaduras sobre 4 [cm]
2-4	Influencia de la malla de extracción	No
3-5		
2-3	Influencia del largo de batea	Si
4-5		
1-2	Influencia de la granulometría	Si
3-6		

4.3 Análisis de flujo

Con el uso de marcadores durante cada experimento se obtiene el elipsoide de extracción asociado a cada configuración, lo que a su vez permite observar el ángulo de flujo (α) del material y estimar la altura de interacción entre zonas de flujo.

4.3.1 Elipsoides de extracción

La Figura 57 corresponde al elipsoide de extracción del experimento 6, con una masa total extraída de 160 [kg], generado mediante la interpolación de las coordenadas iniciales de cada marcador recuperado durante el experimento.

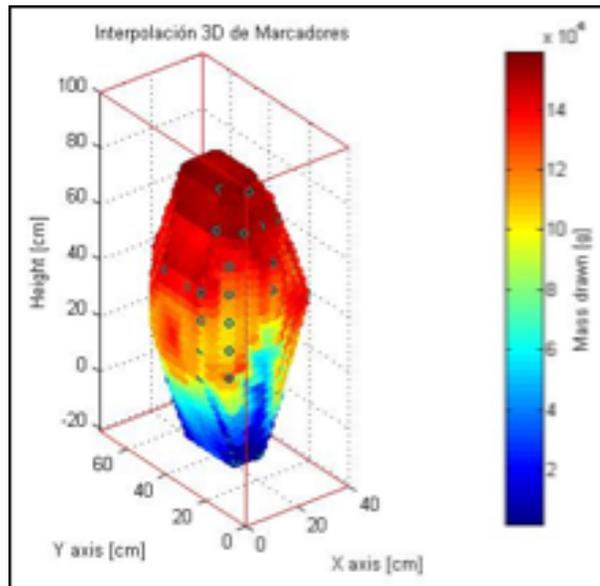


Figura 57: Vista isométrica elipsoide de extracción, exp 6, 160 [kg]

En la Figura 58 se aprecian las vistas a) lateral y b) frontal de la interpolación de marcadores del modelo con una masa total extraída de 160 [kg].

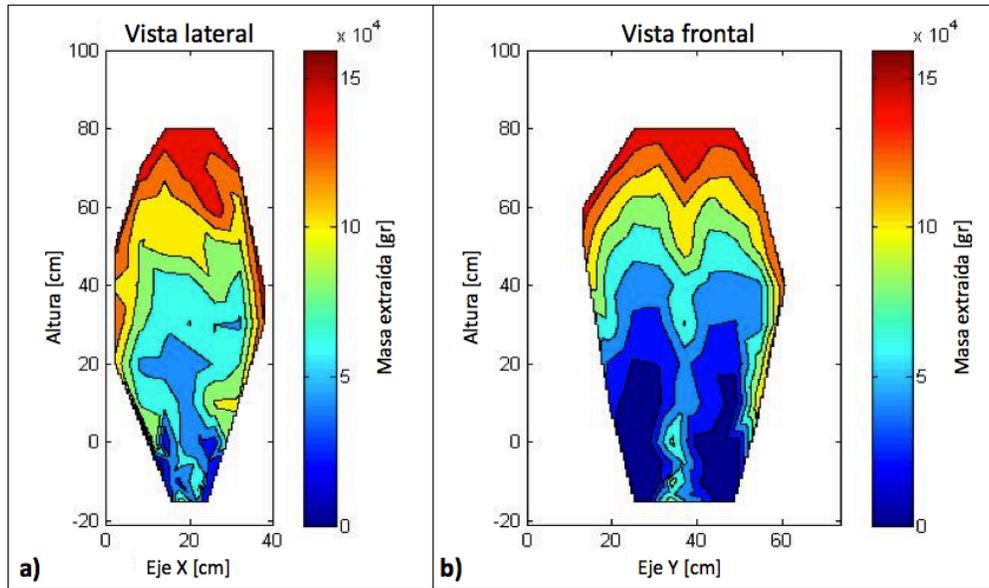


Figura 58: Elipsoide de extracción experimento 5, vista a) lateral b) frontal, 160 [kg]

En la Figura 59 se observa cómo se proyecta el ángulo de flujo del mineral sobre el pilar menor (a) y mayor (b).

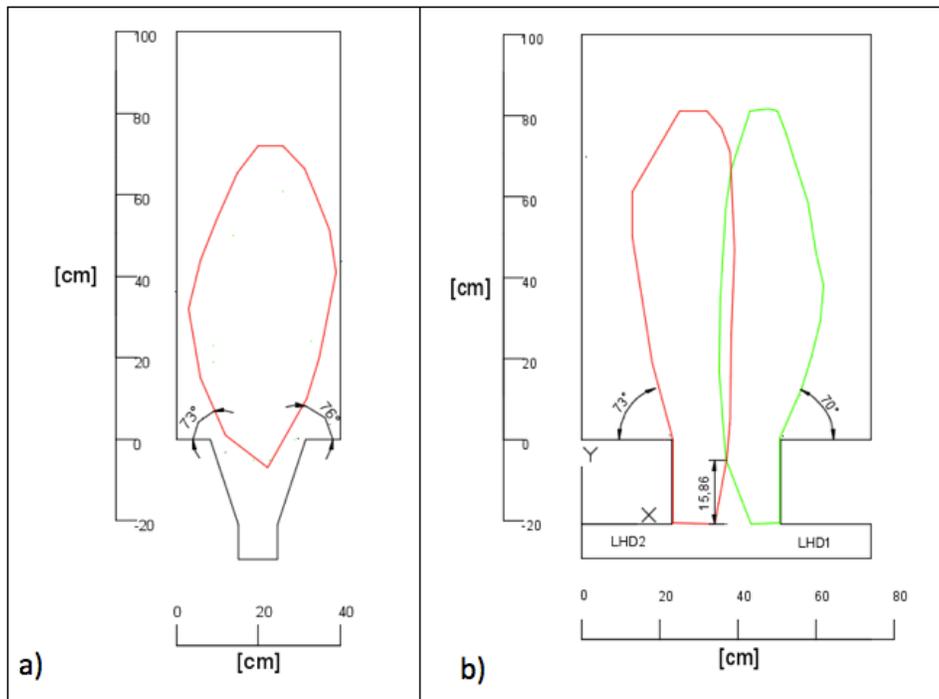


Figura 59: a) Vista lateral y b) Vista frontal de los elipsoides de extracción

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Tabla 34 corresponde a los ángulos de flujo medidos en la vista frontal (hacia el pilar mayor) y lateral (hacia el pilar menor).

Tabla 34: Ángulo de flujo

Experimento	malla	batea	d80 [mm]	Ángulo de flujo pilar mayor	Ángulo de flujo pilar menor
1	16x15	Corta	24,5(gruesa)	$70^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$69^{\circ} \pm 1^{\circ}$
2		Corta	20,0(media)		$74^{\circ} \pm 4^{\circ}$
3		Larga	20,0(media)		$70^{\circ} \pm 2^{\circ}$
4	16x20	Corta	20,0(media)	$70^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$65^{\circ} \pm 2^{\circ}$
5		Larga	20,0(media)		
6	16x15	Larga	16,0(fina)	$72^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$74^{\circ} \pm 1^{\circ}$

Como se menciona anteriormente, el pilar corona no se representa en el modelo físico, luego la altura de la losa debe considerarse al momento de realizar el cálculo de la altura de interacción. Como se observa en la Figura 60, esta diferencia con la batea y el nivel de hundimiento (UCL) equivale a 6,5 [cm] en el modelo.

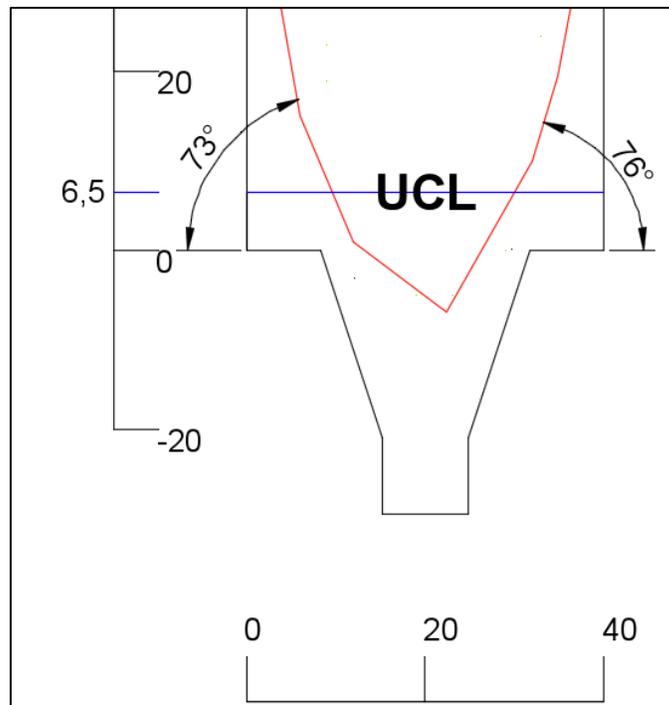


Figura 60: Ajuste del modelo debido al nivel de hundimiento (UCL)

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Si bien la interpolación de marcadores permite estimar el ángulo de flujo de manera visual, es posible calcular α considerando la geometría presente en la ubicación de las coordenadas de los marcadores respecto a la batea. Lo anterior se realiza para los marcadores que se encuentran en el contorno de la matriz, si un marcador sale por un punto de extracción quiere decir que pertenece al volumen de extracción y el ángulo de flujo del material debe ser al menos el requerido para que el marcador en cuestión pudiera llegar al punto de extracción (ver Figura 61).

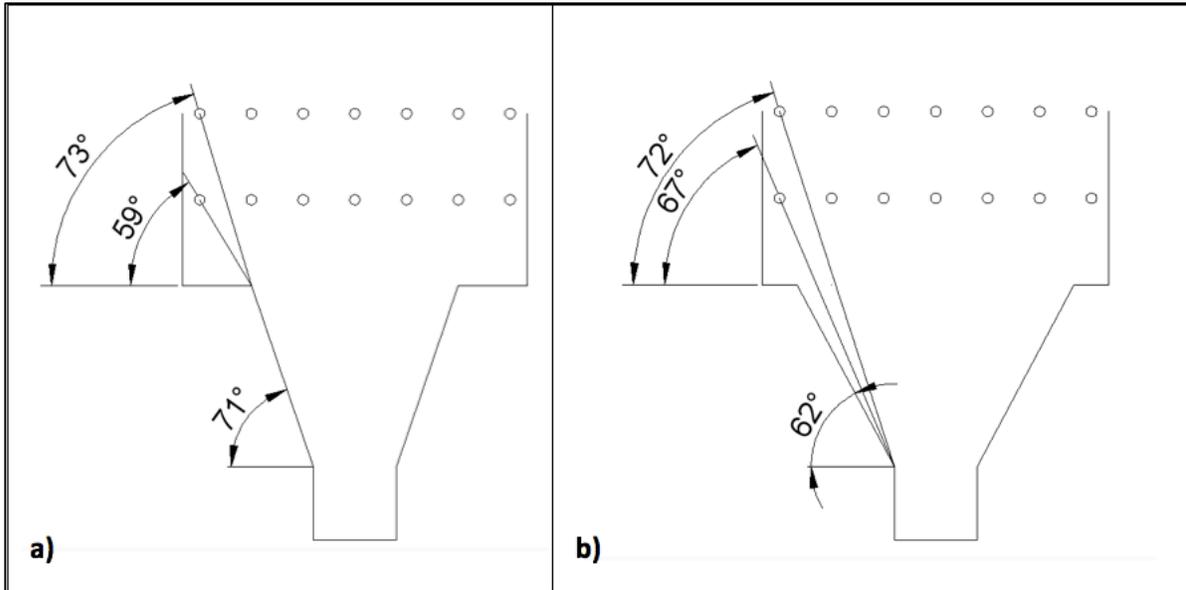


Figura 61: Ángulo de flujo en función de los marcadores extraídos a) malla 16x15; b) malla 16x20

En la Tabla 35 se presenta el ángulo de flujo del material sobre el pilar menor, estimado en función de los marcadores. La Tabla 36 presenta la influencia de las variables de estudio en el ángulo de flujo.

Tabla 35: Ángulo de flujo en función de la extracción de marcadores

Experimento	malla	batea	d80 [mm]	Ángulo de flujo pilar menor
1	16x15	Corta	24,5(gruesa)	73°
2		Corta	20,0(media)	73°
3		Larga	20,0(media)	73°
4	16x20	Corta	20,0(media)	67°
5		Larga	20,0(media)	67°
6	16x15	Larga	16,0(fina)	73°

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tabla 36: Influencia de las variables de estudio en el ángulo de flujo

Análisis experimentos	Objetivo estudio	Influencia en ángulo de flujo (pilar mayor)	Influencia en ángulo de flujo (pilar menor)
2-4	Influencia de la malla de extracción	No	Si
3-5			
2-3	Influencia del largo de batea	No	No
4-5			
1-2	Influencia de la granulometría	Si	No
3-6			

Es importante destacar la influencia de las condiciones de borde asociadas al modelo físico en el flujo del material fragmentado. Si bien el plexiglás permite visualizar el comportamiento de las líneas de flujo, genera un plano vertical por el cual el material desliza. Como se observa en la Figura 62, el análisis de imágenes permite identificar una partícula en el inicio del experimento que luego de 500 y finalmente 1200 extracciones aún continua en contacto con la pared.

Debido a la geometría del modelo físico, el límite superior de la batea que representa la malla 16x20 [m] se encuentra mas cerca de las paredes (ver Figura 61-b). Esto último puede afectar el comportamiento del flujo y como consecuencia de esto, los resultados de los experimentos 4 y 5 muestran una relación entre la malla de extracción y el ángulo de flujo sobre el pilar menor.

