



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**EVALUACIÓN DE LA ALTURA DE SOCAVACIÓN EN LA PRODUCTIVIDAD DE LA
MINERÍA DE BLOCK/PANEL CAVING**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JUAN PABLO HENRÍQUEZ VALENCIA

**PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALVARO ALTAMIRANO CONDOR
CLAUDIO CAVIEDES TRONCOSO**

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN

La socavación, es la metodología utilizada para inducir el inicio del hundimiento del cuerpo mineralizado en la minería de caving la que se lleva a cabo mediante un corte basal al bloque mineralizado a explotar, lo que por efecto de la gravedad da inicio al hundimiento del bloque o panel. El conocimiento general de la socavación es obtenido de la experiencia operativa, y las diferentes estrategias usadas en la actualidad involucran distintas alturas de socavación, sin seguir una tendencia clara. Por otro lado, para un sistema minero de Block/Panel Caving, uno de los problemas o interferencias operacionales es la formación de colgaduras y la aparición de sobre tamaños que interrumpen el flujo continuo de mineral en los puntos de extracción, por lo que establecer criterios y bases teóricas que permitan relacionar la altura de socavación con la productividad en la minería de caving es de suma importancia para evaluar futuros proyectos mineros.

El objetivo general de esta investigación es cuantificar de manera experimental, el efecto de la altura de socavación en la frecuencia de colgaduras en el punto de extracción, y cómo afecta a la productividad. Para ello, se realiza un estudio en un modelo físico a escala 1:50, que replica una columna de extracción de 50 m con dos puntos de extracción. Para analizar el efecto de las interferencias operacionales en la productividad, se realiza una simulación de eventos discretos en el software *Promodel*.

El set experimental consta de experimentos de flujo gravitacional, donde el parámetro a variar es la altura de socavación. Dos experimentos corresponden a alturas de socavación altas (20 y 40 metros) y un experimento con altura de socavación baja (4 m), donde el material a utilizar corresponde a material mina proveniente del dominio geológico cuarzo igual a sericita (QIS) del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS).

Los resultados permitieron comprobar que el uso de socavaciones altas aumenta la productividad temprana de puntos de extracción con respecto al uso de socavación baja. Se extraen 2,900 toneladas más sin eventos de colgaduras al usar una socavación de 20 metros, y 7,000 toneladas al usar una socavación de 40 m, esto debido a la mayor extracción de material fino en las primeras etapas del hundimiento, retrasando la aparición de material grueso en los puntos de extracción. El ángulo de flujo del material al aumenta con la altura de socavación, lo que resulta en aumento de la altura de interacción y con ello una pérdida de mineral relacionada con el tonelaje remanente entre puntos de extracción adyacentes, donde la recuperación minera disminuye de 92.5 % a un 80 % al comparar una socavación de 4 metros con una de 40 metros. Mientras que del análisis de productividad donde se obtiene que a alturas de socavación más altas alcanzan mayores productividades en los primeros meses de producción debido a la mayor cantidad de material tronado extraído antes de la aparición de colgaduras.

Finalmente, se realiza un análisis económico con el fin de comparar las alternativas estudiadas en términos de productividad y costos. Donde la altura de socavación alta de 20 m aparece como la más rentable en términos de valor actual neto, mientras que la de 40 m involucra mayor inversión en desarrollos, a pesar de tener una mayor productividad en comparación al resto.

EVALUACIÓN DE LA ALTURA DE SOCAVACIÓN EN LA PRODUCTIVIDAD DE LA MINERÍA DE BLOCK/PANEL CAVING

ABSTRACT

The undercutting is the methodology used to induce the movement of the orebody in caving mines which is carried out by a basal cut to the block to be extracted, which by effect of gravity initiates the caving of the block or panel. The general knowledge of undercutting is obtained from operational experience, and the different strategies used today involve different undercutting heights, without following a trend. On the other hand there are certain problems in the operational continuity of a caving mine, such as the formation of hang ups and the occurrence of over sizes, which interrupt the continuous flow of ore at the drawpoints, so to establish criteria and theoretical bases that allow to relate the undercut height with productivity in caving mines has a great importance to evaluate future mining projects.

The aim of this research is to quantify experimentally, the effect of the undercut height in the frequency of hang ups in drawpoints and how it affects productivity. A study is carry out on a physical model at 1:50 scale, which replicates an extraction column of 50 m with two drawpoints. In addition, to analyze the effect of operational interferences, a discrete event simulation is performed in Promodel.

The experimental set consists in gravity flow experiments, where the parameter to be varied is the undercut height. Two experiments correspond to high undercut (20 and 40 meters) and an experiment with low undercut height (4 m). The material corresponds to mineral from the geological domain quartz equal sericite of the Chuquicamata Underground Mine Project.

The results permit to prove that use of high undercut increases productivity of drawpoints in early stages of caving with respect to the use of low undercut height. 2,900 more tons are extracted without hang up events using a 20 meter undercutting height and 7,000 tonnes using a 40 m undercut, which increases productivity by extracting more fine material, delaying the appearance of coarse material at the drawpoints. The material flow angle increases with the undercut height, resulting in major height interaction zone and ore loss related to the tonnage remaining between adjacent drawpoints. Where mining recovery decreases from 92.5% to 80% when comparing a 4 meter undercut height with a 40 meter. While the productivity analysis show that a higher undercut area more productive in the earlier moths due the greater amount of blast material extracted before the entry of coarse material.

Finally, an economic analysis is performed in order to compare the alternatives studied in terms of productivity and costs. Where the high undercut of 20 m appears as the most economic, while the 40 m undercut height increases costs considerably, despite having higher productivity compared to the rest.

AGRADECIMIENTOS

Comenzando por familia, quisiera agradecer a mis padres, quienes me dieron la vida, me criaron y me entregaron los valores necesarios de los que me valgo para vivir en estos momentos. Gracias por todo, por estar siempre ahí cuando los he necesitado, por escucharme, aguantarme y mostrar esa incondicionalidad. Ustedes han sido la mejor escuela, la escuela de caer y seguir adelante frente a todo, sin importar lo que pase. De la misma forma que han estado para mí ahí, estaré yo para ustedes. Los quiero mucho, nunca lo olviden.

A mis hermanos, Carlos y Sofía. Más que hermanos, unos amigos, cómplices. Parte de la vida es tomar caminos diferentes. Jamás olvidare los años que pasamos juntos en Santiago, sin lugar a dudas los mejores años que he vivido en Santiago. Gracias por apañar a todo, por ser como son. Me siento orgulloso de tenerlos a ustedes como hermanos. Los quiero, y sepan que siempre estaré ahí para ustedes y para compartir una cerveza.

Al resto de mi familia, a mi tata Carmen, tíos, primos. Siempre se les ha extrañado, pero siempre es un gusto volver a reencontrarse cuando voy a Ovalle.

A mi gente de Ovalle, mis amigos del colegio, que a pesar de los años aún estamos ahí para compartir. Que los años no nos separen y sigamos siempre aprovechando algún momento para tomarnos una cosita. Calero, Pedro, Tuma, Zavala, Nacho, Carlos, Joselo, Vicent, Ambrosio, Acuña, PliPli, Mananin, Marite, Loroso. Esta es para ustedes.

A mis amigos de la U, de plan común. Pedro, Seba, Pajarito, Eric, Caro, Camilo, Fran, Gonzalo, Rodrigo, Jaimito, Garrido, Niko. Quienes desde el primer año en la U seguimos siendo amigos hasta ahora. Gracias por todos estos años de amistad, porque a pesar que cada uno siguió especialidades diferentes, la amistad siempre se ha mantenido.

A los mineros, compañero y amigos, Seba, Gerson, CZ, Mati, Nachito, Lenin, Ibarra, Lefonse, Panchito, Tomas, Aguirre, Pera, Floyd, que si bien la vida nos ha distanciado un poco al salir de la U, con más de alguno de ustedes pasamos tardes y noches de estudio, disfrutamos de buenos mambos, y algunos pasaron de ser compañeros del BCLab a buenos amigos. Espero que nos veamos todos pronto.

A mi comisión. Profesor Raúl Castro, por confiarme este tema de memoria, y por las enseñanzas, consejos brindados durante este tiempo. Álvaro, gracias por el apoyo, por la preocupación, la confianza y todos los conocimientos compartidos. A Don Claudio, que cada consejo y corrección fue de gran ayuda para la finalización de este trabajo.

A la gente del BCLab que estuvo ahí en los periodos en que realice mi memoria, David, Yina, Vane, Mena y algunos que ya los nombre antes. Gracias por el apoyo.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación del trabajo	1
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	2
1.4. Alcances	2
1.5. Metodología de investigación	3
REVISION BIBLIOGRAFICA	4
2.1. Introducción	4
2.2. Socavación	4
2.2.1. Tipos o estrategias de socavación	5
2.2.2. Geometría de socavación.....	9
2.2.3. Altura de socavación	12
2.3. Flujo gravitacional.....	12
2.4. Altura de interacción (HIZ).....	17
2.5. Comportamiento de materiales granulares	20
2.6. Análisis de similitud.....	20
2.7. Colgaduras en puntos de extracción.....	21
2.8. Modelos físicos	23
2.9. Conclusiones del capítulo.....	25
METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	26
3.1. Introducción	26
3.1. Benchmarking alturas de socavación	26
3.2. Diseño del modelo físico.....	26
3.2.1. Dimensiones de la caja.....	27
3.2.2. Batea.....	28
3.3. Sistema de extracción.....	28
3.4. Curvas granulométricas.....	30
3.5. Caracterización del material.....	31
3.6. Colgaduras.....	32
3.7. Zonas de extracción.....	33
3.8. Procedimiento experimental.....	34

3.9.	Plan experimental.....	35
3.10.	Conclusiones del capítulo.....	37
RESULTADOS Y ANALISIS		38
4.1.	Introducción	38
4.2.	Colgaduras.....	38
4.3.	Análisis de flujo	42
4.3.1.	Zonas de extracción.....	42
4.3.2.	Altura de interacción (HIZ) y recuperación minera	44
4.4.	Evaluación de productividad	47
4.4.1.	Alcances de la simulación	47
4.4.2.	Detalles de la simulación.....	48
4.4.3.	Productividad de la calle	48
4.5.	Evaluación económica.....	50
4.5.1.	Parámetros de diseño a considerar.	51
4.5.2.	Costos	51
4.5.3.	Evaluación económica.....	52
4.6.	Conclusiones del capítulo.....	56
5.	CONCLUSIONES	57
5.1.	Conclusiones generales	57
5.2.	Recomendación y trabajo futuro	58
BIBLIOGRAFIA		59
ANEXO A.....		61
ANEXO B		71
ANEXO C		73
ANEXO D.....		75
ANEXO E		77
ANEXO F.....		83

Índice de tablas

Tabla 1 Ventajas y desventajas asociadas a distintas geometrías de socavación (Flores, 2014).....	11
Tabla 2 Tipos de similitud.....	20
Tabla 3 Factores de escala en análisis de similitud (Pineda, 2012).....	21
Tabla 4 Relación entre frecuencia de colgaduras y razón D/d	21
Tabla 5 Benchmarking alturas de socavación (modificado de Rivero, 2008).....	26
Tabla 6 Dimensiones de la batea.....	28
Tabla 7 Dimensiones galerías nivel de extracción	28
Tabla 8 Tamaños característicos de las curvas granulométricas. Escala mina.....	31
Tabla 9 Tamaños característicos de las curvas granulométricas. Escala 1:50.....	31
Tabla 10 Caracterización del material (Abarca, 2016).....	31
Tabla 11 Índice de uniformidad y curvatura	32
Tabla 12 Tipos de colgadura (López, 2016).....	32
Tabla 13 Plan experimental.....	36
Tabla 14 Tonelaje entre colgaduras	39
Tabla 15 Índice de colgaduras.....	40
Tabla 16 Colgaduras tipo 1 y 2	42
Tabla 17 Ángulos de flujo sobre Pilar Mayor y Pilar menor	44
Tabla 18 Resumen ángulos de flujo y HIZ para los 3 experimentos.....	47
Tabla 19 Velocidades de extracción.....	48
Tabla 20 Productividad diaria para cada mes.....	50
Tabla 21 Parámetros diseños de socavación considerados en el análisis	51
Tabla 22 Costos operacionales perforación y tronadura	52
Tabla 23 Parámetros económicos.....	54
Tabla 24 Costos operacionales considerados (Codelco, 2017; Fuentes, 2013; Maas, 2013).....	54
Tabla 25 Resumen diseños socavación Codelco.....	64
Tabla 26 Determinación del factor de forma (Sotomayor, 2016)	71
Tabla 27 Caracterización del material (Abarca, 2016).....	71
Tabla 28 Índice de uniformidad y curvatura	72
Tabla 29 Planilla realización experimentos.....	76

Índice de figuras

Figura 1 Esquema hundimiento convencional (Brown, 2007).....	5
Figura 2 Secuencia de desarrollo y construcción de Hundimiento Convencional (Trueman et al, 2002)	6
Figura 3 Esquema hundimiento previo (Brown, 2007).....	6
Figura 4 Secuencia de desarrollo y construcción de labores Hundimiento Previo (Trueman et al, 2002).....	7
Figura 5 Esquema hundimiento avanzado (Brown, 2007).....	8
Figura 6 Desarrollos y construcción Hundimiento Avanzado (Trueman et al, 2002).....	8
Figura 7 Diagrama perforación y tronadura Estrategia Henderson (Brown, 2007)	9
Figura 8 Geometría de socavación alta (Flores, 2014).....	10
Figura 9 Geometría de socavación angosta y plana (Brown, 2007).....	10
Figura 10 Geometría de socavación angosta e inclinada (Brown, 2007)	11
Figura 11 Determinación del coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008).....	13
Figura 12 Esquema de zonas de flujo en punto aislado (Kvapil, 2008)	14
Figura 13 Tipos de materiales granulares (Kvapil, 2008).....	15
Figura 14 Ancho del elipsoide para distintos tamaños de material	16
Figura 15 Efecto del diferentes factores sobre la forma del elipsoide (Kvapil, 2008)	17
Figura 16 Abaco de Laubcher para determinar espaciamiento entre puntos de extracción (Laubcher, 1994)	18
Figura 17 Curva para determinar la altura de interacción, HIZ (Laubcher, 1994).....	18
Figura 18 Tonelaje remanente debido a la interacción entre zonas de flujo adyacentes (Castro, 2012).....	19
Figura 19 Esquema de formación de arco mecánico (Kvapil, 2008)	22
Figura 20 Diagrama de fuerzas en un arco mecánico. a) Arco alto b) Arco bajo	22
Figura 21 Escala del modelo físico a escala laboratorio (escala mina) (vista 2D).....	27
Figura 22 Vista 3D Modelo experimento.....	27
Figura 23 Dimensiones de la batea. Vista 3D	28
Figura 24 LHD Sandvik LH621.....	29
Figura 25 Secuencia de extracción de los experimentos	29
Figura 26 LHD Laboratorio	29
Figura 27 Control eléctrico de las palas	30
Figura 28 Curvas granulométricas	30
Figura 29 Colgaduras tipo 1 y 2 observadas en los experimentos	33
Figura 30 Disposición de marcadores en los experimentos. A la izquierda una vista en planta de la malla y la derecha una vista lateral.	34
Figura 31 Procedimiento experimental	35
Figura 32 Esquema del modelo físico con las dimensiones de la altura de socavación a variar.....	36
Figura 33 Montaje experimental, Experimento 1 (altura de socavación de 4[m]).....	38
Figura 34 Índice de colgaduras en función del porcentaje de columna de extracción	39
Figura 35 Tonelaje extraído sin colgaduras	41
Figura 36 Diferencia porcentual entre las alternativas	41
Figura 37 Colgaduras tipo 1 y 2 observadas en los experimentos	42
Figura 38 Vista frontal y lateral del elipsoide de extracción. Experimento altura de socavación de 40 [m]	43
Figura 39 Ángulos de flujo sobre el pilar mayor (izquierda) y sobre el pilar menor (derecha). Experimento altura de socavación de 40 m	43
Figura 40 Representación de los perfiles sobre el Pilar Mayor y Pilar Menor.....	44
Figura 41 Estimación altura de interacción (HIZ). Caso altura de socavación de 4m (Sección AA').....	45

Figura 42 Estimación HIZ sobre pilar menor (Sección BB')	45
Figura 43 Aumento de la HIZ en función de la altura de socavación	47
Figura 44 Toneladas extraídas en 6 meses	49
Figura 45 Hundimiento con altura de socavación de 42 m mediante dos niveles, Northparkes Lift 1 (Rivero, 2008)	50
Figura 46 Costo Perforación y Tronadura socavación	52
Figura 47 VAN en función de la altura de socavación	55
Figura 48 Diagrama de perforación hundimiento sector Tiros largos al sur – División Salvador	61
Figura 49 Diagrama perforación hundimiento convencional Andina (extraído de Rivero, 2008)	62
Figura 50 Diagrama de perforación hundimiento sector Inca Extensión Sur – División Salvador	62
Figura 51 Diseño perforación Nivel de Hundimiento Esmeralda (Rivera et al., 2016)	63
Figura 52 Diseño perforación Nivel de Hundimiento Dacita (Rivera et al., 2016)	64
Figura 53 Hundimiento avanzado mediante corte frontal, Freeport (extraído de Rivero, 2008)	65
Figura 54 Socavación alta mediante dos niveles – Northparkes E26 – Lift 1 (Brown, 2007)	66
Figura 55 Corte angosto inclinado, Northparkes Lift 2 (extraído de Rivero, 2008)	66
Figura 56 Socavación convencional Northparkes E48 (extraído de Rivero, 2008)	67
Figura 57 Corte inclinado angosoto, Palabora (Rivero, 2008)	67
Figura 58 Diseño nivel de hundimiento – Cadia East (Brunton, et al., 2016)	68
Figura 59 Diseño nivel de hundimiento – Ridgeway Deeps (Brunton, et al., 2016)	69
Figura 60 Corte frontal avanzado, Premier Diamond (Rivero, 2008)	70
Figura 61 Curva fragmentación socavación	73
Figura 62 Curva fragmentación primaria (Sotomayor, 2016)	74
Figura 63 Harnero manual. Abertura malla 2"	74
Figura 64 Cortador giratorio	75
Figura 65 Montaje experimento altura de socavación 4 m	77
Figura 66 Montaje experimento altura de socavación 20 m	78
Figura 67 Montaje experimento altura de socavación 40 m	79
Figura 68 Evolución elipsoide de flujo, Experimento socavación 4 m	79
Figura 69 Evolución elipsoide de flujo, Experimento socavación 20 m	80
Figura 70 Evolución elipsoide de flujo. Experimento socavación 40 m	80
Figura 71 Interpolación marcadores vista frontal - Experimentos 1 y 2	81
Figura 72 Interpolación marcadores vista lateral - Experimentos 1 y 2	81
Figura 73 Interpolación marcadores 3D - Experimentos 1 y 2	82
Figura 74 Flujo de caja Socavación 4m	83
Figura 75 Flujo de caja Socavación 20m	83
Figura 76 Flujo de caja Socavación 40m	84

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008)	12
Ecuación 2 Excentricidad del elipsoide (Kvapil, 2008)	15
Ecuación 3 Estimación de la altura de interacción (Castro, 2012).....	19
Ecuación 4 Angulo de flujo en función del ángulo de fricción (Vargas, 2010).....	19
Ecuación 5 Estimación de la recuperación minera.....	20
Ecuación 6 Coeficiente de uniformidad (Craig, 2004).....	31
Ecuación 7 Coeficiente de curvatura (Craig, 2004)	31
Ecuación 8 Índice de colgaduras	33
Ecuación 9 Altura de interacción sobre el Crown Pillar	46
Ecuación 10 Altura de interacción sobre el Pilar Menor.....	46
Ecuación 11 Angulo de flujo del mineral.....	46
Ecuación 12 Ajuste HIZ sobre el Crown Pillar medida desde el UCL	46
Ecuación 13 Ajuste HIZ sobre el Pilar Menor medida desde el UCL.....	46
Ecuación 14 Coeficiente de uniformidad (Craig, 2004).....	71
Ecuación 15 Coeficiente de curvatura (Craig, 2004)	72

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La opción de aplicar minería masiva de Block/Panel Caving ha ido en aumento en los últimos años, debido al agotamiento de las reservas masivas más superficiales, obligando a enfrentar los desafíos que involucra el explotar cuerpos mineralizados a mayores profundidades, con calidad de roca diferente y con leyes más bajas. Debido a esto es que la minería de hundimiento aparece como una de las alternativas más viables para explotar cuerpos masivos que se encuentren a grandes profundidades, debido a que se pueden extraer a menores costos y mayores ritmos de producción.

La minería de caving se define como toda explotación en la cual se realiza un corte basal al cuerpo mineralizado, proceso que se conoce como socavación, lo que induce que el material se hunda por efecto de los esfuerzos in situ y la acción de la gravedad, y es recuperado en un nivel de producción inferior, mediante puntos de extracción (Laubscher, 2006).

La minería masiva por hundimiento ha ido tomando un rol importante en los últimos años, llevando consigo diversos cambios y evoluciones que han permitido extraer grandes depósitos minerales. Esto se ve reflejado en la transición de minería a rajo abierto a minería subterránea, como el caso chileno del Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo (PMCHS), o en el crecimiento que han tenido proyectos como El Teniente, Andina y Salvador, todos propiedad de CODELCO.

El periodo actual de bajos precios del cobre, obliga a la minería a buscar las formas de reducir costos manteniendo altas tasas productivas. Es en este contexto que nace la idea de analizar de forma experimental, la influencia de la altura de socavación dentro de la productividad de los puntos de extracción en la minería de Block/Panel Caving, lo cual involucra a la socavación como una variable crítica en el proceso productivo a través de la formación de colgaduras y presencia de sobretamaños en los puntos de extracción.

1.2. Motivación del trabajo

La minería de Block/Panel Caving promete tomar mayor fuerza en los próximos años, debido a la gran productividad que es posible alcanzar y bajos costos operativos. Sin embargo, tiene asociado diversas variables que afectan el funcionamiento y el éxito del método, por lo que resulta fundamental centrar bases teóricas para comprender la influencia de todas las variables involucradas en la minería de caving y asegurar el éxito de este método. Muchas de estas variables han sido estudiadas de forma experimental en modelos físicos, y que tienen una incidencia en la formación de colgaduras en puntos de extracción, lo que afecta la productividad de la minería de caving. En particular, el Laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile ha entregado conocimiento del comportamiento del flujo gravitacional a través de modelos físicos, así como la generación de modelos numéricos que permiten entender el comportamiento del material involucrado en los procesos referentes a la minería de Block/Panel Caving.

Dentro de las variables que ya han sido estudiadas en el laboratorio se encuentran (Fuenzalida, 2012; Orellana, 2012; Gómez, 2014; Olivares, 2014, López, 2016; Sotomayor, 2016; Abarca, 2016, Sánchez, 2016):

- La fragmentación
- Geometría de la batea
- Presencia de finos
- Humedad
- Carga vertical

Sin embargo, existen otras variables que aún no han sido estudiadas, entre las que se encuentran:

- Altura de socavación
- Tipo de balde (LHD)
- Secuencia de extracción

La primera de estas, es el motivo del presente trabajo, donde se busca responder la siguiente pregunta: ¿cómo afecta la altura de socavación y la granulometría asociada en la formación de colgaduras? ¿Cuánto afectan dichas colgaduras en la productividad de los puntos de extracción?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Cuantificar de manera experimental, el efecto de la altura de socavación y la granulometría en la frecuencia de colgaduras, y cómo afecta a la productividad.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica del estado del arte, tanto de los tipos de socavación como de modelos físicos para minería de caving.
- Seleccionar alturas de socavación relevantes empleados en la actualidad, para su posterior análisis experimental.
- Diseñar un modelo físico a escala, así como la preparación del material necesario para llevar a cabo los experimentos.
- Determinar experimentalmente el efecto de la altura de socavación y la granulometría variable en la frecuencia de colgaduras y sobretamaños.
- Realizar una evaluación económica de las alternativas estudiadas, y concluir acerca de la opción más viable en términos de costos y productividad.

1.4. Alcances

Para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos propuestos para la presente investigación, se cuenta con los siguientes alcances:

- Los análisis experimentales de altura de socavación se realizan con granulometría fija de material socavado y hundido.
- El estudio es efectuado para alturas de socavación más utilizadas, considerando como indicadores el índice de colgaduras y sobretamaños.
- Los experimentos se realizaron en un modelo físico a escala 1:50.
- Los experimentos consideraron la extracción desde solo una batea, es decir, dos puntos de extracción.
- No se consideró la carga vertical ni la humedad en la realización de los experimentos.
- El material utilizado corresponde a mineral proveniente de mina.
- El análisis económico se realizó de manera conceptual basándose en la productividad de una calle de producción, en términos de costo de perforación y tronadura.

1.5. Metodología de investigación

Para cumplir con cada uno de los objetivos propuestos, se cuenta con la siguiente metodología de investigación:

- *Benchmarking socavación*: se realizó una revisión con las principales estrategias de socavación, de manera de seleccionar alturas más usadas para su posterior análisis.
- *Análisis granulometrías*: seleccionadas las alturas de socavación, se procedió a estimar la granulometría asociada a la tronadura de socavación, la cual fue implementada en el diseño de los experimentos a escala.
- *Preparación del modelo físico*: con lo anterior, se dio inicio a la preparación del material de acuerdo a las curvas granulométricas propuestas.
- *Realización de experimentos*: cada experimento tiene asociado la preparación del material de acuerdo a la curva respectiva. Estos se realizaron bajo las mismas condiciones, a excepción de la cantidad de material a ocupar de acuerdo a la curva de socavación o de material hundido.
- *Análisis de los experimentos*: luego de realizado cada experimento, se analizaron los resultados obtenidos en base a los objetivos propuestos.

CAPITULO 2

REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1. Introducción

Es necesario contar con una revisión bibliográfica para profundizar en los temas que se ven involucrados en la investigación. En este capítulo, se muestra una recopilación de antecedentes acerca de los principales temas que se ven involucrados. Estos son:

- Socavación en minería de caving
- Flujo gravitacional
- Comportamiento de materiales granulares
- Colgaduras en el proceso productivo
- Modelos físicos aplicados en minería de caving

2.2. Socavación

La socavación es la metodología utilizada para inducir el inicio del movimiento del cuerpo mineralizado en la minería de caving.

Dentro de las técnicas para realizar la socavación, junto con las usuales de perforación y tronadura, existen otras técnicas que pueden ayudar al inicio del hundimiento del macizo rocoso, consisten en excavaciones tipo slot y el preacondicionamiento del macizo rocoso, ya sea por tronadura confinada o fracturamiento hidráulico (Brown, 2007).

Si la socavación realizada es de baja calidad, es posible tener pérdidas de área productiva, debido al daño o colapso del nivel de producción, por lo que es necesaria la reinstalación de fortificación en las áreas afectadas, lo que retrasa los planes iniciales de producción, pone en peligro el éxito de método de explotación, y con ello, el aumento de costos (Brown, 2007).

La etapa de socavación posee 3 objetivos principales según Butcher (2000):

- Generar una excavación de dimensiones suficientes para dar inicio al hundimiento.
- Lograr las dimensiones requeridas del área socavada para iniciar el hundimiento, con un mínimo daño al macizo rocoso en las cercanías.
- Alcanzar tan rápido como sea posible el radio hidráulico requerido para iniciar el hundimiento, propagarlo y así reducir la concentración de esfuerzos producido por esta operación.

Brown (2007), establece a la socavación como operación crítica para asegurar el éxito de minas de Block/Panel Caving. Resume los aspectos claves que influyen en el éxito de una determinada técnica de socavación. Entre ellos se tienen:

- La secuencia de socavación y de desarrollo de los niveles de producción.
- La dirección del frente de avance de la socavación.
- La altura de socavación
- La forma de la socavación, tanto en planta como sección vertical.
- La extensión de la losa, es decir la distancia ente la frente de socavación y la frente de extracción.
- La tasa de avance de la socavación, expresada en términos del área socavada por unidad de tiempo.

2.2.1. Tipos o estrategias de socavación

La estrategia de socavación hace referencia a la secuencia de construcción de las labores productivas. Las estrategias de socavación más importantes según diversos autores (Brown, 2007; Laubcher, 2000) son:

- Hundimiento convencional
- Hundimiento previo
- Hundimiento avanzado

Hundimiento convencional

En esta estrategia, todos los niveles (nivel de hundimiento, producción) se encuentran desarrollados antes del inicio de la tronadura de socavación. Por lo tanto, es necesario considerar una inversión inicial para construir toda la infraestructura necesaria. Como ventaja, se tiene que el sector socavado es incorporado inmediatamente dentro del área de producción. Además, se tiene que en este método es relativamente fácil el manejo de marinas, el cual es extraído desde los niveles de producción (Villegas, 2014). La desventaja del hundimiento convencional se debe a la zona de abutment stress causado por el avance del hundimiento sobre las labores del nivel producción, lo que podría reducir la vida útil de los puntos y las galerías de producción.

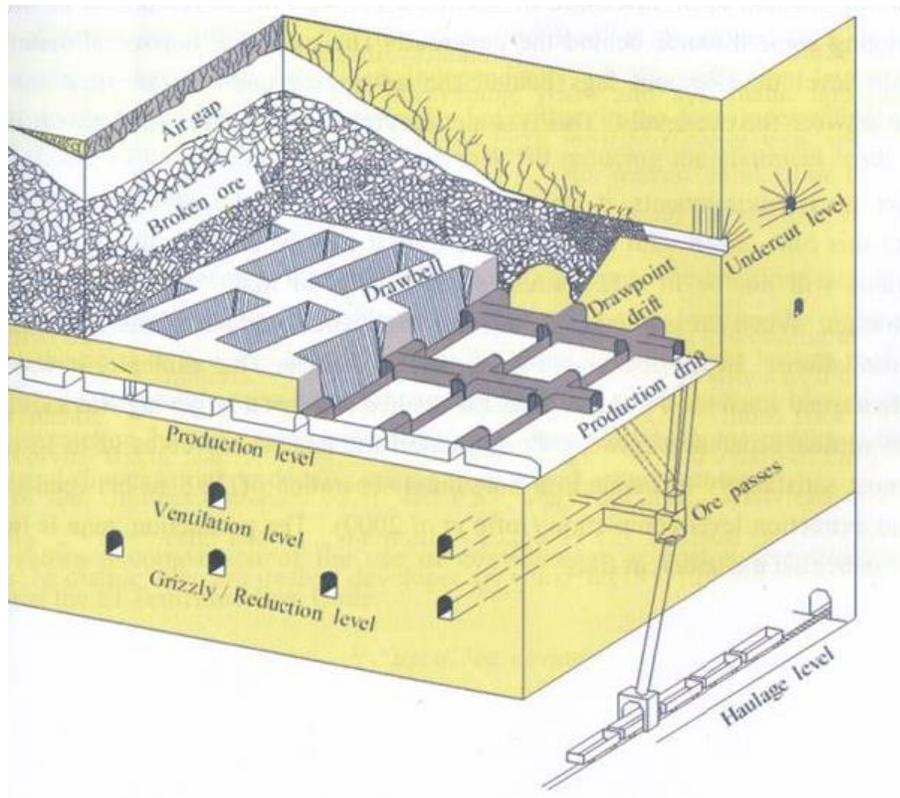


Figura 1 Esquema hundimiento convencional (Brown, 2007)

La secuencia constructiva se resume en los siguientes puntos:

- Desarrollo de las labores de producción y hundimiento.
- Apertura de bateas de extracción.
- Tronadura de socavación en el nivel de hundimiento, avanzando con el frente de hundimiento hacia las bateas abiertas.
- Inicio de la extracción.

