



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

INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

DIEGO NICOLÁS OLIVARES BRÛLÉ

**PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RICARDO VARGAS VERGARA
ALFONSO OVALLE WALKER**

SANTIAGO DE CHILE

2014

RESUMEN

En minas de *block/panel caving* las características del flujo gravitacional del material afectan fuertemente la recuperación y productividad de un yacimiento. Debido a esto, es que las características de flujo del material hundido juegan un rol fundamental en la determinación, a nivel ingenieril, del diseño óptimo de la malla de explotación. Hasta el momento se han realizado pocos estudios sobre la fluidez del material en minería de caving, por lo que resulta trascendental estudiar esto.

El objetivo de esta investigación es el plantear una metodología capaz de predecir las características de flujo de materiales compuestos por finos y gruesos, y con presencia de humedad bajo confinamiento, en un modelo escalado, con tal de replicar el estado de esfuerzos presente en minas de *block/panel caving*.

La fluidez del material puede ser cuantificada por medio de las colgaduras observadas en los puntos de extracción de una mina, al igual que en el modelo experimental, donde los factores que afectan son la distribución granulométrica y su relación con el tamaño de apertura de los puntos, la presencia de finos y agua, la carga vertical, el ángulo de fricción del material, e inclinación de las paredes del punto de extracción.

Por medio del análisis de Janssen-Walker, es posible calcular, de forma teórica, los esfuerzos en las paredes de un bunker completamente lleno de una sección transversal cualquiera con un material no cohesivo, el cual sería el caso del modelo, pudiéndose así escalar los esfuerzos presentes en una mina.

Los experimentos realizados utilizaron mineral con la granulometría esperada de Chuquicamata Subterránea escalada a 1:75, con y sin carga vertical, probando distintas presencias de finos (0, 20 y 40 [%]) y viendo el efecto de la humedad.

Dentro de las principales conclusiones se tiene que, las grandes colpas son el principal factor de colgaduras en los puntos de extracción y que la fluidez disminuye (aumento de colgaduras) al incrementar el confinamiento y el porcentaje de finos presente, y al haber presencia de humedad. En presencia de finos y humedad se tiene que el flujo disminuye considerablemente, pudiendo observarse experimentos donde el flujo de material debió ser asistido y otros donde simplemente, el flujo era inexistente. También, durante los experimentos de flujo confinado, se encontró la formación de colgaduras en altura, las cuales eran imposibles de descolgar y daban por finalizados los experimentos. Estas colgaduras varían de altura y diámetro dependiendo de la presencia de humedad y finos, siendo de menor altura, las que presentan mayor porcentaje de los factores antes mencionados.

ABSTRACT

In block/panel caving mines the characteristics of the gravitational flow of the material strongly affect recovery and productivity of a mine. Because of that, the attributes of the caved ore flow play a fundamental role in determining the optimum design of the mine layout. Until now only a few studies about the fluidity of the material in cave mining have been conducted. Given that, it is important to study about this.

The purpose of this research is to create a methodology able to predict the characteristics of the flow of mixes of fine and coarse materials. This is done through the presence of humidity, and under confinement in a scaled model; under these conditions the stresses which exist in block/panel caving mines can be replicated.

The material's ability to flow in a mine can be quantified in terms of the observed hang-ups in the drawpoints. The same can be applied in the experimental model where the factors that control the flow are as follows: the friction angle, the applied vertical load, the inclination of the walls of the drawpoint, the water presence, and the particle size.

Using the Janssen-Walker analysis it is possible to calculate, theoretically, the stresses in a wall of a completely full bunker of any transversal section. The bunker must be absent of cohesive material, as evidenced in the materials used in the model. Hence, the existing stresses in a mine can be scaled.

The material used in the experiments had the scaled (1:75) expected fragmentation of Chuquicamata Subterránea mine. These experiments were performed with and without vertical load, testing different fines presences (0, 20 and 40 [%]) and analyzing the effect of moisture.

The main conclusions of the research are that coarse material is largely responsible for hang-ups in the drawpoints, and that flow decreases (hang-ups increase) when confinement and/or fines presence increase, and when there is water content. With the presence of humidity and fines the flow decreases considerably. Correspondingly, some of these experiments proved the necessity to assist the material flow while others had no flow at all. Also during the confined flow experiments, high hang-ups were formed. These hang-ups made it impossible to continue the experiments. Furthermore, the hang-ups varied in height and diameter depending on the presence of fines and humidity, those with more of both of the former having a lower height.

AGRADECIMIENTOS

Debido a que todo este documento tiene un orden lógico (o al menos esa era la idea), es que estos agradecimientos también lo tendrá, y ya que es más fácil ordenar bajo un criterio objetivo que uno subjetivo, es que agradeceré por orden cronológico en vez de por importancia.

Entonces, lo que corresponde sería agradecer a mis padres, quienes de alguna forma influyeron a que llegara a ser lo que soy ahora (no sé qué será, pero algo soy). Además, me dieron las herramientas y el apoyo necesario para poder estudiar tranquilo. De igual forma, supongo que debería agradecer a mis hermanos, o al menos mencionarlos. En la misma línea, se tendría que incluir a todo el resto de mi familia.

Luego, vendría la parte escolar, donde influenciaron bastante mis profesores, en especial los de matemáticas y física, con quienes siempre “discutía” y que también fomentaban mi interés por esas asignaturas. Dentro de esta misma etapa estarían incluidos mis compañeros de curso y del colegio en general. Menciones honrosas a Miss Pamela, Miss Teresa, Cubano y Montse. En este período también debo mencionar a toda la gente que conocí debido a mis juegos (Katha, Romi, Gearth, Zelush, entre muchos).

Ya en los primeros años de Universidad, debo admitir que no partí con el pie derecho, cosa que se debe principalmente debido a estupidez personal (en forma de resumen). Pero cabe destacar que se aprovechó en otros ámbitos, aprendí a jugar pool, DotA y taca-taca, entre otras cosas. En este período se debe mencionar a Chanchi, Nacho, Veloso, Shaggy, Feño, Chi, Maguinho, Echeve, Mono, Alfredo, entre otros. Ya con los años y R’s encima me fui poniendo las pilas, cosa que ocurrió debido a la influencia tanto de mi familia, como de mi ex y mis amigos más cercanos, pero principalmente, por un tema de madurez y tal vez de amor propio. Cabe mencionar también a todas las personas que conocí durante esos años (muchos del CEC).