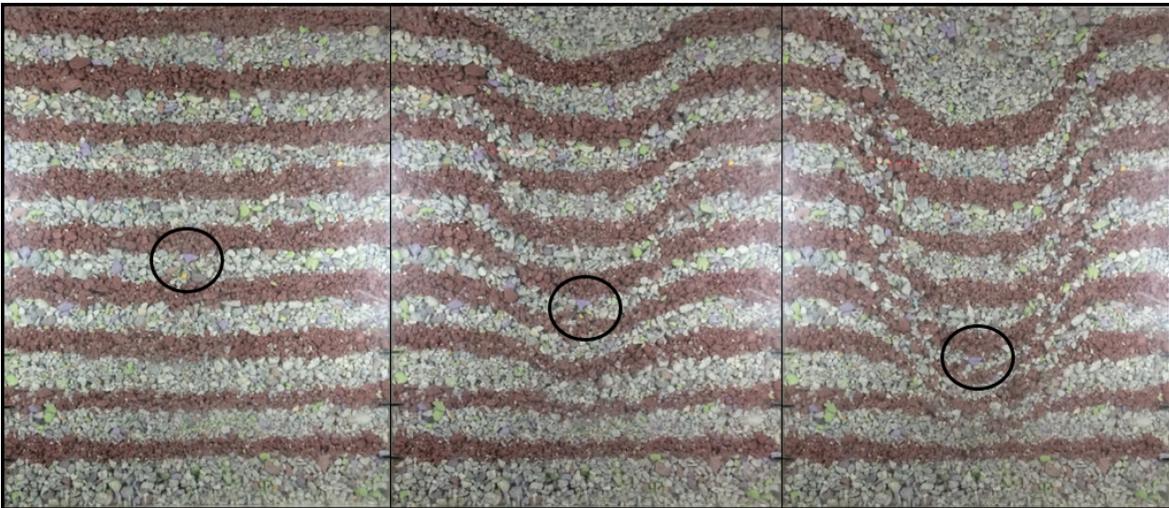


Figura 62: Efecto de la pared en el flujo del material, experimento 6 (inicio, 500 y 1200 extracciones)

En el ANEXO C se observa el comportamiento de los elipsoides de flujo en cada experimento.

4.3.2 Tonelaje remanente y recuperación minera

En la Tabla 37 se observan los resultados obtenidos respecto al tonelaje remanente sobre el nivel de extracción y la recuperación minera.

Tabla 37: Tonelaje remanente y recuperación minera

Experimento	malla	batea	d80 [m]	Tonelaje remanente	Recuperación minera [%]
1	16x15	Corta	1,28(gruesa)	10892±1227	93,3±0,8
2		Corta	1,10(media)	11706±2701	92,8±1,7
3		Larga	1,10(media)	8549±2083	94,7±1,3
4	16x20	Corta	1,10(media)	15608±3602	92,8±1,7
5		Larga	1,10(media)	11398±2777	94,7±1,3
6	16x15	Larga	0,8(fina)	10171±2584	93,7±1,6

Realizando el mismo planteamiento geométrico que en la Ecuación 5 (Sección 2.2.2), se define la altura de interacción sobre el *crown pillar* como:

$$HIZ_{cp} = \frac{D_{c||z} - L_b}{2} \tan \alpha$$

Ecuación 24: Altura de interacción HIZ sobre el crown pillar

Donde HIZ_{cp} es la altura máxima a la cual las zonas de flujo de puntos de extracción adyacentes interceptan sobre el pilar mayor, medida desde el punto mas alto de la batea; $D_{c||z}$ corresponde a la distancia entre calles a través de la zanja; L_b es el largo de batea y α el ángulo de flujo del mineral.

Para obtener la altura de interacción tomando como base el nivel de hundimiento (UCL), es necesario ajustar HIZ_{cp} según la diferencia entre la batea y el nivel de hundimiento (3,25 [m] en escala mina). Así,

$$HIZ_{UCL} = HIZ_{cp} - 3,25 [m]$$

Ecuación 25: Altura de interacción respecto al nivel de hundimiento (UCL)

Donde HIZ_{UCL} es la altura de interacción desde el nivel de hundimiento y HIZ_{cp} se expresa en escala mina.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Utilizando la Ecuación 25 y Ecuación 5 se calcula la altura de interacción sobre los pilares mayor y menor respectivamente. Para su cálculo, se utiliza el ángulo de flujo sobre el pilar mayor de la Tabla 34 y el ángulo de flujo sobre el pilar menor de la Tabla 35 (Ver ANEXO D).

Tabla 38: Altura de interacción sobre nivel de hundimiento, HIZ_{UCL}

Experimento	malla	batea	d80 [m]	HIZ pilar mayor [m]	HIZ pilar menor [m]
1	16x15	Corta	1,28(gruesa)	31	3,5
2		Corta	1,10(media)	33	3,5
3		Larga	1,10(media)	28	3,5
4	16x20	Corta	1,10(media)	33	4,2
5		Larga	1,10(media)	28	4,2
6	16x15	Larga	0,8(fina)	32	3,5

La Tabla 39 y la Tabla 40 presentan la influencia de las variables de estudio en la recuperación minera y la alturas de interacción respectivamente.

Tabla 39: Influencia de las variables de estudio en la recuperación minera

Análisis experimentos	Objetivo estudio	Influencia en recuperación minera
2-4	Influencia de la malla de extracción	No
3-5		
2-3	Influencia del largo de batea	Si
4-5		
1-2	Influencia de la granulometría	Si
3-6		

Tabla 40: Influencia de las variables de estudio en la altura de interacción

Análisis experimentos	Objetivo estudio	Influencia en altura de interacción (pilar mayor)	Influencia en altura de interacción (pilar menor)
2-4	Influencia de la malla de extracción	No	Si
3-5			
2-3	Influencia del largo de batea	Si	No
4-5			
1-2	Influencia de la granulometría	Si	No
3-6			

4.4 Productividad de balde

En la Tabla 41 se presenta la productividad del balde a escala de laboratorio para cada experimento (Ver ANEXO E).

Tabla 41: Productividad de balde (escala laboratorio)

Experimento	Malla	Batea	d80 [mm]	μ [gr]	σ
1	16x15	Corta	24,5 (gruesa)	96,45	26,93
2		Corta	20 (media)	100,14	22,55
3		Larga		109,27	24,76
4	16x20	Corta	20 (media)	100,51	25,22
5		Larga		115,03	25,17
6	16x15	Larga	16 (fina)	118,4	16,0

La densidad aparente del mineral se estima en 1,6 [ton/m³], por lo tanto la capacidad nominal del balde utilizado es de 136,2 [gr] (Ver Ecuación 26).

$$Capacidad\ nominal\ [gr] = \frac{14\ [yd^3] * 0,76\ [m^3/yd^3] * 1,6\ [ton/m^3]}{0,125}$$

Ecuación 26: Capacidad nominal de balde (escala laboratorio)

La Tabla 42 resume el factor de llenado del balde.

Tabla 42: Factor de llenado

Experimento	Malla	Batea	d80 [m]	μ [%]	σ
1	16x15	Corta	1,28 (gruesa)	70,8	19,8
2		Corta	1,1 (media)	73,5	16,6
3		Larga		80,3	18,2
4	16x20	Corta	1,1 (media)	73,8	18,5
5		Larga		84,2	18,5
6	16x15	Larga	0,8 (fina)	86,9	11,8

Considerando los resultados obtenidos para la granulometría media se observa una relación entre el largo de batea y el factor de llenado. Lo anterior corresponde a una limitación del alcance de la pala al utilizar la batea corta en el modelo físico.

Por lo anterior, el análisis de productividad del balde se realiza comparando los experimentos 3 y 5 que presentan la misma configuración geométrica de batea.

La comparación del factor de llenado se observa en la Figura 63.

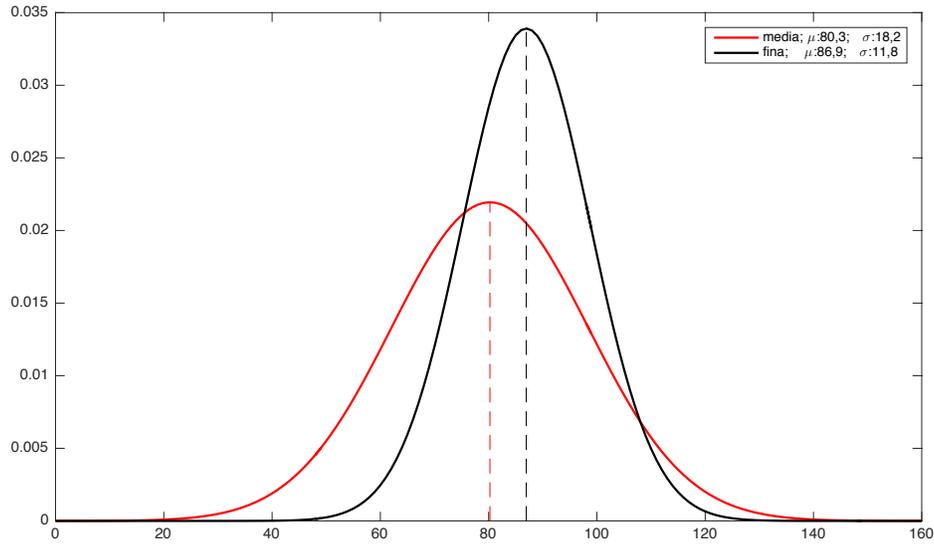


Figura 63: Factor de llenado granulometría media-fina

El factor de llenado aumenta de 80,3% a 86,9% al reducir la granulometría de media a fina ($d_{80} = 1,1 [m] - 0,8 [m]$).

Para analizar la influencia de la granulometría en el factor de llenado se realiza una prueba t de Student para las medias de los factores de llenado agrupadas por granulometría. (Tabla 43).

Las hipótesis respecto a la granulometría son:

- H_0 : No hay influencia de la granulometría en el factor de llenado.
- H_1 : Hay influencia de la granulometría en el factor de llenado.

Tabla 43: Prueba t de Student, influencia de la granulometría en el factor de llenado.

	Granulometría media	Granulometría fina
Media	80,3	86,9
Varianza	331,24	139,24
Diferencia hipotética de las medias	0	
Estadístico t	-11,96	
P(T<=t) dos colas	9,86E-32	
Valor crítico de t (dos colas)	1,96	

Como el estadístico (-11,96) es menor al valor crítico (-1,96) se rechaza la hipótesis nula y por lo tanto la granulometría si influye en el factor de llenado del balde.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 44 se presenta el factor de llenado en función de la granulometría.

Tabla 44: Factor de llenado en función de la granulometría

Experimento	d80 [m]	μ	σ	n
3	1,10 (media)	80,3 %	18,2	1711
6	0,8 (fina)	86,9 %	11,8	

En la Tabla 45 se presenta la influencia de las variables de estudio en el factor de llenado.

Tabla 45: Influencia de las variables de estudio en el factor de llenado

Análisis experimentos	Objetivo estudio	Influencia en el factor de llenado
2-4	Influencia de la malla de extracción	No
3-5		
2-3	Influencia del largo de batea	No
4-5		
1-2	Influencia de la granulometría	Si
3-6		

4.5 Determinación teórica del ángulo de fricción del material

Como se menciona anteriormente, la altura de interacción sobre el nivel de hundimiento tiene relación directa con ϕ . Esta sección busca determinar el ángulo de fricción propio del material utilizado.

4.5.1 Ángulo de fricción según altura de interacción

Dado que en cada experimento se determinó un ángulo de flujo, la Ecuación 27 permite despejar un ángulo de fricción (Sección 2.2.2) para el material utilizado (Tabla 46).

$$\phi = 2 * (\alpha - 45)$$

Ecuación 27: Ángulo de fricción en función del ángulo de flujo

Como se menciona anteriormente, las condiciones de borde del modelo pueden afectar el flujo del material fragmentado cuando este se encuentra en los límites del modelo. Por lo tanto, la estimación del ángulo de fricción se realiza con los ángulos de flujo sobre el pilar mayor.

Tabla 46: Determinación del ángulo de fricción

Experimento	d80 [m]	Ángulo de flujo pilar mayor	Ángulo de fricción
1	1,28(gruesa)	69°±1°	48°±2°
2	1,10(media)	70°±2°	50°±4°
3	1,10(media)	70°±2°	50°±4°
4	1,10(media)	70°±2°	50°±4°
5	1,10(media)	70°±2°	50°±4°
6	0,8(fina)	72°±1°	54°±2°

El ángulo de fricción es propio del material, en particular de su granulometría. En la Tabla 47 se presenta el ángulo de fricción determinado según la altura de interacción.

Tabla 47: Ángulo de fricción del material

d80 [mm]	Ángulo de fricción
24,5 (gruesa)	48°±2°
20,0 (media)	50°±4°
16,0 (fina)	54°±2°

4.6 Influencia de las variables de estudio

En base a los resultados obtenidos se presenta en la Tabla 48 un resumen de la influencia de las variables de estudio en los parámetros analizados en este trabajo. Se menciona además cuál es la mejor configuración (malla de extracción, largo de batea o granulometría) en caso de que se haya establecido que una variable influye en alguno de los parámetros.

Tabla 48: Influencia de las variables de estudio

	Malla de extracción	Largo de batea	Granulometría
Frecuencia de colgaduras	Si (16x20)	Si (larga)	Si (fina)
Colgaduras altas	No	Si (corta)	Si (fina)
Recuperación minera	No	Si (larga)	Si (gruesa)
Ángulo de flujo (pilar mayor)	No	No	Si (gruesa)
Ángulo de flujo (pilar menor)	Si (16x20)	No	No
Altura de interacción (pilar mayor)	No	Si (larga)	Si (gruesa)
Altura de interacción (pilar menor)	Si (16x15)	No	No

Es importante destacar que la fragmentación secundaria es un fenómeno propio del hundimiento del material, por lo tanto no es posible controlar esta variable. Más aún, los resultados de la simulación de fragmentación secundaria realizada por SRK (2015) señalan que sobre 20 [m] de altura de extracción de la columna, el 100% de la granulometría se encuentra bajo 2 [m³] (Sección 2.7.4) Al comparar esta información con las tres curvas utilizadas en este estudio, se observa que la granulometría mas representativa de dicha situación es la fina (~97% < 2 [m³], ver Figura 64).

Por lo anterior, a juicio del autor, la curva fina es la que mejor representa las características granulométricas del mineral presente en la zona de macro bloques centrales del primer nivel de extracción, cota 1841.