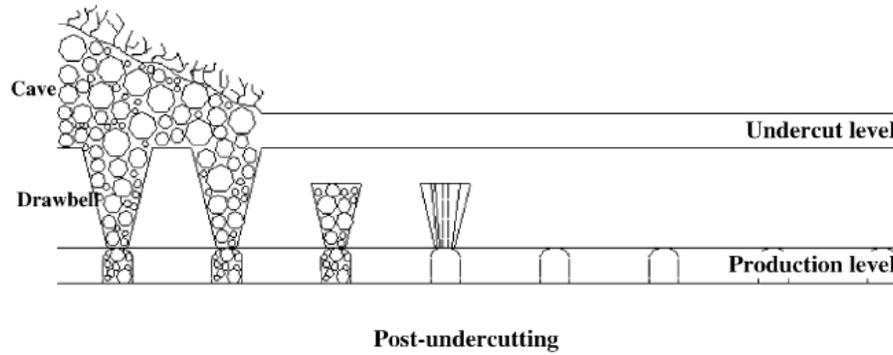


Figura 2 Secuencia de desarrollo y construcción de Hundimiento Convencional (Trueman et al, 2002)

Hundimiento previo

En el hundimiento previo, la socavación es realizada antes del desarrollo y construcción del nivel de producción. El frente de hundimiento avanza delante de cualquier desarrollo en el nivel de producción, lo que permite que la apertura de bateas, y el desarrollo en el nivel de producción se produzca en un ambiente con menores esfuerzos que el caso de hundimiento convencional, lo que le da la ventaja de requerir menos fortificación, además de repercutir en una mayor vida útil de los puntos de extracción. La desventaja radica en la complejidad de coordinar el desarrollo, construcción, y el avance del frente de hundimiento. Además, el hundimiento previo requiere el doble de cantidad en desarrollo en el nivel de hundimiento que la requerida en hundimiento convencional, el cual requiere mayor fortificación que las otras estrategias, como hundimiento previo y avanzado. Sin embargo desde un punto de vista económico, el hundimiento previo tiene la ventaja que la inversión en el nivel de producción se realiza un poco antes que la zona entre en producción (Villegas, 2014).

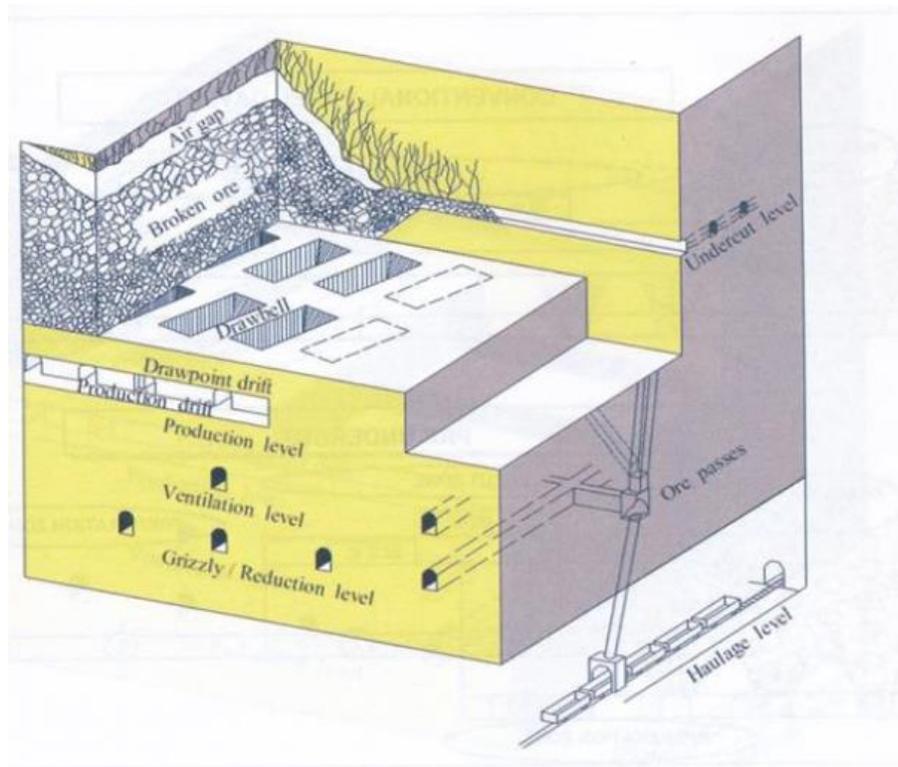
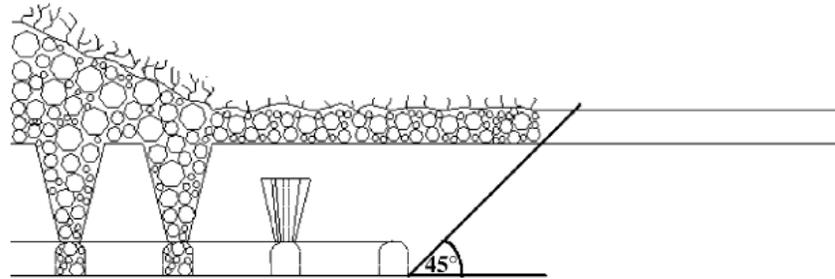


Figura 3 Esquema hundimiento previo (Brown, 2007)

La secuencia de las labores de construcción y desarrollo se resumen a continuación:

- Preparación de labores en el nivel de hundimiento.
- Tronadura de socavación en el nivel de hundimiento avanzando con el frente de socavación hasta alcanzar una cierta distancia por delante del futuro frente de extracción.
- Preparación de labores en el nivel de producción.
- Apertura de bateas bajo área socavada.
- Inicio de la extracción.



Pre-undercutting

Figura 4 Secuencia de desarrollo y construcción de labores Hundimiento Previo (Trueman et al, 2002)

Hundimiento avanzado

En el método de hundimiento avanzado, el frente de hundimiento avanza por delante de la apertura de bateas y parte del desarrollo y construcción del nivel de producción es hecho antes del paso del frente de hundimiento. Este método tiene la ventaja que disminuye el tiempo necesario para completar el desarrollo y construcción del nivel de producción. También, como en el caso del hundimiento previo, requiere menos fortificación en el nivel de producción. Sin embargo, la infraestructura desarrollada antes del nivel de hundimiento necesita fuerte fortificación, y después que el frente de hundimiento ha pasado, a veces es necesario desarrollar algunas reparaciones. Este método incrementa la vida útil de los puntos de extracción, en comparación al hundimiento convencional. La desventaja de este método es la complejidad de coordinar el desarrollo, construcción, y el avance del frente de hundimiento simultáneamente, como con el hundimiento previo, el hundimiento avanzado requiere el doble de desarrollos en el nivel de hundimiento (Villegas, 2014).

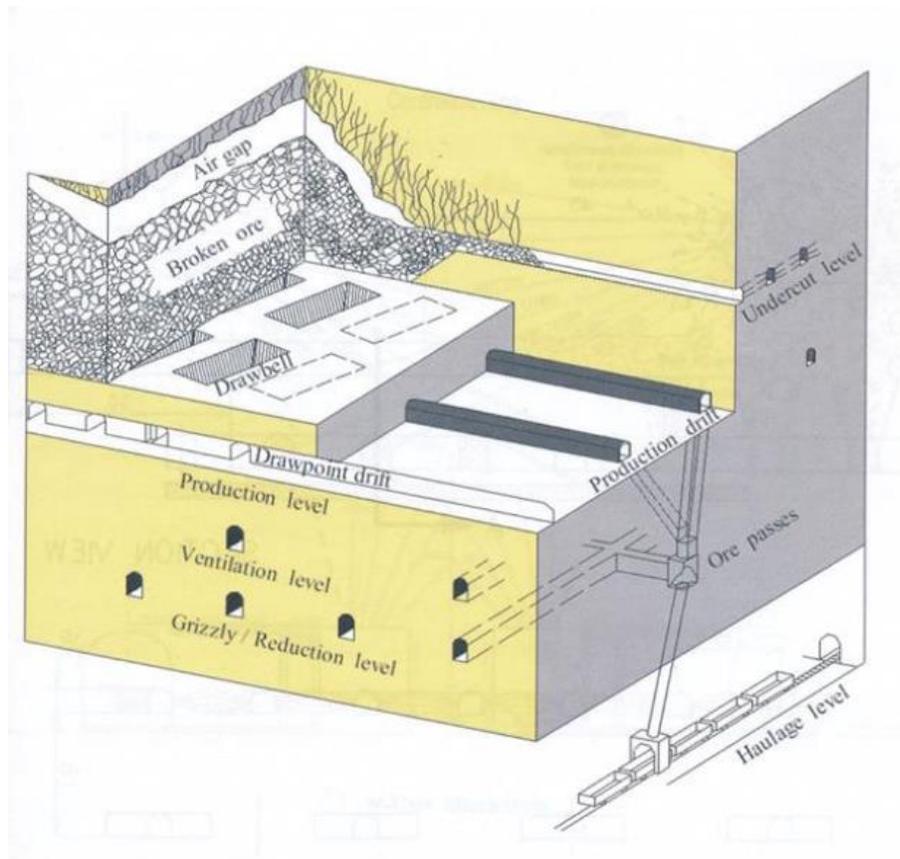
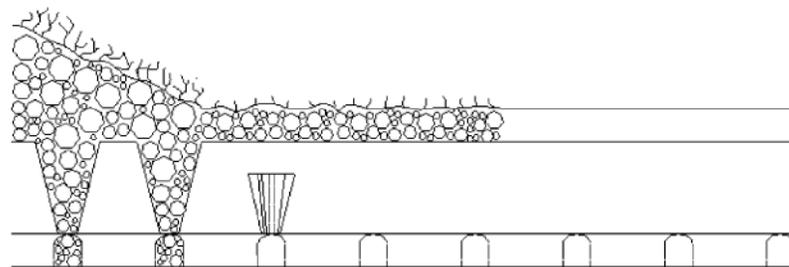


Figura 5 Esquema hundimiento avanzado (Brown, 2007)

La secuencia de desarrollo y construcción se describe a continuación (Rivero, 2008):

- Desarrollo de las labores del nivel de hundimiento, y de algunas del nivel de producción. En general solamente se construyen las calles de producción.
- Tronadura de socavación en el nivel de hundimiento avanzando con el frente de socavación hasta alcanzar una cierta distancia por delante del futuro frente de extracción.
- Se desarrollan las restantes labores del nivel de producción en el sector bajo el área socavada.
- Se realiza la apertura de las bateas.
- Se inicia la extracción.



Advance undercutting

Figura 6 Desarrollos y construcción Hundimiento Avanzado (Trueman et al, 2002)

La Estrategia Henderson

Se considera además de los tipos de socavación nombrados anteriormente, un cuarto tipo de estrategia, que se denomina Estrategia Henderson. En esta técnica, la tronadura de la batea se realiza desde el nivel de producción y desde el nivel de hundimiento, donde la mayor parte de la tronadura se realiza desde este último. Los tiros desde el nivel de hundimiento se llevan a cabo de manera adelantada con respecto a la tronadura de socavación propiamente tal. Esto reduce el tiempo durante el cual los pilares y el nivel de producción están sujetos a mayores esfuerzos que puedan causar daños en las labores (Brown, 2007). Sin embargo, esta estrategia no tiene resultados satisfactorios en condiciones donde existe alto confinamiento que puedan provocar tiros quedados (Laubscher, 2000).

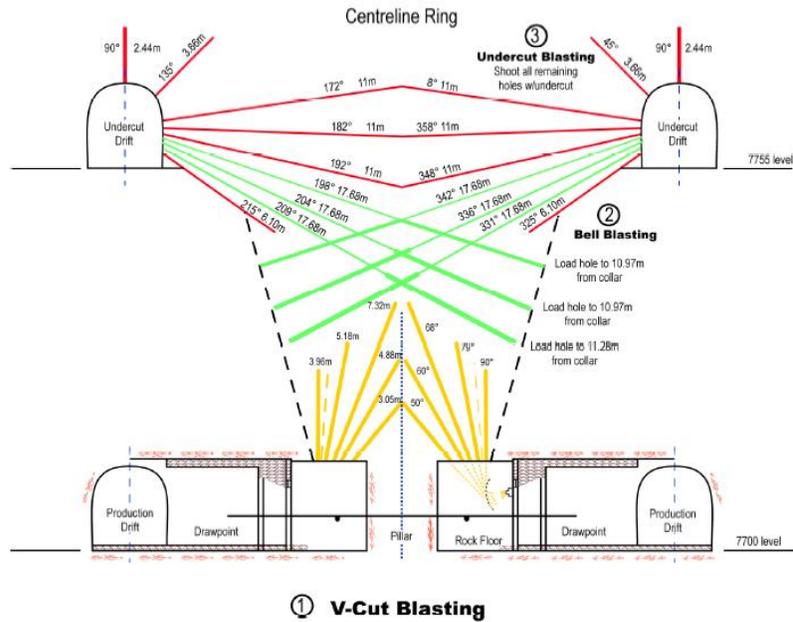


Figura 7 Diagrama perforación y tronadura Estrategia Henderson (Brown, 2007)

2.2.2. Geometría de socavación

Con respecto a la geometría de socavación, se pueden destacar tres opciones usadas principalmente, las cuales se muestran en las Figuras 8, 9 y 10, estas corresponden a geometría de socavación alta (high undercut), angosta y plana (narrow and flat) y angosta e inclinada (narrow and inclined), estas dos últimas están asociadas a alturas de socavación bajas. Flores (2014), resume las ventajas y desventajas asociadas a estas geometrías de socavación, las cuales se muestran en la Tabla 1.

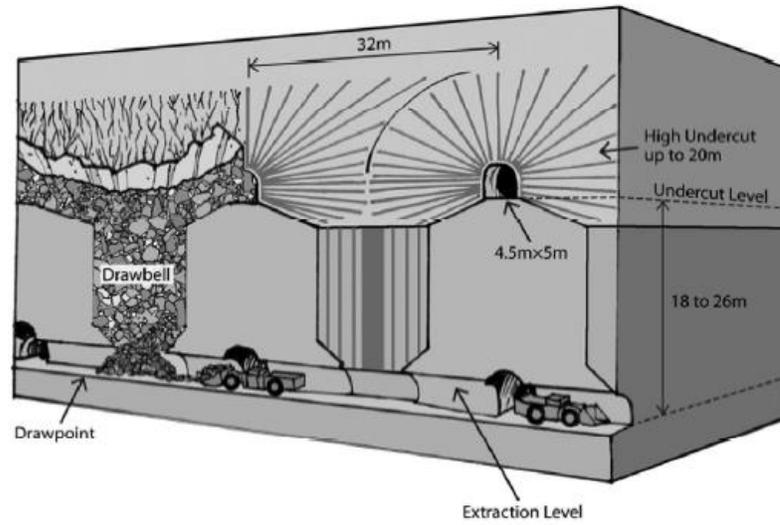


Figura 8 Geometría de socavación alta (Flores, 2014)

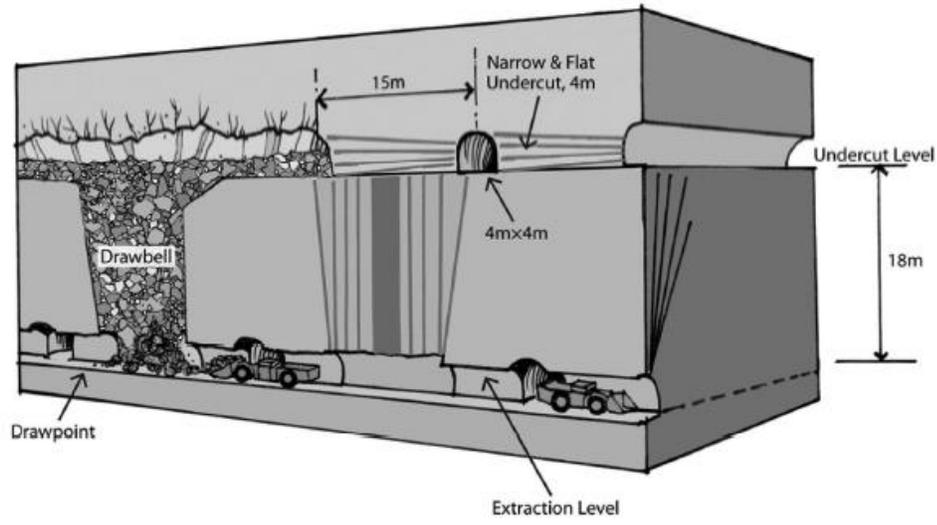


Figura 9 Geometría de socavación angosta y plana (Brown, 2007)

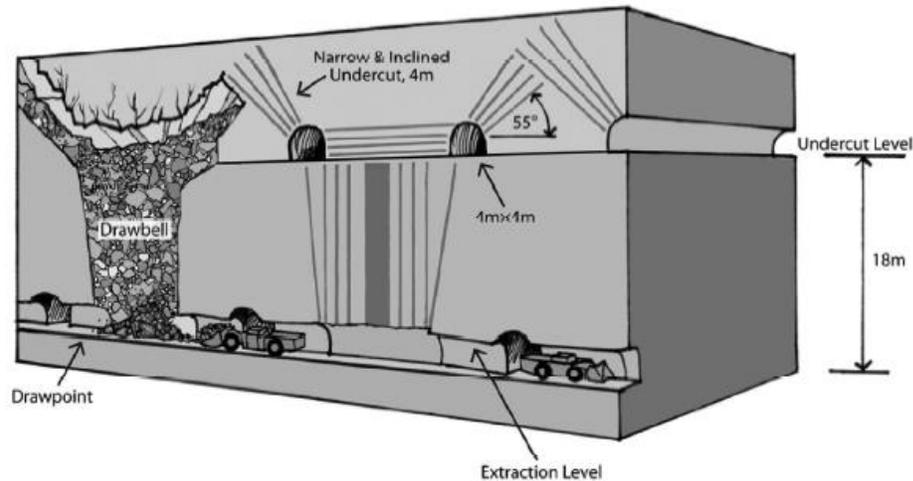


Figura 10 Geometría de socavación angosta e inclinada (Brown, 2007)

Tabla 1 Ventajas y desventajas asociadas a distintas geometrías de socavación (Flores, 2014)

Geometría socavación	Ventaja	Desventaja
High undercut	<ul style="list-style-type: none"> -Relativamente flexibles en cuanto a que la perforación puede llevarse a cabo para un rango de equipos y diámetros de perforación. -Mayor tonelaje de fragmentación fina al comienzo del proceso de caving. 	<ul style="list-style-type: none"> -Desviación de tiros y tiros quedados, lo que resulta en una mala tronadura de las paradas de socavación necesitando re perforación.
Narrow flat undercut	<ul style="list-style-type: none"> -Mayores tasas de avance debido a que se requiere menos perforación y tronadura, lo que reduce tiempos y costos. Además se reducen esfuerzos inducidos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Potencial formación de pilares remanentes debido a tiros quedados y la desviación de los tiros, o condiciones de tronadura confinada, lo que repercute en una inadecuada tronadura de socavación anterior. -Presencia de fragmentación gruesa al comienzo del proceso de caving.
Narrow and inclined undercut	<ul style="list-style-type: none"> -Favorece el flujo del material tronado por la sección inclinada. Se asegura quiebre completo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Presencia de fragmentación gruesa al comienzo del proceso de caving.

2.2.3. Altura de socavación

Brown (2007), establece dentro de los aspectos que influyen en el éxito de una socavación, la altura. El muestra la variación que han sufrido las alturas de socavación con el tiempo, y como esta variación no sigue una tendencia. Nombra ventajas y desventajas asociadas a las socavaciones altas o bajas.

Dentro de las ventajas que establece para las alturas de socavación altas, Brown (2007) propone, desde el punto de vista de la perforación y tronadura, que permiten mayor facilidad de quiebre debido a la cara libre disponible. El riesgo de no alcanzar un quiebre completo es mayor en socavaciones bajas, esto por el alto confinamiento. Además, cualquier cantidad pequeña de tiros desviados pueden exacerbar el problema del confinamiento. Dentro de las desventajas que propone para las socavaciones altas se cuentan:

- Las perforaciones largas que son necesarias para lograr la socavación alta pueden repercutir en irregularidades en el cave back, resultando en una mala fragmentación y pobre hundimiento.
- Como se mencionó anteriormente, incrementan los costos globales debido a la mayor perforación y gasto de explosivos debido a los largos tiros (Butcher, 2000).
- El hundimiento avanzado puede presentar problemas relacionados con el retiro del material de esponjamiento.

2.3. Flujo gravitacional

El flujo gravitacional en minería de caving, es de suma importancia a la hora de tomar en cuenta aspectos como el diseño minero y la operación misma. Esto debido a que el mecanismo de flujo gravitacional tiene un impacto directo en el layout de los niveles de producción y hundimiento, en la configuración de bateas, propagación del caving, formación de airgap y recuperación de reservas (Olivares, 2014).

La teoría convencional de flujo gravitacional, se basa en elipsoides de flujo de material aislado y en el comportamiento del flujo interactivo (Brunton et al, 2012).

Es fundamental entender los mecanismos y la teoría detrás del flujo gravitacional para asegurar el éxito de una mina de caving, esto porque el flujo afecta la recuperación de reservas y la dilución (Susaeta, 2004), las que se requieren conocer para cuantificar el efecto que tiene la tasa de extracción sobre la evaluación económica de un proyecto (Castro y Whitten, 2007).

El material que fluye en un espacio producto del flujo gravitacional, corresponde a una mezcla de materiales de diversos tamaños y formas, donde cada uno, con su respectiva característica específica tiene un movimiento propio del material que corresponde. Esta movilidad depende principalmente de su fricción interna, asociada a un coeficiente de fricción interna f , el que se puede asumir como la tangente del ángulo natural de reposo del material, ϕ . Así, se puede determinar el coeficiente de movilidad asociado a un material por medio de la Ecuación 1.

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

Ecuación 1 Coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008)

El valor máximo que puede tomar m es 1, para un coeficiente de fricción interna $f = 0$. Esto se puede representar en un gráfico como el de la Figura 11.

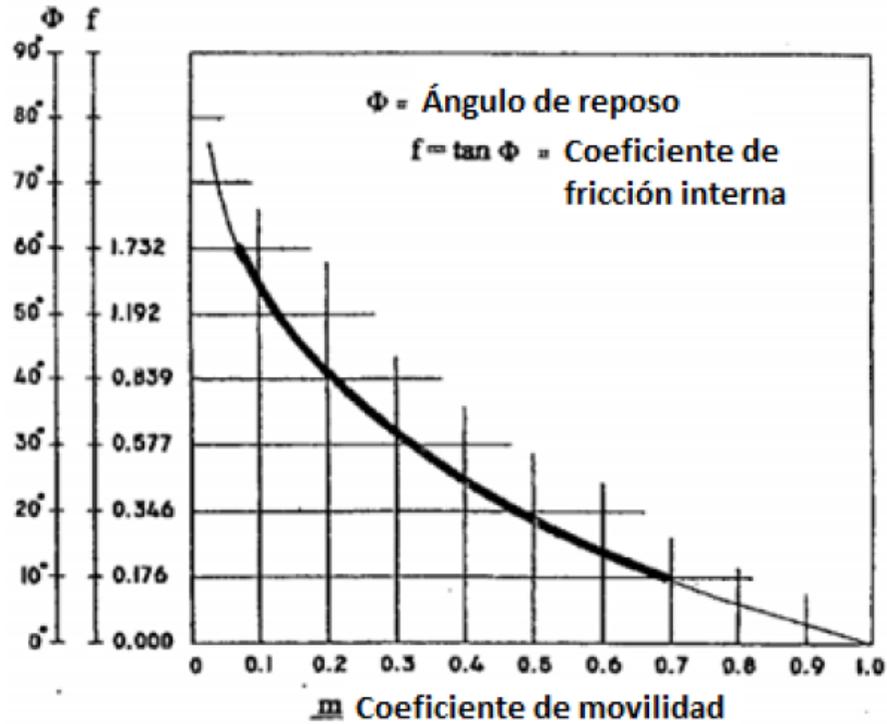


Figura 11 Determinación del coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008)

Como se muestra en la Figura 12, el flujo posee características que le dan una forma similar a una elipse (vista en 2D) o a un elipsoide de revolución (vista en 3D). Donde se pueden identificar dos tipos de elipsoides de movimiento: elipsoide de extracción y elipsoide de movimiento, los cuales representan las zonas de extracción (EZ) y movimiento (MZ), respectivamente.

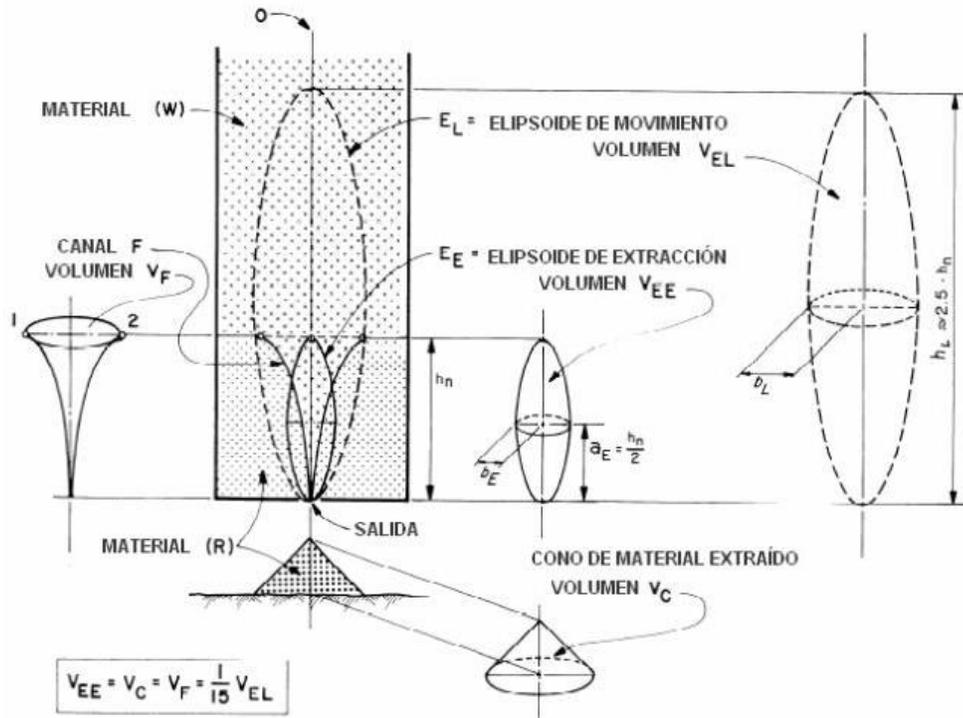


Figura 12 Esquema de zonas de flujo en punto aislado (Kvapil, 2008)

La zona de extracción (EZ) se define como el volumen que determina la posición inicial del material que ha sido extraído desde un punto de extracción, para una masa dada. La zona de movimiento (MZ) es el volumen que se define el límite entre el material estacionario y el material que se ha desplazado desde su posición original. Las zonas conocidas como zona de extracción aislada (IEZ) y zona de movimiento aislado (IMZ), importantes para el presente trabajo, son obtenidas cuando las EZ y MZ son extraídas desde solo un punto de extracción (Kvapil, 2008; Fuenzalida, 2012; Olivares, 2014).

El comportamiento del material a fluir puede cambiar dependiendo de la composición o la mezcla de materiales presentes. Kvapil (2008) establece que la presencia de material fino más humedad repercute en un comportamiento plástico y hasta cementante. Además, la presencia de material fino puede cambiar el comportamiento del material grueso presente, entre un 10 a 15% de finos. Lo que puede en algunos casos aumentar la fluidez del material grueso (Olivares, 2014).

Como se mencionó anteriormente, durante un flujo de material en minería de caving, existe una mezcla de diversos materiales, con diferentes tamaños y formas. Kvapil (2008), clasificó los materiales en cuatro tipos, diferenciándolos en rangos de tamaño y forma, y por su medio de transporte ideal. Dicha clasificación se muestra en la Figura 13.

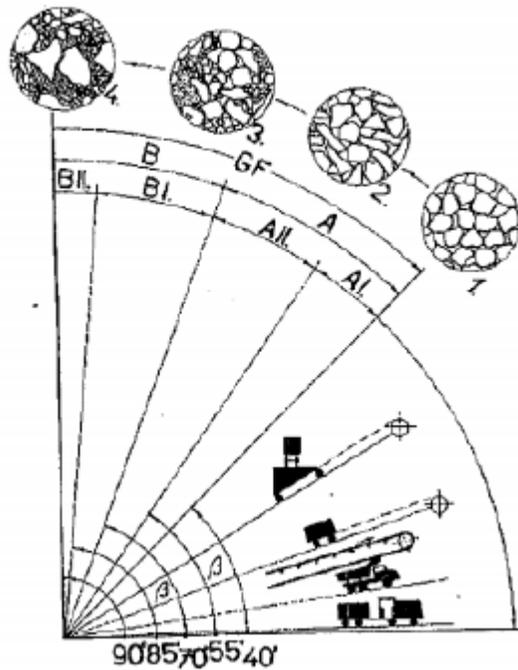


Figura 13 Tipos de materiales granulares (Kvapil, 2008)

La clasificación de la figura anterior, responde a las siguientes descripciones (Kvapil, 2008):

- Material 1: corresponde a material grueso con tamaños y formas redondeadas relativamente uniformes.
- Material 2: material grueso con partículas angulares y tabulares, con tamaños aproximadamente uniformes.
- Material 3: mezcla de partículas grandes, fragmentos de roca, gravilla y arena.
- Material 4: mezcla de bloques grandes, fragmentos de tamaño intermedio, gravilla y arenas.
- Material A: materiales idealmente transportados en tolvas.
- Material B: transporte ideal mediante piques de traspaso y bateas.

Para el caso de minería de caving, la clasificación de material corresponde al rango de material tipo B (López, 2016).