Estando en la especialidad las juntas empezaron a cambiar, donde principalmente nos reunimos los de la sección 3 (Mono, Nico, Holck, Osvald, Fabián (?) y Paukar (?)). Y luego fueron apareciendo las chiquillas (Cami (con familia incluida), Tama, Bárbara y Vale). Después, debido a los ramos fueron apareciendo los giorquera (Oso, Duque, Pancho, Loco, Cris, JC) y la formación de Ñoblense (sumando a Alexis, el Diablo, Memo y Vicho). Del 2012 en adelante, me volví parte del equipo de rugby, y con el tiempo de su directiva. A pesar de las múltiples lesiones, este deporte me ayudó mucho para mi formación en general.

El 2013, debido a mi participación en el CAM (debo admitir que no fui gran aporte, pero algo hice), conocí un poco más a grandes personas (Nacho M, Ma Camila, Sibila, Erika, Katy, etc...). También ese año, en BCTec siempre me ayudaron Pancho, Chamo y Seba, mientras que en BCLab, durante el mismo período destacan Caro, Mena, Migue y Seba. Alguien a quien no puedo no mencionar es a mi prima (Dani), quien me aceptó como roommate, lo que cambió (para bien) la forma en que funcionaba yo.

In 2014 I went to the United States of America, where, given the circumstances, I was able to meet a lot of different people. I would like to mention the chileans (Rita, Made, Nico, Cami, Armando, Martín etc...) and the foreigners (Celena, Peyton, Aline, Marica, Cami, Wesley, Almohada, Sultan, Husain, Hikaru, Morgan, Cooper, Carolina, Hunter, Nathan, Tori, Liana, Will, México, the korean girls, Brandt, Hary, Hyomyung, Ellisa, Kevin, etc...).

Ya entrando al tema que nos convoca, primero corresponde agradecer a mi profesor guía, quien me confió el tema. También, agradecer a los otros profesores de mi comisión por sus correcciones y recomendaciones. Durante el desarrollo de mi memoria, varios fueron los que me ayudaron, donde podría mencionar a todos los del BCLab, pero destacando a René y a David (y a Labbé por su gráfico), junto a unos externos como Alonso, Héctor, Jano y Pancho. Así mismo, agradecer a Juanita, Luchito y Carlitos, junto al resto del personal que trabaja en el departamento, quienes nos hacen más fácil la vida día a día.

Finalmente, a ti, gracias.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Motivación del trabajo.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Alcances.....	4
1.5. Metodología de investigación.....	5
1.6. Contenidos por capítulo.....	7
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. Introducción.....	8
2.2. Flujo gravitacional.....	9
2.2.1. Características básicas de flujo.....	9
2.3. Colgaduras en puntos de extracción.....	14
2.3.1. Arcos continuos.....	14
2.3.2. Arcos mecánicos.....	16
2.4. Guías de diseño.....	18
2.5. Experimentos de flujo confinado.....	20
2.6. Conclusiones del capítulo.....	22
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	23
3.1. Introducción.....	23
3.2. Descripción ensayos de flujo confinado.....	23
3.2.1. Equipo de laboratorio.....	23
3.2.2. Diseño.....	26
3.2.3. Resultados.....	26
3.3. Descripción de experimentos.....	26
3.4. Caracterización de material.....	27
3.4.1. Uniformidad y curvatura.....	28
3.4.2. Esfericidad y redondez.....	28
3.4.3. Contenido de humedad.....	29
3.5. Fluidez del material.....	30
3.6. Colgaduras.....	30
3.7. Cálculo de esfuerzos.....	31

3.8.	Granulometrías.....	32
3.9.	Experimentos a realizar	34
3.10.	Conclusiones del capítulo.....	35
RESULTADOS		36
4.1.	Introducción	36
4.2.	Caracterización del material	36
4.2.1.	Uniformidad y curvatura	36
4.2.2.	Esfericidad y redondez	37
4.2.3.	Contenido de humedad	38
4.3.	Frecuencia e índice de colgaduras	38
4.4.	Altura promedio de colgaduras.....	42
4.5.	Condición de flujo	43
4.6.	Altura y diámetro elipsoide de colgadura alta	43
4.7.	Conclusiones del capítulo	44
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		45
5.1.	Introducción	45
5.2.	Frecuencia e índice de colgaduras	45
5.3.	Altura promedio de colgaduras.....	46
5.4.	Condición de flujo	46
5.5.	Altura y diámetro elipsoide de colgadura alta	48
5.6.	Conclusiones del capítulo	48
CONCLUSIONES.....		49
6.1.	Conclusiones generales.....	49
6.2.	Recomendaciones y trabajo futuro	50
BIBLIOGRAFÍA		51
ANEXO A		53
	Diseño equipo experimental	53
ANEXO B		79
	Dimensiones dimensionamiento bateas	79
ANEXO C		83
	Granulometrías.....	83
ANEXO D		85
	Determinación de esfericidad y redondez.....	85
ANEXO E.....		86
	Colgaduras observadas	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolución de profundidad minas subterráneas (modificado de Brown, 2004).....	3
Figura 2: Diagrama de la metodología de investigación.....	6
Figura 3: Determinación coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008).....	9
Figura 4: Esquema de zonas en punto aislado (Kvapil, 2008).....	10
Figura 5: Definición tipos de material (Kvapil, 2008).....	11
Figura 6: Ancho de flujo para distintos materiales (Kvapil, 2008).....	11
Figura 7: Efecto del tamaño de partícula sobre el flujo (Kvapil, 2008).....	12
Figura 8: Modelo físico de falla progresiva (Kvapil, 2008).....	13
Figura 9: Zonas en arco cohesivo.....	14
Figura 10: Estimación forma del arco.....	15
Figura 11: Arco mecánico.....	16
Figura 12: Diagrama de esfuerzos para arco mecánico alto (Kvapil, 2008).....	16
Figura 13: Diagrama de esfuerzos para arco mecánico bajo (Kvapil, 2008).....	17
Figura 14: Máximo/mínimo espaciamiento de zonas de extracción (Laubscher, 1994).....	18
Figura 15: Determinación de K (Kvapil, 2008).....	19
Figura 16: Efecto de la carga vertical en la fluidez del material.....	20
Figura 17: Prensa hidráulica con cilindro instalado y sus dimensiones [cm].....	24
Figura 18: Dimensiones batea [cm], Batea instalada en cilindro.....	24
Figura 19: Vista isométrica sistema de extracción de material.....	26
Figura 20: Metodología experimental.....	27
Figura 21: Radios en partícula.....	29
Figura 22: Definición de esfericidad y redondez (Hoz, 2007).....	29
Figura 23: Clasificación de colgaduras.....	30
Figura 24: Granulometrías a utilizar.....	33
Figura 25: Comparación curva granulométrica.....	34
Figura 26: Factor de forma para material utilizado en experimentos (Hoz, 2007).....	37
Figura 27: Resultados frecuencia de colgaduras [g/colgadura].....	39
Figura 28: Resultados frecuencia de colgaduras [toneladas/colgaduras].....	40
Figura 29: Resultados índice de colgaduras [colgaduras/1,000 ton].....	41
Figura 30: Resultados altura promedio colgaduras [cm].....	42
Figura 31: Ajuste de curvas, frecuencia de colgaduras.....	45
Figura 32: Efecto de presencia de finos y carga vertical en condiciones de flujo.....	47
Figura 33: Condición de flujo del material.....	47
Figura 34: Malla de 15 x 17.32 [m] operativizada con LHD de 13 [yd ³].....	57
Figura 35: Vista longitudinal batea (HC) [m].....	62
Figura 36: Vista lateral batea (HC) [m].....	62
Figura 37: Área influencia batea (HC) [m].....	63
Figura 38: Vista longitudinal batea escalada (HC) [mm].....	63
Figura 39: Vista lateral batea escalada (HC) [mm].....	64
Figura 40: Área de influencia batea escalada (HC) [mm].....	64
Figura 41: Vista planta batea en base (HC) [mm].....	65
Figura 42: Vista isométrica batea en base (HC).....	65
Figura 43: Vista longitudinal batea (HA o P) [m].....	66
Figura 44: Vista transversal batea (HA o P) [m].....	66
Figura 45: Área de influencia batea (HA o P) [m].....	67
Figura 46: Vista longitudinal batea (HA o P) [mm].....	67

INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

Figura 47: Vista transversal batea (HA o P) [mm].....	68
Figura 48: Área influencia batea (HA o P) [mm].....	68
Figura 49: Vista planta batea en base (HA o P) [mm]	69
Figura 50: Vista isométrica batea en base (HA o P)	69
Figura 51: Vista longitudinal batea Andina [m].....	70
Figura 52: Vista transversal batea Andina [m].....	70
Figura 53: Vista isométrica batea Andina	71
Figura 54: Vista isométrica batea Andina en base 1:50 [cm].....	71
Figura 55: Vista isométrica batea Andina en base 1:75 [cm].....	72
Figura 56: Vista isométrica batea Andina en base 1:100 [cm].....	72
Figura 57: Componentes sistema de extracción	74
Figura 58: Vista isométrica sistema de extracción de material	75
Figura 59: Vista lateral sistema de extracción de material [cm]	75
Figura 60: Vista planta sistema de extracción de material [cm]	75
Figura 61: Motor de paso	76
Figura 62: Servo engranajes	76
Figura 63: Vista planta sistema de extracción con cilindro.....	77
Figura 64: Vista lateral sistema completo	77
Figura 65: Vista longitudinal batea Andina a escala 1:50 [cm]	79
Figura 66: Vista transversal batea Andina a escala 1:50 [cm]	79
Figura 67: Vista longitudinal batea Andina a escala 1:75 [cm]	80
Figura 68: Vista transversal batea Andina a escala 1:75 [cm]	80
Figura 69: Vista longitudinal batea Andina a escala 1:100 [cm]	80
Figura 70: Vista transversal batea Andina a escala 1:100 [cm]	81
Figura 71: Cortes cilindro con batea Andina a escala 1:50 [cm]	81
Figura 72: Cortes cilindro con batea Andina a escala 1:75 [cm]	82
Figura 73: Cortes cilindro con batea Andina a escala 1:100 [cm]	82
Figura 74: Colgadura alta, caso base, vista inferior	86
Figura 75: Colgadura alta, caso base, vista superior	86
Figura 76: Colgadura alta, experimento 20% finos y 15% humedad, vista superior	87
Figura 77: Colgadura alta, experimento 40% finos, vista inferior	87
Figura 78: Colgadura en punto de extracción, experimento 40% finos	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dimensiones de aperturas (Kvapil, 2008)	18
Tabla 2: Ventajas y desventajas bateas tipo Andina.....	25
Tabla 3: Resultados metodología Janssen-Walker	32
Tabla 4: Alturas de columna en función del esfuerzo	32
Tabla 5: Masas por malla.....	33
Tabla 6: Experimentos realizados	34
Tabla 7: Índice de uniformidad	36
Tabla 8: Índice de curvatura	36
Tabla 9: Esfericidad y redondez	37
Tabla 10: Humedad por curva	38
Tabla 11: Resultados número de colgaduras [#]	38
Tabla 12: Resultados masa extraída [g].....	38
Tabla 13: Resultados frecuencia de colgaduras [g/colgadura]	39
Tabla 14: Resultados frecuencia de colgaduras [toneladas/colgaduras]	40
Tabla 15: Resultados índice de colgaduras [colgaduras/1,000 ton]	41
Tabla 16: Resultados altura promedio colgaduras [cm]	42
Tabla 17: Resultados condición de flujo	43
Tabla 18: Resultados altura/diámetro colgadura alta [m].....	43
Tabla 19: Factores de ajuste utilizados.....	46
Tabla 20: Dimensiones de ápex en sectores de El Teniente.....	54
Tabla 21: Altura de visera según variante de caving.....	54
Tabla 22: Ángulo de visera según tipo de hundimiento	54
Tabla 23: Ángulo de talud según tipo de hundimiento.....	55
Tabla 24: Distancia entre bateas o ápex menor	56
Tabla 25: Ángulo pared entre bateas	56
Tabla 26: Parámetros de entrada diseño bateas	58
Tabla 27: Parámetros de salida diseño bateas	58
Tabla 28: Ventajas y desventajas bateas tipo Andina.....	73
Tabla 29: Granulometrías Chuquicamata y finos	83
Tabla 30: Granulometrías experimentos	84
Tabla 31: Esfericidad y redondez [cm].....	85