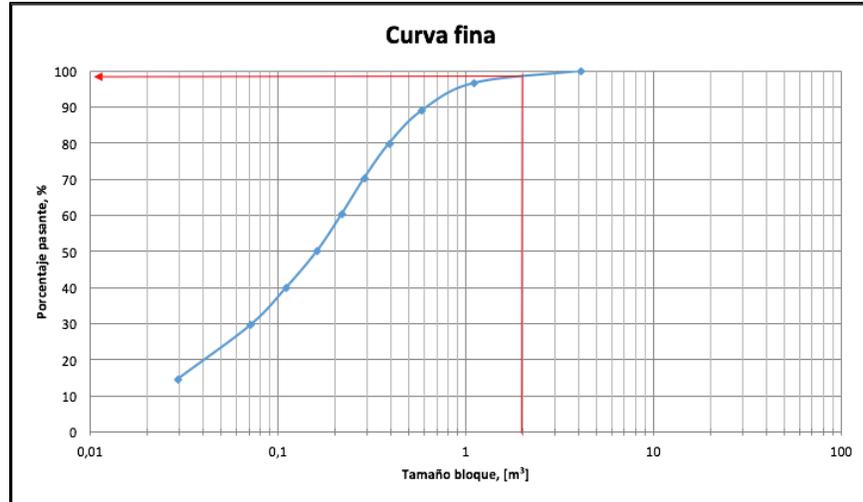


Figura 64: Distribución granulométrica, curva fina [m3]

4.7 Extrapolación de resultados a malla 16x17[m]

Dentro de los objetivos de este trabajo se incluye considerar la influencia del uso de la malla 16x17[m]. Como se menciona en la configuración experimental, esta malla no se evalúa directamente en el modelo físico debido a la linealidad que presenta la altura de interacción respecto a la distancia entre zanjas para un ángulo de flujo determinado.

Según el análisis de las variables de estudio, la frecuencia de colgaduras depende de la malla y el largo de batea, luego en la Figura 65 esta se presenta expresada en cantidad de eventos cada 1000 ton (colg/1000 ton). Cabe destacar que el análisis de datos establece una relación entre la frecuencia de colgaduras y la granulometría, luego la relación lineal que se presenta a continuación solo es válida para la granulometría media.

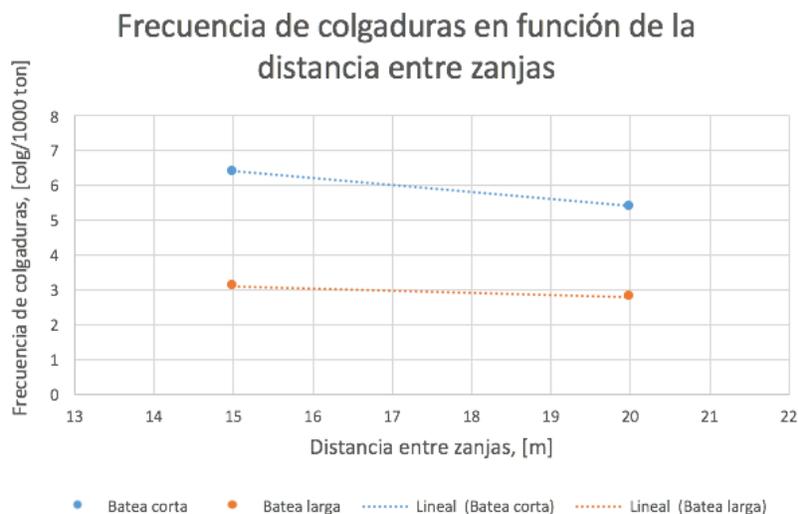


Figura 65: Extrapolación de frecuencia de colgaduras, malla 16x17[m] curva media

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para determinar la altura de interacción sobre el pilar menor asociada a la malla 16x17 [m] se considera el ángulo de flujo (α) obtenido de la sección anterior, donde es $\alpha \sim 70^\circ$ (Ver Figura 66).

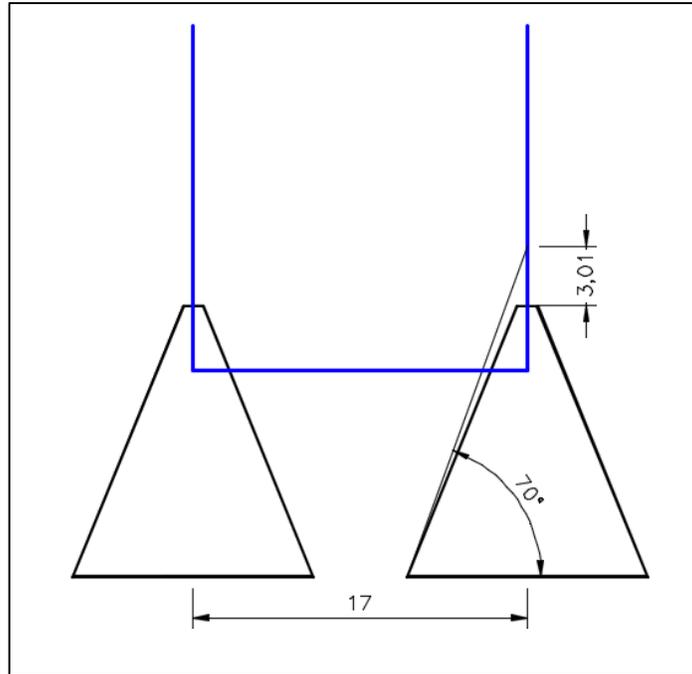


Figura 66: Altura de interacción para malla 16x17 [m]

No hay evidencia de una dependencia de la altura de interacción y la recuperación minera con las dimensiones de la malla de extracción, sólo del largo de batea. Bajo estos últimos criterios, los resultados de la extrapolación para la malla 16x17[m] se presentan en la Tabla 49.

Tabla 49: Extrapolación de resultados a malla 16x17[m]

	16x15		16x17		16x20	
	BC	BL	BC	BL	BC	BL
Frecuencia de colgaduras	6,4	3,1	6,0	3,0	5,4	2,8
HIZ pilar mayor [m]	33	28	33	28	33	28
HIZ pilar menor [m]	3,5	3,5	3,0	3,0	4,2	4,2
Recuperación Minera [%]	92,8	94,7	92,8	94,7	92,8	94,7

4.8 Conclusiones del capítulo

4.8.1 Frecuencia de colgaduras

Si bien el tonelaje promedio entre colgaduras presenta una alta variabilidad en cada caso, es posible identificar una tendencia en el comportamiento del fenómeno, concluyendo:

- El uso de malla 16x20 [m] implica una disminución en la frecuencia de colgaduras de un 15% respecto a la malla 16x15[m].
- Un cambio en el largo de batea de 11[m] a 14[m] reduce en mas de 50% la frecuencia de colgaduras.
- El cambio de granulometría es la variable que mas influye en la ocurrencia del fenómeno. Si se considera como referencia la curva de granulometría media ($d_{80}=20$ [mm]), la curva gruesa ($d_{80}=24,5$ [mm]) implica un aumento en el índice de colgaduras cercano al 40%. Para el caso de la granulometría fina ($d_{80}=16$ [mm]), la reducción en promedio del índice de colgaduras es de 55% .
- Para el caso de las colgaduras altas, el efecto de la granulometría se mantiene. Al disminuir la granulometría de gruesa a media se aprecia una disminución de este tipo de colgaduras de 53% (batea corta) y al reducir la granulometría media a fina la disminución es de un 67% (batea larga)
- El uso de la batea corta implica una disminución de la frecuencia de colgaduras altas mayores a 4 [cm] – con respecto a la batea larga – de un 47% para el caso de la malla 16x15 [m] y de un 57% en la malla 16x20 [m].

4.8.2 Factor de llenado de balde

- El factor de llenado aumenta de 80,3% a 86,9% al reducir la granulometría de media a fina.

4.8.3 Análisis de flujo

- El ángulo de flujo aumenta cuando la granulometría disminuye. No se observa dependencia del largo de batea.
- En el caso del flujo hacia el pilar menor, se observa una dependencia del tipo de malla. Este resultado es particular para el caso del pilar menor por lo tanto genera incertidumbre respecto a las condiciones de borde del modelo físico y la influencia en los resultados obtenidos.
- Respecto a la recuperación minera, el uso de la batea larga implica un aumento en la recuperación – para una columna de 250 [m] – de 92,8% a 94,7%.
- La evidencia del flujo expuesto en las imágenes de las paredes del modelo, permite concluir respecto a la interacción entre elipsoides adyacentes.

4.8.4 Ángulo de fricción.

- El ángulo de fricción es una característica propia del material, por lo cual no debe variar independiente de la dirección en que se mida este ángulo. Luego se concluye que las diferencias encontradas en la estimación del ángulo de flujo obedecen al error propio del sistema de medición, la densidad de marcadores que al ser interpolados generan un error y las condiciones de borde asociadas al modelo físico.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones generales

Los experimentos realizados permitieron analizar la influencia del largo de batea y la malla de extracción (distancia entre zanjas) tanto en la frecuencia de colgaduras, como en la recuperación minera.

El objetivo principal de este trabajo de memoria es recomendar una malla de extracción para los macro bloques centrales del nivel superior del PMCHS. Respecto a los experimentos realizados en función del objetivo principal se concluye lo siguiente:

- En todas las combinaciones de malla y largo de batea se produce interacción entre los elipsoides de extracción de las bateas adyacentes.
- Se establece una relación del largo de batea con la frecuencia de colgaduras y la recuperación minera. El uso de una batea larga de 14 [m] produce una reducción superior al 50% en la frecuencia de colgaduras y un aumento en torno al 2% total de la recuperación minera, para la granulometría media ($d_{80}=20$ [mm]).
- Se establece una relación del largo de batea con la frecuencia de colgaduras altas. En este caso, el uso de batea corta reduce estos eventos en torno a un 50% respecto a la batea larga. Pero es la granulometría la que más impacta en este fenómeno.
- La mayor implicancia de la elección de la malla de extracción se ve reflejada en la frecuencia de colgaduras. El uso de malla 16x20 [m] reduce la frecuencia de colgaduras en un 15% respecto a la malla 16x15 [m].
- Tanto el largo de batea como la granulometría presente en el punto de extracción se consideran como las variables que más afectan los parámetros de estudio. Respecto a la malla de extracción, la que presenta mejores resultados en base a los objetivos de este trabajo es la 16x20 [m].
- Finalmente, se recomienda el uso de una malla de 16x20 [m] y una batea larga de 14 [m].

5.2 Recomendaciones y trabajo futuro

Los objetivos de este trabajo de memoria están enfocados en el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea; no obstante, el desarrollo de este trabajo permitió estudiar la influencia de variables generales de diseño que aplican a cualquier mina subterránea de *caving*. Buscando la aplicabilidad de los resultados y conclusiones de esta investigación, se recomiendan los siguientes puntos:

- Incluir en los modelos físicos más variables que incidan en el comportamiento del flujo y se asemejen a la operación, en particular en la zona de las bateas. Si bien el plexiglás permite visualizar la que ocurre en las bateas, los resultados obtenidos siguen presentando una alta variabilidad, por lo mismo y en particular para el caso en que las bateas tienen un ángulo muy similar al ángulo de flujo propio del material, se recomienda considerar un material que presente propiedades similares al mineral, aún a expensas de perder la visibilidad del fenómeno de colgaduras en la batea.
- Mejorar la metodología utilizada para estimar la geometría del elipsoide de extracción. Si bien los marcadores incluidos en el modelo entregan una buena aproximación del volumen de extracción, éste sigue presentando variabilidad respecto a su geometría. Más aún, sólo se conoce la posición inicial y final del elemento pero la trayectoria de este y la influencia los fragmentos de su entorno son una incógnita, por lo cual se recomienda el desarrollo e implementación de *'smart markers'* a escala de laboratorio.
- Es necesario incluir mayor tecnología en los modelos, automatizando el proceso de toma de datos y disminuyendo la influencia del error asociado al procedimiento. Así como la minería es un proceso interdisciplinario, la investigación debe considerar otras áreas en que la ingeniería y las tecnologías disponibles puedan aportar a la confiabilidad de la metodología.
- Considerar el efecto de la altura de socavación en el comportamiento del flujo. Debido a la relación existente entre la granulometría del material con los parámetros estudiados, resulta interesante conocer cómo afecta la socavación y su altura en un estudio a escala de laboratorio. Así mismo, considerar el efecto de utilizar granulometrías que representen fragmentación primaria y secundaria.

6 BIBLIOGRAFÍA

1. Abarca, A. 2016. Estudio y aplicación de un modelo de fragmentación secundaria para Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Chile.
2. Brady B H, and Brown E T. 2004, longwall and Caving Mining Methods. Proceedings Rock mechanics for underground mining, third edition.
3. Brunton, I, Sharrock, G and Lett, J. 2012. Full scale near field flow behavior at the Ridgeway Depps Block Cave Mine. Proceedings of MassMin 2012, Sudbury, Canada.
4. Carter, C J and Russell, F M, 2000. Modelling and design of block caving at Bingham Canyon. Proceedings MassMin 2000, Brisbane, (Ed: G Chitombo), 347-356- Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.
5. Castro, R. 2006. Study of the mechanisms of gravity flow for block caving. PhD Thesis, the University of Queensland, Brisbane, Australia.
6. Castro, R. 2012. Determination of drawpoint spacing in panel caving: a case study at El Teniente Mine. 2012.
7. Chitombo, G.P. 2010. Cave mining-16 years after Laubscher's 1994 paper 'Cave mining-state of the art'. Proceedings of the Second International Symposium on Block Caving and Sublevel Caving, Y.Potvin (Ed), 20-22 Abril 2010, Perth, Australia.
8. Cho G, Dodds J, Santamarina J. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering.
9. Craig, R. F. 2004. Soil Mechanics, 7th, Spon Press: New York.
10. Flores, G, 2004. Geotechnical challenges of the transition from open pit to underground cave mining at Chuquicamata Mine. Proceedings MassMin 2004, Santiago, (Ed: A Karzulovic and M Alfaro), 591-602.
11. Flores, G., 2014. Future Challenges and Why Mining Must Change. Caving 2014, Chile.
12. Fuenzalida, M. 2012. Estudio del flujo gravitacional confinado y su aplicación a la minería de caving. Tesis de Magíster en minería. Universidad de Chile, Chile.
13. Gómez, R. 2014. Modelo de fragmentación secundaria y colgaduras en minería de caving. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Chile.
14. Hoz K. 2007. Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos. Tesis de magister. Universidad de Chile, Santiago.
15. Kvpil, D R. 1965. Gravity Flow of Granular Materials in Hoppers and Bins I. Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Vol 2.
16. Kvpil D R. 2008. Gravity flow in Sublevel and panel caving – A common sense approach.
17. Laubscher, D. 1994. "Cave Mining – the state of the art". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, pp.279-293.