La excentricidad del elipsoide puede determinarse mediante la Ecuación 2:

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

Ecuación 2 Excentricidad del elipsoide (Kvapil, 2008)

Donde, a y b corresponden al semieje mayor y menor, respectivamente.

Esta relación permite visualizar el siguiente comportamiento: mientras más alta es la excentricidad, el elipsoide es más delgado y su volumen es menor. Además, para el mismo tipo de material, la excentricidad no es constante y aumenta con la altura del elipsoide de extracción y movimiento.

Además, es posible establecer la relación entre el tamaño de la partícula y la forma del elipsoide. Esto se muestra en la Figura 14, donde se puede ver que para material con granulometría más fina, el elipsoide es más delgado.

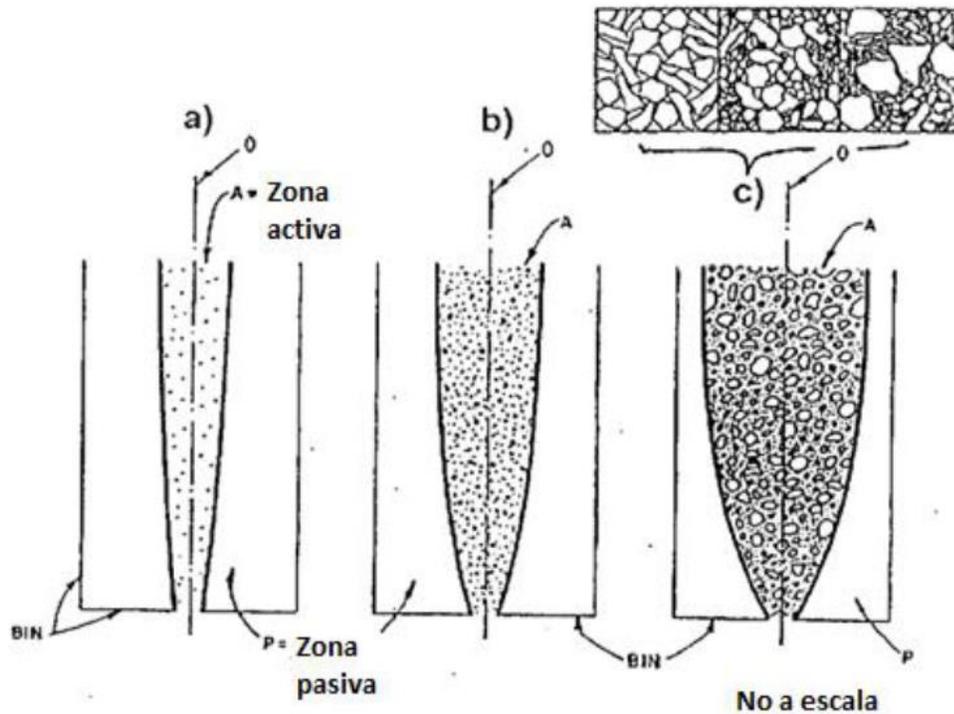


Figura 14 Ancho del elipsoide para distintos tamaños de material

Kvapil (2008), establece que la excentricidad depende de los siguientes factores:

- Forma de los fragmentos
- Rugosidad superficial y fricción entre partículas
- Porcentaje de finos, arenas y arcillas
- Porcentaje de humedad
- Compresibilidad, plasticidad y compactación
- Resistencia de los fragmentos
- Magnitud, distribución y dirección de esfuerzos y carga externa
- Tasa de extracción
- Densidad del material

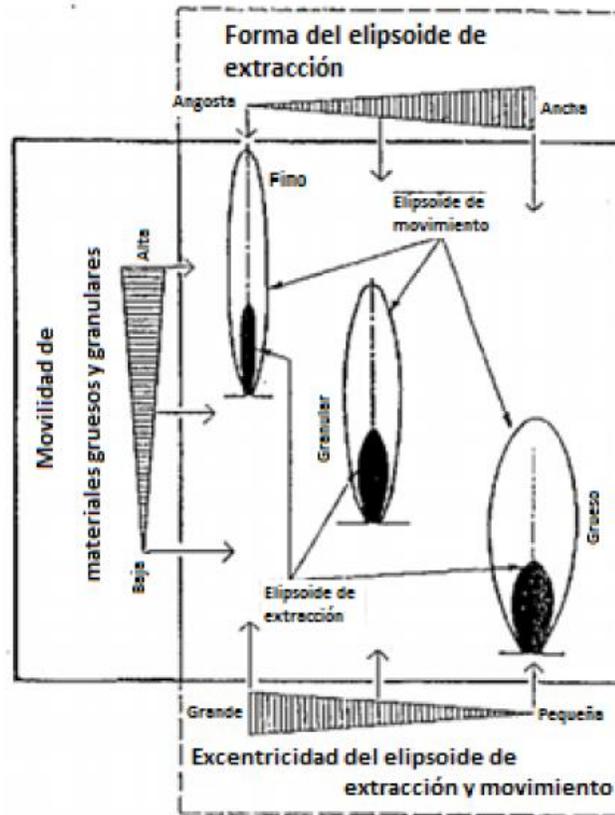


Figura 15 Efecto del diferentes factores sobre la forma del elipsoide (Kvapil, 2008)

2.4. Altura de interacción (HIZ)

La metodología para el diseño de minas de Block/Panel Caving, está basada en gran medida por teorías de flujo gravitacional. Entre la más usada para determinar el espaciamiento entre puntos de extracción, se encuentra la teoría propuesta por Laubcher. Esta teoría, denominada *Teoría de interacción*, establece que cuando la distancia entre puntos de extracción es menor a 1.5 veces el diámetro de tiraje aislado (DTA), la columna de mineral desciende uniformemente hasta una cierta altura a la cual las zonas de flujo adyacentes interactúan. Esta altura se denomina altura de interacción. En la Figura 16, se muestra el ábaco de Laubcher, el cual permite estimar el máximo y mínimo espaciamiento entre puntos de extracción, toma en cuenta la calidad del macizo rocoso, el ancho del punto de extracción, la granulometría esperada y el diámetro de tiraje aislado.

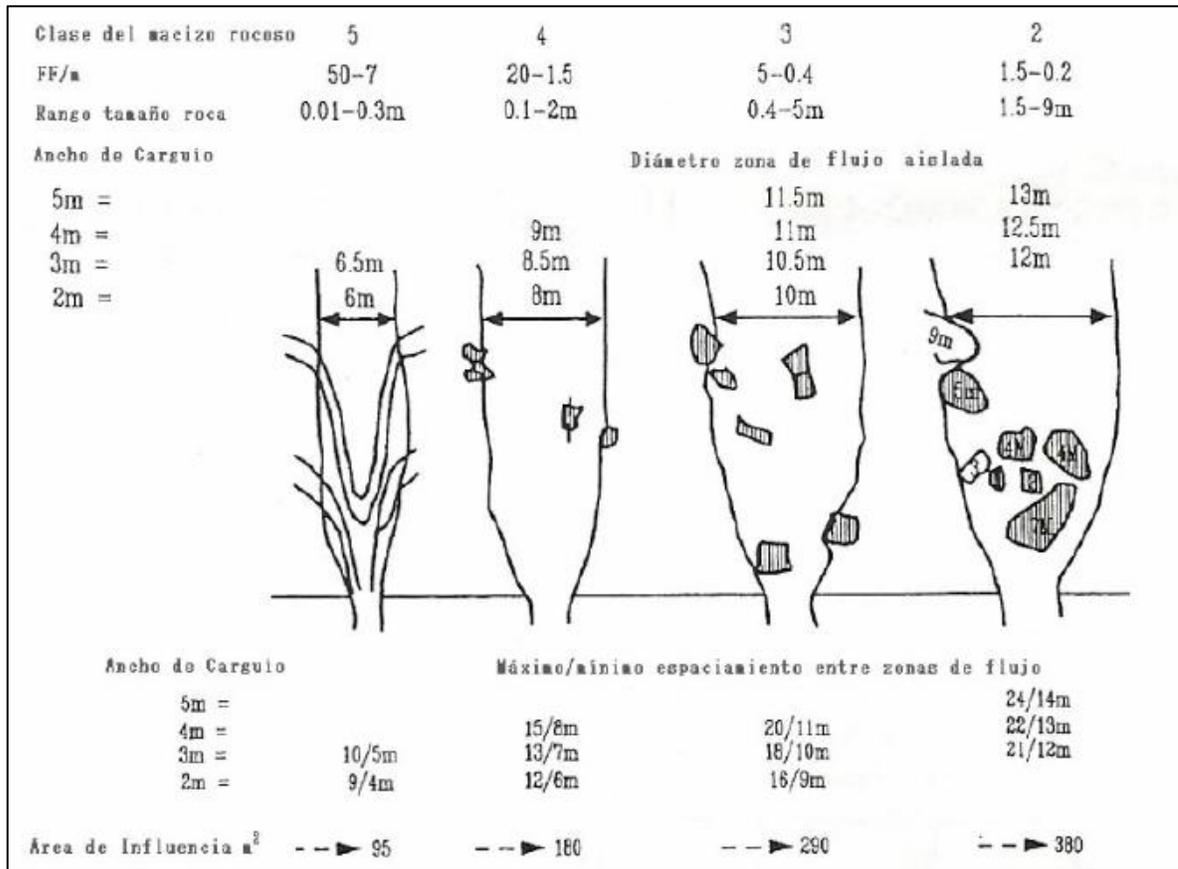


Figura 16 Abaco de Laubcher para determinar espaciamiento entre puntos de extracción (Laubcher, 1994)

Este resultado se ingresa en la curva de la Figura 17, propuesta por el mismo autor, donde se ingresa con el rating máximo y la diferencia de rating en la columna de primario de la roca para luego cortar en la curva del espaciamiento optimo, y entrega como resultado la altura de interacción (HIZ)

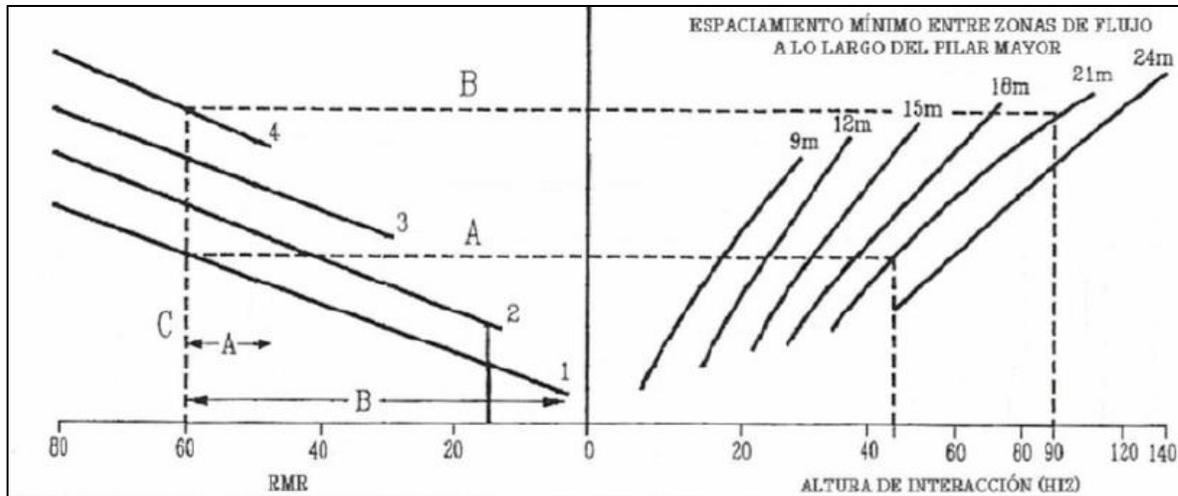


Figura 17 Curva para determinar la altura de interacción, HIZ (Laubcher, 1994)

Determinar el espaciamiento óptimo entre puntos de extracción en base a recuperación minera, tomando en cuenta el concepto de altura de interacción HIZ fue propuesto por Castro (2012). La Figura 18 muestra un esquema de la estimación de la altura de interacción (HIZ) entre los flujos producidos por la extracción desde un punto de extracción, y el tonelaje remanente debido al traslape.

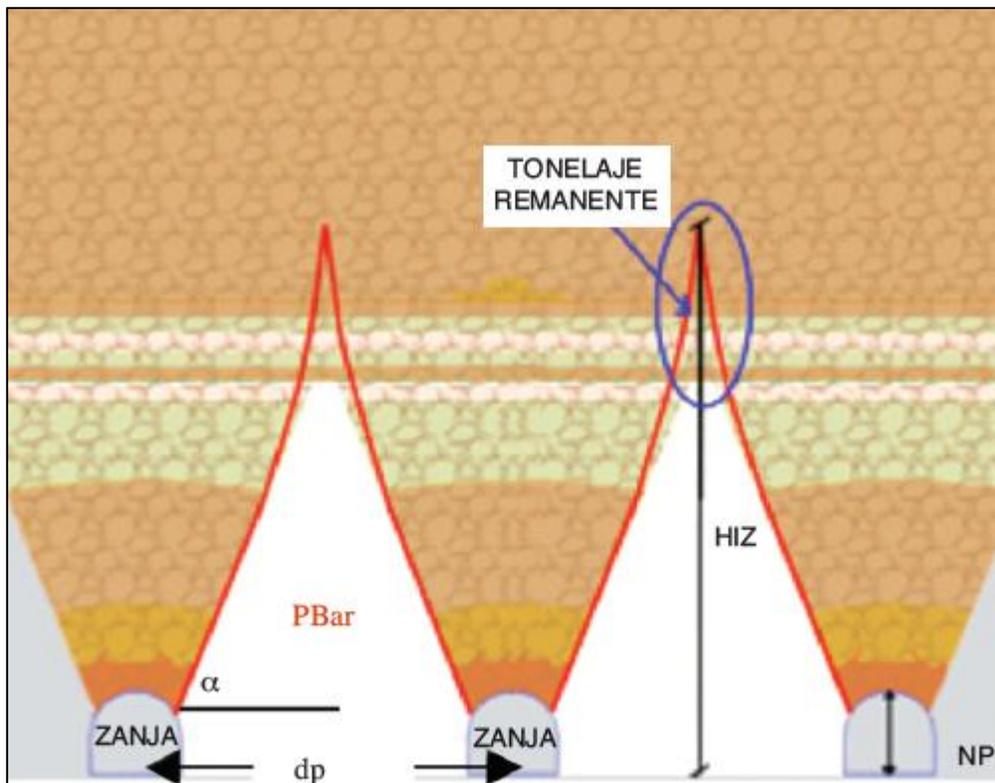


Figura 18 Tonelaje remanente debido a la interacción entre zonas de flujo adyacentes (Castro, 2012)

Según Castro (2012), de la zona de flujo desarrollada por el tiraje de un punto de extracción, se puede estimar la altura de interacción HIZ mediante la Ecuación 3:

$$HIZ = \left[\frac{d_p - w_p}{2} \right] \tan(\alpha)$$

Ecuación 3 Estimación de la altura de interacción (Castro, 2012)

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$$

Ecuación 4 Ángulo de flujo en función del ángulo de fricción (Vargas, 2010)

Donde HIZ es la altura a la cual interactúan dos zonas de flujo adyacente, medida desde el techo del nivel de producción, d_p corresponde a la distancia entre puntos de extracción y w_p al ancho del punto de extracción, α corresponde al ángulo de flujo del mineral, el cual está en función del ángulo de fricción propio del material (ϕ).

El tonelaje remanente, implica una pérdida de eficiencia del método (Sotomayor, 2016). Esta pérdida permite estimar la recuperación minera asociada al método de Block/Panel Caving, la que puede calcularse mediante la Ecuación 5.

$$\text{Recuperación Minera [\%]} = \frac{\text{ton}_{columna} - \text{ton}_{remanente}}{\text{ton}_{columna}} * 100$$

Ecuación 5 Estimación de la recuperación minera

2.5. Comportamiento de materiales granulares

El comportamiento de los materiales granulares, está relacionado con la interacción que existe entre sus partículas, las cuales se pueden clasificar en: fuerzas electrostáticas y adhesivas, cohesión capilar y fuerzas de Van der Waals (Andreotti et al. 2014).

El material granular puede definirse como un conglomerado de partículas macroscópicas discretas. En el caso de no haber cohesión entre ellas, la forma queda determinada por las condiciones de borde y la fuerza de gravedad. Ahora, si el material está seco, o existe una cantidad muy pequeña de humedad, entonces es posible omitir las fuerzas electrostáticas, aerodinámicas y capilares y es posible hablar de material seco sin cohesión. En el caso de minería de caving, considerando una baja cantidad de finos y/o humedad presentes, se puede obviar la cohesión entre ellas. Esto debido a que dichos factores tienden a favorecer la cohesión entre las partículas (Gómez, 2014).

Para el caso del problema a escala mina, las fuerzas dominantes son la fuerza de gravedad y de fricción. Estas mismas fuerzas son las que deben ser consideradas al modelar el problema en un experimento a escala más pequeña. Sin embargo, con la presencia de partículas de bajo tamaño, aparecen otras fuerzas que deben ser cuantificadas para lograr un buen entendimiento del fenómeno a estudiar, y así elegir el tamaño correcto de las partículas (Castro, 2001).

2.6. Análisis de similitud

La efectividad de un modelo reducido depende del grado de similitud que tiene este con respecto al prototipo (Castro, 2006). Bajo este contexto, el modelamiento físico puede definirse como el uso de sistemas físicos reducidos representativos para el entendimiento de un fenómeno definido (Pineda, 2012).

Existen tres tipos de similitud las cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Tipos de similitud

Similitud Geomecánica	La distancia entre los puntos homólogos está dada por un factor de escala λ_L .
Similitud Cinemática	Cuando dos eventos homólogos ocurren a una constante de tiempo λ_T como factor de escala.
Similitud Dinámica	Cuando la razón entre la inercia y cualquier fuerza externa es constante entre modelo y prototipo.

Las similitudes mencionadas anteriormente, pueden relacionarse con procesos y eventos que ocurren en minería de caving, y que tienen especial repercusión en los modelos considerados en la presente investigación. Así, un análisis de similitud muestra que el flujo gravitacional en el modelo físico y el prototipo pueden ser similares si cumplen las similitudes mencionadas de la siguiente forma (Castro, 2006; López, 2016):

- Similitud geométrica: Esto incluye las dimensiones de la columna (altura y área), dimensiones del punto de extracción y la distribución de tamaños del material.
- Similitud cinemática: Esto incluye la tasa de extracción.
- Similitud dinámica: Para validar este tipo de similitud se deben cumplir las siguientes condiciones:
 - Partículas del material contenido en el modelo deben poseer la misma distribución granulométrica que las del prototipo.
 - Partículas del modelo deben poseer la misma masa específica, coeficiente de Poisson y módulo de elasticidad que el prototipo.
 - El material usado en el modelo debe tener el mismo ángulo de fricción que el prototipo.

La Tabla 3, muestra las variables que pueden ser escaladas a un modelo físico, de la cuales, largo, área, volumen, peso, por ejemplo, son de especial estudio para la presente investigación.

Tabla 3 Factores de escala en análisis de similitud (Pineda, 2012)

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

2.7. Colgadas en puntos de extracción

Existen numerosos estudios asociados al flujo en silos y piques de traspaso, los cuales se han utilizado para definir reglas y ciertas aproximaciones y así poder predecir de cierta forma la frecuencia de las colgadas. Una de las reglas más conocidas es la cual relaciona el tamaño máximo de partícula (d) con la abertura de la estructura (D). Ésta relación permite predecir la posible condición de flujo que se puede tener en un sistema de traspaso de mineral (Gómez, 2014). La Tabla 4 muestra las reglas definidas.

Tabla 4 Relación entre frecuencia de colgadas y razón D/d

Razón	Frecuencia de colgadas
$D/d > 5$	Baja
$5 > D/d > 3$	Probable
$D/d < 3$	Muy Alta

Una colgada corresponde a la formación de un arco estable de rocas o bloques que obstruyen un punto de extracción, impidiendo el libre flujo gravitacional lo cual provoca que se cierre (Gómez, 2014). Las colgadas con tamaños gruesos generalmente son llamadas arcos mecánicos.

CAPITULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La formación de arcos en materiales gruesos, tal como, mineral y estéril, puede resultar en problemas operacionales en minas de caving y son mucho más frecuentes que los arcos continuos. Estos arcos se pueden formar en cualquier sector sobre la zona de extracción y estudios en silos indican que éste tipo de arcos en materiales gruesos tienen una forma parabólica, como se puede observar en la Figura 19.

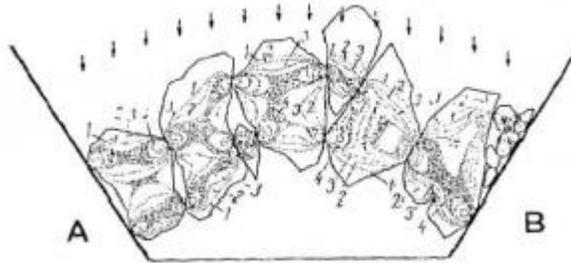


Figura 19 Esquema de formación de arco mecánico (Kvapil, 2008)

La parte inferior de una batea generalmente tiene muros inclinados en un ángulo α . La altura del arco será menor si la inclinación de los muros es más pronunciada. Además, el ángulo α puede afectar a la zona de concentración de esfuerzos, debido a que si los muros son más inclinados entonces la zona de concentraciones de esfuerzos puede aumentar significativamente.

La Figura 20 muestra la altura del arco como función de la inclinación de los muros, se muestran, además, la distribución de esfuerzos formadas debajo del arco para el caso de un arco alto y un arco bajo (Kvapil, 2008).

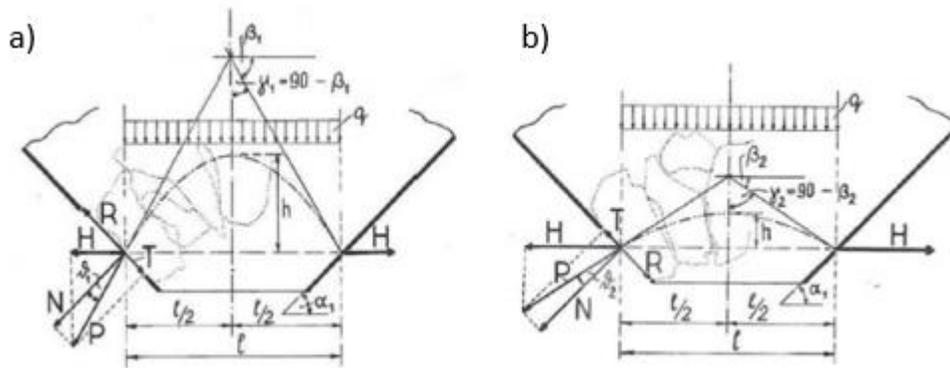


Figura 20 Diagrama de fuerzas en un arco mecánico. a) Arco alto b) Arco bajo

Según Kvapil (2008) la formación de arcos sobre un punto de extracción con materiales gruesos está ligada a diversas causas, entre ellas se puede nombrar:

- La reducción de la apertura del punto de extracción, como la principal causa de la formación de arcos.
- La capa inferior de bloques se tranca en la salida del material.
- La línea media de un arco tiene forma parabólica.
- La altura del arco depende de la inclinación de los muros del punto de extracción.
- Al disminuir la altura del arco se incrementan los esfuerzos en los muros del punto de extracción.
- Punto de extracción con muros excesivamente inclinados son peligrosos en operación ($\alpha > 60^\circ$).
- El arco se forma más fácilmente si la movilidad del material grueso es baja.

- Arcos planos pueden ser formados si las partículas son más irregulares y fuertes.
- Los arcos se forman más fácilmente si los bloques de rocas son más grandes.
- Una apertura pequeña facilita la formación de arcos y una apertura grande la reduce.

2.8. Modelos físicos

Como se nombró anteriormente, diversos estudios en modelos físicos se han realizado para entregar un conocimiento mayor a las variables involucradas en la minería de caving. A continuación se muestra un resumen de las variables estudiadas y los principales resultados obtenidos del modelamiento físico de los experimentos nombrados en la sección 1.2.

- Fuenzalida (2012). Su trabajo aportó una mejora al entendimiento de flujo gravitacional confinado, él varió el tamaño característico del material y la carga aplicada sobre el flujo. Esto a través del uso de la prensa hidráulica. Dentro de sus principales resultados se encuentran:
 - El material grueso tuvo mayor compactación que el material fino.
 - A mayor esfuerzo vertical, mayor fue el índice de ruptura y mayor esfuerzo radial ejercido por el material.
 - Al aumentar el esfuerzo vertical, la altura de extracción disminuye.
 - A mayor esfuerzo vertical, disminuye el flujo libre del material.
- Orellana (2012). Dentro de sus variables de estudios, se encontraba la sección de la galería zanja, la altura de la batea y la resistencia a la compresión uniaxial. Sus principales conclusiones fueron:
 - Una disminución de la sección de la galería zanja disminuye la masa entre colgaduras.
 - El aumento de la altura de la batea disminuye la masa entre colgaduras.
 - Aumento del UCS del material disminuye la masa entre colgaduras.
- Gómez (2014). Analizó las colgaduras y llegó a un modelo predictivo de colgaduras. Además realizó un estudio y modelo de la fragmentación secundaria. Dentro de sus conclusiones se encuentran:
 - Un aumento del esfuerzo vertical disminuye la masa entre colgaduras.
 - Aumento del esfuerzo vertical aumenta la altura de las colgaduras.
 - La extracción alternada entre los puntos de extracción de una batea aumenta la frecuencia de colgaduras pero disminuye su altura.
- Olivares (2014). Fue una continuación al trabajo realizado por Fuenzalida (2012). Pero esta vez considero la humedad y la presencia de finos. Dentro de sus resultados se tiene:
 - La presencia de humedad y finos disminuye de forma significativa la capacidad de flujo del material, aumentando las colgaduras.
- López (2016). Él realizó un estudio en un modelo físico similar al de la presente investigación, donde sus variables a estudiar fueron el largo y altura de la batea, el ángulo de la zanja batea y la granulometría. Sus principales conclusiones fueron:
 - La disminución del largo de la batea aumenta la masa entre colgaduras.
 - El aumento de la altura de la batea disminuye la masa entre colgaduras.
 - El aumento del ángulo de la batea aumenta la masa entre colgaduras.
 - El aumento de la granulometría disminuye la masa entre colgaduras.
- Sotomayor (2016). En base al estudio experimental, realizó una recomendación de malla para el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. Sus principales conclusiones fueron:
 - El uso de una batea larga reduce los eventos de colgadura respecto a una batea más corta.
 - El largo de la batea y la granulometría se consideran como las variables más influyentes.
 - Se recomienda el uso de la malla 16x20 [m], dado que reduce la frecuencia de colgaduras con respecto a la 16x15 [m].
- Abarca (2016). Similar al trabajo realizado por Gómez (2014), acerca de la aplicación de un modelo de fragmentación secundaria, pero esta vez aplicado al Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. Dentro de sus principales resultados se encuentran:

CAPITULO 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

- Las características propias del material tienen una gran influencia en el proceso de fragmentación secundaria, como el test de carga puntual y el factor de forma, específicamente la redondez.
- A mayor resistencia a la carga puntual, menor es la fragmentación.
- A mayor redondez del material, menor es la reducción.

2.9. Conclusiones del capítulo

- Los aspectos relacionados a la socavación son de suma importancia para la experimentación realizada. Esto debido a que es una componente importante para asegurar el éxito en el proceso de caving.
- Fue importante establecer las características, ventajas y desventajas asociadas a los diseños de socavación considerados en la actualidad, de manera de establecer una hipótesis de trabajo relacionada con la productividad y presencia de sobretamaños en etapas tempranas de la producción de un punto de extracción.
- Con respecto al flujo gravitacional, conocer la teoría detrás del comportamiento del material granular es de suma importancia al momento de diseñar y buscar las variables importantes para realizar los experimentos.
- Aspectos claves como la influencia del tamaño y forma de partículas en la forma del elipsoide de extracción serán analizadas y corroboradas en los experimentos, tal como se menciona en el capítulo siguiente, mediante marcadores.
- El flujo gravitacional está gobernado principalmente por fuerzas como la gravedad y fricción entre partículas. Existen otras fuerzas que afectan el comportamiento del material, las que se relacionan con la presencia de material fino y la cohesión, las que deben ser consideradas y evaluadas para poder diseñar de la mejor manera los modelos a experimentar.
- Las colgaduras en puntos de extracción impiden el libre flujo del mineral, provocando interrupciones en el proceso productivo, ya sea por cierre de calles, reducción secundaria, u otro, lo que afecta la productividad de la minería de caving.
- Diversos estudios de colgaduras y flujo gravitacional se ha estudiado en modelos físicos, donde variables como la altura de socavación no han sido estudiadas, siendo esto la motivación del presente trabajo.

CAPITULO 3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Introducción

Para cumplir con los objetivos planteados se contó con una metodología experimental, la cual incluye los estudios de *benchmarking* que se realizaron para establecer las bases de los experimentos en cuanto a las alturas de socavación y sus diseños. Se describe además el equipo de laboratorio utilizado, la preparación de cada experimento y la forma en la cual se realizaron los. Finalmente, se incluye un plan experimental que muestra en detalle cada experimento a realizar con sus variables a estudiar.

3.1. Benchmarking alturas de socavación

Los diseños actuales de socavación, son en general el resultado de un proceso continuo de acumulación de experiencia y conocimiento operacional (Rivero, 2008). Para poder establecer criterios necesarios para el análisis experimental, fue necesario realizar un Benchmarking de las alturas de socavación usadas durante los años, para poder establecer su relevancia para la posterior experimentación. La Tabla 5 muestra el resultado de este Benchmarking, donde el detalle de los diseños se encuentra en el Anexo A.

Tabla 5 Benchmarking alturas de socavación (modificado de Rivero, 2008)

Mine	Altura Socavación [m]	Distancia N. Hund-Prod [m]
Andina	12	14
Salvador	3	16
Esmeralda	15.6	18
Dacita	19	-
Finsch	12	20
DOZ	6.5	20
Henderson	18.3	18
Northparkes lift 1	42	18
Northparkes lift 2	4	14
Northparkes E48	4	20
Palabora	4	18
Cadia East	20	26
Ridgeway Deeps	4	18.5
Premier Diamond	4	15

3.2. Diseño del modelo físico

La escala utilizada para escalar el problema a escala mina, es la escala 1:50. Esta fue seleccionada en trabajos anteriores, donde se determinó que dicho factor representa de manera suficiente los procesos que ocurren en la escala mina, y que son considerados en la presente investigación (Sotomayor, 2016).

Las dimensiones del modelo físico involucran a la caja, la cual representa a la columna de mineral de 50 m, y la batea, con la respectiva dimensión del nivel de producción.