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Coeficiente de movilidad (Kvopil, 2008)	9
Ecuación 2: Excentricidad elipsoide (Kvopil, 2008)	12
Ecuación 3: Ángulo de reducción.....	15
Ecuación 4: Ángulo de fricción interna.....	15
Ecuación 5: Modelo de predicción de colgaduras (Gómez, 2014).....	21
Ecuación 6: Coeficiente de uniformidad (Craig, 2004).....	28
Ecuación 7: Coeficiente de curvatura (Craig, 2004)	28
Ecuación 8: Definición de esfericidad (Cho et al, 2006).....	28
Ecuación 9: Definición de redondez (Cho et al, 2006).....	28
Ecuación 10: Relación coeficiente de fricción con ángulo de fricción	31
Ecuación 11: Relación esfuerzos verticales y horizontales	31
Ecuación 12: Definición de Ko	31
Ecuación 13: Escalamiento.....	40
Ecuación 14: Frecuencia de colgaduras [toneladas/colgadura]	46
Ecuación 15: Cálculo distancia calle/visera	53
Ecuación 16: Altura de talud de batea para hundimiento convencional.....	55
Ecuación 17: Altura de talud de batea para hundimiento avanzado o previo.....	55
Ecuación 18: Determinación distancia entre niveles de producción y hundimiento	55
Ecuación 19: Ancho del pilar corona	55
Ecuación 20: Altura del pilar corona.....	55
Ecuación 21: Distancia entre zanjas perpendicular a la zanja	55
Ecuación 22: Área de influencia de una batea.....	56
Ecuación 23: Diámetro de influencia de una batea	56

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

En las últimas décadas la mayor parte de la producción mundial de oro y cobre ha sido extraída desde rajos abiertos, a excepción del oro producido en minas profundas en Sudáfrica. Sin embargo, en la industria minera se aprecia que la profundidad de los rajos no puede seguir aumentando. No solo los costos favorecen a los métodos de explotación masivos subterráneos cuando en rajos aumenta la razón estéril mineral, sino que también hay mucha incertidumbre acerca de la capacidad ingenieril de poder asegurar la estabilidad, seguridad y productividad para rajos que alcanzan gran profundidad. Aún más importante, los rajos abiertos tienen un impacto ambiental mucho mayor que minas subterráneas de igual producción. Además, muchos de los yacimientos conocidos, y los que están siendo descubiertos o probados, se encuentran a profundidades mayores que las que alcanzan los rajos actuales más profundos. La profundización ha hecho que se deban estudiar nuevos factores relacionados con la naturaleza y comportamiento geotécnico de la roca (Chacón et al, 2004). Todo lo anterior se ve reflejado en que dos de los rajos más grandes y antiguos, Chuquicamata y Bingham Canyon, están iniciando transiciones a minas subterráneas de *caving* (Carter & Rusell 2000, Flores 2004, 2005). Esta minería de *caving* se refiere a todas las operaciones mineras en que el cuerpo mineralizado se hunde de forma natural luego de que su base es extraída y donde luego, todo este material es recuperado desde puntos de extracción (Laubscher 1994).

Debido a su masividad, su capacidad de explotar yacimientos de bajas leyes y sus costos, los cuales son menores a otros métodos subterráneos y similares a los costos de rajos, es que los métodos de explotación por *block/panel caving* serán un factor clave en el futuro de la industria minera. Otro factor que hace más atractivo el *block/panel caving* es que dentro de los métodos subterráneos, es el que tiene mayor productividad por trabajador y tiene el potencial de automatización (Brown, 2007).

En *block caving* el cuerpo mineralizado completo o un bloque de mineral aproximadamente equidimensional es hundido para generar *caving*. La zona de hundimiento es perforada y tronada progresivamente y parte del material quebrado es extraído con tal de generar espacio donde pueda alojarse el material inicial del *caving*. A medida que se extrae el material quebrado, el *caving* se propaga verticalmente a través del cuerpo mineralizado o bloque, hasta alcanzar la superficie, donde provoca subsidencia superficial. El mineral es extraído desde el nivel de producción que se encuentra debajo del nivel de hundimiento y que está conectado a este último por medio de bateas por donde el mineral se desplaza debido a la gravedad hasta los puntos de extracción ubicados en el nivel de producción. Desde este nivel el mineral es transportado hasta el nivel de acarreo y luego hacia afuera de la mina (Brown, 2007).

En *panel caving* el cuerpo mineralizado o bloque no se hunde por completo, si no que un panel o franja del cuerpo es hundido generando el *caving*. El desarrollo, hundimiento y extracción de los paneles siguientes se realizan a una distancia determinada del panel previo, teniendo como resultado que el frente de hundimiento se mueve a través del cuerpo

mineralizado con un ángulo constante en la dirección de avance de los paneles (Brown, 2007).

Dentro de los riesgos asociados con la minería de *caving* se encuentran (Heslop 2000 y Summers 2000):

- Calidad de los datos geológicos utilizados en la estimación de la estructura, forma, tamaño y ley del yacimiento.
- Calidad datos geotectónicos del yacimiento incluyendo estructuras mayores, discontinuidades, características de la roca, esfuerzos in situ e hidrología. Esto es necesario para determinar la hundibilidad, fragmentación, estabilidad y dilución.
- Determinación de hundibilidad que depende de la predicción del radio hidráulico del nivel de hundimiento desde donde se comenzará el *caving*.
- Propagación del *caving* que depende del diseño del nivel de hundimiento, la tasa de hundimiento, los esfuerzos inducidos en los límites y sobre la zona de desprendimiento de mineral, las estructuras y características geotécnicas del cuerpo mineralizado, y la estrategia de extracción utilizada. La no iniciación o propagación del *caving* es uno de los mayores riesgos a los que se pueden enfrentar las minas de *caving* debido a que estas requieren una gran inversión, son poco selectivas y tienen una naturaleza poco flexible.
- Fragmentación resultante del proceso de *caving*. Este factor influye el espaciamiento y diseño de los puntos de extracción, el tamaño y desempeño de los equipos, la generación de colgaduras y realización de reducción secundaria en los puntos de extracción, la necesidad de utilizar chancadores *sizer* subterráneos, y la productividad de la mina.
- El desempeño del *caving* que es reflejado en que tan bien se cumple la planificación de la razón de propagación de *caving*, la tasa de producción, el grado de fragmentación, las leyes de mineral y la recuperación minera.
- Estabilidad del diseño y de la necesidad de soporte o refuerzos de las excavaciones incluyendo calles, excavaciones del nivel de extracción, bateas e infraestructura auxiliar. La estabilidad de las excavaciones no depende solo de las propiedades geotécnicas del macizo y de los esfuerzos in situ, sino que también depende de factores como el *layout* tridimensional de la mina, el momento en que se realizan ciertos desarrollos y actividades mineras, y la razón de hundimiento.
- Grandes peligros operacionales tales como colapsos de excavaciones, estallidos de roca, estallidos de aire, y bombeos de barro y agua.
- Peligros medioambientales bien definidos que incluyan aspectos como la influencia de la mina sobre el agua subterránea y superficial, el tratamiento y descarte de estéril, la influencia en la flora y fauna, la subsidencia superficial, los derechos de tierra, los asuntos arqueológicos, y otras áreas de interés comunitario.
- Riesgos a la conveniencia del proyecto minero debido a cambios a la estructura de costos, a las relaciones industriales, a las variaciones de precios e inestabilidad política local.