18. Jaeger, H M, Nagel S R and Behringer, R P, 1996. The physics of Granular Materials, Physics Today, Abril 1996.
19. López, S. 2016. Estudio experimental de colgaduras. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Chile.
20. Marano, G., 1980. "The interaction between adjoining draw points in free flowing materials and its application to mining", Chamber of Mines Journal, Zimbabwe, pp 25-32.
21. Merino L. 1986. Predicting the size distribution of ore fragments in block caving mines. Tesis de Magíster. Imperial College. Inglaterra.
22. Nedderman, R., M. 1992. Statics and Kinematics of Granular Materials.
23. Olivares, D. 2014. Influencia de fino y humedad en flujo gravitacional confinado. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Chile.
24. Orellana, L. F. 2012. Diseño de la tecnología de minería continua a partir de experimentos en laboratorio. Tesis de Magíster en minería. Universidad de Chile, Chile.
25. Peters, D, 1984. Physical modeling of the draw behavior of broken rock in Caving. Quarterly of the Colorado School of Mines, 79:1-48.
26. Pineda, M., 2012. Study of the gravity flow mechanisms at goldex by means of a physical model. Master Thesis. Universidad de Chile, Chile.
27. Power, G. 2004. Modelling Granular Flow in Caving Miners: Large Scale Physical Models and Full Scale Experiments. PhD Thesis, University of Queensland, Brisbane.
28. Rustan, A. Gravity flow of broken rock. Proceedings of MassMin 2000, Brisbane, Queensland.
29. Troncoso S. 2006. Simulación del impacto de interferencias operacionales para la planificación de producción. Memoria de Título. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
30. Vargas, R. 2010. Metodología de diseño de malla de extracción en block y panel caving incorporando back-análisis. Tesis de Magíster en Minería. Universidad de Chile, Chile.

ANEXO A
Estudio de colgaduras mediante modelos físicos

Tabla 50: Principales conclusiones respecto a colgaduras obtenidas de experimentos en modelos físicos

Autor	Variables	Conclusiones
Orellana (2012)	<ul style="list-style-type: none"> • Sección galería zanja • Altura batea • Resistencia del material a la compresión uniaxial 	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de la sección de galería zanja disminuye la masa entre colgaduras. • Aumento de la altura de la batea disminuye la masa entre colgaduras. • Aumento en el UCS del material disminuye la masa entre colgaduras.
Gómez (2014)	<ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzo vertical • Estrategia de extracción 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento en el esfuerzo vertical disminuye la frecuencia de colgaduras. • Aumento en el esfuerzo vertical aumenta la altura de las colgaduras. • Extracción alternada entre los puntos de extracción de una batea aumenta la frecuencia de colgaduras pero disminuye su altura.
Olivares (2014)	<ul style="list-style-type: none"> • Granulometría • Humedad • Cantidad de finos • Carga vertical 	<ul style="list-style-type: none"> • La presencia de humedad y finos disminuye significativamente la capacidad de flujo del material, aumentando las colgaduras.
López (2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Largo batea • Altura batea • Ángulo zanja batea • Granulometría 	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución del largo de batea aumenta la masa entre colgaduras. • Aumento de la altura de batea disminuye la masa entre colgaduras. • Aumento en el ángulo incrementa la masa entre colgaduras. • Aumento de la granulometría disminuye la masa entre colgaduras.

ANEXO B

Construcción de curvas

Estimación de curva granulométrica

El material utilizado en este estudio corresponde a la roca *cuarzo igual sericita* (Q=S) dado que es la que se encuentra en mayor proporción en la zona de estudio del proyecto.

La curva de fragmentación primaria asociada a esta roca es entregada por SRK (2015) en el marco del estudio de ingeniería de detalle de la fragmentación de la zona de estudio solicitado por Codelco. La Figura 67 muestra la curva granulométrica utilizada como base en este trabajo.

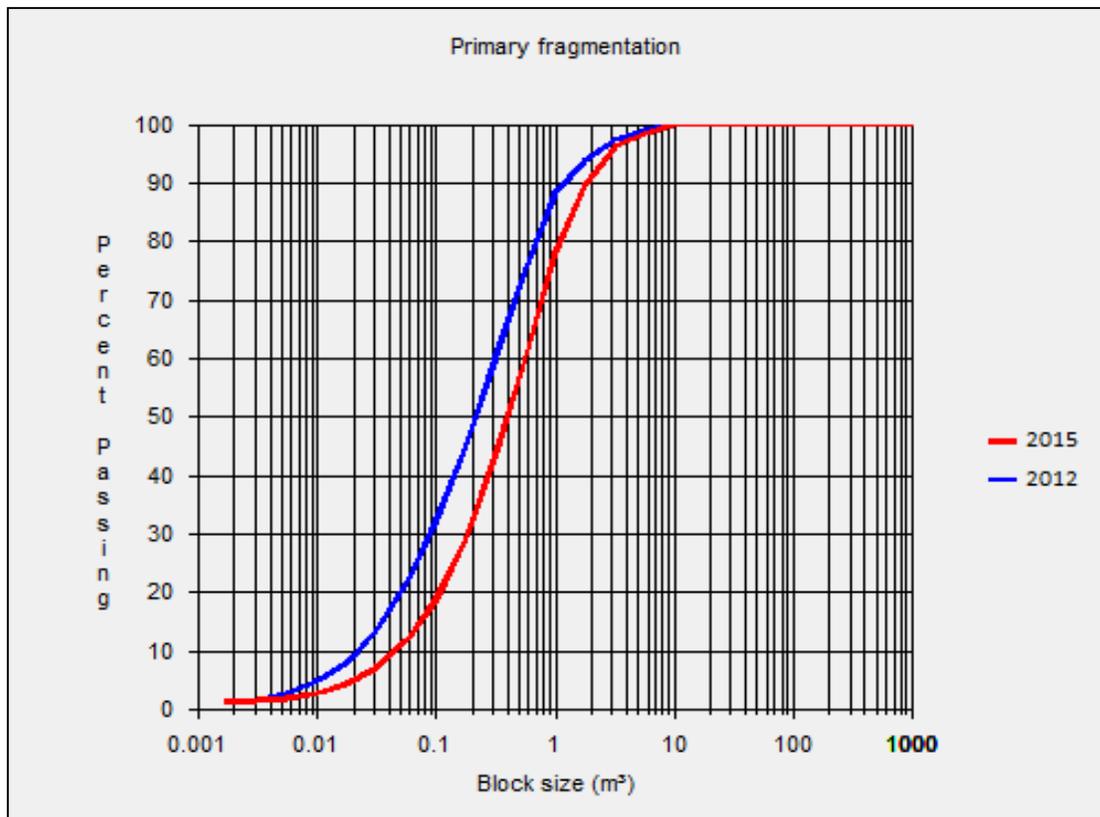


Figura 67: Curva de fragmentación primaria, Q=S (SRK, 2015)

Dado que la curva esta expresada en función del volumen, se procede a calcular el diámetro equivalente de cada fragmento considerando el factor de forma de los fragmentos de una muestra. Para ello se miden los ejes principales (L_1, L_2, L_3) de 20 fragmentos. Un ejemplo de la medida del largo mayor de un fragmento se aprecia en la Figura 68 y en la Tabla 51 se presentan los resultados obtenidos.

ANEXO B

**RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**



Figura 68: Medida del largo máximo de un fragmento

Tabla 51: Determinación del factor de forma de los fragmentos

Fragmento	Largo Menor	Largo Medio	Largo Mayor
1	4	6	9
2	3	4	6.5
3	4	6	10
4	2	3.5	7.5
5	3.5	5	10
6	3	4.5	7
7	2	4	8
8	4	5	8
9	3.5	4.5	10.5
10	3	4.5	8.5
11	2.5	4	7.5
12	3	4	7
13	3.5	4.5	7.5
14	1.5	4	7
15	2	4	6
16	2	4	7.5
17	2	3	7.5
18	2.5	3.5	6
19	3	4	7
20	3	4	8
Promedio	2,85	4,3	7,8
Desvest	0,76	0,75	1,26

RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

Con la relación de aspecto entre los ejes principales se calcula el diámetro equivalente:

$$V_e = L_1 * L_2 * L_3$$

$$V_e = (0,66L_2) * L_2 * (1,83L_2) = 1,2078L_2^3$$

$$L_2 = \sqrt[3]{\frac{V_e}{1,2078}}$$

Considerando ahora el diámetro equivalente d_e :

$$d_e = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3}$$

$$d_e = \frac{(0,66L_2) + L_2 + (1,83L_2)}{3} = 1,163L_2$$

Finalmente:

$$d_e = 1,0932 \sqrt[3]{\frac{V_e}{1,2078}}$$

En la Figura 69 se observa la curva de fragmentación primaria en función del diámetro equivalente y en la Figura 70 se aprecia la curva en escala 1:50.

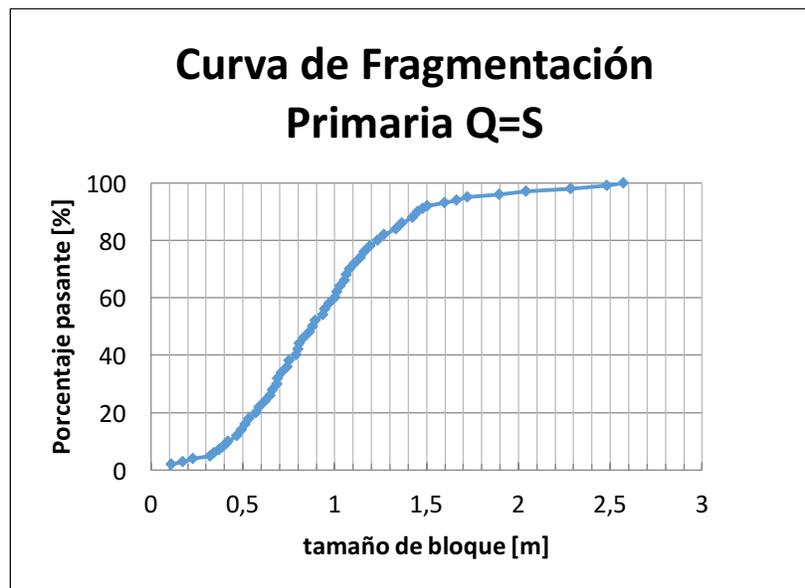


Figura 69: Curva de fragmentación en función del diámetro equivalente

RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

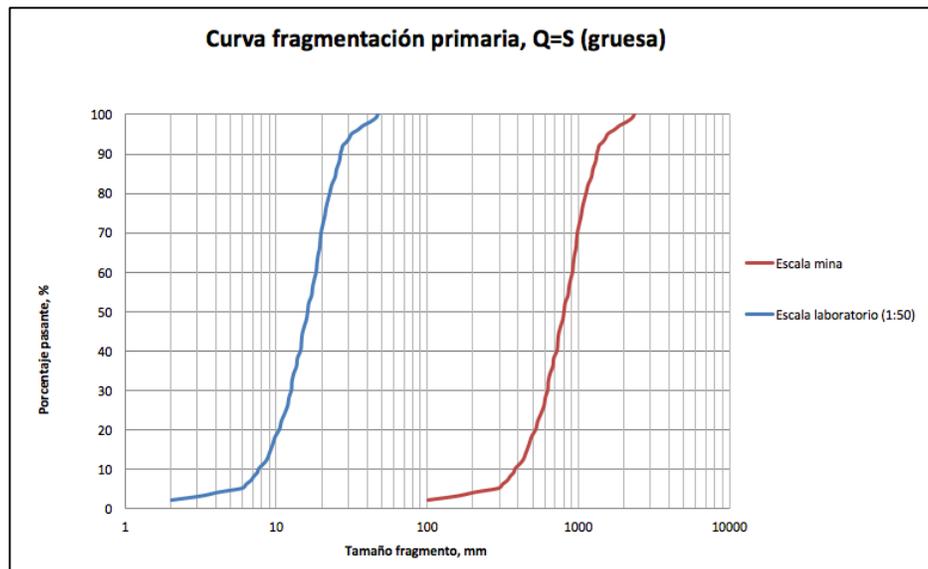


Figura 70 Curva de fragmentación en función del diámetro equivalente, escala 1:50

Protocolo de construcción de curva en laboratorio

El protocolo de construcción de curvas en laboratorio indica lo siguiente:

- I. Preparación de tamaños retenidos entre tamices
 1. Si la malla requerida esta disponible en harnero manual (cajón), este debe utilizarse. La Figura 71 corresponde a un cajón con malla de 2".
 2. Si no es posible utilizar un harnero manual, entonces se utiliza el harnero eléctrico. El sobre tamaño debe pasarse dos veces por el harnero para ser considerado como tal.
 3. Para tamaños bajo ¼" se utiliza tamizador *Ro-Tap*®. El sobre tamaño debe volver a pasarse por el equipo para ser considerado como tal.
- II. Homogenización del material
 1. Para homogenizar el material se utiliza el cortador rotatorio (Figura 72) de 10 capachos.
 2. El material es depositado en 20 baldes con capacidad de 25 [kg] cada uno, evitando que se genere excesivo polvo.
 3. Una vez que todo el material ha sido pasado por el cortador, los baldes vuelven a pasarse una vez mas por el cortador.
- III. Preparación de líneas de flujo
 1. Uno de los baldes de 25 [kg] es separado en 10 partes mediante el cortador rotatorio. Solo se realiza un corte.
 2. El material es pintado y secado en horno para ser utilizado como líneas de flujo en el modelo

ANEXO B
RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA



Figura 71: Harnero manual, malla de 2"



Figura 72: Cortador rotatorio

Dado que el procedimiento considera un tratamiento de los sobre tamaños, cada fragmento tiene asociado un 'tiempo de residencia' considerable en el equipo para que pueda atravesar la abertura de la malla en la posición mas desfavorable. Esto es, el plano definido por sus largos menor y medio. Luego calcular calcular la curva con el diámetro equivalente es considerado una sobre estimación de la granulometría.