3.2.1. Dimensiones de la caja

Las dimensiones de la caja, correspondiente a la representación de una columna de extracción de 50 m en escala mina, y altura de 1 m en escala laboratorio (escala 1:50), se muestran en la Figura 21, la cual es un esquema en dos dimensiones del modelo físico, con sus respectivas dimensiones en escala laboratorio y escala mina entre paréntesis. El lado izquierdo muestra una vista lateral, y el lado derecho una vista frontal.

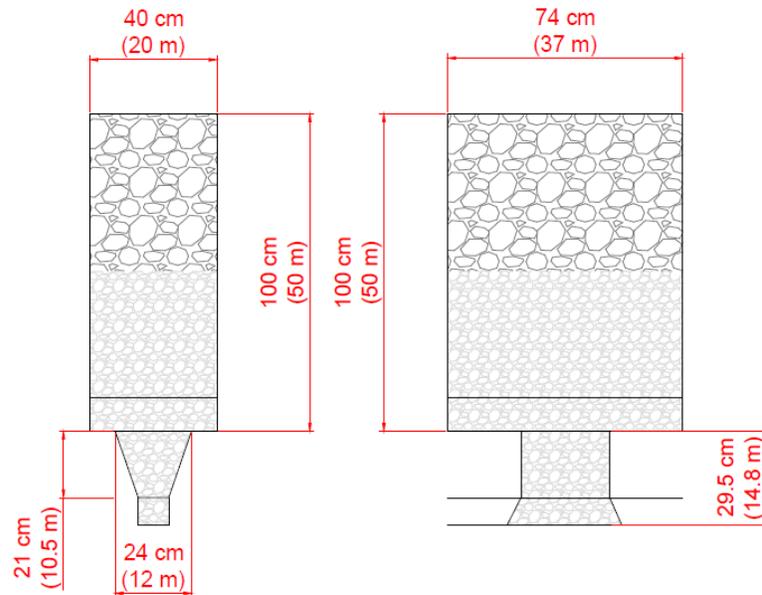


Figura 21 Escala del modelo físico a escala laboratorio (escala mina) (vista 2D)

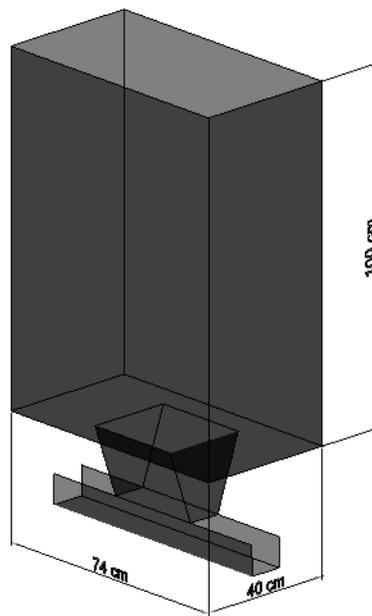


Figura 22 Vista 3D Modelo experimento

3.2.2. Batea

La dimensión de la batea se muestra a continuación, tanto en escala mina como laboratorio.

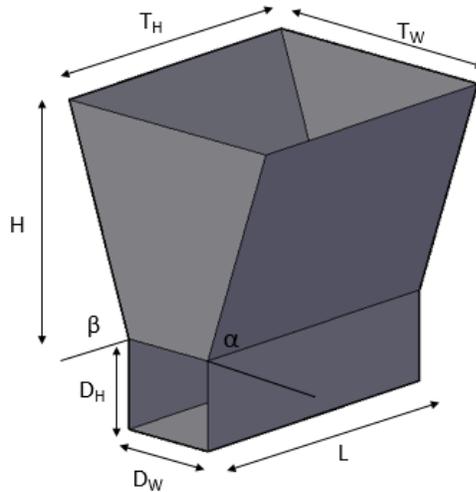


Figura 23 Dimensiones de la batea. Vista 3D

Tabla 6 Dimensiones de la batea

Escala laboratorio (Escala mina)							
L	H	Tw	TH	Dw	DH	Alpha	Beta
28 cm (14 m)	21 cm (10.5 m)	24 cm (12 m)	28 (14 m)	9.6 cm (4.8 m)	8.5 cm (4.25 m)	71.1°	90°

3.3. Sistema de extracción

El sistema de extracción emula una pala LHD que opera en un punto de extracción. Para el caso del experimento de esta investigación, el ancho de galería de los puntos de extracción tiene las siguientes dimensiones en escala mina y laboratorio.

Tabla 7 Dimensiones galerías nivel de extracción

	Ancho	Alto
Escala mina	4.8 m	4.25 m
Escala laboratorio 1:50	9.6 cm	8.5 cm

De esta forma, se considera un equipo de extracción de 14 yd³, correspondiente a un equipo Sandvik LH621, como se muestra en la Figura 24. En la Figura 26, se muestra el sistema LHD con el balde escalado para el modelo de laboratorio (1:50).



Figura 24 LHD Sandvik LH621

El sistema de extracción corresponde a un sistema mecanizado de palas controladas por el usuario a cargo de la extracción. Donde es posible tener el control de ambas palas que extraen desde los dos puntos de extracción por medio de un control eléctrico (ver Figura 27) que permite iniciar el movimiento, el carguío, la descarga y la detención de la pala. La secuencia de extracción corresponde a extracción uniforme, desde un punto a la vez, como lo muestra la Figura 25.

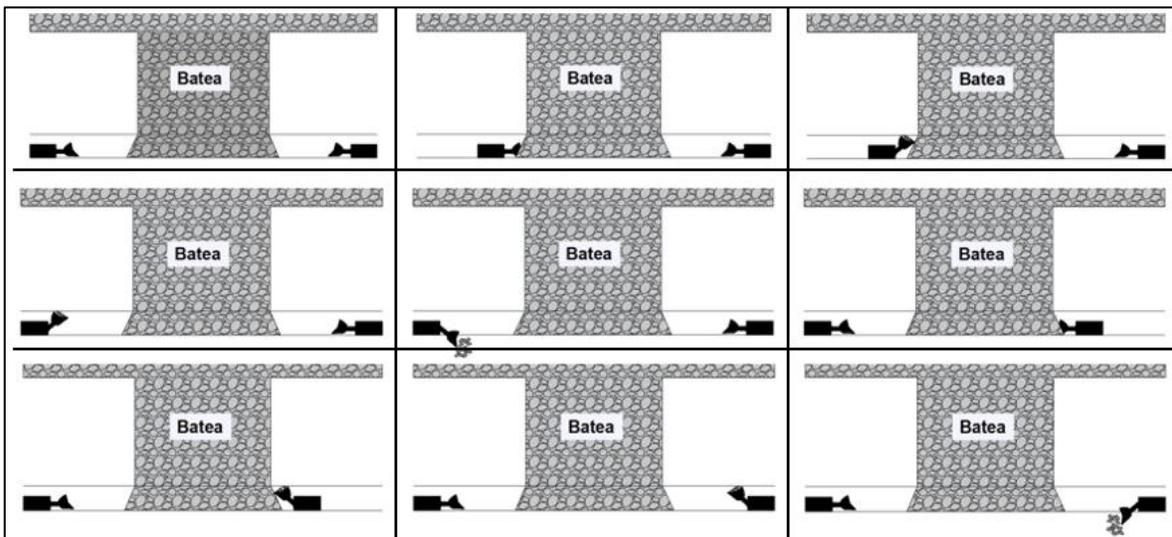


Figura 25 Secuencia de extracción de los experimentos

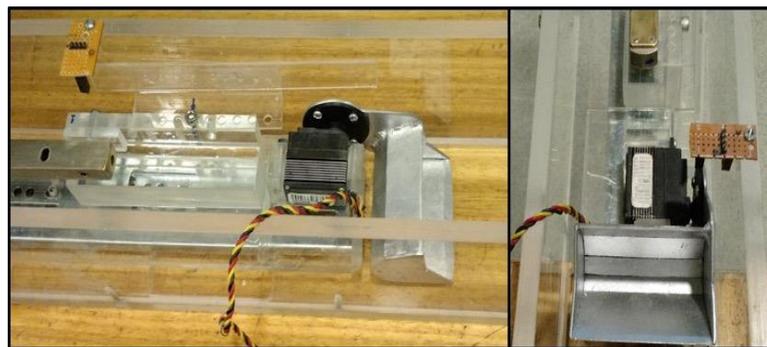


Figura 26 LHD Laboratorio

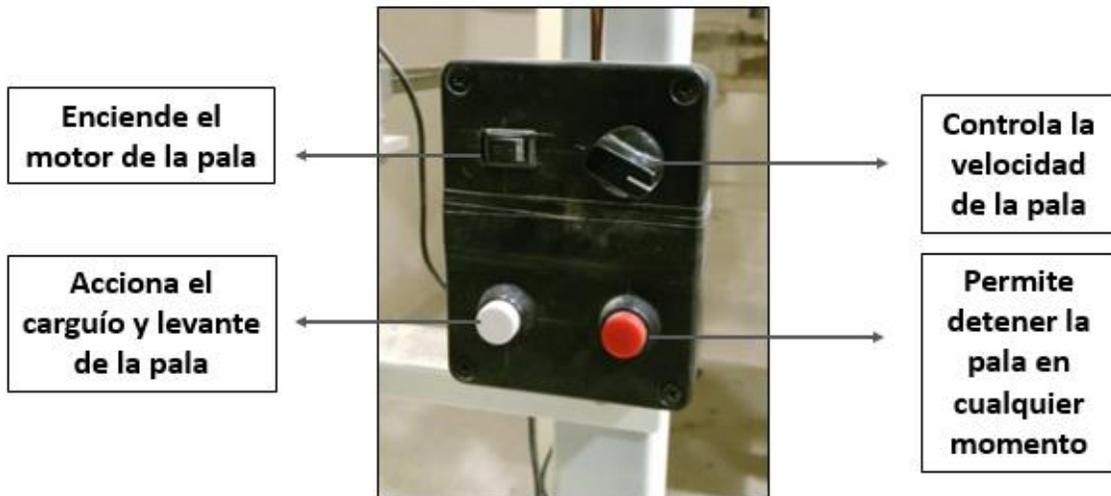


Figura 27 Control eléctrico de las palas

3.4. Curvas granulométricas

Para el presente estudio se consideró la curva de fragmentación Primaria de los macrobloques centrales del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) (Sotomayor, 2016), mientras que la curva de fragmentación representativa del material socavado fue obtenida con la herramienta *Fragmento* del software de simulación de tronadura JKSimblast (la metodología se encuentra en Anexo). En la Figura 28, se muestran las curvas a considerar en los experimentos. Estas fueron escaladas a la escala laboratorio para luego aplicarlas en la preparación del material.

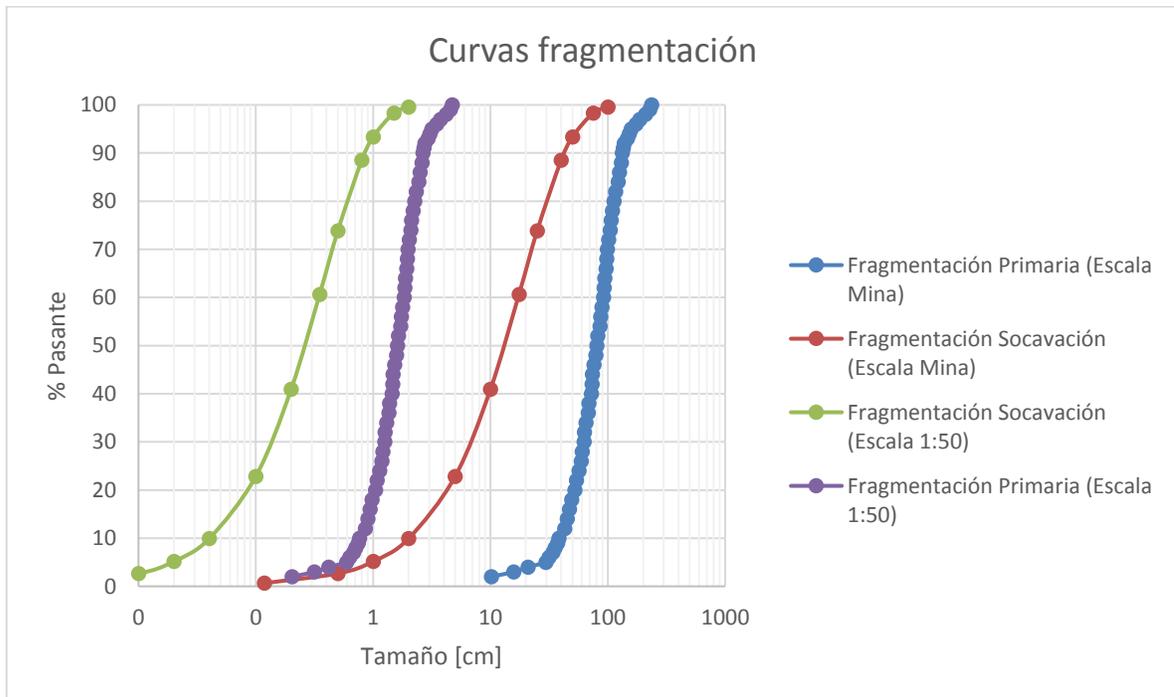


Figura 28 Curvas granulométricas

El detalle de los tamaños característicos d_{20} , d_{50} , d_{80} para ambas curvas se muestran en la Tabla 8 y Tabla 9, tanto para la escala mina como para la escala laboratorio. Se puede observar que el tamaño d_{80} de la curva primaria es aproximadamente 4 veces el d_{80} de la curva de socavación.

Tabla 8 Tamaños característicos de las curvas granulométricas. Escala mina

Escala Mina	d20 [cm]	d50 [cm]	d80 [cm]
Curva Primaria	52.4	80.5	112.8
Curva Socavación	4.1	13	30.3

Tabla 9 Tamaños característicos de las curvas granulométricas. Escala 1:50

Escala Laboratorio (1:50)	d20 [cm]	d50 [cm]	d80 [cm]
Curva Primaria	10.5	16.1	22.6
Curva Socavación	0.8	2.6	6.1

3.5. Caracterización del material

El material utilizado en los experimentos corresponde a mineral proveniente del dominio geológico cuarzo igual a sericita (QIS) del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS). Este material corresponde a un dominio representativo del sector a explotar del proyecto.

Abarca (2016) y Sotomayor (2016) realizaron estudios con material proveniente del mismo dominio geológico (QIS). Las principales características se resumen a continuación:

Tabla 10 Caracterización del material (Abarca, 2016)

Esfericidad	0.68
Redondez	0.20
Carga puntual [MPa]	1.66

Por otro lado las curvas de distribución granulométrica utilizadas en los experimentos pueden ser descritas a través de los coeficientes de uniformidad y curvatura.

Craig (2004), define estos coeficientes de acuerdo a las ecuaciones:

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

Ecuación 6 Coeficiente de uniformidad (Craig, 2004)

$$C_z = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}}$$

Ecuación 7 Coeficiente de curvatura (Craig, 2004)

Donde d_{10} , d_{30} , d_{60} representan los tamaños bajo los cuales se encuentra el 10%, 30% y 60% de las partículas, respectivamente. Se tiene que a mayor índice de uniformidad, mayor es el rango de tamaño de

las partículas, y que un coeficiente entre 1 y 3 indica una buena gradación de las partículas (Craig, 2004). A continuación se muestran los tamaños característicos necesarios para estimar los coeficientes, y el valor de estos.

Tabla 11 Índice de uniformidad y curvatura

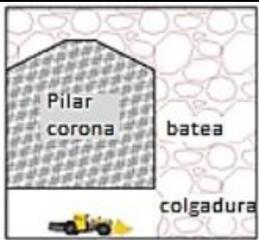
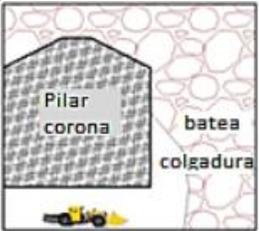
Tamaño característico	Curva	
	Socavación	Primaria
d10	0.05 cm	0.77 cm
d30	0.15 cm	1.26 cm
d60	0.35 cm	1.83 cm
Cu	7.78	2.38
Cz	1.43	1.13

Los índices de uniformidad indican un mayor rango de tamaño de partículas en la curva de socavación y un menor rango para la curva Primaria.

3.6. Colgaduras

Como se mencionó anteriormente, la investigación involucra la influencia de las colgaduras en la productividad de los puntos de extracción. Para la realización de los experimentos, se consideraron tres tipos de colgaduras, diferenciadas básicamente por su altura. La Tabla 12 muestra una descripción de los tipos de colgaduras consideradas en los experimentos.

Tabla 12 Tipos de colgadura (López, 2016)

Colgadura tipo	Descripción
	1 (en el punto de extracción)
	2 (en la batea)
	3 (sobre la batea)

Cuando no es posible seguir extrayendo material desde un punto de extracción este se define como colgado y se detiene la extracción, se registra que el punto está colgado, el tipo de colgadura de acuerdo a la tabla anterior y su altura. Un ejemplo de la planilla para la realización de los experimentos se muestra en el ANEXO D.

El registro de las colgaduras y su masa asociada permite estimar la frecuencia de colgaduras asociada medida como un índice de colgaduras, esto de acuerdo a la Ecuación 8.

$$\text{Índice de colgaduras} = \frac{\text{Numero de colgaduras}}{1,000 \text{ toneladas}}$$

Ecuación 8 Índice de colgaduras

Como se mencionó anteriormente, el uso de acrílico como material de la caja de la realización de los experimentos, permite visualizar el comportamiento del flujo del material, y también la formación de las colgaduras. Sin embargo, las colgaduras tipo 3 (sobre la batea) no sería posible observarlas. La altura de la colgadura se mide desde la visera hasta la parte más alta del arco que forma a la colgadura.



Figura 29 Colgaduras tipo 1 y 2 observadas en los experimentos

3.7. Zonas de extracción

Las zonas de extracción y de movimiento, como se mencionó en el capítulo anterior, corresponden a las zonas IEZ e IMZ respectivamente. Para tener una estimación de su comportamiento en los experimentos, se utilizan marcadores (o trazadores), los cuales son representados por partículas correspondientes al tamaño medio de las curvas granulométricas utilizadas en los experimentos (d_{50}). Es decir, por cada experimento, se tienen marcadores dispuestos para la zona de socavación, que tienen un tamaño correspondiente al d_{50} de su curva, y marcadores para la zona superior, es decir el material hundido. Cada uno de estos marcadores posee un color (de acuerdo si es parte de la socavación de material hundido) y un código o ID que lo identifica de acuerdo a su posición dentro del modelo.

La disposición de estos en el modelo sigue la siguiente configuración:

- En zona socavación
 - Capa marcadores cada 5 cm
 - Espaciamiento 6x6 cm
- En zona sobre socavación:
 - Capa de marcadores cada 10 cm
 - Espaciamiento 6x6 cm

Mientras se realiza el experimento, los trazadores salen en los puntos de extracción y se registra su salida y la masa asociada a cada ciclo, esto permite generar una matriz que relaciona la posición inicial y final del marcador con la masa acumulada al momento de su extracción. En la Figura 30 se muestra como ejemplo la disposición de los marcadores en el experimento con altura de socavación de 4 m.

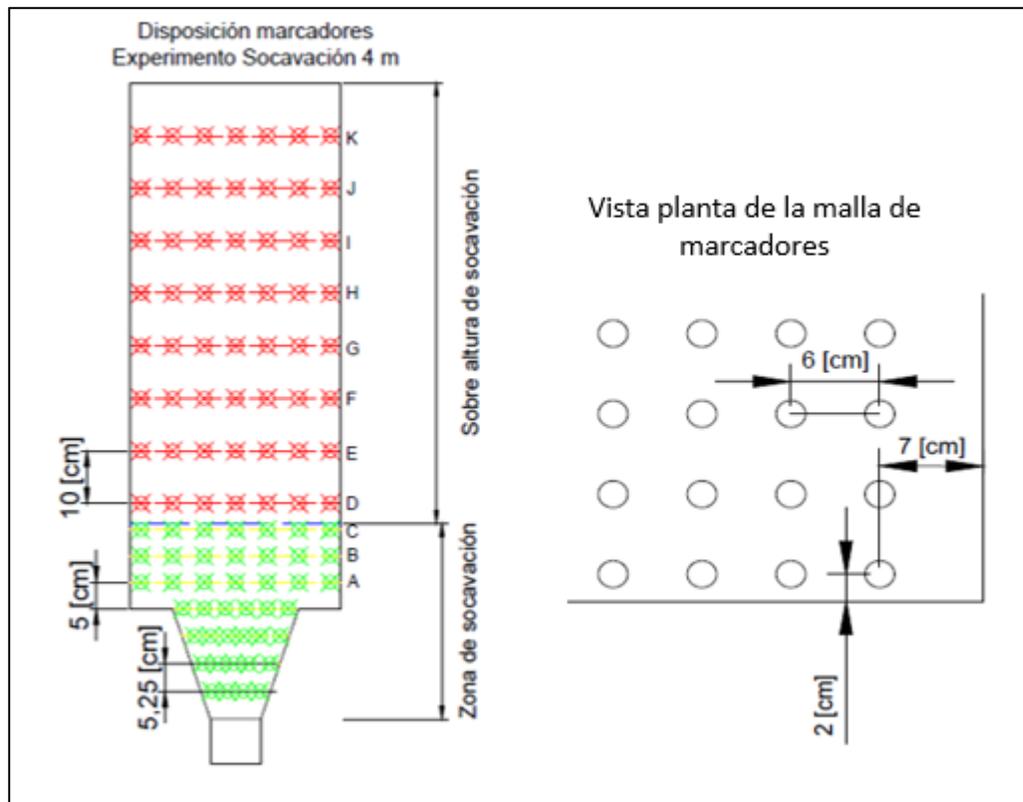


Figura 30 Disposición de marcadores en los experimentos. A la izquierda una vista en planta de la malla y la derecha una vista lateral.

Con la información de los marcadores es posible realizar una interpolación en función de la masa acumulada registrada al momento de la extracción o salida del marcador, con ello se puede obtener la forma de los elipsoides de extracción y así estimar la altura de interacción entre elipsoides adyacentes.

3.8. Procedimiento experimental

Para obtener los resultados, es necesario seguir el mismo protocolo para cada experimento, de manera de replicar de la mejor forma las condiciones en que cada uno se llevó a cabo. A continuación se describen los pasos seguidos en cada uno, posteriormente, se muestra un esquema del procedimiento experimental a seguir correspondiente a la presente investigación.

- Primero se cargó el modelo con el material preparado previamente. Fue importante en esta etapa considerar las dos granulometrías presentes en el modelo, y la cantidad de material a cargar correspondiente a cada una, tomando en cuenta la altura de socavación respectiva. Es decir, para cada experimento la masa de material socavado fue diferente.
- Durante la etapa de carguío, se posicionaban los marcadores con la configuración descrita en la sección anterior.
- Cada 10 cm, se agregaba una capa de material pintada previamente con un color, lo que representa las líneas de flujo.
- Comienza la etapa de extracción, donde alternadamente se extraía material desde cada punto de extracción, donde se anotaba la masa extraída, la presencia de sobretamaño y marcadores (ver ANEXO D).

- En caso de producirse una colgadura, esta era registrada según su tipo y la altura respectiva. Luego el descuelgue se realizaba manualmente.
- El experimento terminaba al realizar 1300 extracciones (o ciclos) por punto.

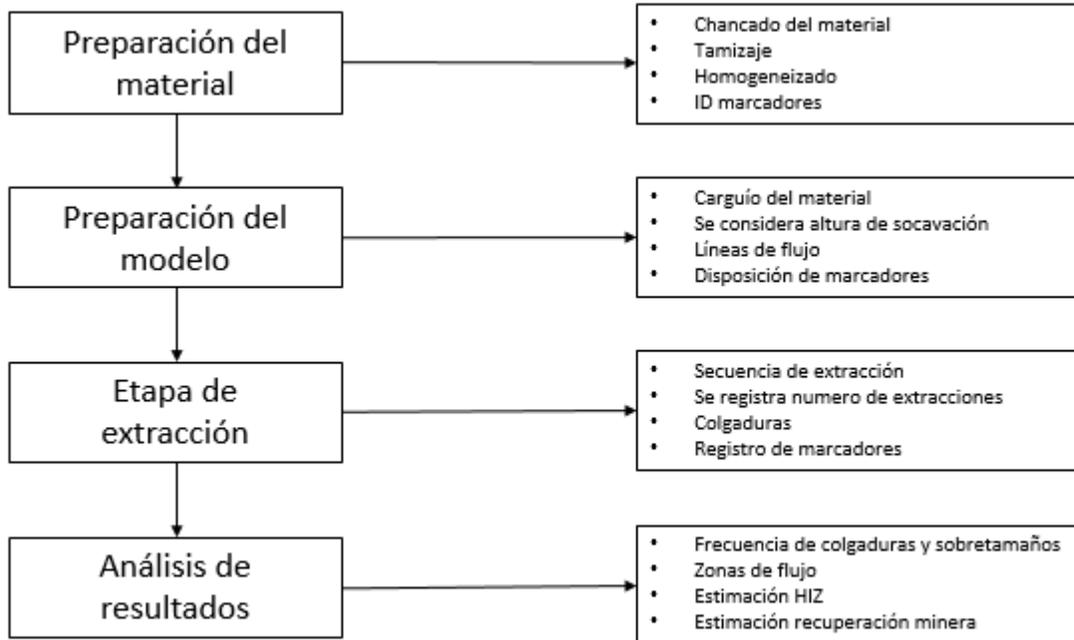


Figura 31 Procedimiento experimental

3.9. Plan experimental

En la Tabla 13, se resumen los experimentos a realizar con sus respectivos objetivos y configuraciones. En la Figura 32, se muestra el esquema del modelo físico, donde se puede apreciar la altura de socavación a variar H_{soc} .

CAPITULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Tabla 13 Plan experimental

Experimento	Socavación	Altura Socavación (Hsoc)	Objetivo
1	Baja	4 m	El objetivo de este experimento es cuantificar el flujo, toneladas de mineral entre colgaduras y recuperación minera considerando un tipo de socavación baja.
2	Alta	20 m	El objetivo de este experimento es cuantificar el flujo, toneladas de mineral entre colgaduras y recuperación minera considerando un tipo de socavación alta de 20 m.
3	Alta	40 m	El objetivo de este experimento es cuantificar el flujo, toneladas de mineral entre colgaduras y recuperación minera considerando un tipo de socavación alta, con una altura de 40 m.

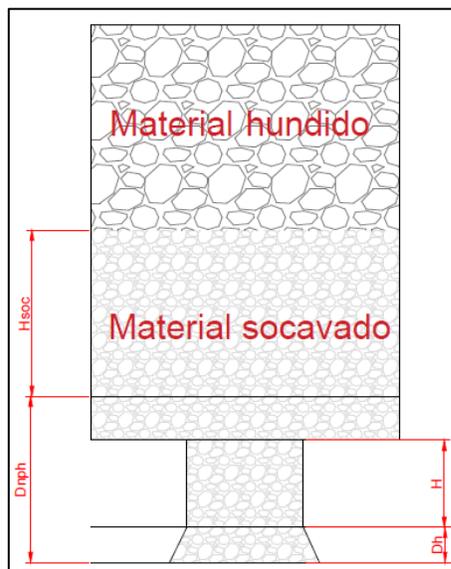


Figura 32 Esquema del modelo físico con las dimensiones de la altura de socavación a variar

Donde,

H_{soc} : es la altura de socavación a variar, medida en metros.

D_{nph} : corresponde a la distancia entre el nivel de producción y hundimiento, igual a 18 m.

H : es la altura de la batea, igual a 10.5 m.

D_h : altura de la galería, igual a 4.25 m.

3.10. Conclusiones del capítulo

- La metodología experimental propuesta se diseñó para cumplir con los objetivos propuestos en el Capítulo 1, y fue capaz de cubrir toda la problemática presente, y dar respuesta a los objetivos planteados.
- El benchmarking realizado para alturas de socavación, involucra operaciones de minas de Block /Panel Caving donde no se evidencia una tendencia o predominancia en cuanto a los diseños de alturas. Tanto socavación baja como alta son utilizadas dependiendo de la estrategia de socavación elegida y de las condiciones propias de la mina.
- El material a utilizar en los experimentos corresponde a material mina. Esto entrega una mayor aproximación del modelo físico a la realidad al replicar las condiciones de las propiedades del material en el flujo.
- El sistema de extracción mecanizado pretende replicar la extracción que ocurre en la realidad. Esto para dar un acercamiento aun mayor al modelo experimental con lo que ocurre realmente.
- Lo referente a las curvas granulométricas, estas representan una estimación esperada con respecto al caso real, replicando los tamaños característicos esperados para una tronadura de socavación.

CAPITULO 4

RESULTADOS Y ANALISIS

4.1. Introducción

En este capítulo se muestran los resultados y el análisis correspondiente de acuerdo al plan experimental mostrado anteriormente para cada uno de los experimentos realizados, donde se obtuvieron resultados de masa (o tonelaje) entre colgaduras, zonas de extracción, altura de interacción (HIZ) y recuperación minera, para las diferentes alturas de socavación.

El montaje experimental se muestra en la Figura 33. En ella se puede apreciar ambas granulometrías con sus respectivos tamaños característicos d_{80} a escala laboratorio (1:50), los puntos de extracción y el control eléctrico de cada pala. Las figuras correspondientes a los otros experimentos se encuentran en el ANEXO E.

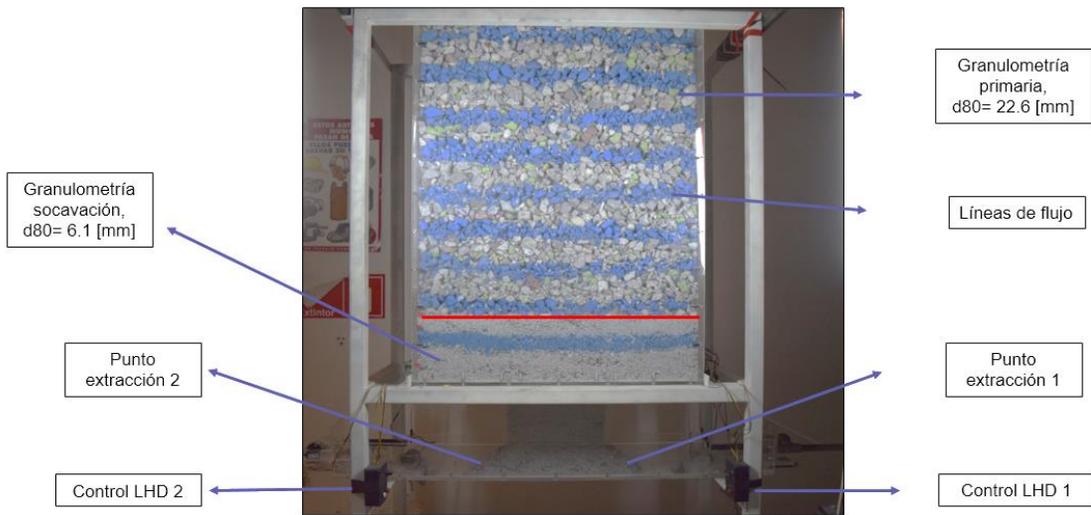


Figura 33 Montaje experimental, Experimento 1 (altura de socavación de 4[m])

4.2. Colgaduras

Los resultados de las colgaduras se presentan como tonelaje de material extraído entre eventos de colgaduras, y como índice de colgaduras (número de colgaduras cada 1,000 toneladas extraídas).