1.2. Motivación del trabajo

Debido a su impacto tanto en la recuperación como en la productividad minera de un yacimiento, es importante caracterizar los parámetros que determinan la fluidez del material.

Las colgaduras, o el no flujo de material, son unas de las interferencias operacionales que más afectan la productividad y los costos en una mina de *caving*. A pesar de esto, se han hecho escasos estudios de la capacidad de fluir de diferentes materiales en las minas de *caving*, y de estos, la mayoría de las observaciones están relacionadas a flujo de material en piques de traspaso, dejando de lado los puntos de extracción.

Debido a la profundización de las minas masivas (Castro, 2014) y a que un aumento de las alturas de columna de extracción genera una disminución del costo de preparación por tonelada (Ovalle, 2014), es que se hace necesaria la cuantificación del efecto del confinamiento generado por la columna en la fluidez del material. La profundización en el tiempo se refleja en la Figura 1.

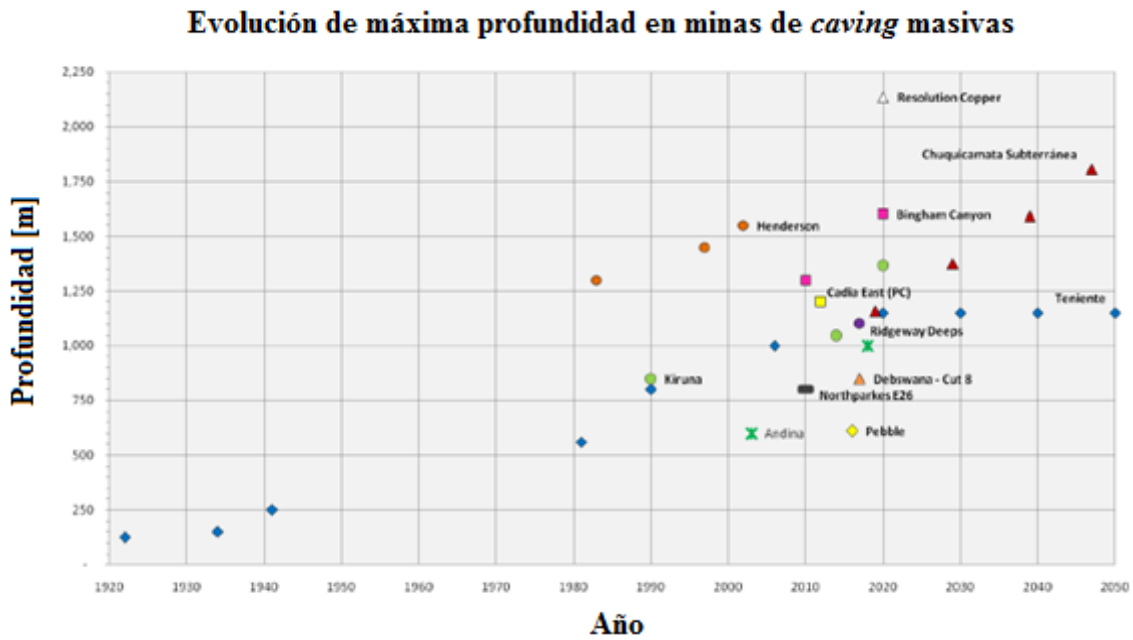


Figura 1: Evolución de profundidad minas subterráneas (modificado de Brown, 2004)

1.3. Objetivos

Los objetivos, generales y específicos, de esta investigación son los que se listan a continuación.

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general que se desea alcanzar es cuantificar de manera experimental la influencia que tiene el material fino y la humedad en el flujo gravitacional confinado.

1.3.2. Objetivos específicos

Para llevar a cabo el objetivo general, se consideran los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un estudio del estado del arte del efecto de la humedad y presencia de finos en el flujo gravitacional confinado.
- Diseñar y construir set experimental para la realización, de acuerdo a la metodología propuesta, de los experimentos definidos.
- En cuanto a los experimentos, cuantificar cantidad, dimensiones y tipo de colgaduras. Además, definir condición de flujo de cada experimento.
- Estudiar el efecto de la sobrecarga aplicada, la presencia de agua y distintas distribuciones granulométricas en la fluidez del material en función de los resultados obtenidos.
- Generar un modelo multivariable de predicción de colgaduras en función de la carga vertical, presencia de finos y humedad.

1.4. Alcances

Para este trabajo se tienen los siguientes alcances:

- Se trabajará a escala laboratorio con un modelo experimental a escala 1:75.
- Se utilizará un solo punto de extracción y se hará una cantidad de extracciones de material definida o hasta que no se pueda continuar con el experimento.
- Se estudiará el efecto de los siguientes parámetros:
 - Distribución granulométrica.
 - Presencia de finos.
 - Presencia de agua.
 - Carga vertical.

1.5. Metodología de investigación

La metodología de investigación planteada en esta memoria apunta a cumplir con los objetivos, tanto generales como específicos, de esta investigación. Los siguientes pasos son propuestos con tal de cumplir con los objetivos antes mencionados.