Por lo anterior se utiliza el largo medio para escalar el volumen.

ANEXO B

RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

$$L_2 = 0,94\sqrt[3]{V_e}$$

Esta nueva relación genera una curva mas fina con respecto a la calculada con el diámetro equivalente. Ambas curvas se aprecian en la Figura 73.

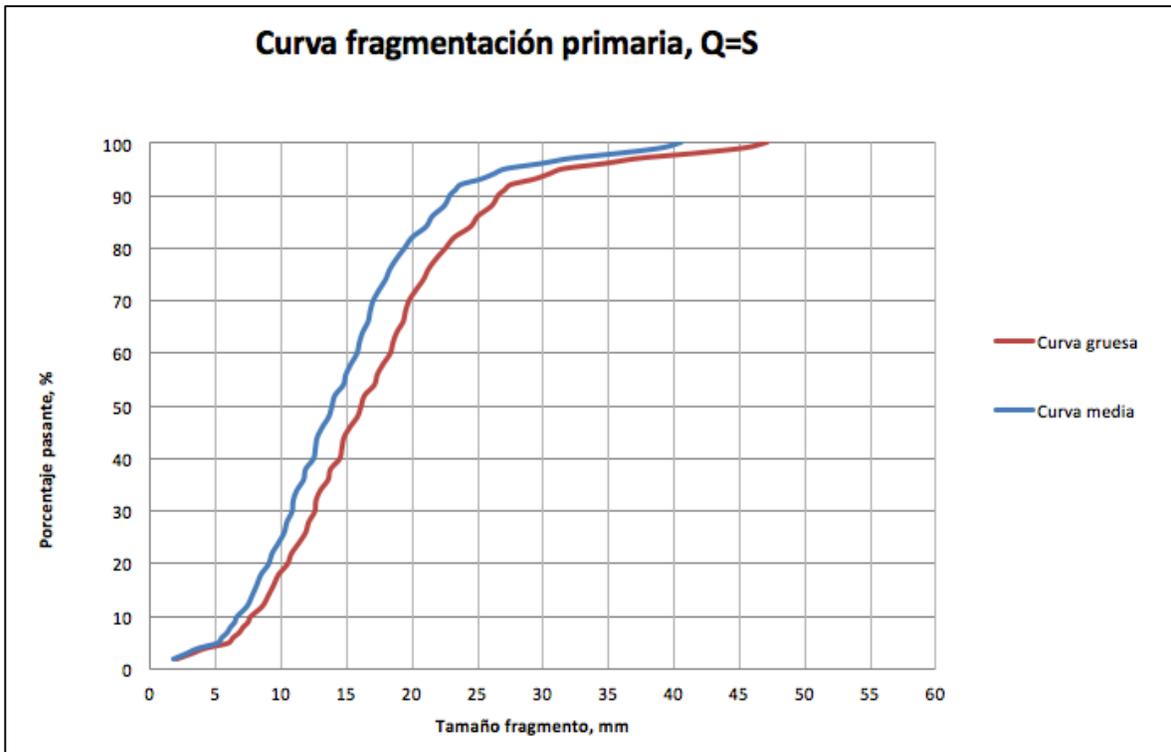


Figura 73 Curva de fragmentación primaria, comparación granulometría gruesa-media

ANEXO C

Elipsoides de flujo



Figura 74: Flujo experimento 1 (inicio y 500 extracciones)



Figura 75: Flujo experimento 2 (inicio, 500 y 800 extracciones)

ANEXO C
RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

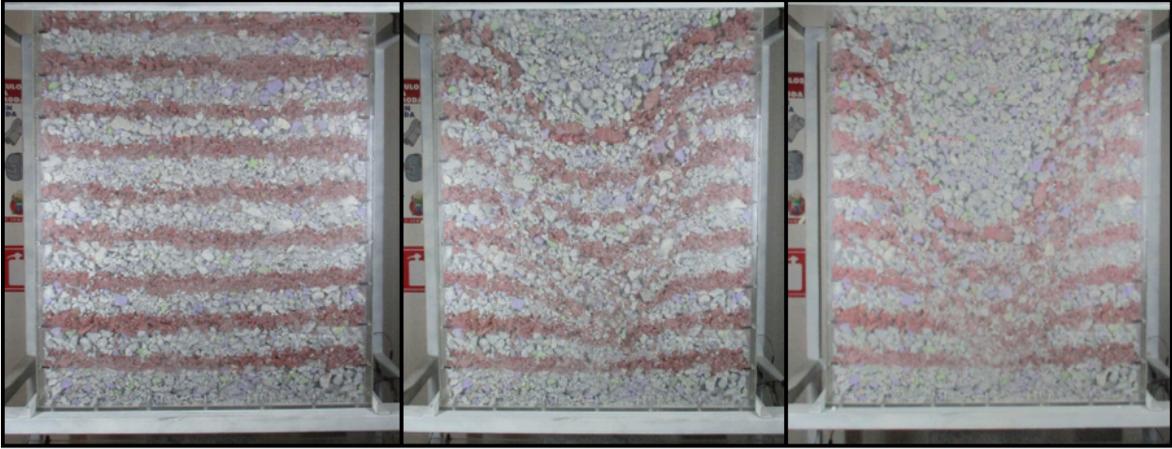


Figura 76: Flujo experimento 3 (inicio, 500 y 800 extracciones)



Figura 77: Flujo experimento 4 (inicio, 500 y 800 extracciones)

ANEXO C

RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA



Figura 78: Flujo experimento 5 (inicio, 500 y 700 extracciones)



Figura 79: Flujo experimento 6 (inicio, 500, 800 y 1250 extracciones)

ANEXO C

RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA



Figura 80: Perfil elipsoide de flujo visto desde la batea, experimento 6



Figura 81; Interacción elipsoide de flujo con pared lateral, experimento 6 1250 extracciones

ANEXO D

Altura de interacción

Pilar mayor

En la Tabla 52 se resumen los parámetros asociados a cada configuración, requeridas para la estimación de la altura de interacción.

Tabla 52: Parámetros estimación altura de interacción pilar mayor

Experimento	Largo batea [m]	Ángulo de flujo
1	11	69°
2	11	70°
3	14	
4	11	
5	14	72°
6	11	

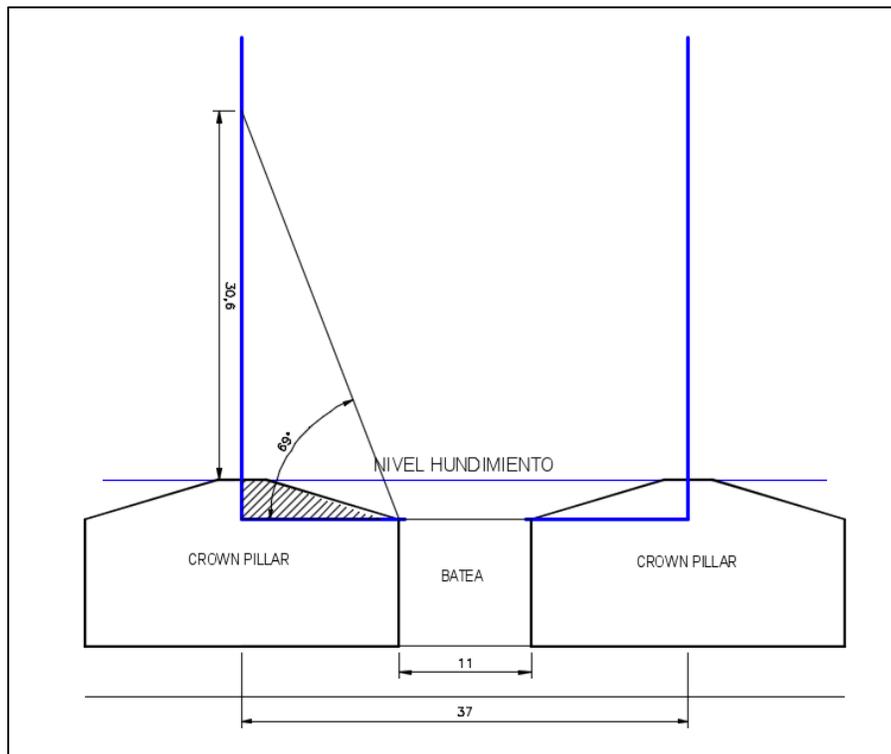


Figura 82: Altura de interacción pilar mayor, experimento 1

ANEXO D
RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

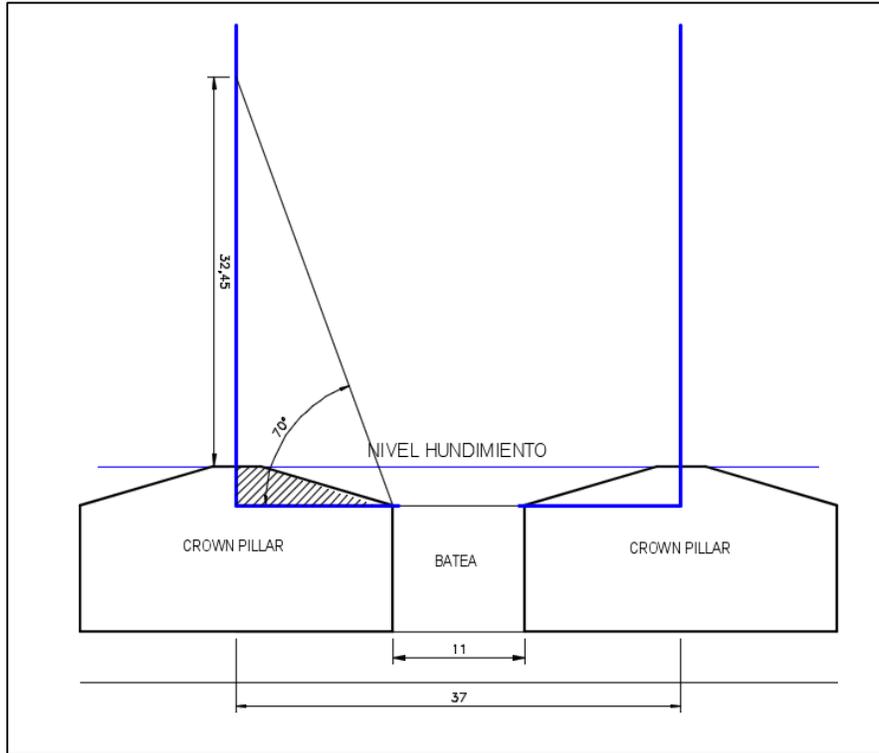


Figura 83: Altura de interacción pilar mayor, experimentos 2 y 3

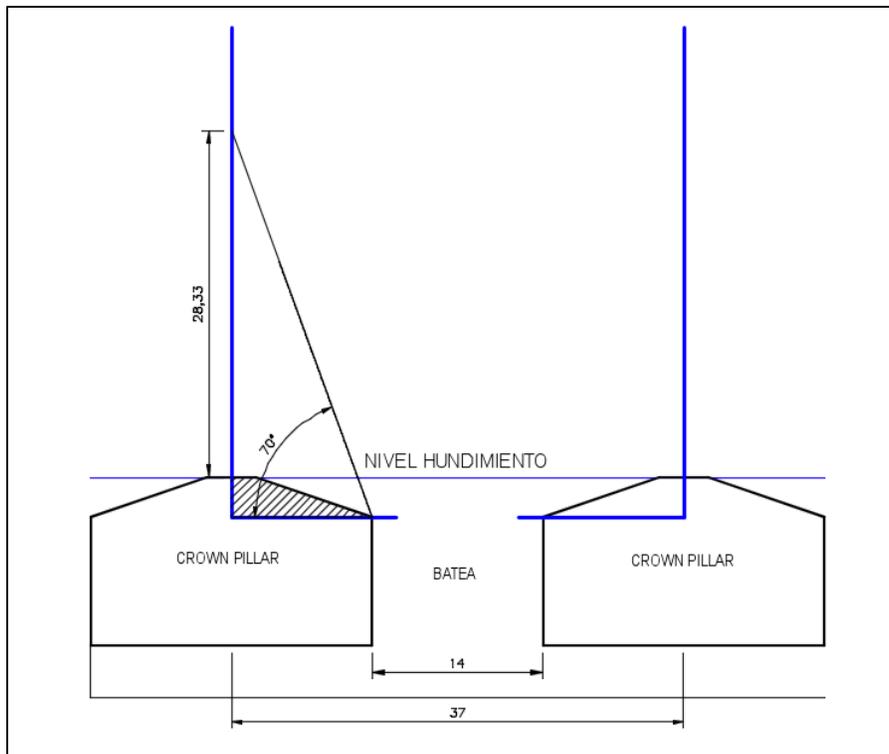


Figura 84: Altura de interacción pilar mayor, experimentos 4 y 5

ANEXO D

**RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**

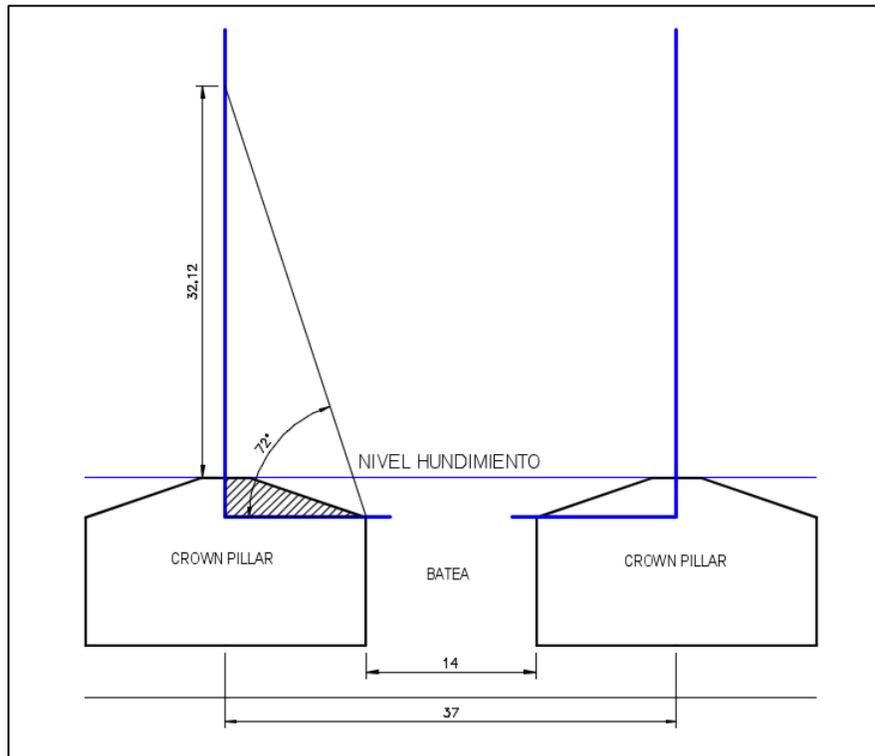


Figura 85: Altura de interacción pilar mayor, experimento 6

Pilar menor

En la Tabla 53 se resumen los parámetros asociados a cada configuración, requeridas para la estimación de la altura de interacción.