En la Figura 33, se muestra el índice de colgaduras cada 1,000 toneladas extraídas para los 3 experimentos realizados, en función del porcentaje de la columna de extracción. El porcentaje de la columna de extracción que fue posible extraer de los experimentos corresponde a las 1,300 extracciones mencionadas en el capítulo anterior, lo cual representa cerca del 35% para una columna de extracción de 150 m de altura. La Tabla 14 y Tabla 15, muestran el detalle de los resultados de las colgaduras.

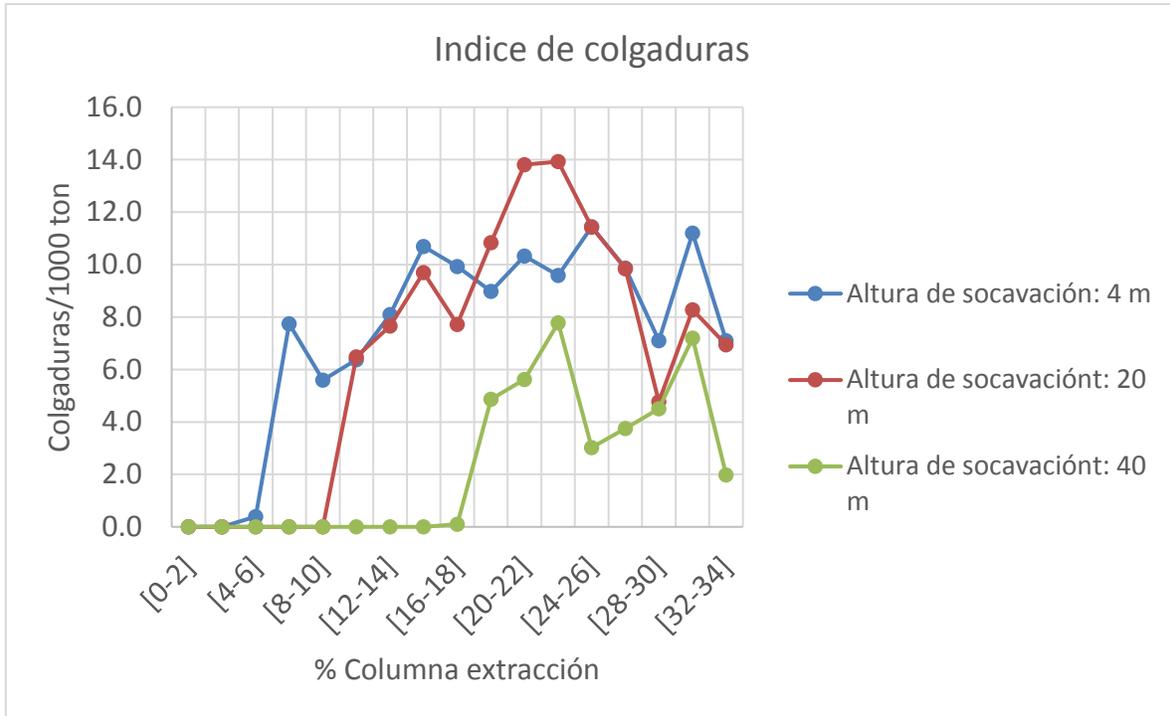


Figura 34 Índice de colgaduras en función del porcentaje de columna de extracción

Tabla 14 Tonelaje entre colgaduras

% Altura Columna	Tonelaje entre colgaduras		
	Experimento 1 Socavación 4 [m]	Experimento 2 Socavación 20 [m]	Experimento 3 Socavación 40 [m]
0 - 2	0	0	0
2 - 4	0	0	0
4 - 6	2543 ± 170	0	0
6 - 8	370 ± 327	0	0
8 - 10	367 ± 218	0	0
10 - 12	204 ± 118	5610 ± 2555	0
12 - 14	364 ± 138	194 ± 157	0
14 - 16	120 ± 71	120 ± 60	0
16 - 18	135 ± 95	153 ± 66	9438 ± 0.0
18 - 20	116 ± 24	108 ± 52	3474 ± 576
20 - 22	109 ± 38	107 ± 98	210 ± 101
22 - 24	119 ± 61	90 ± 44	175 ± 127
24 - 26	88 ± 11	115 ± 92	342 ± 87
26 - 28	101 ± 21	156 ± 150	267 ± 94
28 - 30	141 ± 23	326 ± 293	222 ± 109
30 - 32	89 ± 28	132 ± 43	139 ± 75
32 - 34	141 ± 19	168 ± 86	503 ± 230

Tabla 15 Índice de colgaduras

% Altura Columna	Colgaduras/ 1000 ton		
	Experimento 1 Socavación 4 [m]	Experimento 2 Socavación 20 [m]	Experimento 3 Socavación 40 [m]
0 - 2	0	0	0
2 - 4	0	0	0
4 - 6	0.4 ± 0.0	0	0
6 - 8	7.7 ± 8.0	0	0
8 - 10	5.6 ± 3.8	0	0
10 - 12	6.4 ± 3.6	6.5 ± 4.5	0
12 - 14	8.1 ± 5.1	7.7 ± 4.0	0
14 - 16	10.7 ± 5.4	9.7 ± 3.4	0
16 - 18	10.0 ± 4.7	7.7 ± 3.4	0.1 ± 0.0
18 - 20	9.0 ± 4.7	10.8 ± 4.0	4.9 ± 4.4
20 - 22	10.3 ± 4.0	13.81 ± 7.3	5.6 ± 2.1
22 - 24	9.6 ± 2.7	13.9 ± 6.6	7.8 ± 3.9
24 - 26	11.4 ± 1.3	11.4 ± 5.0	3.0 ± 0.8
26 - 28	9.8 ± 2.0	9.8 ± 6.0	3.8 ± 1.1
28 - 30	7.1 ± 1.7	4.8 ± 2.8	4.5 ± 2.4
30 - 32	11.2 ± 4.3	8.3 ± 2.6	7.2 ± 3.7
32 - 34	7.1 ± 2.1	7.0 ± 2.6	2.0 ± 0.9

La aparición de los eventos de colgaduras fue más temprana para el caso del experimento de socavación de 4 m, donde los puntos comienzan a colgarse cuando se ha extraído entre un 4% y un 6% de la columna. Un aumento de altura de socavación a 20 m, aumentó en un 6% aproximadamente el porcentaje de columna extraída sin colgaduras. Por último, una socavación alta de 40 m, permitió extraer entre un 14% y 16% de la columna sin eventos de colgaduras.

En términos de tonelaje extraído sin colgaduras, se cumple que al tener una altura de socavación mayor, hay un mayor tonelaje de fragmentación fina al comienzo de la extracción. El aumento de este tonelaje en función de la altura de socavación se encuentra en la Figura 35, donde se puede apreciar que el aumento de la altura de socavación de 4 a 20 metros, aumenta las toneladas extraídas sin colgaduras en aproximadamente un 119%. Mientras que al comparar con una altura de 40 m, el aumento de toneladas extraídas sin colgaduras aumenta en un 290% aproximadamente, en comparación a la socavación baja. La Figura 35, muestra el mismo análisis, comparando la altura de socavación baja y alta (de 40 metros) con la de 20 metros.

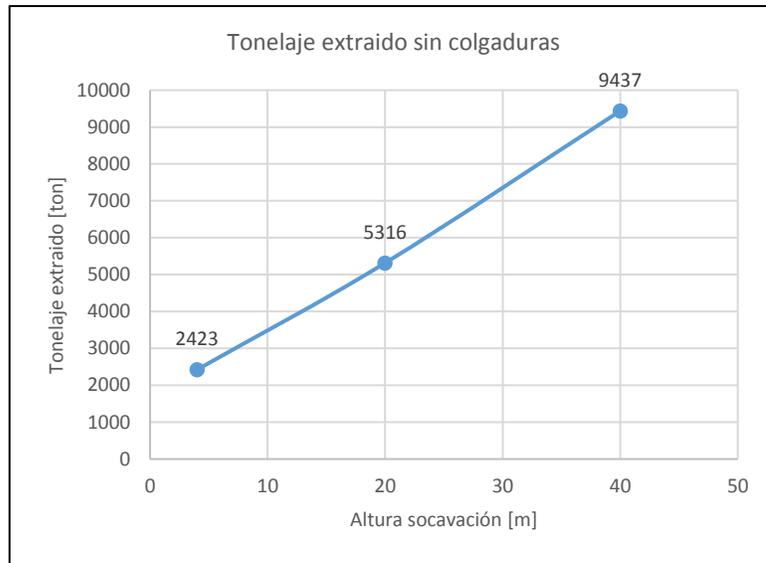


Figura 35 Tonelaje extraído sin colgaduras

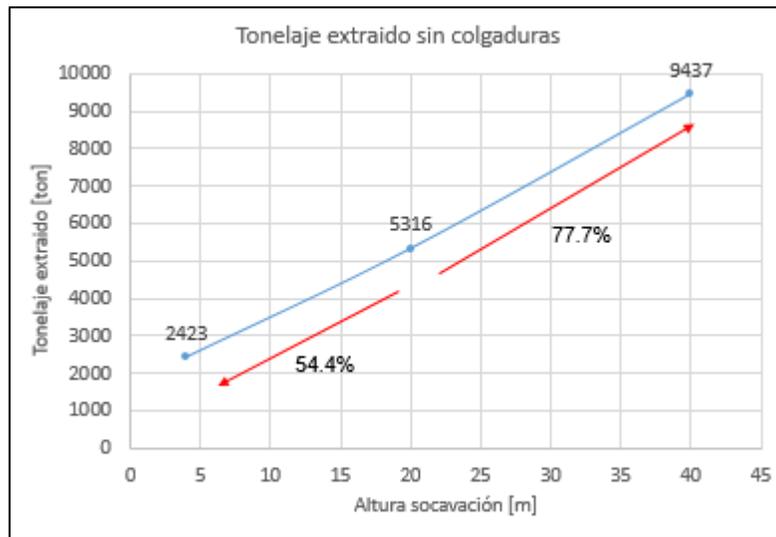


Figura 36 Diferencia porcentual entre las alternativas

Con respecto a los tipos de colgaduras, en la sección anterior se mencionó que existen tres tipos de colgaduras con diferentes opciones de formación. Las colgaduras tipo 3, que son las que se forman sobre la batea, no ocurrieron en los experimentos. Por lo que el siguiente análisis se reduce solo a las colgaduras tipo 1 y 2. En la Figura 37 se muestra un ejemplo de colgadura tipo 1 (a la izquierda) y colgadura tipo 2 (derecha) observada en los experimentos.



Figura 37 Colgaduras tipo 1 y 2 observadas en los experimentos

A medida que aumentamos la altura de socavación, se retrasa la aparición de material con fragmentación más gruesa en los puntos de extracción, por lo que el inicio de cualquier tipo de colgadura está influenciada por eso. Además, dado que los experimentos tuvieron un límite de extracciones, a altura de socavación más alta, los números de colgaduras formadas fueron menores. Esto último es obvio, dado que, por ejemplo en el Experimento 3, con altura de socavación de 40 m, se extrajo mayor cantidad de material fino que de grueso, mientras que para el experimento de altura de socavación de 4 m, se extrajo mayor cantidad de material grueso que de fino, y su número de colgaduras al final del experimento fue mayor. En la Tabla 16 se muestra un resumen del número y tipo de colgaduras obtenidas para cada experimento.

Tabla 16 Colgaduras tipo 1 y 2

Experimento	# colgaduras tipo 1	# colgaduras tipo 2
Altura de socavación: 4 m	106	61
Altura de socavación: 20 m	97	61
Altura de socavación: 40 m	18	20

4.3. Análisis de flujo

El análisis de flujo se llevó a cabo gracias al uso de marcadores, que producto de la información de su posición inicial y la masa acumulada al momento de su extracción, permitieron visualizar y comprender el comportamiento del mineral dentro de la caja del modelo físico. Uno de los principales resultados obtenidos, y de gran importancia para este trabajo, fue la estimación de la altura de interacción (HIZ), y su variación con respecto a la altura de socavación utilizada, con lo que se pudo estimar la recuperación minera asociada a cada altura de socavación.

4.3.1. Zonas de extracción

En base a los elipsoides de extracción, fue posible estimar el ángulo de flujo del mineral sobre el pilar mayor y sobre el pilar menor (las imágenes de los resultados de los experimentos se encuentran en el ANEXO E).

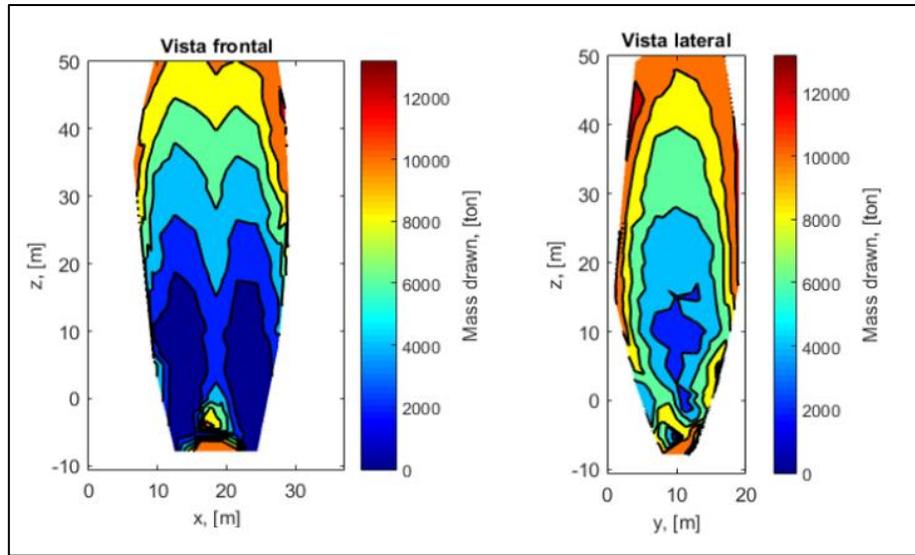


Figura 38 Vista frontal y lateral del elipsoide de extracción. Experimento altura de socavación de 40 [m]

En base a los resultados de la interpolación, se pudo obtener los ángulos de flujo correspondientes, como se muestra en la Figura 39.

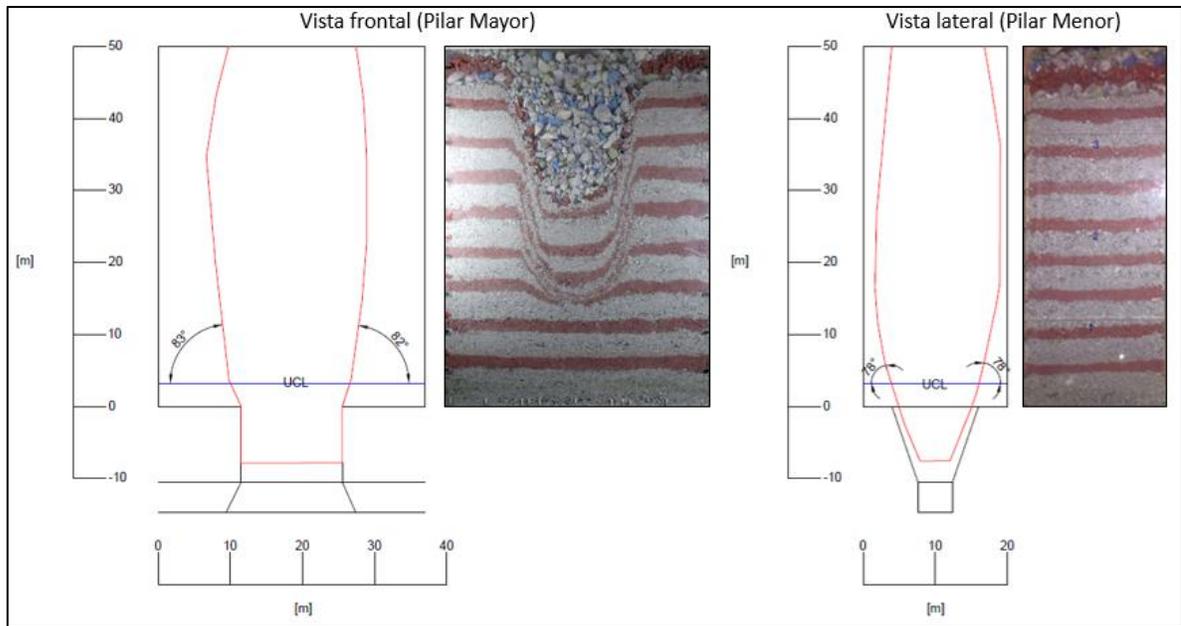


Figura 39 Ángulos de flujo sobre el pilar mayor (izquierda) y sobre el pilar menor (derecha). Experimento altura de socavación de 40 m

A continuación se muestra una tabla resumen con los ángulos de flujo obtenidos para cada experimento.

Tabla 17 Ángulos de flujo sobre Pilar Mayor y Pilar menor

Experimento	Altura socavación [m]	Angulo flujo Pilar Mayor	Angulo flujo Pilar Menor
1	4	73.5° ± 2.1°	66.5° ± 0.7°
2	20	77.5° ± 0.7°	69.5° ± 3.5°
3	40	82.5° ± 0.7°	78°

Se aprecia que a medida que consideramos una altura de socavación más alta, el ángulo de flujo del mineral aumenta, tanto para el Pilar Menor como para el Crown Pillar (Pilar Mayor). Esto se debe a la mayor presencia de material fino, que como se sabe, influye en la forma que tomara el elipsoide de extracción y será más esbelto y con un mayor ángulo (Kvapil, 2008).

4.3.2. Altura de interacción (HIZ) y recuperación minera

Con los resultados obtenidos anteriormente, se procede a estimar la altura de interacción (HIZ) por medio de la proyección del ángulo de flujo, ya sea sobre el Pilar Mayor (Crown Pillar) o sobre el Pilar Menor. Para ello, se considera el análisis en los perfiles sobre cada uno de los pilares. En la Figura 40 se muestra una vista en planta de la malla 16x15 m junto con la ubicación de la caja del modelo físico y los perfiles AA' y BB' correspondientes a los perfiles sobre Pilar Mayor y Menor respectivamente. Las Figuras 41 y 42 muestran un esquema de lo planteado para el caso del experimento de altura de socavación de 4 m. Para los demás experimentos el análisis fue el mismo.

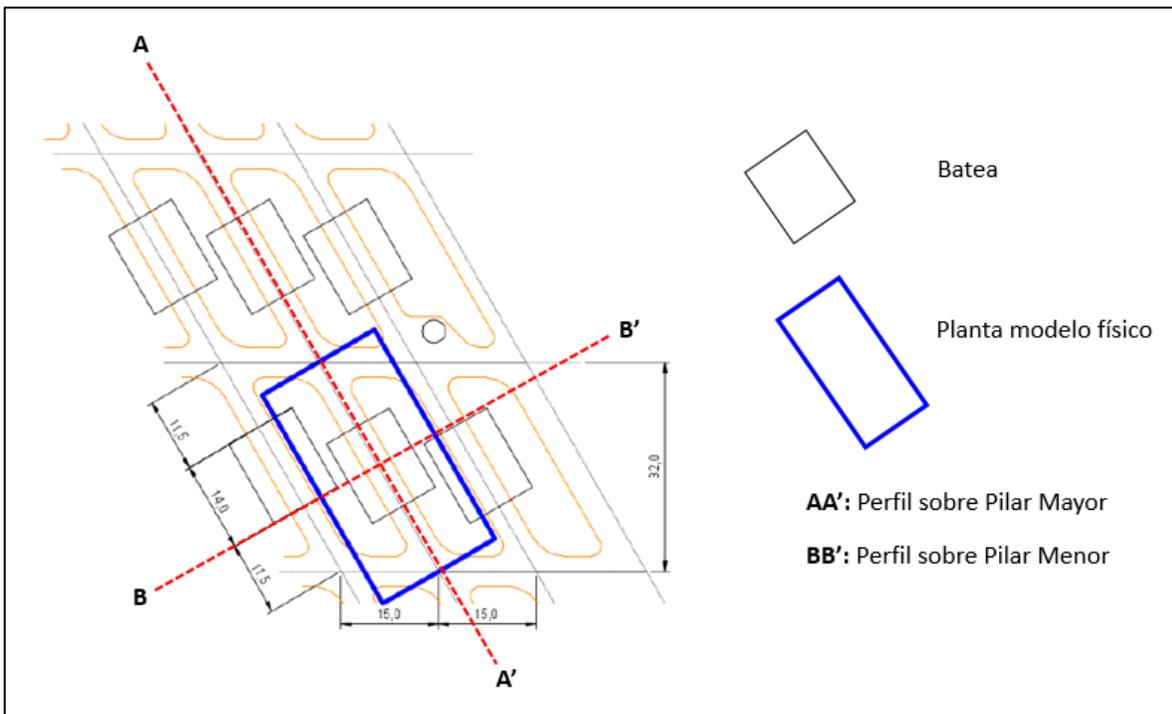


Figura 40 Representación de los perfiles sobre el Pilar Mayor y Pilar Menor

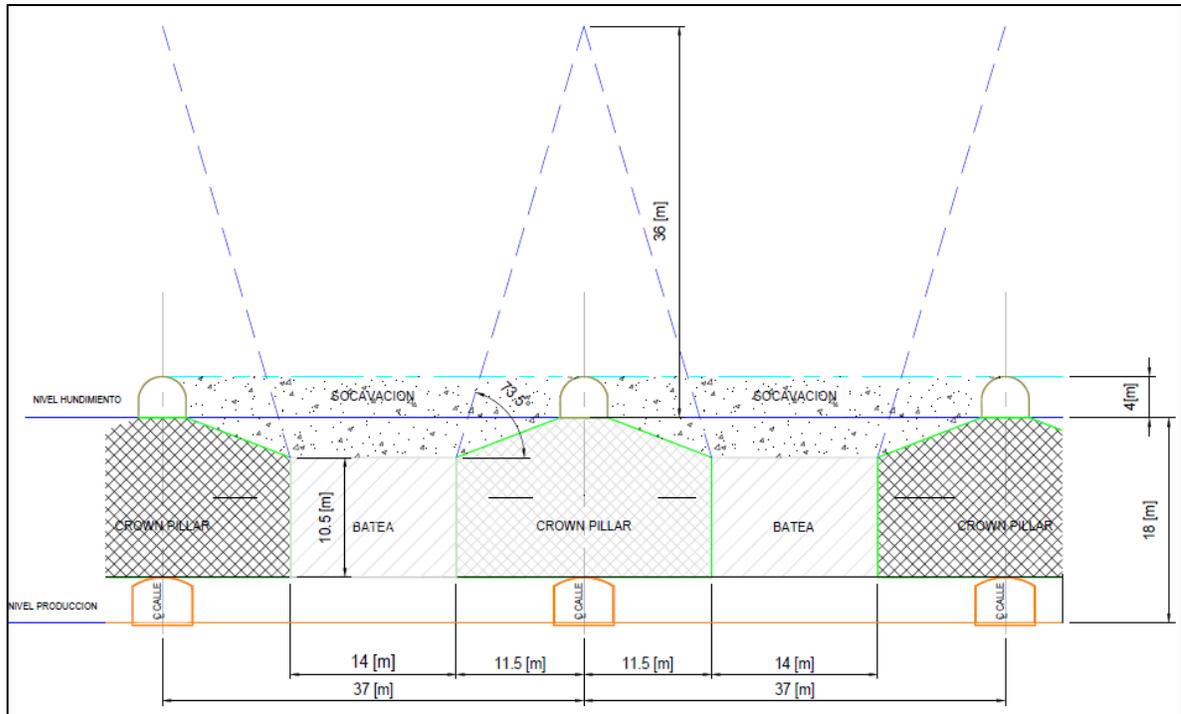


Figura 41 Estimación altura de interacción (HIZ). Caso altura de socavación de 4m (Sección AA')

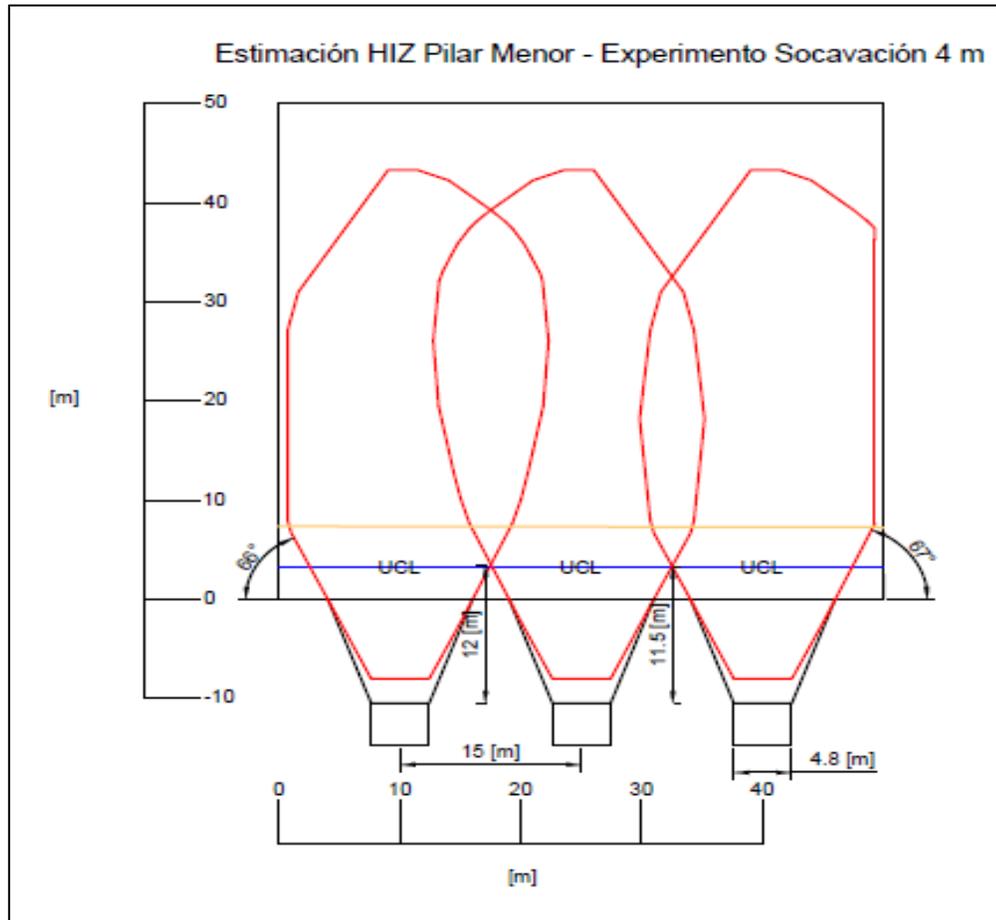


Figura 42 Estimación HIZ sobre pilar menor (Sección BB')

Para poder estimar la altura de interacción (HIZ), se hizo un reajuste a la fórmula propuesta por Castro (2006), para poder estimar HIZ a partir del nivel de hundimiento (UCL).

Por lo tanto a partir de

$$HIZ_{cp} = \left[\frac{D_{cz} - L_b}{2} \right] \tan(\alpha)$$

Ecuación 9 Altura de interacción sobre el Crown Pillar

$$HIZ_{pm} = \left[\frac{d_p - w_p}{2} \right] \tan(\alpha)$$

Ecuación 10 Altura de interacción sobre el Pilar Menor

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$$

Ecuación 11 Angulo de flujo del mineral

Podemos hacer el reajuste para encontrar HIZ_{UCL} . Para ello, debemos considerar la distancia entre el techo del nivel de producción hasta el UCL y restársela a la calculada anteriormente, para el caso del Pilar Menor; y para el caso del Crown Pillar, se resta la distancia entre el punto más alto de la batea y el piso del Nivel de Hundimiento. Es decir, para el caso del Pilar Mayor y Menor, se tendría:

$$HIZ_{cp}^* = HIZ_{cp} - 3.25$$

Ecuación 12 Ajuste HIZ sobre el Crown Pillar medida desde el UCL

$$HIZ_{pm}^* = HIZ_{pm} - 13.75$$

Ecuación 13 Ajuste HIZ sobre el Pilar Menor medida desde el UCL

La Figura 43, nos muestra la diferencia de la altura de interacción para las diferentes alturas de socavación, donde se aprecia que para el caso de la socavación más alta (40 metros) la altura de interacción sobre el Crown Pillar crece considerablemente, donde la gran altura de material fino es responsable del crecimiento rápido del elipsoide de extracción, alcanzando un ángulo empinado que repercute en una mayor altura de interacción.

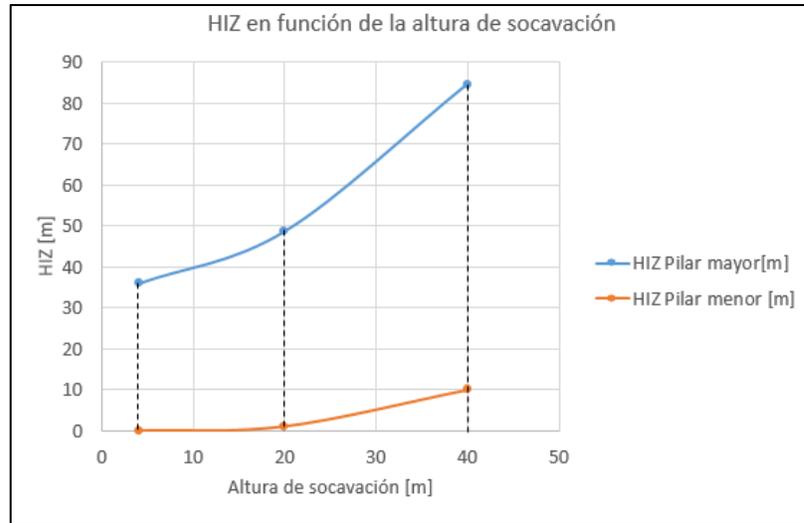


Figura 43 Aumento de la HIZ en función de la altura de socavación

Tabla 18 Resumen ángulos de flujo y HIZ para los 3 experimentos

Altura socavación [m]	Angulo flujo Pilar Mayor	Angulo flujo Pilar Menor	HIZ Pilar Mayor [m]	HIZ Pilar Menor [m]	Tonelaje remanente [kton]	Recuperación [%]
4	73.5° ± 2.1°	66.5° ± 0.7°	36 ± 5.3	0	12.1 ± 2	92.5 ± 1.2
20	77.5° ± 0.7°	69.5° ± 3.5°	48.7 ± 3	1 ± 1.4	16.8 ± 1.1	89.6 ± 0.7
40	82.5° ± 0.7°	78°	84.5 ± 8.4	10.2	33 ± 3.1	80 ± 2

4.4. Evaluación de productividad

En base a los resultados obtenidos anteriormente de colgaduras, es posible realizar una evaluación conceptual de la productividad para cada altura de socavación, tomando en cuenta que a mayor altura de socavación mayor es la cantidad de material extraído sin interferencias operacionales hasta la aparición de colgaduras, lo que implica cierre de puntos para realizar la reducción secundaria.