1. Determinación de variables a estudiar: Para poder generar una metodología de investigación es necesario determinar qué es lo que se desea estudiar y el por qué se debería estudiar, y con lo anterior determinar las variables que más influyen en el objeto de estudio.
2. Diseño y construcción del equipo de laboratorio: Al no existir equipamiento estándar para la realización de estos experimentos, es necesario diseñar y construir parte del equipo a utilizar, siendo en este caso, la batea y el sistema de extracción.
3. Caracterización de las propiedades del material: Es fundamental conocer las características del material a ensayar ya que éstas definen el comportamiento de su flujo. Se determinan las distribuciones granulométricas, el factor de forma y las propiedades de resistencia a la compresión del material a utilizar.
4. Determinación de experimentos: Para determinar los experimentos a realizar se estudian los rangos a utilizar de cada una de las variables estudiadas.
5. Realización de los experimentos: Se efectúan los experimentos determinados y se mide masa extraída, número, tipo y altura de colgaduras, y cantidad de ciclos de extracción.
6. Análisis de resultados experimentales: Ya obtenidos los resultados experimentales, éstos son analizados y discutidos con el objetivo de obtener conclusiones acerca del efecto de las variables estudiadas, tanto en conjunto como por separado.
7. Desarrollo de metodología de predicción: Hechos ya los análisis, es posible obtener un modelo de predicción de colgaduras que considere las variables estudiadas para poder ser aplicada a minería de *caving*.

En la Figura 2 se muestra un diagrama de la metodología de investigación antes explicada.

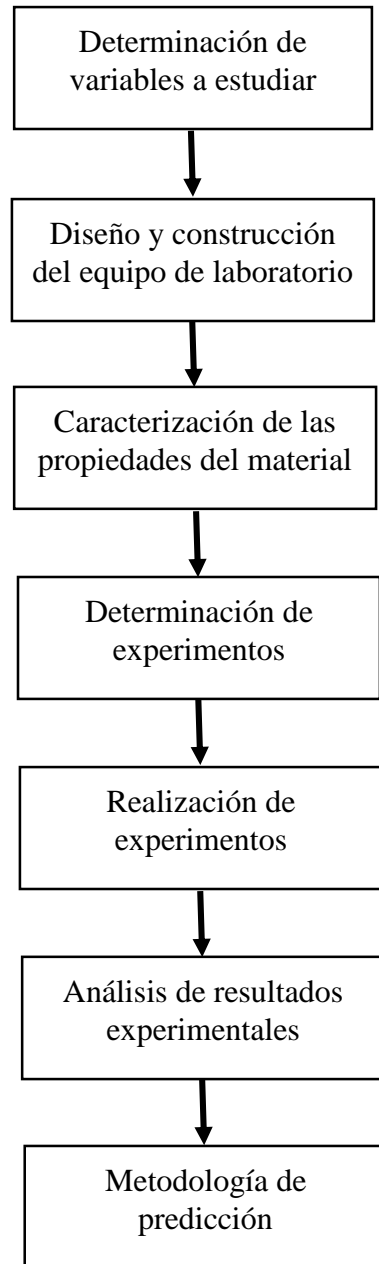


Figura 2: Diagrama de la metodología de investigación

1.6. Contenidos por capítulo

Los contenidos de esta investigación se discuten en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Corresponde a la introducción del trabajo, donde se exponen: motivación del trabajo, objetivos, alcances y la metodología de investigación.

Capítulo 2: Son los antecedentes de esta investigación donde se explica el trabajo realizado a la fecha, los factores que afectan la movilidad del material y las colgaduras en los puntos de extracción.

Capítulo 3: Describe la metodología experimental utilizada para llevar a cabo los experimentos, definiendo el plan experimental efectuado, detallando tipo de material, granulometría y variables consideradas para cada uno de los experimentos.

Capítulo 4: Se muestran los resultados obtenidos para la caracterización del material y de los experimentos realizados.

Capítulo 5: Se presenta el análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 6: Conclusiones generales, recomendaciones y trabajo a futuro.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introducción

El flujo gravitacional de materiales granulares es el proceso en que el material se mueve desde su posición inicial hacia el punto de extracción debido a la gravedad. Al ser el flujo gravitacional un método de transporte eficiente y de bajo costo para materiales granulares, éste juega un rol importante en un amplio rango de problemas de manejo de materiales como el diseño de silos y en sistemas de traspaso de mineral (Castro, 2006). Este flujo afecta significativamente el diseño minero y las estrategias de extracción, por ende, también la recuperación minera (Chitombo, 2010).

En todos los yacimientos explotados por métodos de hundimiento masivos existen eventos de interferencia de flujo, como las colgaduras y los sobretamaños, que, como se mencionó previamente, afectarán el resultado final del método. La presencia de material de grandes tamaños, finos o agua favorece la formación de arcos estables en altura al interior de una batea, lo cual es perjudicial para el desempeño de la extracción. Un ejemplo son las frecuentes interferencias de flujo en puntos de extracción, que obligan a realizar tronaduras de reducción secundaria, aumentando los riesgos asociados a las operaciones de extracción, a lo que se suma una disminución de la disponibilidad de puntos de extracción y a la capacidad productiva asociada a las calles de producción involucradas (Maass, 2013).

La fragmentación o curva granulométrica, además de influir enormemente en el flujo de material, es un factor determinante en la producción de un punto de extracción y por ende, en el éxito de una mina de *caving*. Los parámetros que se ven afectados por la fragmentación obtenida son (Laubscher, 1994):

- Espaciamiento y productividad de los puntos de extracción.
- Entrada de dilución y esfuerzos presentes en columna de extracción.
- Método y tasa de extracción.
- Costos y daños asociados a reducción secundaria.

En este capítulo se presenta el estudio y revisión bibliográfica realizada sobre los temas principales que están involucrados en esta investigación.

2.2. Flujo gravitacional

Entender los mecanismos de flujo gravitacional es vital para el éxito de una mina de *caving*. El flujo gravitacional impacta tanto el diseño como la operación de la mina, incluyendo los *layout* de los niveles de producción y hundimiento, la geometría de las bateas, la propagación del *caving*, la formación de *air gap* y la recuperación de reservas. La teoría de flujo convencional se basa en elipsoides de flujo aislados y comportamiento de flujo interactivo (Brunton et al, 2012).

Además, las características del flujo gravitacional afectan la dilución, la cual, junto a la recuperación de reservas, se requieren conocer, en una malla de extracción y en una secuencia de tiraje en específico, para así poder cuantificar el efecto que tiene la tasa de extracción sobre la evaluación económica de un proyecto (Castro y Whitten, 2007).

2.2.1. Características básicas de flujo

Cada material en específico tiene sus propias características específicas como su movimiento. La movilidad de un material particulado depende principalmente de su fricción interna. Simplificando, se puede asumir que el coeficiente de fricción interna, f , es la tangente del ángulo natural de reposo (ϕ). El coeficiente de movilidad aproximado, m , se define en la Ecuación 1.