Tabla 53: Parámetros estimación altura de interacción pilar menor

Experimento	Distancia entre zanjas [m]	Ángulo de flujo
1	15	73°
2		
3		
4	20	66°
5		
6	15	73°

ANEXO D
RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

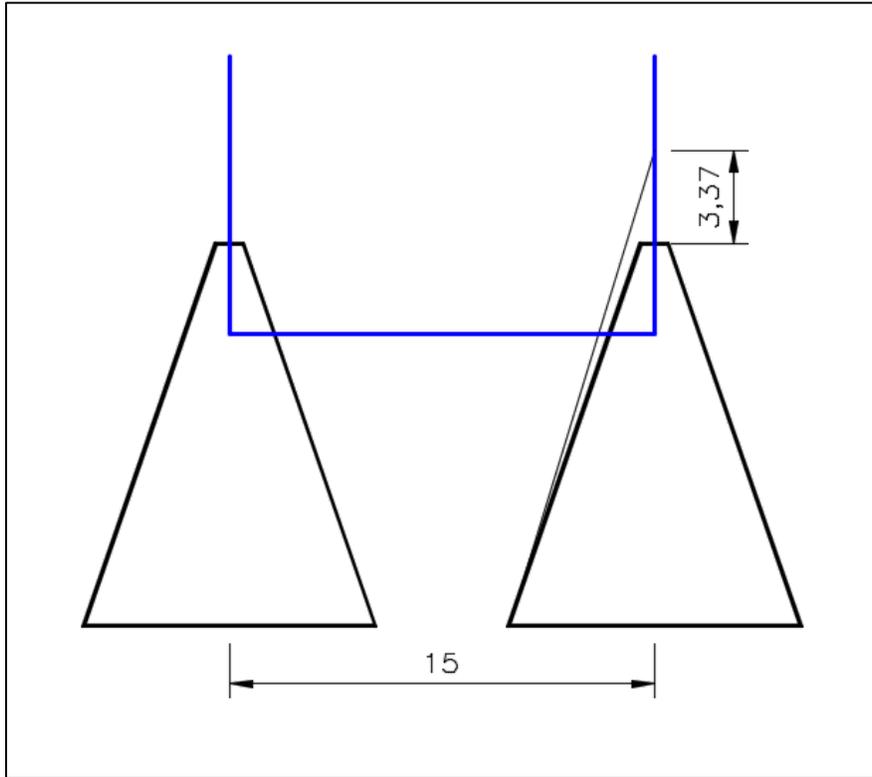


Figura 86: Altura de interacción pilar menor, malla 16x15 [m]

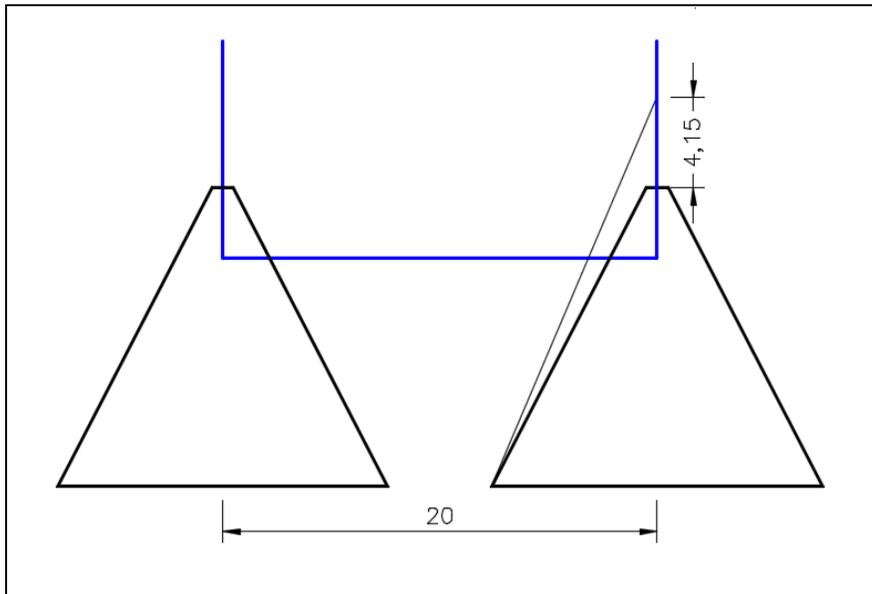


Figura 87: Altura de interacción pilar menor, malla 16x20 [m]

ANEXO E

Productividad de balde

En cada ciclo de extracción se registra la masa extraída por baldada, lo cual permite conocer la distribución, media y desviación estándar de los datos. A continuación se presentan los histogramas de la masa extraída (escala laboratorio) por baldada durante el desarrollo experimental.

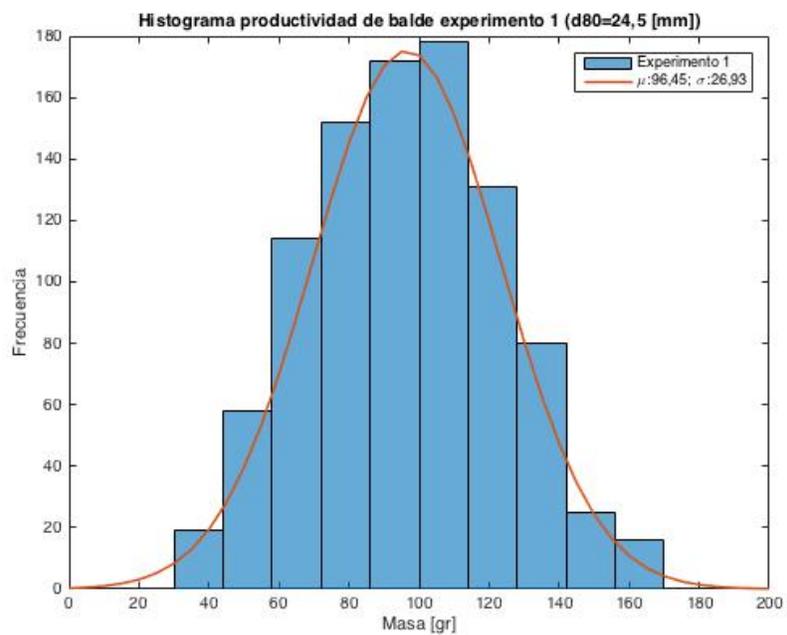


Figura 88: Histograma productividad de balde experimento 1

ANEXO E

**RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**

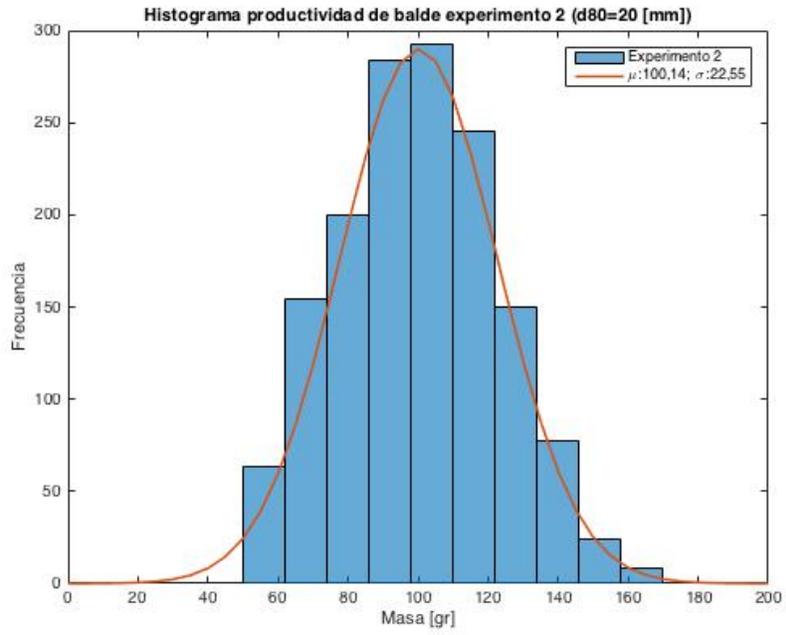


Figura 89: Histograma productividad de balde experimento 2

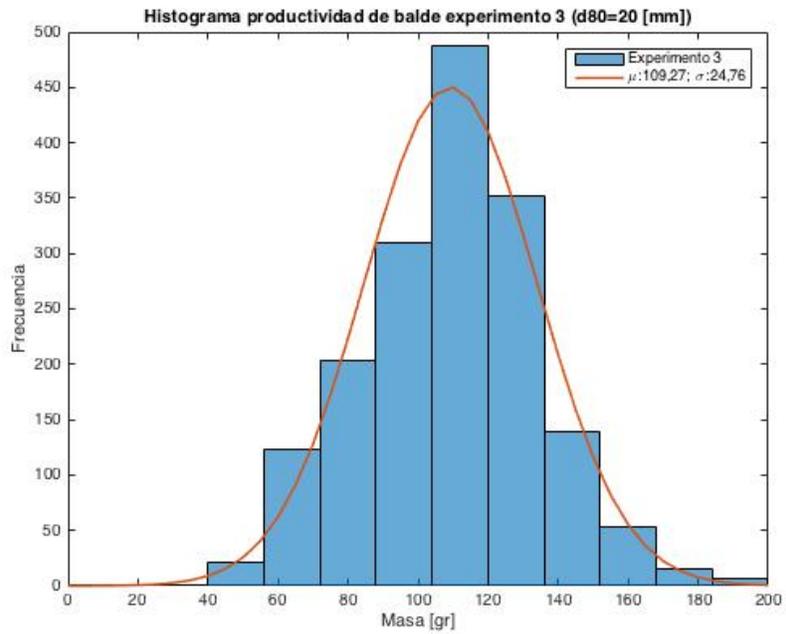


Figura 90: Histograma productividad de balde experimento 3

ANEXO E
RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

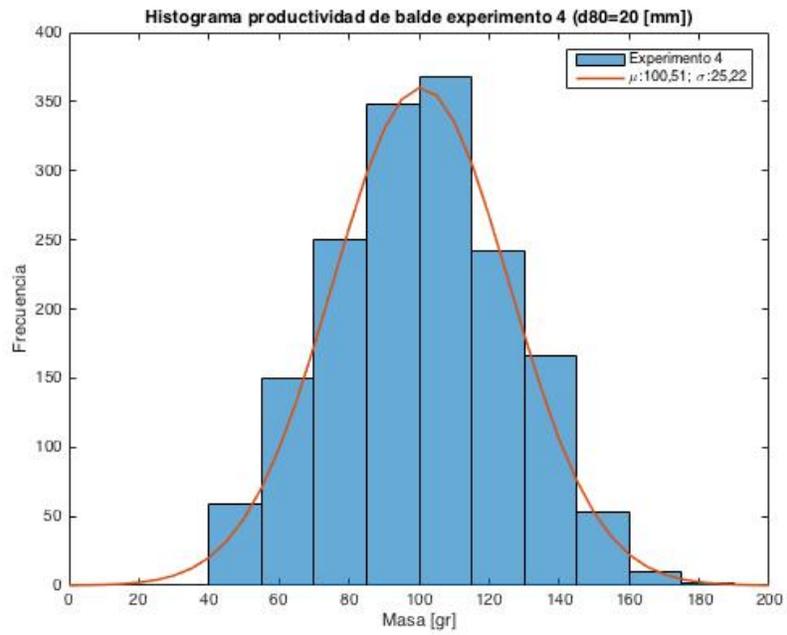


Figura 91: Histograma productividad de balde experimento 4

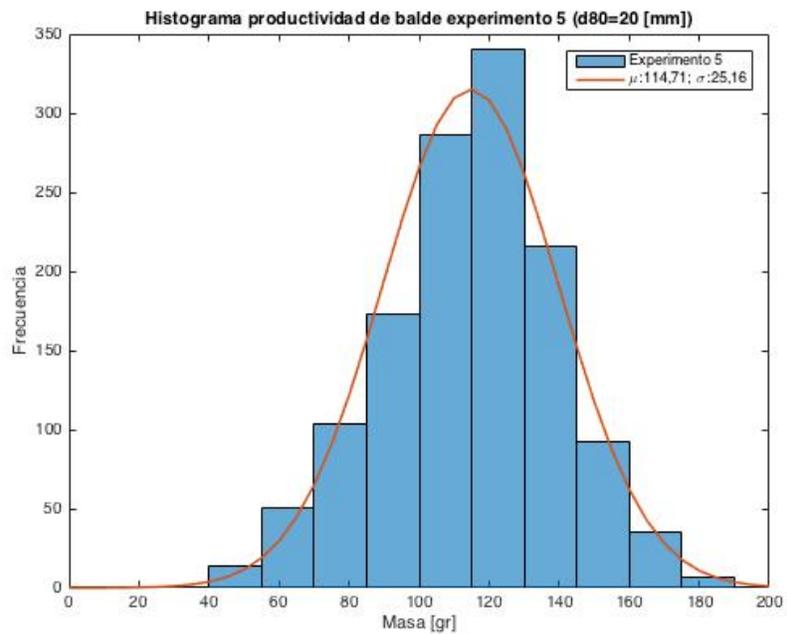


Figura 92: Histograma productividad de balde experimento 5

ANEXO E
RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

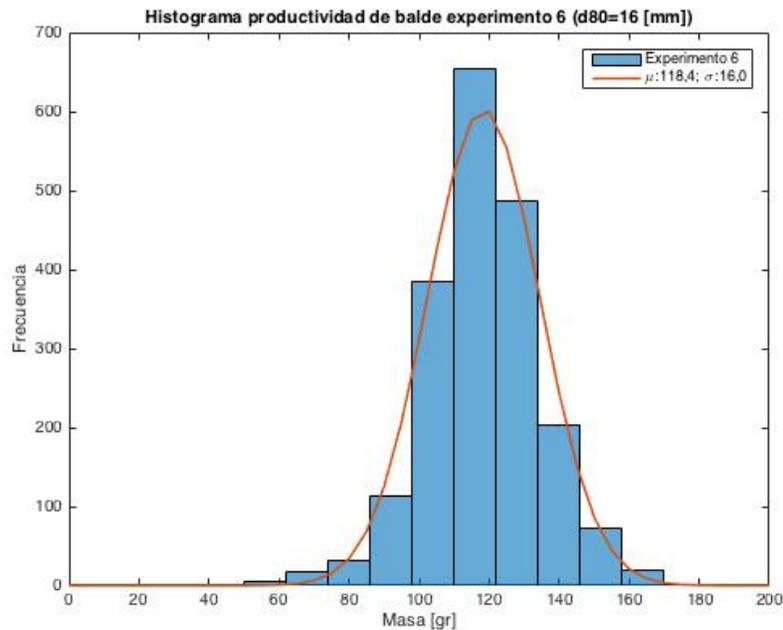


Figura 93: Histograma productividad de balde experimento 6

La Tabla 54 resume la productividad del balde a escala de laboratorio.