Para realizar la evaluación de productividad, se realiza una simulación en el software *Promodel*, de manera de obtener una estimación de la cantidad de toneladas a extraer en un periodo de tiempo para una calle de producción, considerando la velocidad de extracción según el porcentaje de la columna de extracción, las toneladas extraídas hasta que comienzan a aparecer los sobretamaños y la frecuencia de colgaduras obtenidas de los experimentos. Esto nos da una aproximación para el caso real considerando interferencias operacionales como descuelgue y reducción secundaria.

4.4.1. Alcances de la simulación

La simulación considera 14 puntos operativos, donde 8 de ellos se encuentran en régimen, y el resto en quiebre. Para estimar la cantidad de mineral a extraer en cada punto, se siguió las siguientes tasas de extracción.

Tabla 19 Velocidades de extracción

Velocidad extracción en régimen [ton/m²dia]	1
Velocidad extracción en quiebre [ton/m²dia]	0.25

- La simulación se realiza para la productividad de una calle de producción con 14 puntos de extracción.
- Cambios de turno, choca, mantención del LHD son considerados en la simulación.
- Se consideran interferencias operacionales como colgaduras en puntos de extracción, lo que involucra cierre de puntos, y de la calle para el descuelgue y reducción secundaria.
- El parámetro a variar es el tonelaje entre colgaduras y el tonelaje extraído antes del primer evento de colgadura. Ambos resultados de los experimentos.
- El tiempo de simulación es de 6 meses.

4.4.2. Detalles de la simulación

La simulación se realiza de manera conceptual para una calle de producción, considerando interferencias operacionales como colgaduras, cierre de la calle por descuelgue y el tiempo que toma la reducción secundaria. Se considera un total de 10 réplicas.

Las toneladas entre colgaduras se consideran de acuerdo a los resultados obtenidos en los experimentos.

El criterio para realizar la reducción secundaria que sigue la simulación es el siguiente:

- Se tiene un contador con el número de puntos colgados en la calle.
- Cuando hay 7 puntos colgados, la calle se cierra y se procede al descuelgue de cada punto.
- El costo por reducción secundaria y descuelgue se estima en 55 [US\$/descuelgue] (Maas, 2013).
- Realizado el descuelgue, la calle y los puntos colgados quedan nuevamente operativos.

Como resultados se obtiene la productividad de la calle para los 6 meses que dura el tiempo de la simulación, la cantidad de descuelgues y el costo total asociado a ellos.

4.4.3. Productividad de la calle

La productividad de la calle para los 6 meses varía con respecto a la altura de socavación considerada, esto debido a que los eventos de colgadura son más tempranos para el caso de la socavación baja, y más tardíos para las socavaciones altas. En la Figura 44 Toneladas extraídas en 6 meses, se muestra el aumento de la productividad total en los 6 meses para los tres casos, donde se aprecia que al considerar una altura de socavación de 40 metros, se obtuvo la mayor productividad.

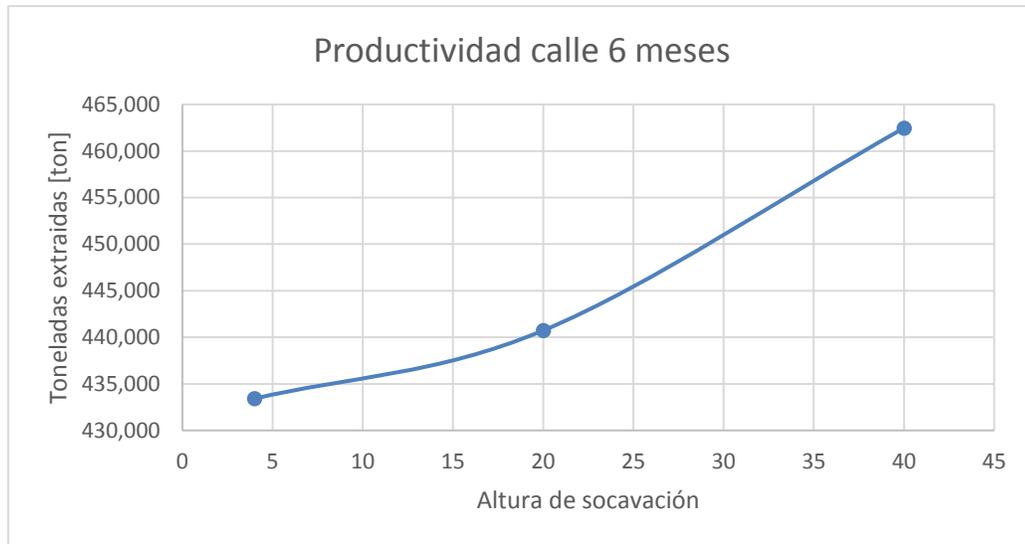


Figura 44 Toneladas extraídas en 6 meses

La diferencia de productividad entre cada caso es de aproximadamente 7,000 toneladas entre la socavación de 4 metros y la de 20 metros, 22,000 toneladas entre la socavación de 20 metros y la de 40 metros. Esta diferencia de toneladas se debe precisamente al mayor tiempo que se extrajo mineral sin interferencias operacionales como colgaduras, cierre de puntos y de la calle para el descuelgue, lo que permitió extraer material de manera más uniforme para cada punto durante un periodo aproximado de 40 días sin eventos de colgaduras. La Tabla 20 muestra la productividad en toneladas por día para cada mes de la simulación. En ella, se puede observar que el primer mes de extracción al utilizar una altura de socavación de 40 metros fue más uniforme en comparación a los otros casos, y en promedio su productividad fue mayor.

Tabla 20 Productividad diaria para cada mes

Mes	Producción diaria [tpd]		
	Altura socavación 4 [m]	Altura socavación 20 [m]	Altura socavación 40 [m]
1	2,849 ± 652	2,976 ± 807	3,552 ± 95
2	2,712 ± 461	2,821 ± 616	2,681 ± 845
3	3,031 ± 823	3,163 ± 456	3,313 ± 604
4	2,763 ± 865	3,050 ± 757	3,182 ± 728
5	3,338 ± 1006	2,101 ± 957	3,421 ± 881
6	3,054 ± 1096	3,292 ± 882	3,291 ± 865
Promedio	2,960 ± 858	3,081 ± 772	3,226 ± 769

4.5. Evaluación económica

El análisis experimental, solo nos muestra las ventajas y desventajas de utilizar alturas de socavación bajas o altas en base al flujo del material, altura de interacción, recuperación minera y colgaduras. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta los costos asociados, debido a que alturas de socavación más altas incrementan los costos globales debido a la mayor perforación y gasto de explosivos debido a los largos tiros (Butcher, 2000).

En particular, una altura de socavación de 40 m como la utilizada en el montaje experimental del Experimento 3, involucra dos niveles de hundimiento. La Figura 45 muestra el esquema de la socavación realizada en Northparkes Lift 1 mediante dos niveles de hundimiento con una diferencia de cota de 12 m para dar una altura total de 42 m. En ella se puede apreciar que se utilizan dos niveles de hundimiento, uno inferior y uno superior, con alturas de socavación de 12 y 30 metros respectivamente

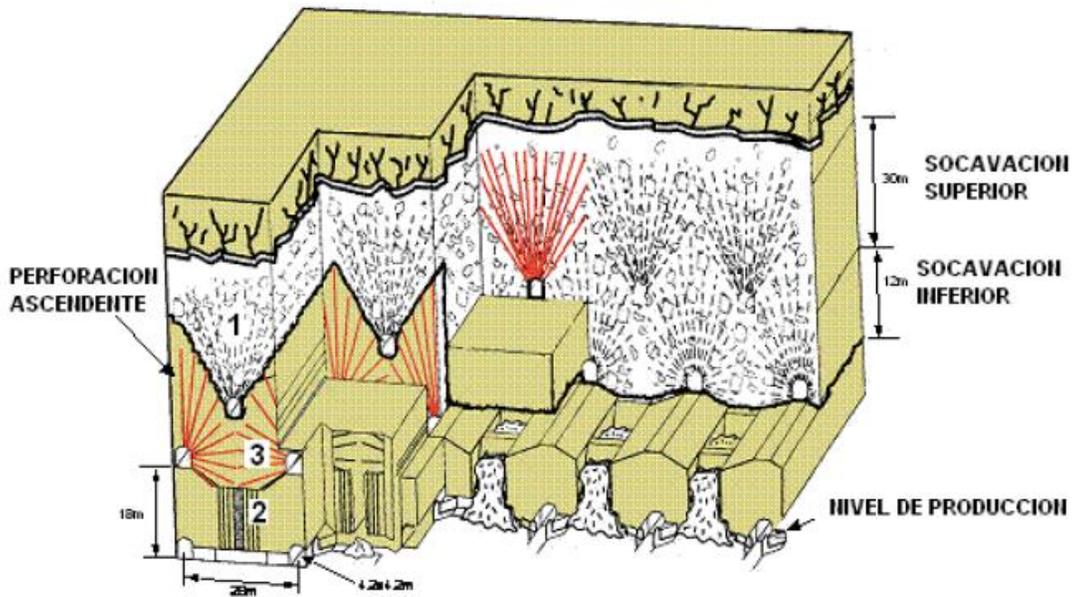


Figura 45 Hundimiento con altura de socavación de 42 m mediante dos niveles, Northparkes Lift 1 (Rivero, 2008)

El objetivo de esta sección, es entregar una comparación de los experimentos en términos de costos, para luego realizar un análisis económico considerando las ventajas y desventajas concluidas del capítulo anterior.

4.5.1. Parámetros de diseño a considerar.

Los parámetros de los diseños de socavación a considerar se resumen en la siguiente tabla. El detalle de diseños se puede encontrar en Anexos.

Tabla 21 Parámetros diseños de socavación considerados en el análisis

	Socavación 4 [m]	Socavación 20 [m]	Socavación 40 [m]	
			Nivel superior	Nivel inferior
# Perforaciones	16	30	16	27
Metros barrenados [m]	144	540	423	441
Volumen socavado [m3]	346.0	1,437	1,504	1,206
Factor de perforación	0.4	0.4	0.3	0.4
Cantidad explosivo [kg]	319	1,364	1,475	1,556
Factor de carga [kg/m3]	0.92	0.95	0.98	1.29
Factor de carga kg/ton	0.34	0.35	0.36	0.48

4.5.2. Costos

Si bien, con el uso de una altura de socavación de 40 metros, se obtuvo una mayor productividad, este tipo de socavación incrementa los costos globales de perforación y tronadura como se mencionó anteriormente, por lo es necesario un análisis para poder comparar económicamente las alternativas.

Para la estimación de los costos relacionados a la socavación, se consideran costos operacionales relacionados a la perforación y tronadura estimados por Codelco para el PMCHS. En base a ello se realiza una comparación del gasto total asociado a la perforación y tronadura de una parada de socavación para cada tipo de altura, y se estiman los costos unitarios en US\$/ton para ambas operaciones. La Figura 46 muestra la comparación de costos entre las alturas de socavación estudiadas, en ella se aprecia que el costo total por parada aumenta para alturas de socavación más altas, lo cual se debe a la mayor cantidad de metros perforados y cantidad de explosivo utilizado, lo que aumenta el gasto global de las operaciones de perforación y tronadura. Por otro lado, el costo unitario medido en US\$/tonelada socavada, disminuye a mayor altura de socavación debido a la mayor cantidad de tonelaje removido (ver Tabla 21).

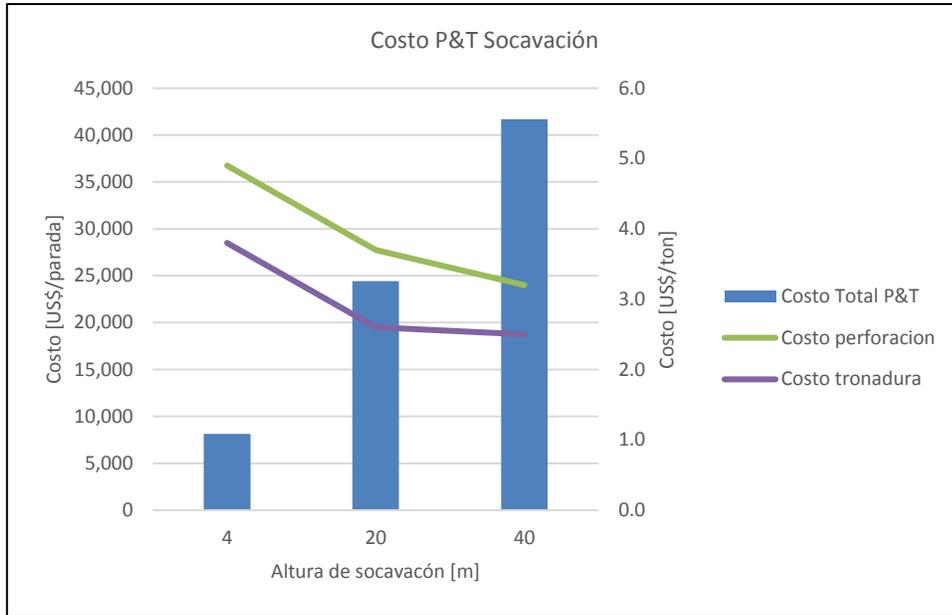


Figura 46 Costo Perforación y Tronadura socavación

Tabla 22 Costos operacionales perforación y tronadura

Costo	Socavación 4 m	Socavación 20 m	Socavación 40 m
Costo Perforación [US\$/ton]	4.9	3.7	3.3
Costo Tronadura [US\$/ton]	3.8	2.6	2.5

4.5.3. Evaluación económica

Cada altura de socavación considerada en el estudio experimental, involucra una diferencia en sus diseños de perforación y tronadura, lo que se traduce en una mayor cantidad de explosivo y metros perforados, lo que aumenta los costos y el tiempo de preparación para entrar en producción el punto, así como la cantidad de material tronado al comienzo de la extracción, lo que se ve reflejado en el flujo de caja.

En Northparkes E26 Lift 1 se utilizó un diseño de socavación que consistía en dos niveles de hundimiento que en conjunto alcanzaban una altura de socavación de 42 m. Este diseño permitió eliminar la extracción de material grueso al inicio del proceso de caving y alcanzar rápidamente el ramp-up y un bajo costo operativo. Sin embargo, requería el doble de desarrollos y el gasto de perforación y tronadura aumentó (Duffield, 2000) (House et al., 2001) (Rivero, 2008).

A continuación se presenta un análisis económico para un punto de extracción, el cual permite comparar las alternativas estudiadas en función del Valor Actual Neto (VAN) asociado. Cabe destacar que el analisis se realiza se manera conceptual de manera de comparar y evaluar las alternativas estudiadas experimentalmente en términos de flujo de caja,

Para realizar la evaluación se consideran como supuestos parámetros económicos para realizar estimaciones necesarias para el flujo de caja. La

Tabla 23 muestra los parámetros considerados como supuesto.

Tabla 23 Parámetros económicos

Parámetros Económicos	
Precio Cu [US\$/lb]	2.6
Costo Planta [US\$/ton]	14
Costo Venta y Refinación [US\$/lb]	0.2

El cálculo del costo unitario de perforación y tronadura, medido en US\$ por tonelada removida se explicaron anteriormente. Estos se muestran en la Tabla 24 junto con costos operacionales supuestos para el análisis. Se trabajó bajo el supuesto que solo los costos de perforación y tronadura varían con respecto a la altura de socavación, donde al igual que para el caso de Northparkes Lift 1, el costo operacional es más bajo para la altura de socavación de 40 m.

Tabla 24 Costos operacionales considerados (Codelco, 2017; Fuentes, 2013; Maas, 2013)

Altura de socavación [m]	4	20	40
Perforación [US\$/ton]	4.9	3.7	3.2
Tronadura [US\$/ton]	3.8	2.6	2.5
Extracción [US\$/ton]	0.099	0.099	0.099
Traspaso y carguío [US\$/ton]	0.26	0.26	0.26
Transporte [US\$/ton]	0.66	0.66	0.66
Administración [US\$/ton]	0.241	0.241	0.241
Otros [US\$/ton]	0.1	0.1	0.1
Reducción secundaria [US\$/reducción]	55	55	55

4.2 Parámetros de diseño

Se considera una columna de extracción de 150 metros de altura para una malla tipo Teniente de 16 x 15 m, las tres alturas de socavación revisadas en el presente trabajo, sus resultados experimentales correspondientes a las toneladas extraídas sin eventos de colgaduras y velocidades de extracción en quiebre y régimen para la columna. Se considera un costo de preparación de 2,354 US\$/m² el cual considera obras como excavaciones mineras (desarrollos horizontales y verticales, y actividades asociadas a estos), obras civiles (relacionadas con la fortificación del punto de extracción) y montaje de infraestructura (Navarro, 2017).

4.3 Resultado

Del resultado del flujo de caja (Anexo), se calcula el Valor Actual Neto (VAN) para cada altura de socavación, al graficar cada una de estas se obtiene una curva como la de la Figura 47. En ella, se aprecia que dentro de las tres alternativas, todas son rentables, es decir, todas son económicamente viables, sin embargo, la altura de socavación de 20 metros presenta un VAN mayor al resto. La diferencia entre los VAN para los casos de altura de socavación de 4 y 20 metros, se debe a que en los primeros meses, la extracción de las leyes más altas en los primeros metros de columna es más rápida debido a la cantidad de material fino disponible para la altura de socavación de 20 metros, donde se mantiene prácticamente igual la inversión inicial. Si bien, para el caso de la altura de 40 metros, la cantidad de material tronado disponible es mayor aun, este diseño requiere el doble de desarrollos que los casos anteriores, por lo que el gasto en preparación es mayor, lo que se ve reflejado en la inversión y por ende en el valor del VAN, aun así, de las tres alternativas, esta última cumple con alcanzar más rápido el ramp-up.

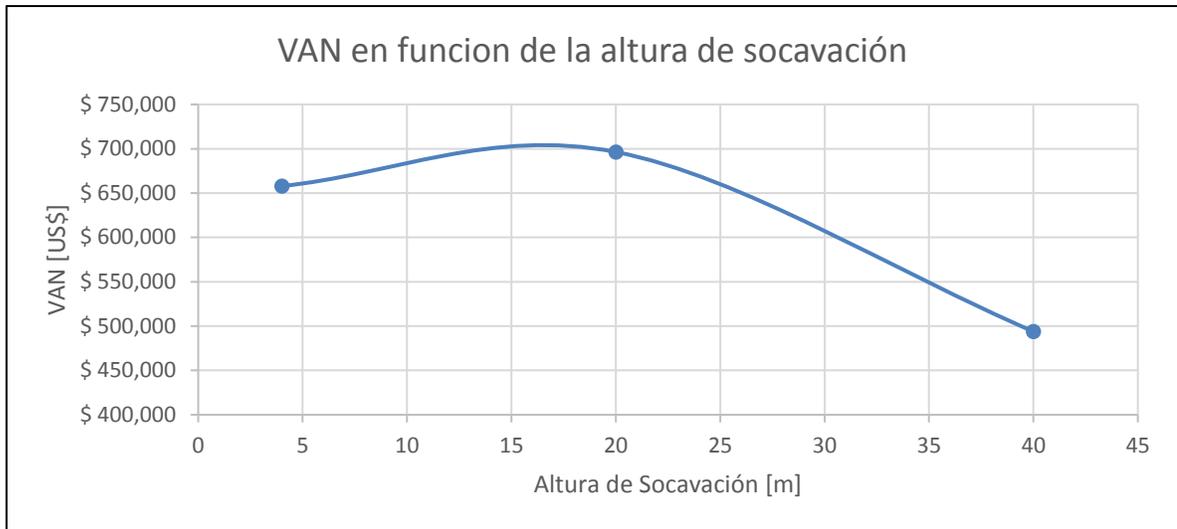


Figura 47 VAN en función de la altura de socavación

4.6. Conclusiones del capítulo

De los resultados obtenidos se tienen las siguientes conclusiones:

- Colgadas: alturas de socavación altas retrasan la aparición de eventos de colgadas, lo que permite la extracción de material fino al comienzo sin interferencias producto de ellas (2,423 ton para 4m de socavación; 5,316 ton para 20m de socavación; 9,437 ton para 40m de socavación). Esto se ve reflejado en el aumento del índice de colgadas (número de colgadas cada 1000 toneladas) en función de la altura de columna extraída.
- Ángulos de flujo. Al usar alturas de socavación altas, aumenta el ángulo de flujo del mineral, representado por elipsoides de extracción más delgadas, lo que aumenta la altura a la cual se interceptan los flujos de puntos de extracción adyacentes que es mayor para alturas de socavación más altas, tanto para el Crown Pillar como para el Pilar Menor.
- Recuperación minera: una altura de socavación alta de 40 m presenta menor recuperación minera (80%) debido a la mayor cantidad de material de granulometría fina presente, en comparación a las alturas de socavación de 4 y 20 metros (93% y 90% respectivamente). Esto se debe a la diferencia de ángulos de flujo y alturas de interacción entre puntos de extracción, siendo mayores para alturas de socavación más alta, lo cual aumenta la cantidad de tonelaje remanente.
- Productividad: al considerar una calle de producción, se tiene que alturas de socavación más altas aumentan la productividad para un horizonte temporal de 6 meses, esto debido a menores interferencias operativas al comienzo a causa de colgadas, cierre de puntos y calle por descuelgue.
- Costos: sin embargo, los costos globales para una altura de socavación de 40 metros aumentan considerablemente, debido principalmente a los mayores metros de perforación involucrados. Por otro lado, los costos de perforación y tronadura por tonelada para una socavación baja, son mayores a los de una socavación de 20 y 40 metros. Si bien el gasto en perforación es mayor para las socavaciones altas, las toneladas a extraer son mucho más que para el caso de la socavación baja, lo que repercute en un menor costo por tonelada. La cantidad de descuelgues es mayor para el caso de la socavación baja, y disminuye para las socavaciones más altas a causa del retraso de la aparición de eventos de colgadas en los puntos de extracción. Sin embargo, este costo es mínimo en comparación al de la perforación.
- Del análisis conceptual, se obtiene finalmente, un mayor VAN para una altura de socavación de 20 metros, siendo, en términos de costos y productividad la más rentable.

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones generales

Colgaduras

- Alturas de socavación altas retrasan la aparición de eventos de colgaduras, lo que permite la extracción de material fino al comienzo sin interferencias producto de ellas. esto se ve reflejado en el índice de colgaduras (número de colgaduras cada 1000 toneladas) en función de la altura de columna extraída.
- Las toneladas extraídas antes de los eventos de colgaduras es mayor para alturas de socavación altas, esto debido a la mayor cantidad de material tronado extraído. En particular, las toneladas aumentan en un 77 % al cambiar de socavación de 20 a 40 metros. Mientras que disminuyen un 54 % al considerar una altura de socavación baja de 4 metros.
- Los eventos de colgaduras aparecen cuando se ha extraído sobre el 10% de la columna de extracción para el caso de una socavación de 4 m, sobre un 25% en el caso de una socavación alta de 20 m y sobre un 30 % para una socavación de 40 m.

Flujo

- Al usar alturas de socavación altas, aumenta el ángulo de flujo del mineral, representado por elipsoides de extracción más delgadas, lo que aumenta la altura a la cual se produce flujo interactivo entre los elipsoides de extracción.
- Los ángulos de flujo son mayores para alturas de socavación más altas, siendo para el Pilar Mayor de 73.5°, 77.5° y 82.5° para socavaciones de 4m, 20m y 40m, respectivamente. Para el Pilar Menor 66.5°, 69.5° y 78° para socavaciones de 4m, 20m y 40m, respectivamente.
- Al comparar una altura de socavación de 20 y 40 metros, la altura de interacción es mayor en 36 m sobre el Crown Pillar y en 9 m sobre el pilar menor para la socavación de 40 m. Esto lleva a una pérdida de recuperación minera de un 10 %.

Recuperación

- El uso de alturas de socavación más altas están asociadas a recuperación minera más baja, debido al aumento del ángulo de flujo y con ello HIZ. Experimentalmente, se observa que en comparación al caso de una altura de socavación de 20 m, una altura de socavación baja aumenta la recuperación minera en un 3 %, y una altura de socavación de 40[m la disminuye en un 10 %.

Productividad y costos

- La altura de socavación de 40 metros fue la que obtuvo mayor productividad, permitiendo extraer mayor tonelaje en un periodo de tiempo de 6 meses, y de manera más uniforme, debido al retraso de los eventos de colgadura. Sin embargo, sus costos aumentan al involucrar dos niveles de hundimiento y más metros a perforar y mayor cantidad de explosivo, lo que impacta en el costo de perforación y tronadura por parada. Sin embargo, debido a la mayor cantidad de tonelaje removido, presenta menores costos operativos (US\$/ton).
- La altura de socavación de 20 metros aparece como la más rentable entre las tres alturas estudiadas. En comparación a la altura de socavación baja, tiene mayor productividad y menos interferencias entre colgaduras. El análisis económico involucra que la altura de socavación de 20 m presenta un mayor Valor Actual Neto en comparación a las otras alternativas. Su menor costo operativo en comparación a la socavación baja y menos desarrollo en comparación a la socavación de 40 m influyen en el flujo de caja.

5.2. Recomendación y trabajo futuro

El enfoque del estudio estuvo basado en los experimentos de flujo gravitacional, donde la variable a analizar fue la altura de socavación. Con ello, un análisis de productividad y costos permitió realizar una conclusión más acabada de los resultados obtenidos de los experimentos. Sin embargo, existen aspectos que no fueron parte de los alcances de este trabajo, y que permiten realizar las siguientes recomendaciones:

- Este trabajo permitió estudiar la el flujo gravitacional considerando una granulometría variable con dos curvas granulométricas, una para fragmentación primaria y otra para material socavado. Se recomienda profundizar aún más en este tipo de experimentos, considerando además de la granulometría de socavación y primaria, una granulometría secundaria.
- Realizar experimentos de tiraje aislado, es decir, extracción desde un punto de extracción, dado que éste, y otros experimentos han sido realizados con tiraje uniforme desde ambos puntos de extracción, lo que resulta interesante y de utilidad para la calibración de modelos numéricos de flujo gravitacional.
- Realizar experimentos similares, pero donde se tenga material fino sobre material grueso, de manera de estudiar la migración de finos en una columna de extracción con una batea y con alturas de columna más altas para prolongar perfil de productividad.
- Aumentar la tecnología involucrada en los modelos, enfocado principalmente al sistema de marcadores para el estudio del elipsoide de extracción. Si bien, permite estimar la forma final del elipsoide, sería útil tener un mayor conocimiento de la trayectoria de los fragmentos, sobre todo en experimentos de este tipo, donde se involucran dos granulometrías diferentes.
- El análisis de costos realizado se realizó de manera conceptual enfocándose en los costos de perforación y tronadura de socavación, y en la productividad asociada a una calle de producción. si bien, se obtuvieron resultados que permitieron comparar las alternativas estudiadas, se recomienda realizar una simulación más detallada, que involucre la productividad de un área mayor, avance de hundimiento e incorporación de área, agregando la variable toneladas extraídas antes de los eventos de colgadura. Esto podría realizarse por ejemplo, para el hundimiento de los macrobloques centrales del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea.

BIBLIOGRAFIA

- Altamirano, A., Castro, R., Sotomayor, G., & Donoso, J. (2016). Diseño de malla de extracción para el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. En *UMining 2016* (pp. 51-64). Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Brown, E. (2007). *Block Caving Geomechanics, Second Edition*. Brisbane, Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.
- Brunton, I., Lett, J., Sharrock, G., Thornhill, T., & Mobilio, B. (2016). Full-scale Flow Marker Experiments at the Ridgeway Deeps and Cadia East Cave Operations. En *MassMin 2016* (págs. 141-150). Sydney, Australia: The Australasian Institute of Mining Metallurgy.
- Butcher R J, (2000). Block Cave Undercutting-Aims, Strategies, Methods and Management. En *MassMin 2000*. Brisbane, Australia.
- Butcher, R. (2000). Block Cave Undercutting - Aims, Strategies, Methods and Management. En *MassMin 2000* (pp. 405-411). Brisbane, Australia: The Australian Institute of Mining and Metallurgy.
- Castro, R. (2006). *Study of the mechanism of gravity flow for block caving. PhD thesis*. Brisbane, Australia: University of Queensland.
- Castro, R. L., Vargas, R., & de la Huerta, F. (2012). Determination of drawpoints spacing in panel caving: a case study at El Teniente Mine. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 871-876.
- Duffield, S. (2000). Design of the second Block Cave at Northparkes E26 Mine. En *MassMin 2000* (págs. 335-346). Brisbane, Australia: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Flores , G., & Karzulovic, A. (2002). *Geotechnical Guidelines for a Transition from Open Cut to Underground Mining: Benchmarking Report*. Brisbane, Australia: JKMRC.
- Flores G., (2014). Future challenge and Why cave mining must change. Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving, Santiago, Chile.
- Fuenzalida, M. (2012). *Estudio de flujo gravitacional confinado y su aplicación a la minería de caving. Tesis de Magíster en minería*. Universidad de Chile, Chile.
- Garcés, D., Viera, E., Castro, R., & Meléndez, M. (2016). Gravity Flow Tests at Esmeralda Mine's Block 2, El Teniente. En *MassMin 2016* (págs. 349-358). Sydney: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Gómez R., 2014. "Modelo de fragmentación secundaria y colgaduras en minería de caving". Tesis de pregrado, Universidad de Chile.
- Jofre J, et al, 2000. "Evolution in Panel Caving Undercutting and Drawbell Excavation, El Teniente Mine". *MassMin 2000*, Brisbane, Australia.
- Kvapil, D. R., 2008. Gravity flow in Sublevel and panel caving – A common sense approach.
- Kvapil, R., 1965. Gravity flow of Granular materials in Hoppers and Bins. Part I and II. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.* Vol 2, 35-41.
- Laubcher, D. (2006). *Cave Mining Handbook*.