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

Ecuación 1: Coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008)

El coeficiente de movilidad para distintos valores de ϕ y f se muestran en la Figura 3. El coeficiente de movilidad más alto es 1 y este se encuentra en materiales cuyo ángulo de reposo es 0° y que tiene un coeficiente de fricción interna de cero.

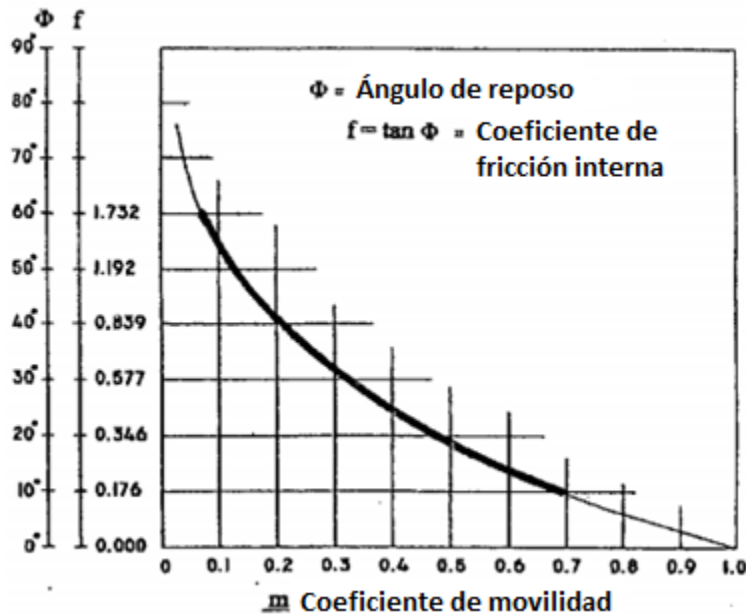


Figura 3: Determinación coeficiente de movilidad (Kvapil, 2008)

Las características de flujo se muestran en el esquema de la Figura 4, donde se tiene una forma similar a una elipse, pero que en tres dimensiones, representa un elipsoide de revolución. También se logran observar los elipsoides de movimiento (E_L) y de extracción (E_E). El elipsoide de extracción representa a la zona de extracción (EZ) que se define como el volumen que determina la posición original del material que ha sido removido desde un punto de extracción, para una masa dada. El elipsoide de movimiento representa la zona de movimiento (MZ), que es el volumen que define el límite entre el material estacionario y el material que se ha desplazado desde su posición original. Cuando ambas zonas son extraídas a través de un solo punto de extracción, se denomina a los volúmenes como zona de extracción aislada (IEZ) y zona de movimiento aislada (IMZ) (Kvapil, 2008; Vargas, 2008; Fuenzalida, 2012).

A medida que aumenta la extracción, la altura incrementa mientras que el ancho se mantiene prácticamente constante lo que genera que el tamaño del elipsoide crezca. Cabe señalar que el material al fluir se encuentra expuesto a diferentes esfuerzos, lo que puede causar fragmentación secundaria. Presencia de 10 a 15% de finos puede cambiar el comportamiento del material grueso, pudiendo, bajo algunas condiciones, aumentar la fluidez de este material. Pero, en algunas situaciones, la presencia de finos junto a humedad puede hacer que el material presente comportamientos plásticos y hasta cementantes, reduciendo su movilidad (Kvapil, 2008).

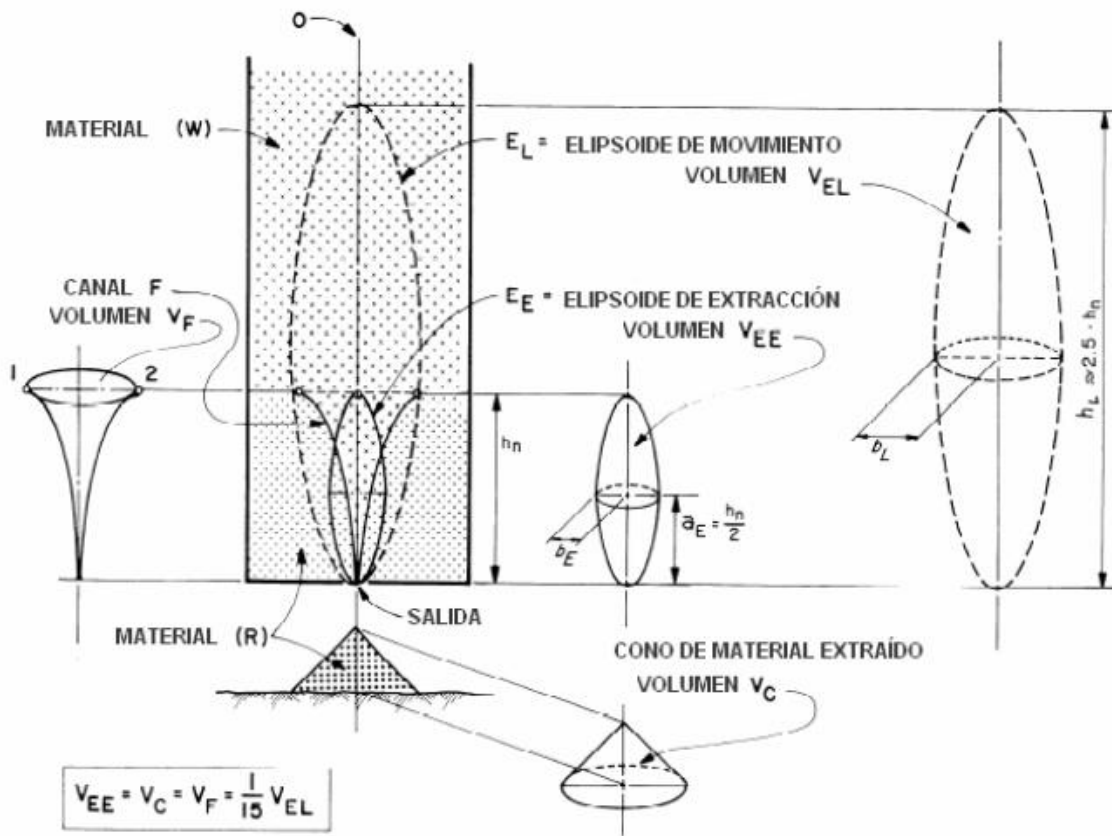


Figura 4: Esquema de zonas en punto aislado (Kvapil, 2008)

Al no haber una clasificación formal de los materiales antes descritos, se utiliza la Figura 5 para ejemplificarlos, donde se tienen materiales desde el tipo 1 que está compuesto por material grueso con tamaños y formas relativamente uniformes, hasta el tipo 4 que consiste de una mezcla de bloques grandes, partículas intermedias y finos.