Tabla 54: Productividad de balde (escala laboratorio)

Experimento	Malla	Batea	d80 [mm]	μ [gr]	σ
1	16x15	Corta	24,5 (gruesa)	96,45	26,93
2		Corta	20 (media)	100,14	22,55
3		Larga		109,27	24,76
4	16x20	Corta	20 (media)	100,51	25,22
5		Larga		115,03	25,17
6	16x15	Larga	16 (fina)	118,4	16,0

La densidad aparente del mineral se estima en 1,6 [ton/m³], por lo tanto la capacidad nominal del balde utilizado es de 136,2 [gr] (Ver Ecuación 28).

$$Capacidad\ nominal\ [gr] = \frac{14\ [yd^3] * 0,76\ [m^3/yd^3] * 1,6\ [ton/m^3]}{0,125}$$

Ecuación 28: Capacidad nominal de balde (escala laboratorio)

ANEXO E
RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

A continuación se presentan los histogramas del factor de llenado para cada experimento.

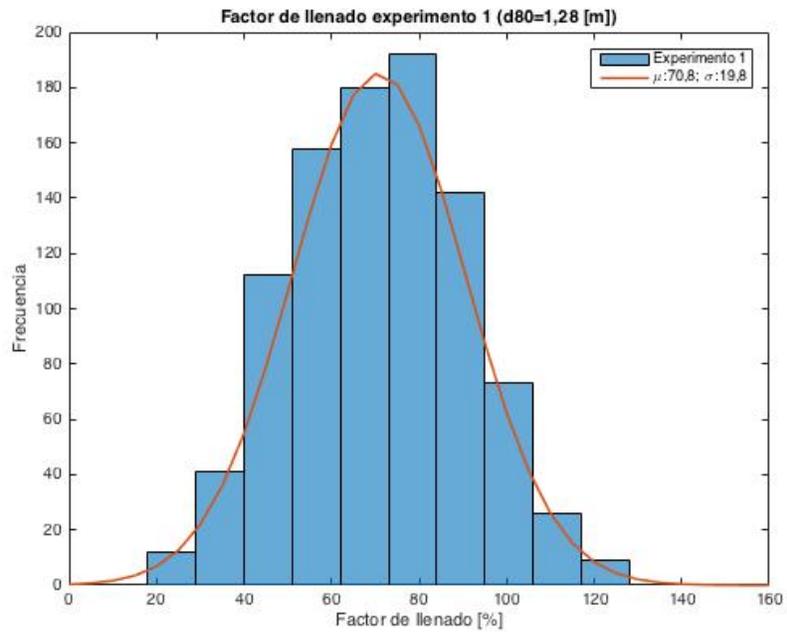


Figura 94: Factor de llenado experimento 1

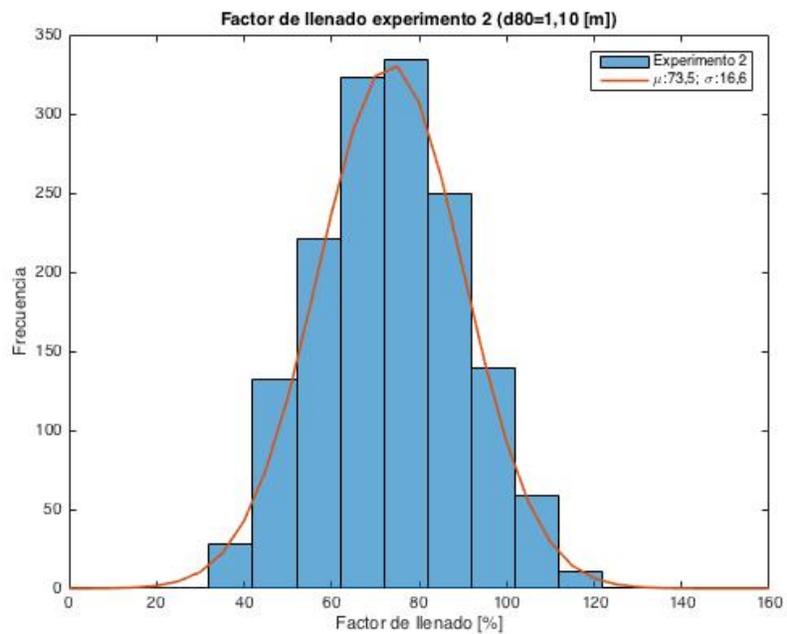


Figura 95: Factor de llenado experimento 2

ANEXO E
RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

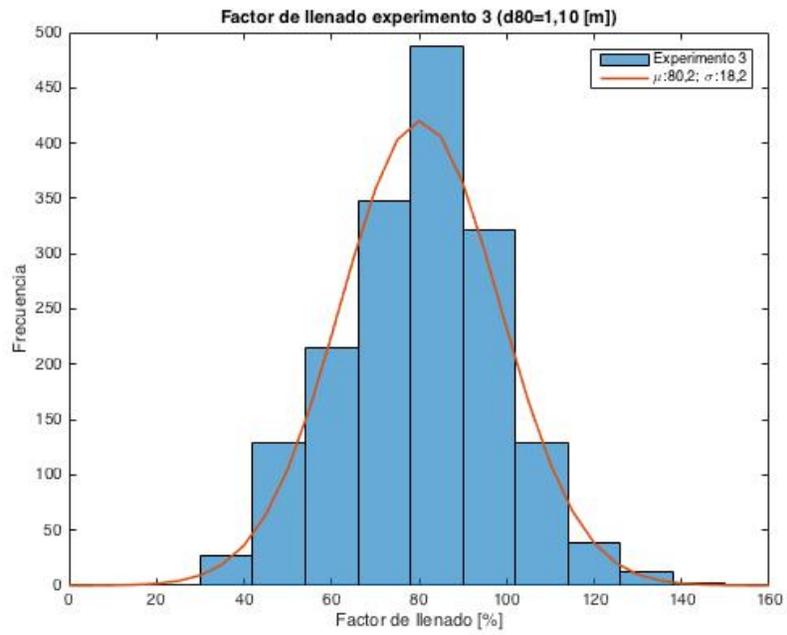


Figura 96: Factor de llenado experimento 3

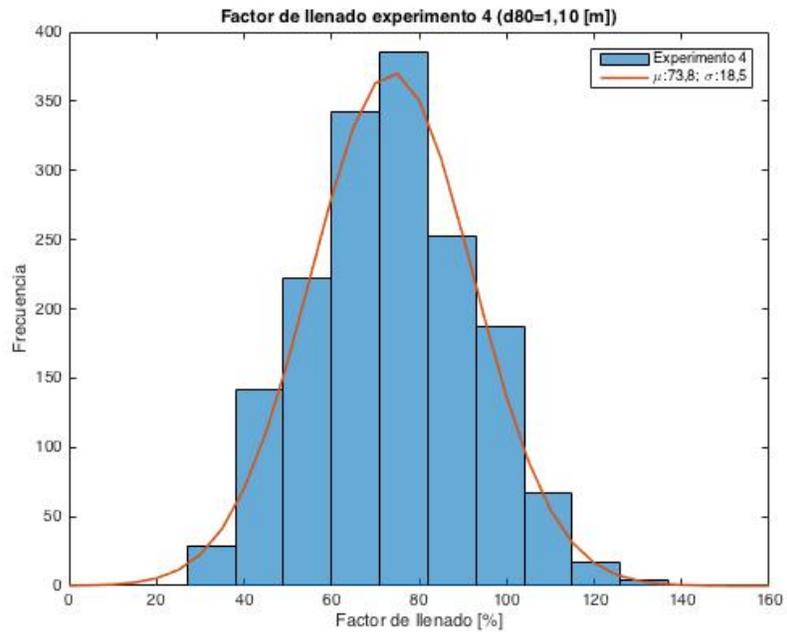


Figura 97: Factor de llenado experimento 4

ANEXO E

**RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**

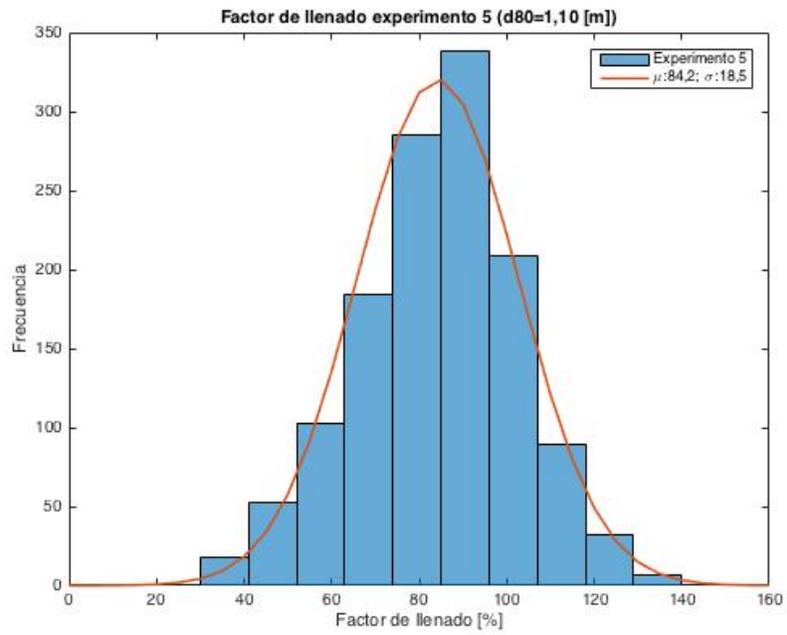


Figura 98: Factor de llenado experimento 5

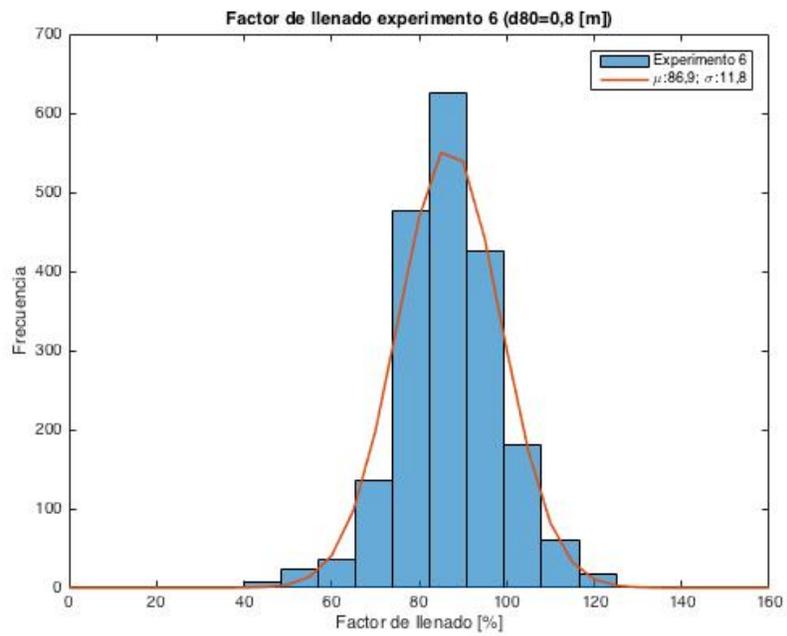


Figura 99: Factor de llenado experimento 6

ANEXO E
RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

La Tabla 55 resume el factor de llenado del balde.

Tabla 55: Factor de llenado

Experimento	Malla	Batea	d80 [m]	μ [%]	σ
1	16x15	Corta	1,28 (gruesa)	70,8	19,8
2		Corta	1,1 (media)	73,5	16,6
3		Larga		80,3	18,2
4	16x20	Corta	1,1 (media)	73,8	18,5
5		Larga		84,2	18,5
6	16x15	Larga	0,8 (fina)	86,9	11,8

Considerando los resultados obtenidos para la granulometría media se observa una relación entre el largo de batea y el factor de llenado. Lo anterior corresponde a una limitación del alcance de la pala al utilizar la batea corta en el modelo físico.

Por lo tanto, para estudiar la influencia de la granulometría en el factor de llenado de la pala se comparan los experimentos 3 y 6 que presentan la misma configuración geométrica de batea.

La comparación del factor de llenado se observa en la Figura 100.