BIBLIOGRAFIA

- Laubsher, D. (2000). *A practical manual on Block Caving. International caving study (1997-2000)*. JKRCM.
- López S. (2016). *Estudio experimental de colgaduras. Tesis de pregrado*, Universidad de Chile.
- López, S., Castro, R., Palma, S., & Olivares, D. (2016). Quantifying the role of drawbell geometry on hang-ups for caving applications. En *UMining 2016* (pp. 75-89). Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Morales J. (2015). “Benchmarking Minas de Block/Panel Caving”. Komatsu.
- Olivares D. (2014). *Influencia de fino y humedad en flujo gravitacional confinado. Tesis de pregrado*, Universidad de Chile.
- Pineda, M. (2012). *Study of the gravity flow mechanism at Goldex by means of a physical model. Tesis de magister*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Rivera N. (2016). Tiros ascendentes confinados (TAC)-Caso de estudio sector Dacita y Esmeralda, Mina El Teniente. En *UMining 2016*, Santiago, Chile.
- Rivero, V. (2008). *Evaluación geomecánica de estrategias de socavación en minería subterránea. Memoria de pregrado*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Sotomayor, G. (2016). *Recomendación de malla de extracción para el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. Memoria de pregrado*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Susaeta, A., 2004. Theory of gravity flow. Part I and II. En *Proceedings MassMin 2004*, Santiago, 167-178.
- Viera E., Diez E, (2014). Analysis of hang up frequency in Bloque 1-2, Esmeralda Sur Mine. *Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving*, Santiago, Chile.
- Villegas, F., 2014. Geomechanical evaluation of a mechanical undercutting system in block caving.

ANEXOS

ANEXO A

Benchmarking alturas de socavación

Rivero (2008), realizó un resumen de los principales diseños de socavación utilizados a la fecha. Siendo aquel estudio de gran importancia y base del presente benchmarking. La Tabla 5 mostrada anteriormente muestra alturas de socavación para las principales minas en el mundo. En esta sección se muestran los diseños correspondientes a esas alturas.

Andina

En la División Andina de Codelco, las prácticas de socavación se basan en un Hundimiento Convencional, que, durante el tiempo y dependiendo del sector, han usado diferentes alturas que bordean los 10 m de altura, utilizando configuraciones con 8, 10 y 12 metros por ejemplo. Estos diseños se muestran en la Figura 48 y Figura 49.

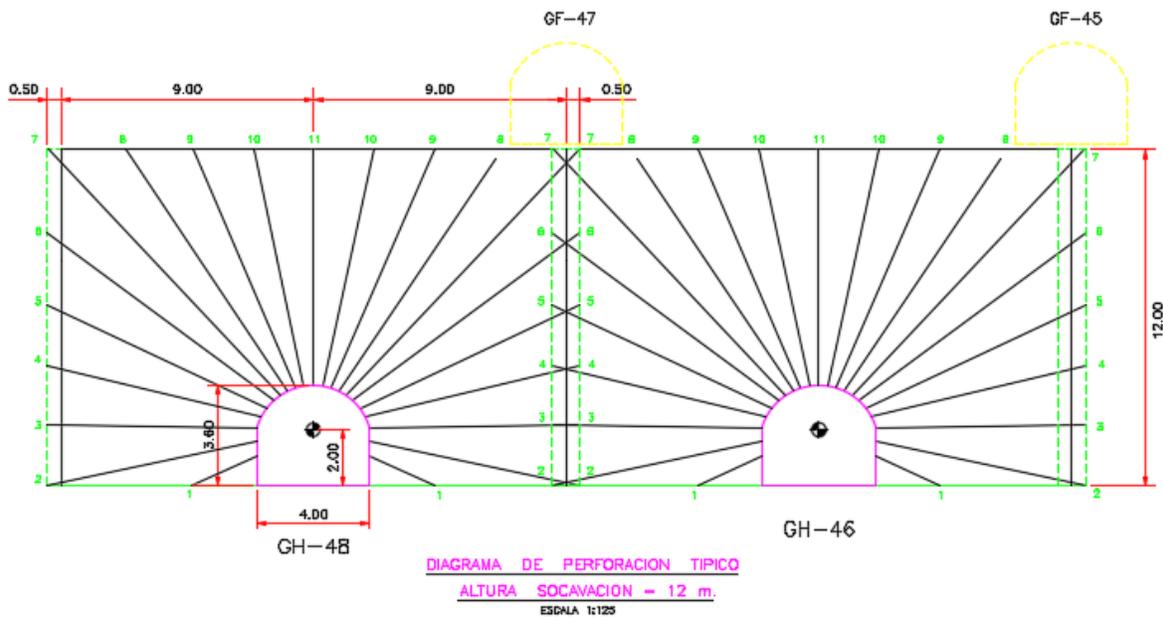


Figura 48 Diagrama de perforación hundimiento sector Tiros largos al sur – División Salvador

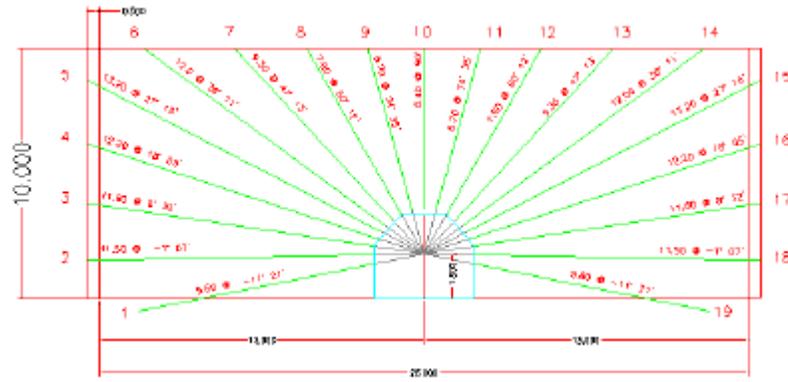


Figura 49 Diagrama perforación hundimiento convencional Andina (extraído de Rivero, 2008)

Salvador

La Figura 50 muestra una sección típica de hundimiento para el sector Inca Extensión Sur, en la cual la altura de socavación es de 5 metros.

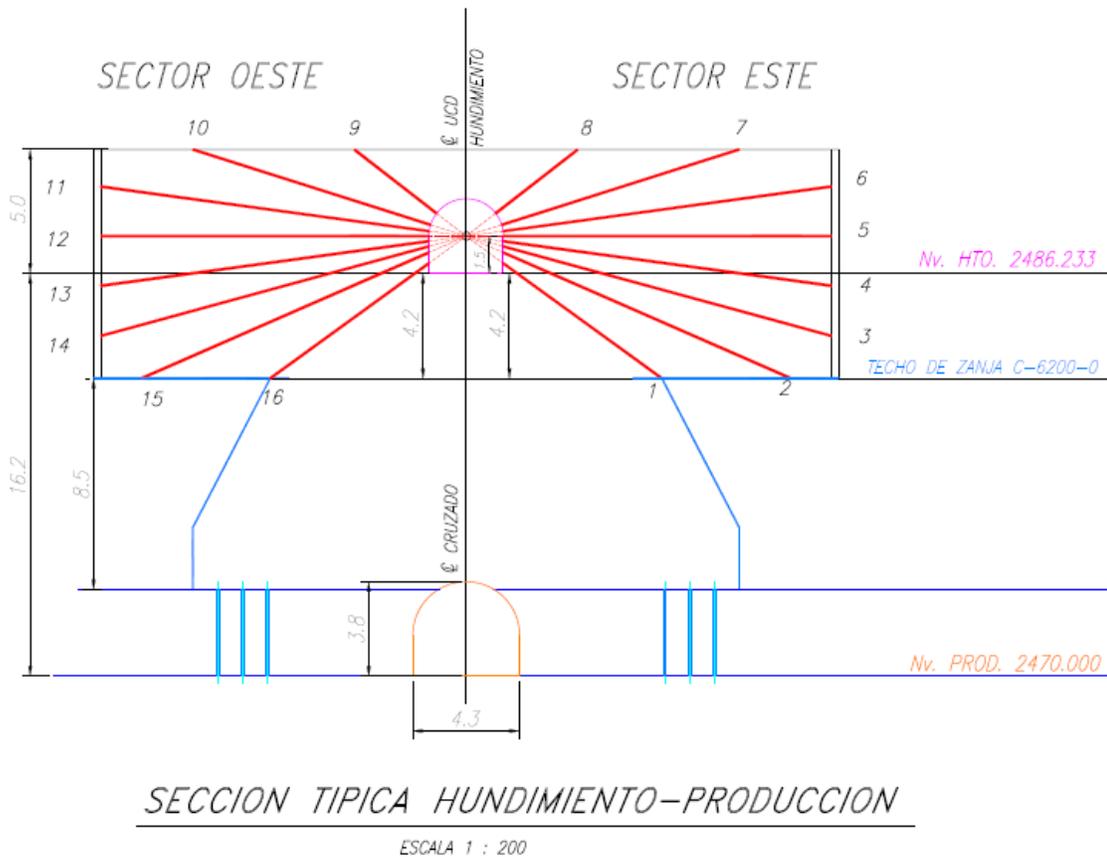


Figura 50 Diagrama de perforación hundimiento sector Inca Extensión Sur – División Salvador

El Teniente

Actualmente el principal método de explotación en Mina El Teniente es el Panel Caving con Hundimiento Convencional aplicado en los sectores productivos más relevantes (Reservas Norte, Dacita y Esmeralda) (Rivera et al., 2016). La Figura 51 y Figura 52 muestran los diseños de perforación y tronadura radial para el nivel de hundimiento de Esmeralda y Dacita respectivamente.

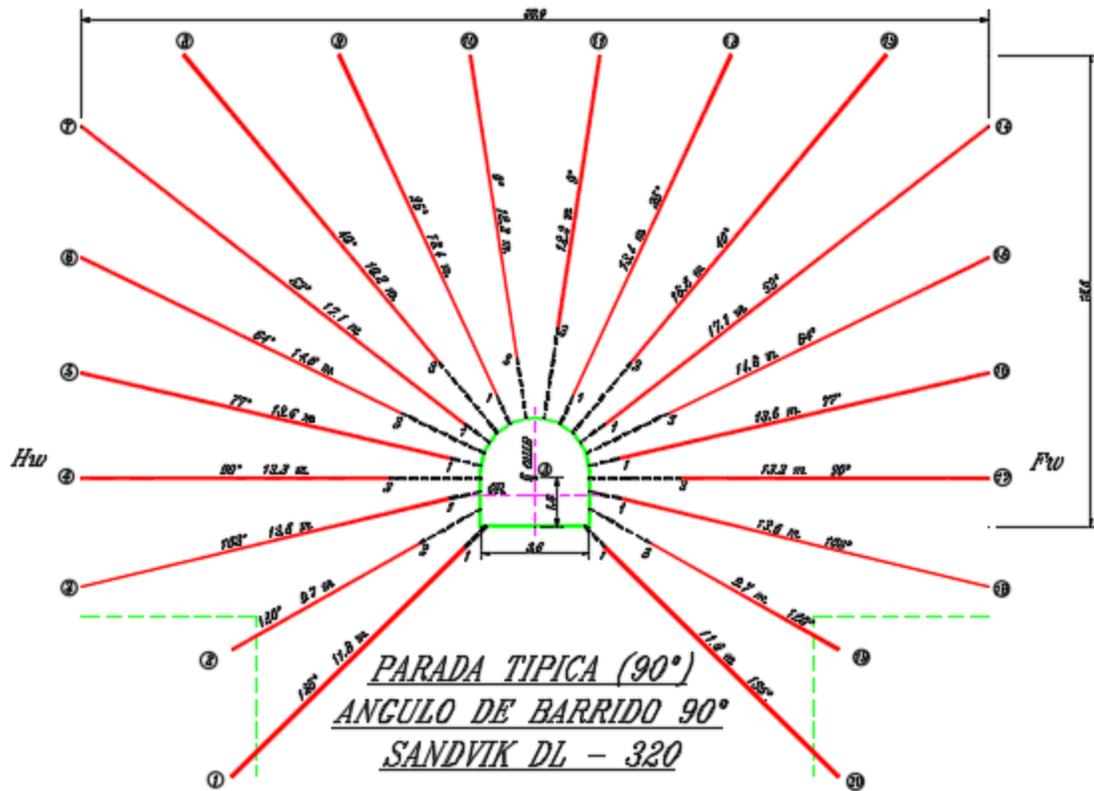


Figura 51 Diseño perforación Nivel de Hundimiento Esmeralda (Rivera et al., 2016)

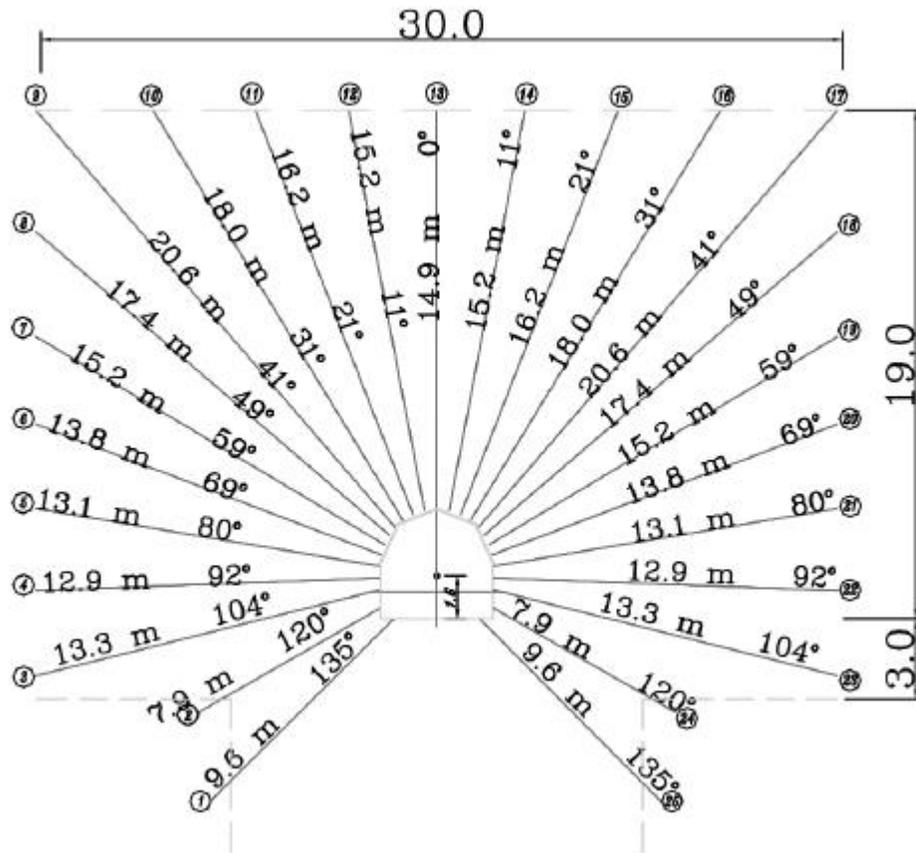


Figura 52 Diseño perforación Nivel de Hundimiento Dacita (Rivera et al.,2016)

Tabla 25 Resumen diseños socavación Codelco

Mina	Altura Socav.	Diám. Perforación	N° Tiros	Burden	Espaciamiento	Explosivo
Esmeralda Sur	15,6 m	3"	20	2 m	3,6 m	ANFO
Salvador (2014)	5 m	2 ½"	16	1,8 m	2 m	ANFO
Salvador (1997)	4,5 m	2 ½"	16	1,7 m	1,5 m	ANFO
Andina (Parrillas)	8 m	2 ½"	13	1,6	2,3	ANFO
Andina (III Panel GH 48)	12	2 ½"	21	1,5	2	ANFO

Freeport - DOZ

Considera un corte alto mediante hundimiento frontal para un hundimiento avanzado (ver Figura 53). Donde algunas guías de diseño consideradas son (Rivero, 2008):

- Desfase máximo entre paradas de hundimiento de 22 metros
- Tronadura de al menos 2 paradas por calle de hundimiento por mes

- Construcción completa en el nivel de producción la menos 60 metros por delante de la frente de socavación
- Pre-carguío de explosivos en la frente, lo que minimiza la exposición al riesgo del personal en las cercanías a zonas hundidas.

En comparación con las técnicas de corte inclinado angosto o corte horizontal angosto, este método presenta mayor cantidad de perforación, lo que le da una desventaja frente a los cortes mencionados anteriormente.

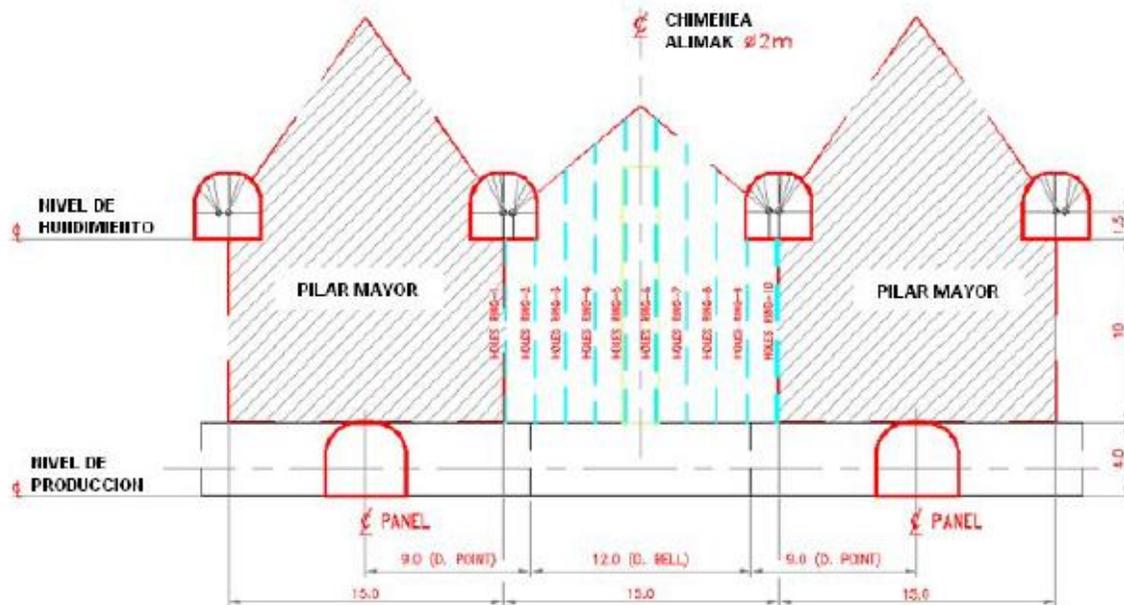


Figura 53 Hundimiento avanzado mediante corte frontal, Freeport (extraído de Rivero, 2008)

Northparkes E26 - Lift 1

El diseño de socavación del Lift 1 de Northparkes E26, mostrado en la Figura 54, corresponde a un diseño de socavación alta, realizada mediante dos niveles de hundimiento. El nivel superior con una altura de socavación de 30 metros, y el nivel inferior con una altura de socavación de 12 metros, realizando una altura total de socavación de 42 metros. Brown (2007), establece que este tipo de socavación tiene la ventaja de entregar una mayor productividad al comienzo, debido a la extracción de material fino, pero que aumenta los costos globales debido a la mayor cantidad de perforación y tronadura y al desarrollo de ambos niveles de hundimiento.

La secuencia de tronadura consistía en tronar primero el nivel superior mediante tiros ascendentes, luego la apertura de la batea, para terminar con la tronadura del nivel inferior de altura de 12 metros.

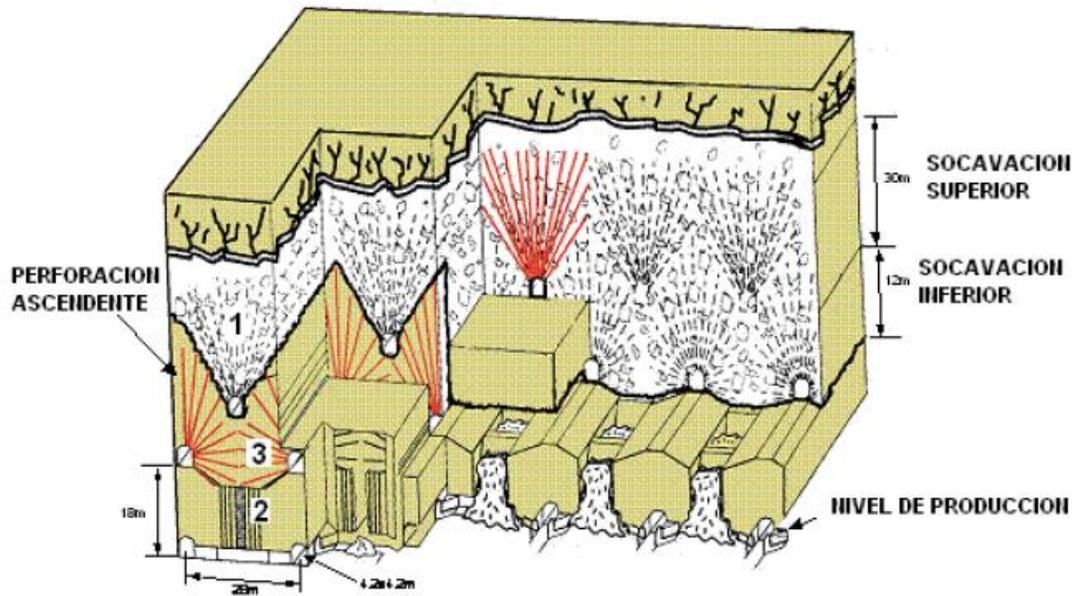


Figura 54 Socavación alta mediante dos niveles – Northparkes E26 – Lift 1 (Brown, 2007)

Northparkes E26 - Lift 2

Ubicado 350 metros por debajo del anterior, fue una de las primeras operaciones en que se propuso practicar un hundimiento avanzado mediante corte inclinado (Rivero, 2008). El corte inclinado fue exitoso, debido al rápido avance alcanzado y a que fue posible verificar que no quedarán pilares remanentes en el UCL. La socavación completa del bloque se logró llevar a cabo en un periodo de 11 meses, con un área basal de 200 x 160 m².

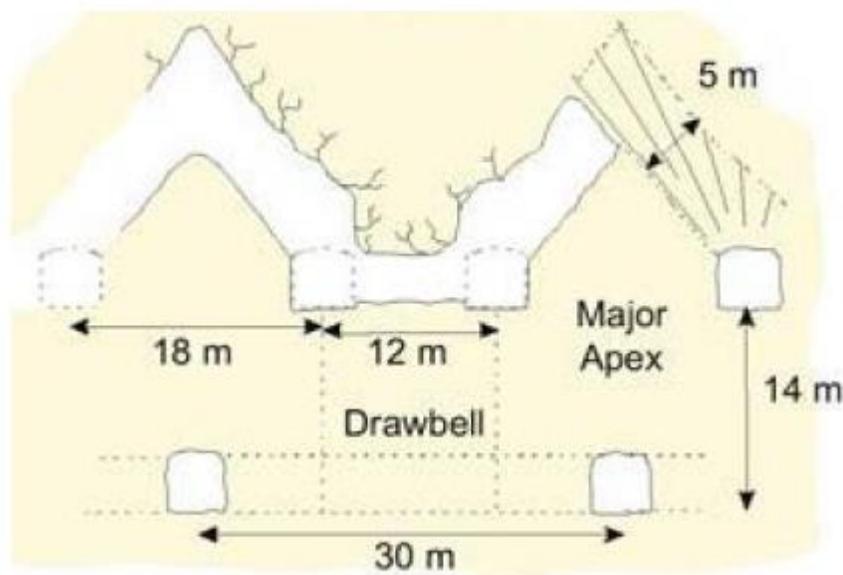


Figura 55 Corte angosto inclinado, Northparkes Lift 2 (extraído de Rivero, 2008)

Northparkes E48

Socavación mediante hundimiento convencional donde se esperaba que la etapa de socavación se realizara de manera más simple y rápida, ofreciendo menos tiempo de desarrollo y de entrada en producción. Se optó la estrategia convencional netamente por razones operativas (Rivero, 2008).

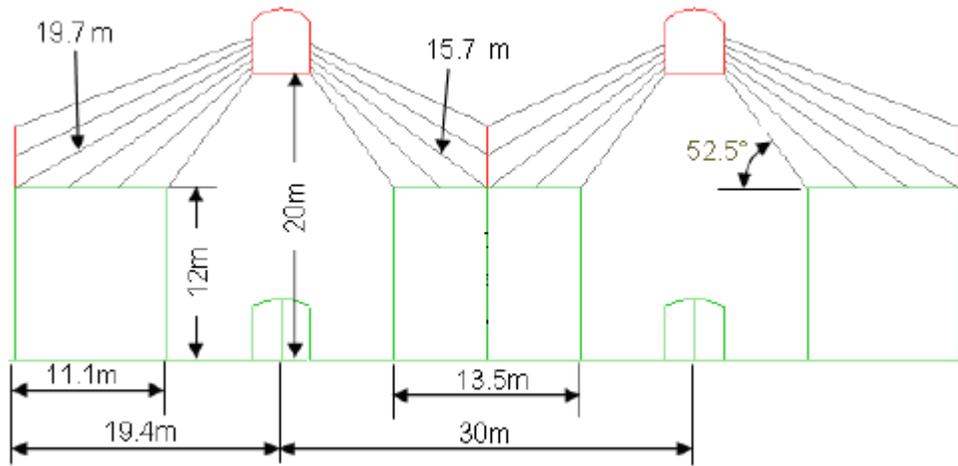


Figura 56 Socavación convencional Northparkes E48 (extraído de Rivero, 2008)

Palabora

Fue la primera mina en el mundo que utilizó un corte inclinado angosto como diseño de socavación, debido a la minimización de esfuerzos inducidos, aspecto crítico si se considera la profundidad de 1,200 metros sobre algunos sectores. Alcanzó altas tasas de socavación, superiores a 4200 m³/mes en un ambiente de roca competente (Rivero, 2008).

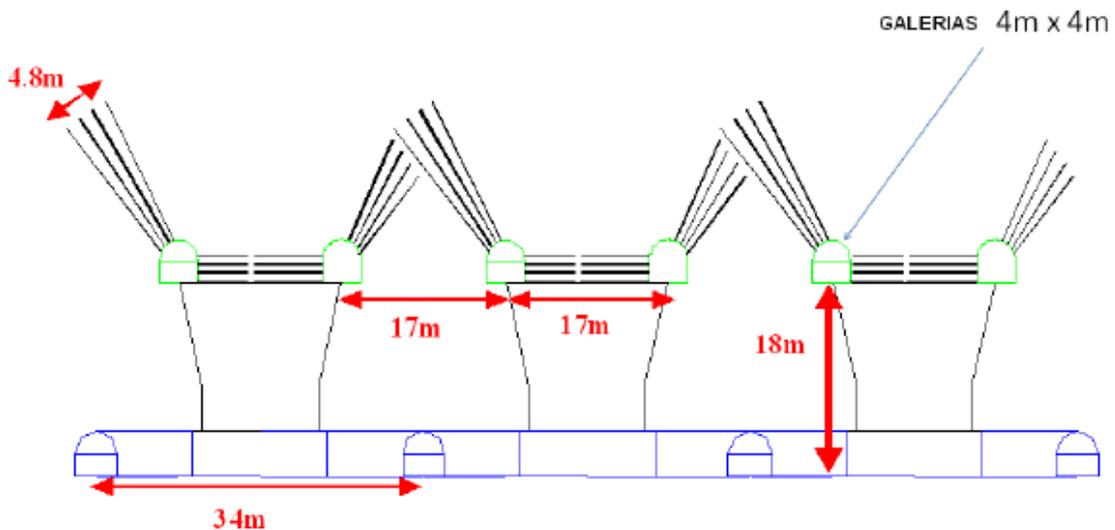
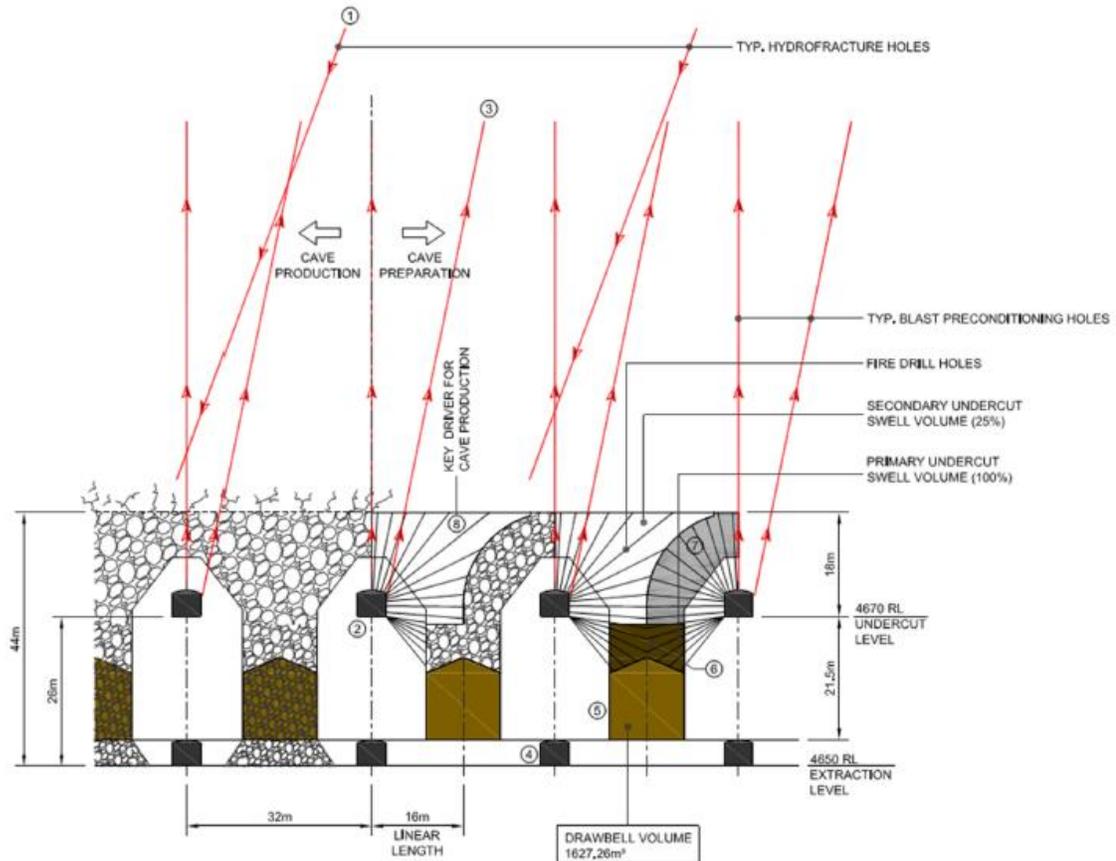


Figura 57 Corte inclinado angosto, Palabora (Rivero, 2008)

Cadia East

El diseño de la Figura 58 muestra un hundimiento convencional con altura de socavación de 20 m para Cadia East. Se muestran además el uso de preconditionamiento, y un pilar que protege la visera, lo que lo

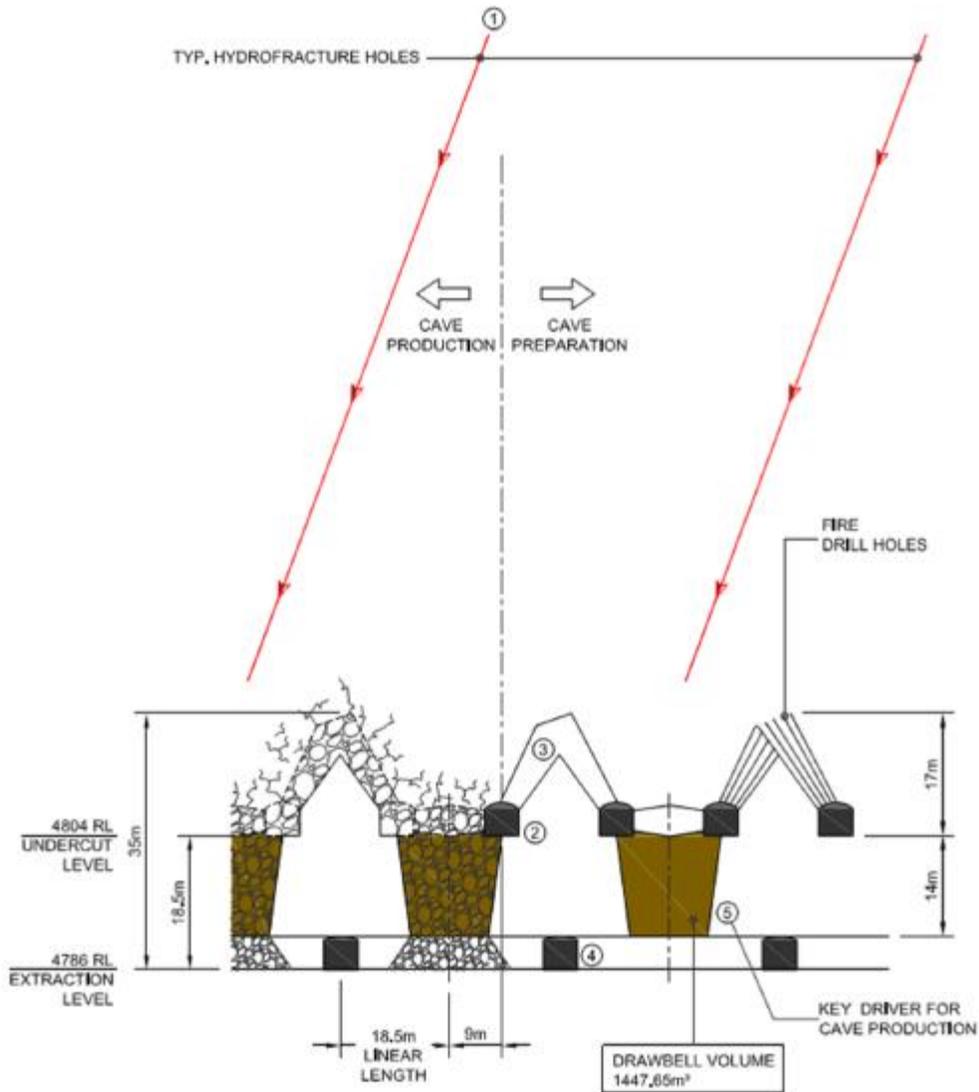
diferencia de otros diseños de socavación. Tiene la particularidad de que su diseño utiliza emulsión como explosivo para la tronadura de socavación.