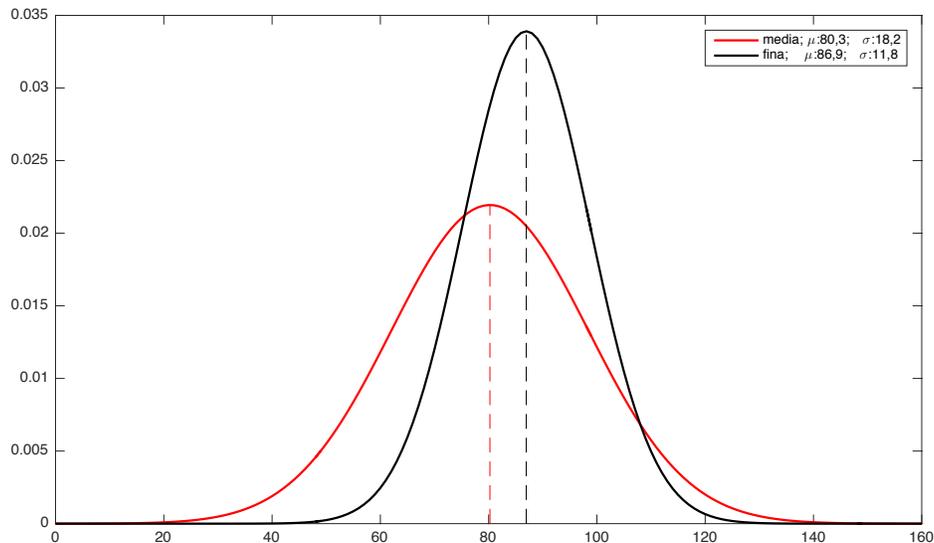


Figura 100: Factor de llenado granulometría media-fina

El factor de llenado aumenta de 80,3% a 86,9% al reducir la granulometría de media a fina (d80 = 1,1 [m] - 0,8 [m]).

ANEXO F

Caracterización de material

En la Tabla 56 se presenta un resumen de la caracterización del material Q=S (Cuarzo igual Sericita) utilizado para el desarrollo de este trabajo.

Tabla 56: Resumen caracterización material

	Q=S
Esfericidad	0,68
Redondez	0,20
Carga puntual (MPa)	1,66

Coefficiente de uniformidad y curvatura

La curva de distribución granulométrica del material puede ser descrita mediante los coeficientes de uniformidad y curvatura. El coeficiente de uniformidad (C_u) describe el rango de tamaño de tamaño de las partículas y el coeficiente de curvatura (C_z) la pendiente de la curva granulométrica (Ver Ecuación 29 y Ecuación 30).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ecuación 29: Coeficiente de uniformidad (Craig, 2004)

$$C_z = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

Ecuación 30: Coeficiente de curvatura (Craig, 2004)

Donde D_{10} , D_{30} y D_{60} corresponden al tamaño bajo el cual se encuentran los porcentajes pasantes 10%, 30% y 60% del total de la muestra, estas se estiman a partir de la curva granulométrica original. Craig (2004) plantea que una muestra con coeficiente de curvatura entre 1 y 3 posee una buena gradación de partículas .

Tabla 57: Tamaños característicos para Coeficiente de uniformidad y curvatura, curvas de fragmentación (1:50)

	D10 [mm]	D30 [mm]	D60 [mm]
Gruesa	8,0	14,0	20,0
Media	7,0	11,0	16,0
Fina	5,5	9,0	13,0

Con los datos de la Tabla 57 se obtienen los coeficientes de uniformidad y curvatura para las tres curvas granulométricas utilizadas en este trabajo (Ver Tabla 58).

**RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**

Tabla 58: Coeficientes de uniformidad y curvatura

	C_u	C_z
Gruesa	2,50	1,23
Media	2,29	1,08
Fina	2,36	1,13

Factor de forma

El factor de forma se define en base a su esfericidad y redondez (Cho et al, 2006). La Esfericidad (S) se refiere a la semejanza entre el largo, ancho y alto de la partícula (Ecuación 31). La Redondez (R) corresponde a la razón entre los radios de curvatura medios de las características superficiales y el radio del círculo inscrito más grande de la partícula (Ecuación 32).

$$S = \frac{r_{max-in}}{r_{min-cir}}$$

Ecuación 31: Esfericidad de partícula (Cho et al, 2006)

Donde r_{max-in} es el radio del círculo inscrito mas grande y $r_{min-cir}$ es el radio del círculo circunscrito más pequeño.

$$R = \frac{\sum r_i / N}{r_{max-in}}$$

Ecuación 32: Redondez de partícula (Cho et al, 2006)

Donde r_i es el radio de curvatura de las características superficiales de la partícula; N es el número de características consideradas y r_{max-in} es el radio inscrito más grande en la partícula.

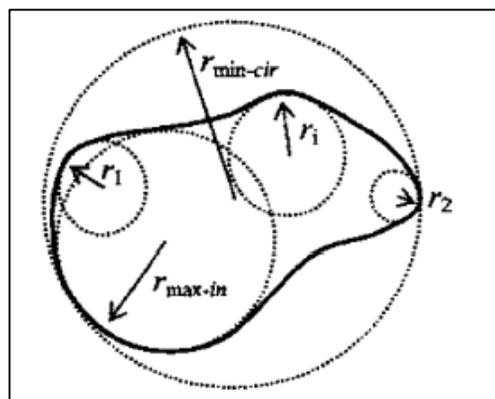


Figura 101: Definición radios en una partícula, esfericidad

RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA

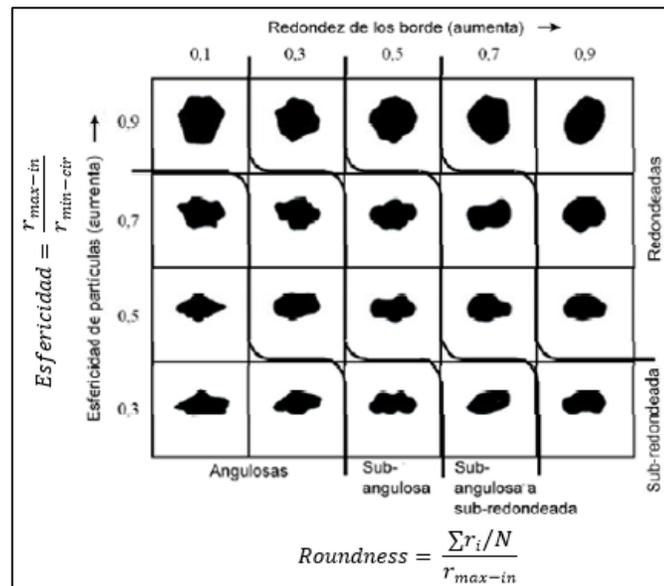


Figura 102: Matriz de clasificación, esfericidad y redondez (Hoz, 2007)

En la Tabla 59 se presenta el factor de forma de las partículas. Según la matriz de clasificación (Figura 102) se establece que las partículas se clasifican como sub-angulosas a sub-redondeadas (Resultados del ensayo en Tabla 61).

Tabla 59: Factor de forma de las partículas

Esfericidad		Redondez	
Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
0,68	0,06	0,20	0,07

Carga puntal

El ensayo de carga puntal permite determinar de manera indirecta estimar de manera indirecta la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) de fragmentos irregulares de roca (ISRM Comisión, 1985) convirtiendo el índice de resistencia a la carga puntal (I_s) a UCS según el diámetro del fragmento. Se caracteriza por ser una prueba rápida y económica que consiste en romper una muestra entre dos puntas cónicas metálicas (ver Ecuación 33).

$$I_s = \frac{P}{D_e^2}$$

Ecuación 33: Índice de carga puntal no corregido

Donde P es la carga puntal requerida para romper el fragmento y D_e es el diámetro equivalente de la muestra. que se requiere para

ANEXO F

**RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**

Dado que I_s varía con el diámetro equivalente de la muestra, se define el Índice de resistencia a la carga puntual corregido $I_{s(50)}$ (ver Ecuación 34) , que corresponde al valor que hubiese tenido I_s si se hubiera realizado un ensayo diametral con un diámetro equivalente $D_e = 50$ [mm]

$$I_{s(50)} = I_s \times \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45}$$

Ecuación 34: Índice de carga puntual corregido

Los resultados del ensayo de carga puntual se presentan en la Tabla 60.

Tabla 60: Ensayo de carga puntual, Q=S (Abarca, 2016)

Distancia entre puntas (D) [mm]	Ancho 1 [mm]	Ancho 2 [mm]	Ancho promedio [mm]	Fuerza de Ruptura [KN]	De ² [mm ²]	De [mm]	Índice de Carga Puntual (Is) [Mpa]	Factor de Corrección	Índice de Carga Puntual (Is) [Mpa]
22	49	31	40	4	1120,5	33,5	3,6	0,8	3
26	57	30	43,5	1,2	1440	37,9	0,8	0,9	0,7
23	56	40	48	2,7	1405,7	37,5	1,9	0,9	1,7
20	45	34	39,5	0,7	1005,9	31,7	0,7	0,8	0,6
21	48	30	39	1,3	1042,8	32,3	1,3	0,8	1
24	50	24	37	1,3	1130,6	33,6	1,1	0,8	1
25	52	36	44	4,6	1400,6	37,4	3,3	0,9	2,9
26	53	31	42	1,4	1390,4	37,3	1	0,9	0,9
25	66	40	53	4,7	1687	41,1	2,8	0,9	2,5
22	53	28	40,5	2,1	1134,5	33,7	1,9	0,8	1,6
42	68	69	68,5	1,5	3663,1	60,5	0,4	1,1	0,5
41	106	60	56	5,8	2923,4	54,1	2	1	2,1
57	112	71	91,5	3,9	6640,6	81,5	0,6	1,2	0,7
20	39	56,5	47,8	6,1	1215,9	34,9	5,0	0,9	4,2
20	67	40	53,5	2,7	1362,4	36,9	2,0	0,9	1,8
27	61	45	53,0	2,2	1822,0	42,7	1,2	0,9	1,1
23	66	50	58,0	4,1	1698,5	41,2	2,4	0,9	2,2
30	63	40	51,5	4,5	1967,2	44,4	2,3	0,9	2,1
22	62	44	53,0	1,7	1484,6	38,5	1,1	0,9	1,0
27	59	40	49,5	2,8	1701,7	41,3	1,7	0,9	1,5
14	58	41	49,5	1,0	882,4	29,7	1,2	0,8	0,9
20	65	51	58,0	1,9	1477,0	38,4	1,3	0,9	1,2
16	66	54	60,0	4,0	1222,3	35,0	3,3	0,9	2,8
24	50	45	47,5	6,1	1451,5	38,1	4,2	0,9	3,7
38	78	54	66,0	1,0	3193,3	56,5	0,3	1,1	0,3
21	64	55	59,5	3,5	1590,9	39,9	2,2	0,9	2,0
23	67	37	52,0	1,5	1522,8	39,0	1,0	0,9	0,9

ANEXO F

**RECOMENDACIÓN DE MALLA DE EXTRACCIÓN PARA EL PROYECTO
MINA CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA**

Tabla 61: Esfericidad y Redondez, Q=S (Abarca, 2016)

Muestra	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	r _{min-cir}	r _{max-in}	S	R
1	1,50	0,93	0,49	0,13	0,27	0,00	0,00	0,00	1,50	0,93	0,62	0,31
2	1,28	0,90	0,26	0,23	0,13	0,00	0,00	0,00	1,28	0,90	0,70	0,23
3	1,50	0,97	0,37	0,26	0,17	0,26	0,22	0,00	1,50	0,97	0,64	0,26
4	1,15	0,86	0,26	0,14	0,26	0,00	0,00	0,00	1,15	0,86	0,75	0,25
5	1,24	0,95	0,18	0,95	0,14	0,13	0,18	0,00	1,24	0,95	0,77	0,41
6	1,18	0,79	0,33	0,31	0,22	0,10	0,00	0,00	1,18	0,79	0,67	0,30
7	1,73	0,98	0,26	0,29	0,22	0,15	0,14	0,00	1,73	0,98	0,57	0,22
8	1,21	0,80	0,18	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	1,21	0,80	0,66	0,21
9	1,38	0,87	0,24	0,24	0,16	0,13	0,10	0,13	1,38	0,87	0,63	0,19
10	1,33	0,92	0,25	0,17	0,12	0,12	0,11	0,00	1,33	0,92	0,69	0,17
11	1,36	0,92	0,14	0,14	0,16	0,09	0,09	0,00	1,36	0,92	0,68	0,13
12	1,57	0,96	0,22	0,18	0,13	0,11	0,11	0,11	1,57	0,96	0,61	0,15
13	1,59	1,16	0,10	0,09	0,10	0,15	0,00	0,00	1,59	1,16	0,73	0,09
14	1,27	0,95	0,28	0,16	0,10	0,10	0,08	0,00	1,27	0,95	0,74	0,15
15	1,29	0,82	0,07	0,13	0,24	0,00	0,00	0,00	1,29	0,82	0,63	0,18
16	1,22	1,00	0,10	0,13	0,11	0,10	0,10	0,00	1,22	1,00	0,82	0,11
17	1,23	0,77	0,12	0,13	0,10	0,11	0,00	0,00	1,23	0,77	0,63	0,15
18	1,53	1,00	0,12	0,22	0,13	0,17	0,00	0,00	1,53	1,00	0,65	0,16
19	1,27	0,80	0,15	0,22	0,18	0,17	0,00	0,00	1,27	0,80	0,63	0,23
20	1,26	0,95	0,17	0,16	0,13	0,12	0,12	0,00	1,26	0,95	0,76	0,15
21	1,35	0,86	0,17	0,15	0,10	0,10	0,00	0,00	1,35	0,86	0,64	0,15
22	1,35	0,97	0,13	0,13	0,06	0,09	0,00	0,00	1,35	0,97	0,72	0,11
23	1,22	0,73	0,14	0,12	0,21	0,16	0,00	0,00	1,22	0,73	0,60	0,22
24	1,45	0,86	0,18	0,12	0,10	0,23	0,10	0,00	1,45	0,86	0,60	0,17
25	1,41	1,07	0,18	0,17	0,17	0,00	0,00	0,00	1,41	1,07	0,76	0,16
26	1,16	0,74	0,17	0,12	0,16	0,07	0,13	0,00	1,16	0,74	0,64	0,18
27	1,42	1,00	0,14	0,17	0,13	0,13	0,00	0,00	1,42	1,00	0,70	0,14
28	1,28	0,93	0,28	0,26	0,17	0,14	0,00	0,00	1,28	0,93	0,73	0,23
29	1,32	0,90	0,25	0,14	0,47	0,00	0,00	0,00	1,32	0,90	0,68	0,32
30	1,14	0,76	0,14	0,17	0,12	0,12	0,00	0,00	1,14	0,76	0,67	0,18
Promedio											0,68	0,20
Desviación											0,06	0,07