CADIA EAST - POST UNDERCUT DETAILS

Figura 58 Diseño nivel de hundimiento – Cadia East (Brunton, et al., 2016)

Ridgeway Deeps



RIDGEWAY - ADVANCED UNDERCUT DETAILS

Figura 59 Diseño nivel de hundimiento – Ridgeway Deeps (Brunton, et al., 2016)

Premier Diamond

Panel Caving con hundimiento avanzado donde se aplica un corte frontal como se muestra en la Figura 60. Es un diseño en que las calles de hundimiento están separadas 15 m y las de producción 30 m. La distancia entre el nivel de producción y hundimiento es de 15 m.

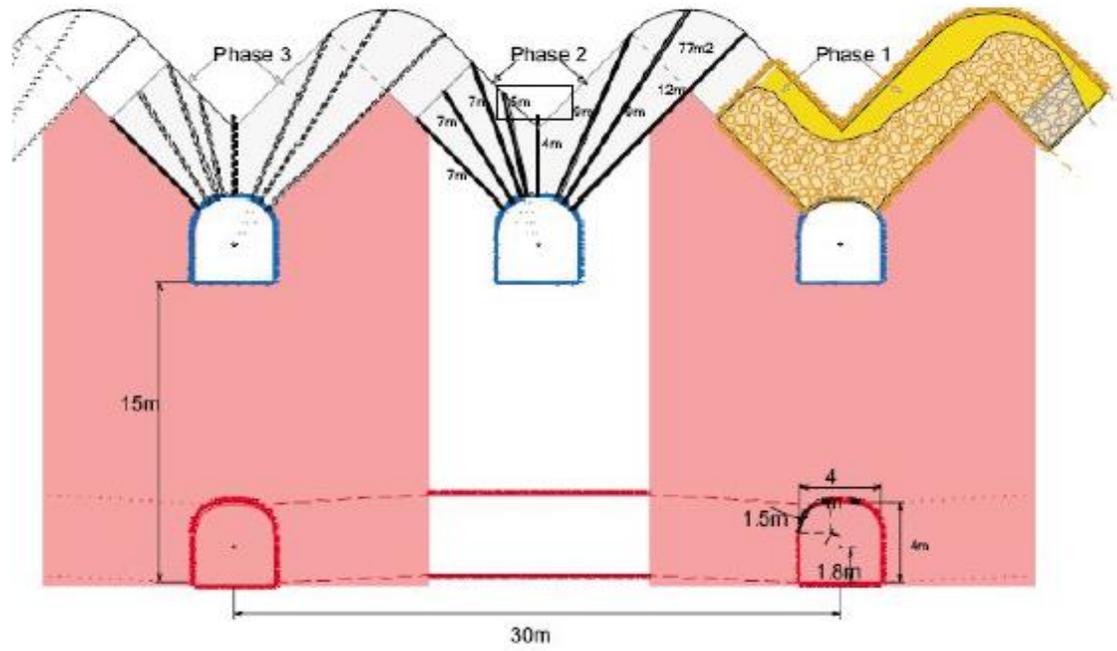


Figura 60 Corte frontal avanzado, Premier Diamond (Rivero, 2008)

ANEXO B

Caracterización del material

Sotomayor (2016), determino el factor de forma para los fragmentos de la roca QIS. En la Tabla 26 se muestra las mediciones realizadas para 20 muestras de fragmentos.

Tabla 26 Determinación del factor de forma (Sotomayor, 2016)

Fragmento	Largo menor	Largo medio	Largo mayor
1	4	6	9
2	3	4	6.5
3	4	5	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

Abarca (2016) y Sotomayor (2016) realizaron estudios con material proveniente del mismo dominio geológico (QIS). Las principales características se resumen a continuación:

Tabla 27 Caracterización del material (Abarca, 2016)

Esfericidad	0.68
Redondez	0.20
Carga puntual [MPa]	1.66

Por otro lado las curvas de distribución granulométrica utilizadas en los experimentos pueden ser descritas a través de los coeficientes de uniformidad y curvatura.

Craig (2004), define estos coeficientes de acuerdo a las ecuaciones:

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

Ecuación 14 Coeficiente de uniformidad (Craig, 2004)

$$C_z = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}}$$

Ecuación 15 Coeficiente de curvatura (Craig, 2004)

Donde d_{10} , d_{30} , d_{60} representan los tamaños bajo los cuales se encuentra el 10%, 30% y 60% de las partículas, respectivamente. Se tiene que a mayor índice de uniformidad, mayor es el rango de tamaño de las partículas, y que un coeficiente entre 1 y 3 indica una buena gradación de las partículas (Craig, 2004). A continuación se muestran los tamaños característicos necesarios para estimar los coeficientes, y el valor de estos.

Tabla 28 Índice de uniformidad y curvatura

Tamaño característico [cm]	Curva	
	Socavación	Primaria
d10	0.05	0.77
d30	0.15	1.26
d60	0.35	1.83
Cu	7.78	2.38
Cz	1.43	1.13

Los índices de uniformidad indican un mayor rango de tamaño de partículas en la curva de socavación y un menor rango para la curva Primaria. Por otro lado, el índice de uniformidad indica una buena gradación para ambas curvas.

ANEXO C

Preparación del material

El material a utilizar en los experimentos, corresponde a material proveniente del dominio geológico QIS (Cuarzo igual a sericita) del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. Este material debió ser preparado previo a la realización de cada experimento. Esta sección describe el procedimiento por el cual se llevó a cabo esta preparación, así como los equipos utilizados.

Equipos utilizados

- Chancador de mandíbulas
- Harnero
- Tamices
- Cortador giratorio

Procedimiento

Lo primero fue determinar la cantidad de material necesario para la realización de los experimentos. El modelo era cargado completamente con 500 kg de material. De esa cantidad y dependiendo del experimento, debía considerarse una cantidad de material con granulometría de socavación, y otra cantidad con material con granulometría primaria, la que variaba dependiendo de la altura de socavación a considerar.

A partir de las curvas granulométrías consideradas en los experimentos, se definen puntos representativos, los cuales determinarían los rangos de tamaños y la cantidad de material a considerar para cada experimento, de acuerdo al tamaño y al porcentaje pasante. Los puntos escogidos se muestran en la Figura 61. Estos se eligen de acuerdo a la disponibilidad de la abertura del tamaño de esa malla en el laboratorio.

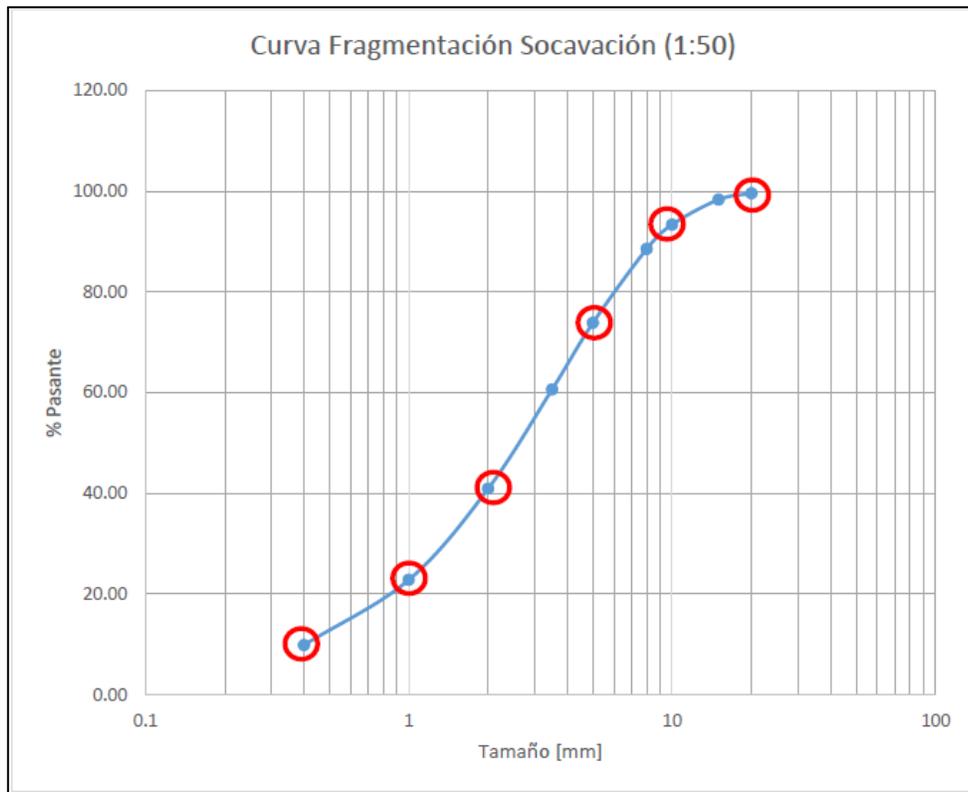


Figura 61 Curva fragmentación socavación

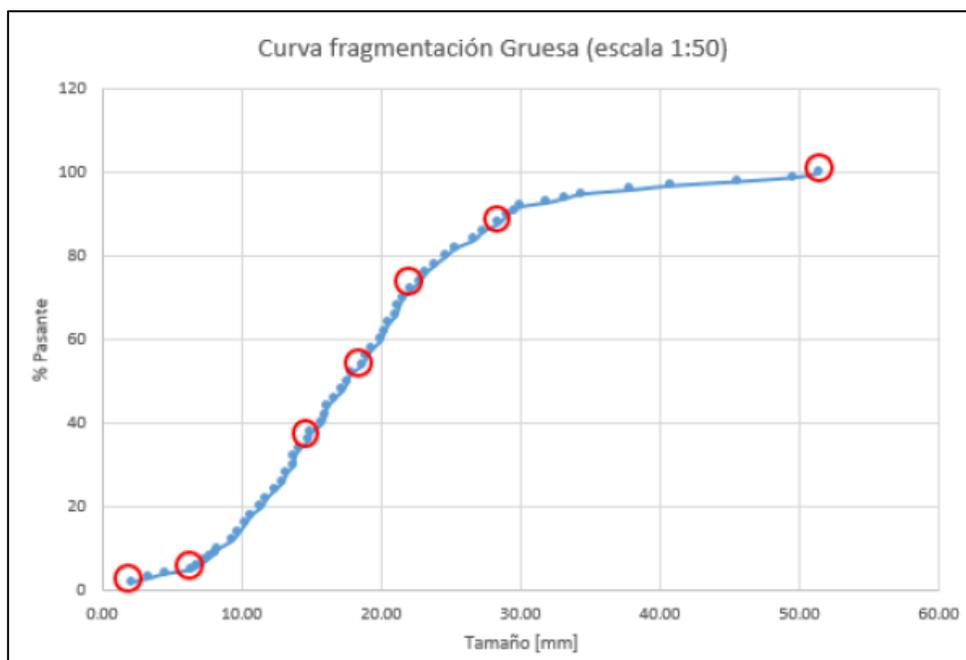


Figura 62 Curva fragmentación primaria (Sotomayor, 2016)

Definidos los rangos, se procedió al chancado del material, el que posteriormente pasaba por el harnero para ir clasificando los tamaños de material. Se registra la masa obtenida.

Si no era posible utilizar un harnero manual (Figura 63), se utilizaba el harnero eléctrico. El sobre tamaño vuelve a pasarse por el harnero.



Figura 63 Harnero manual. Abertura malla 2"

Cuando se tenían las masas de material correspondientes a cada curva (para cada experimento), se mezcla el material en el cortador giratorio de manera de obtener una mezcla homogénea y representativa.

Para pintar las líneas de flujo, se eligen baldes de material de socavación (fino) y primario (grosso), los que se reparten en 10 partes y son pintados para luego ser secados en un horno.



Figura 64 Cortador giratorio

ANEXO D

Planilla de realización de experimentos

En la Tabla 29 se muestra un ejemplo de la planilla para la realización de los experimentos utilizadas en cada uno. En ella se anotaban datos como la masa extraída, el tipo de colgadura (en caso de ocurrir una), la altura de la colgadura, el tamaño del sobretamaño el o los marcadores que eran extraídos (en caso de salir uno) y comentarios, referentes a cada ciclo de extracción.

Tabla 29 Planilla realización experimentos

LHD 1						
# Ciclo	Mesa [gr]	Colgadura [tipo]	Altura Colgadura [cm]	Sobre tamaño	Marcadores [ID]	Comentario
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
32						
33						
34						
35						
36						
37						
38						
39						
40						
41						
42						
43						
44						
45						
46						
47						
48						
49						

ANEXO E

Experimentos

Montaje experimentos

A continuación se muestra la configuración final de los experimentos, donde se aprecia la variación de la altura de socavación.



Figura 65 Montaje experimento altura de socavación 4 m



Figura 66 Montaje experimento altura de socavación 20 m



Figura 67 Montaje experimento altura de socavación 40 m

Elipsoides de flujo

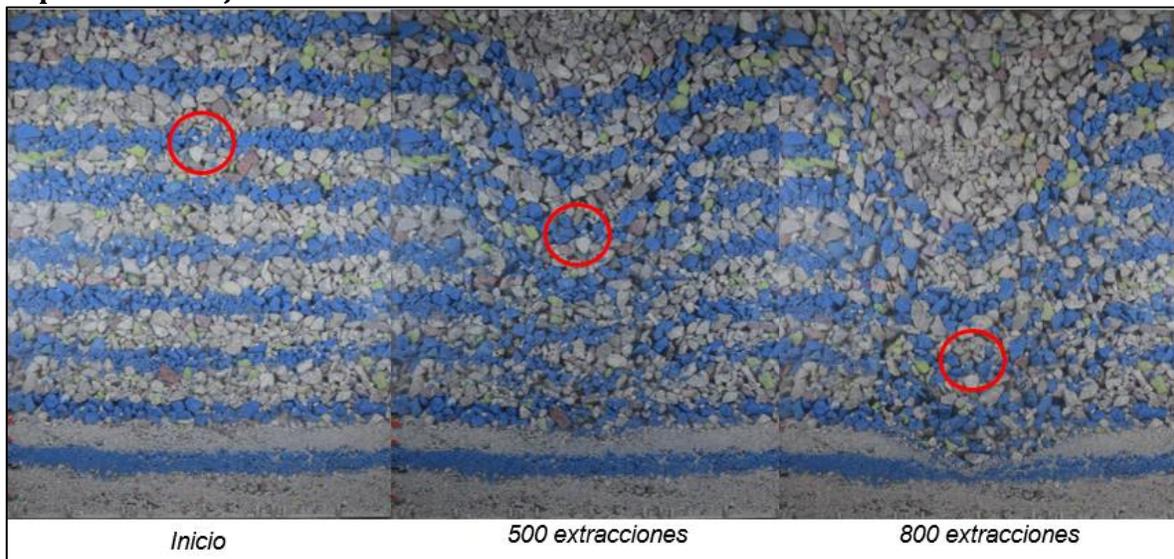


Figura 68 Evolución elipsoide de flujo, Experimento socavación 4 m



Figura 69 Evolución elipsoide de flujo, Experimento socavación 20 m

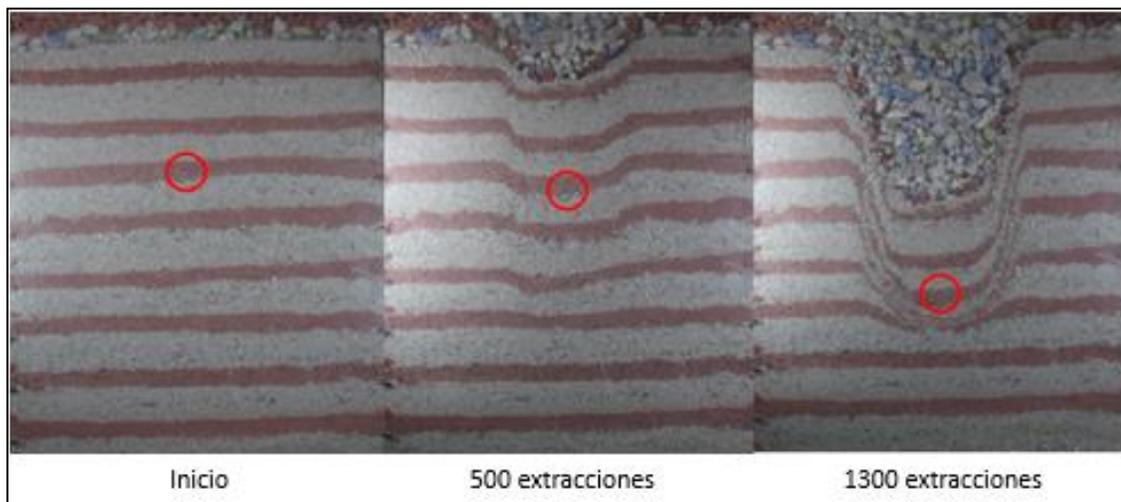


Figura 70 Evolución elipsoide de flujo. Experimento socavación 40 m

Interpolación marcadores

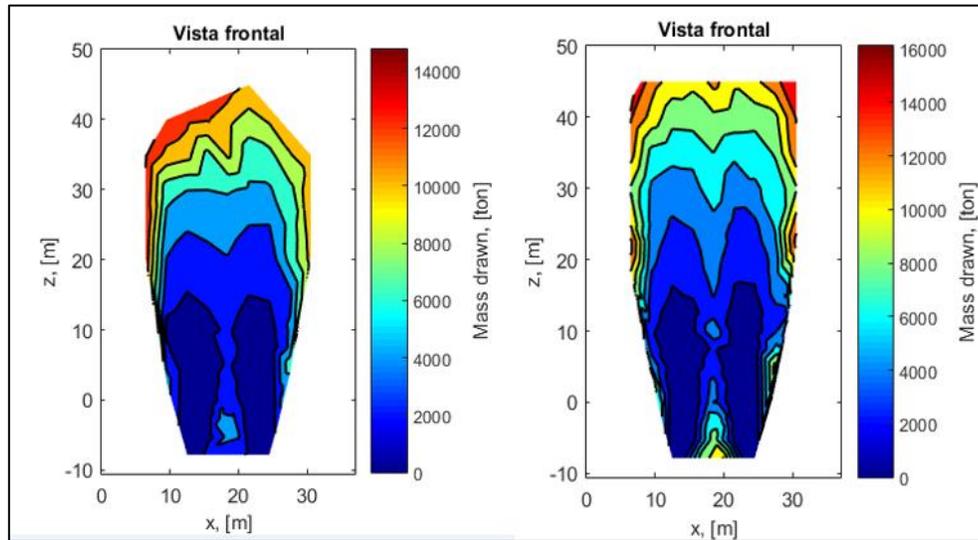


Figura 71 Interpolación marcadores vista frontal - Experimentos 1 y 2

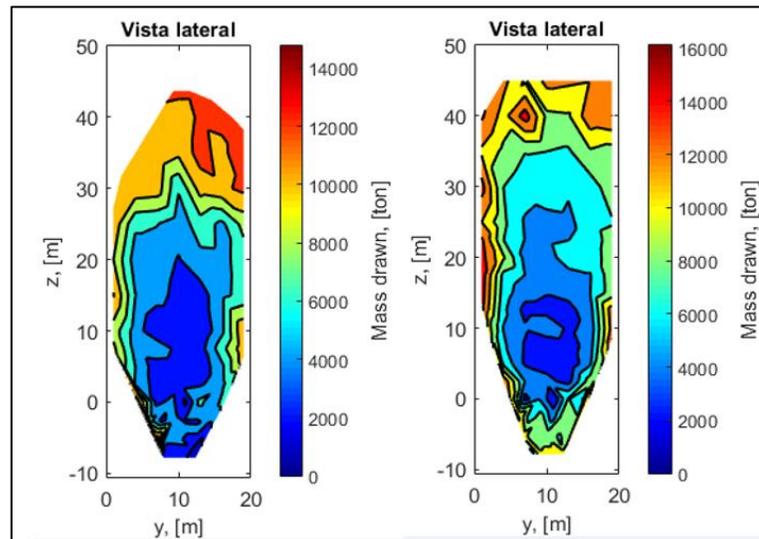


Figura 72 Interpolación marcadores vista lateral - Experimentos 1 y 2

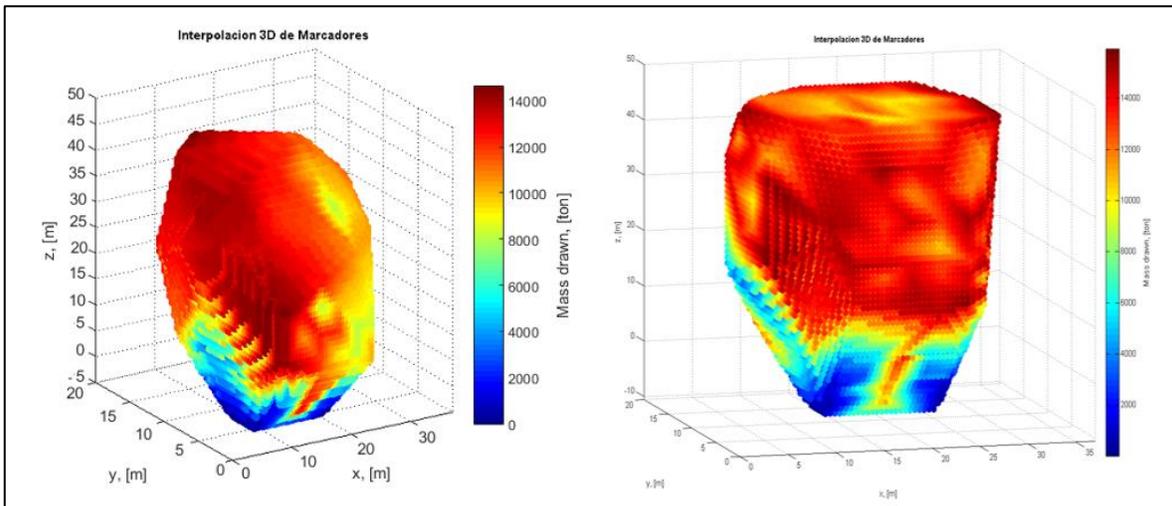


Figura 73 Interpolación marcadores 3D - Experimentos 1 y 2

ANEXO F

Flujo de caja

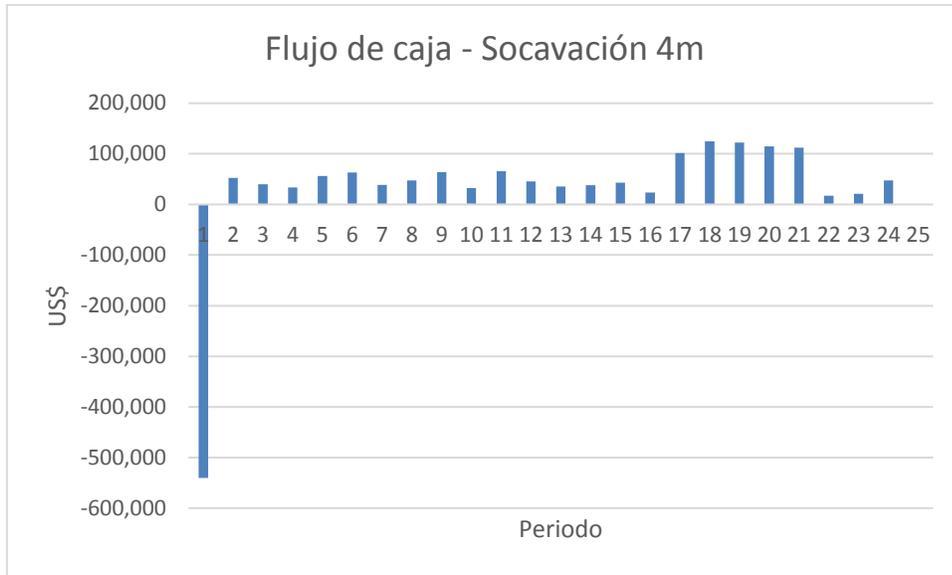


Figura 74 Flujo de caja Socavación 4m

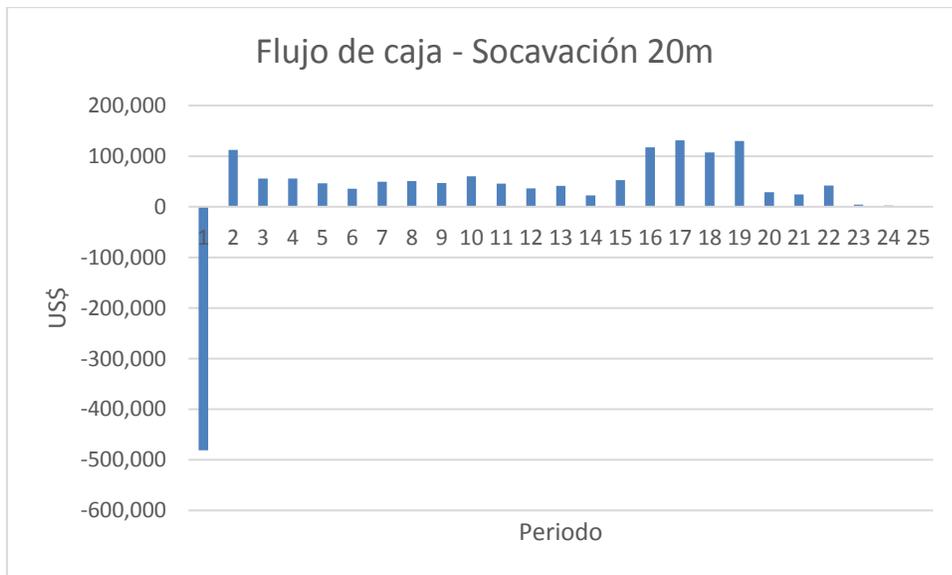


Figura 75 Flujo de caja Socavación 20m

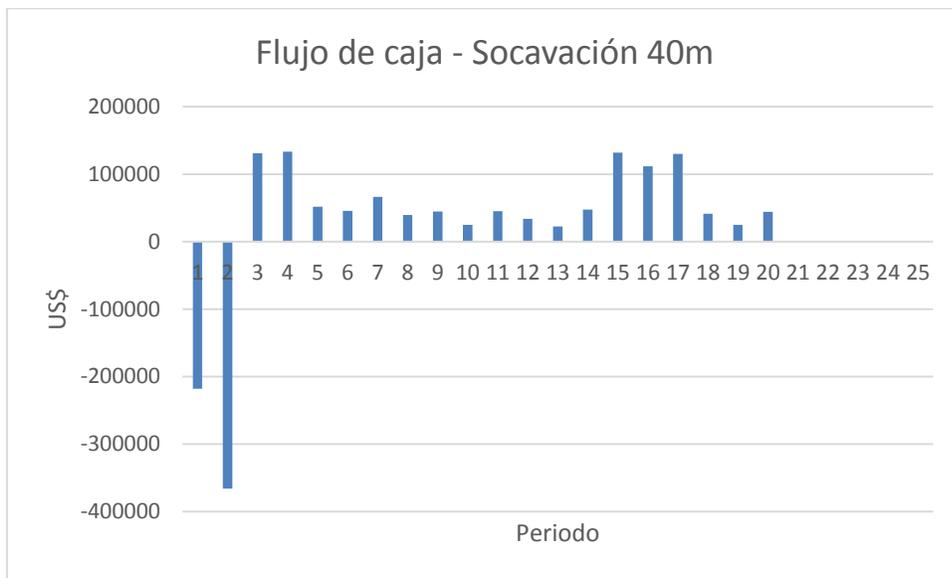


Figura 76 Flujo de caja Socavación 40m