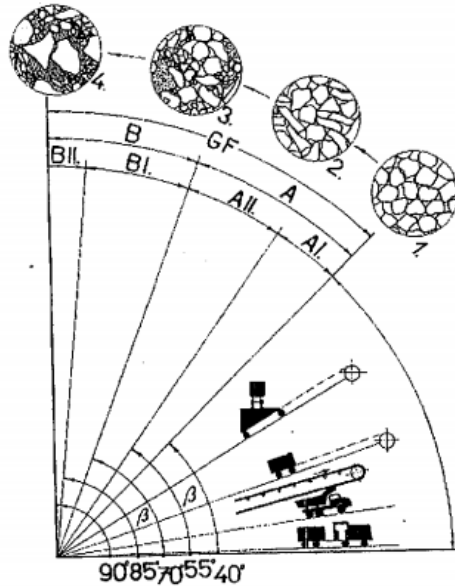


Figura 5: Definición tipos de material (Kvapil, 2008)

Como se muestra en la Figura 6, se puede expresar el ancho del flujo gravitacional en función del tipo de material. Donde el material en a) es material muy fino, en b) es material granular y en c) es material grueso.

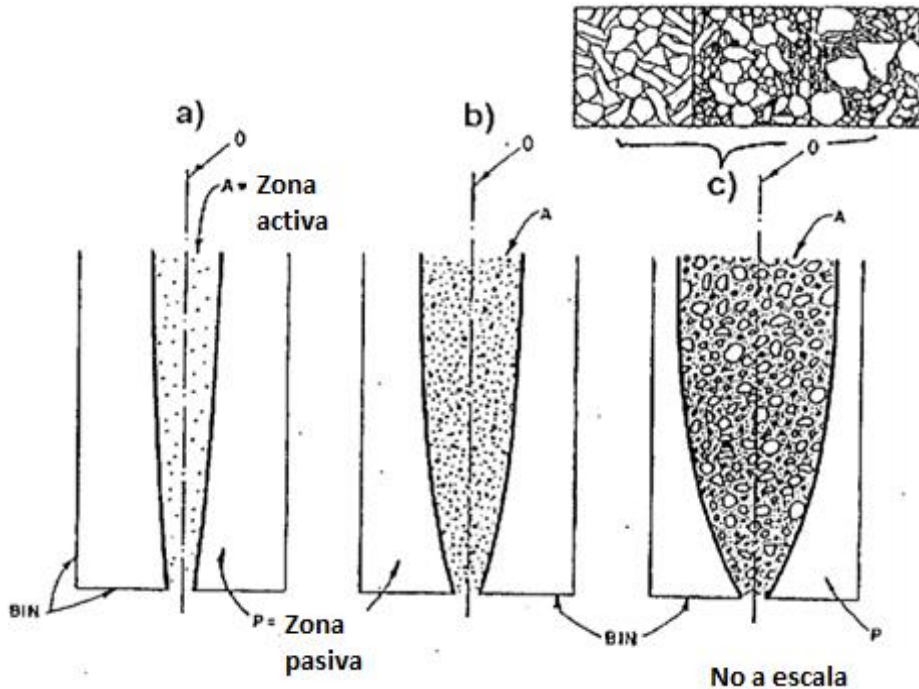


Figura 6: Ancho de flujo para distintos materiales (Kvapil, 2008)

La forma de los elipsoides de extracción y de movimiento pueden ser representados por su excentricidad, como se define en la Ecuación 2.

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

Ecuación 2: Excentricidad elipsoide (Kvapil, 2008)

Donde (a) es el eje semi mayor y (b) es el eje semi menor del elipsoide. A mayor excentricidad, más delgado es el elipsoide de extracción y menor es su volumen. Para el mismo tipo de material, la excentricidad no es constante y aumenta con la altura del elipsoide de extracción y movimiento. De igual forma, ésta no depende solo del tamaño de partícula, sino que también es función de estos factores (Kvapil, 2008):

- 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 cargas externas.
- Tasa de extracción.
- Densidad del material.

El efecto que tiene la movilidad del material sobre la forma y la excentricidad del elipsoide de extracción y movimiento se muestran en la Figura 7.

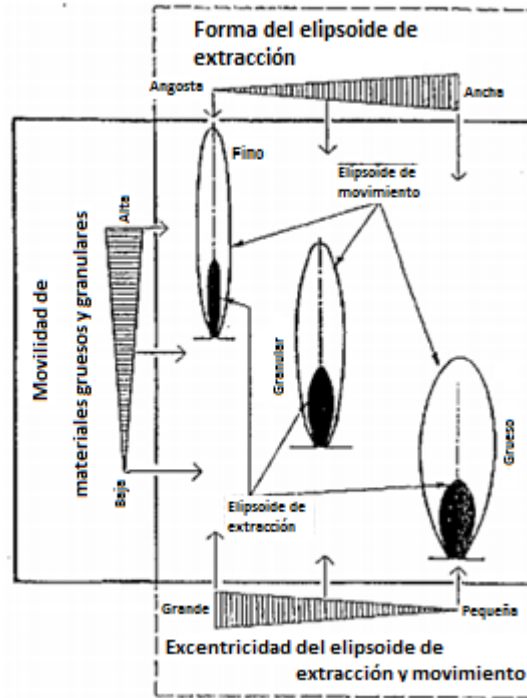


Figura 7: Efecto del tamaño de partícula sobre el flujo (Kvapil, 2008)

El modelo mostrado en la Figura 8 muestra que el proceso de falla del techo y de la sobrecarga es un proceso intermitente, el cual es interrumpido debido a la formación de arcos. Estos arcos, al generarse, crean pequeñas cavidades que pueden colapsar al poco tiempo. Para materiales con gran movilidad, la formación de arcos será muy poco frecuente, generando baja interrupción de flujo. Para materiales de baja movilidad, esta interrupción de flujo por arcos será alta y se formarán grandes cavidades, las que pueden permanecer abiertas por largos períodos de tiempo antes de colapsar.

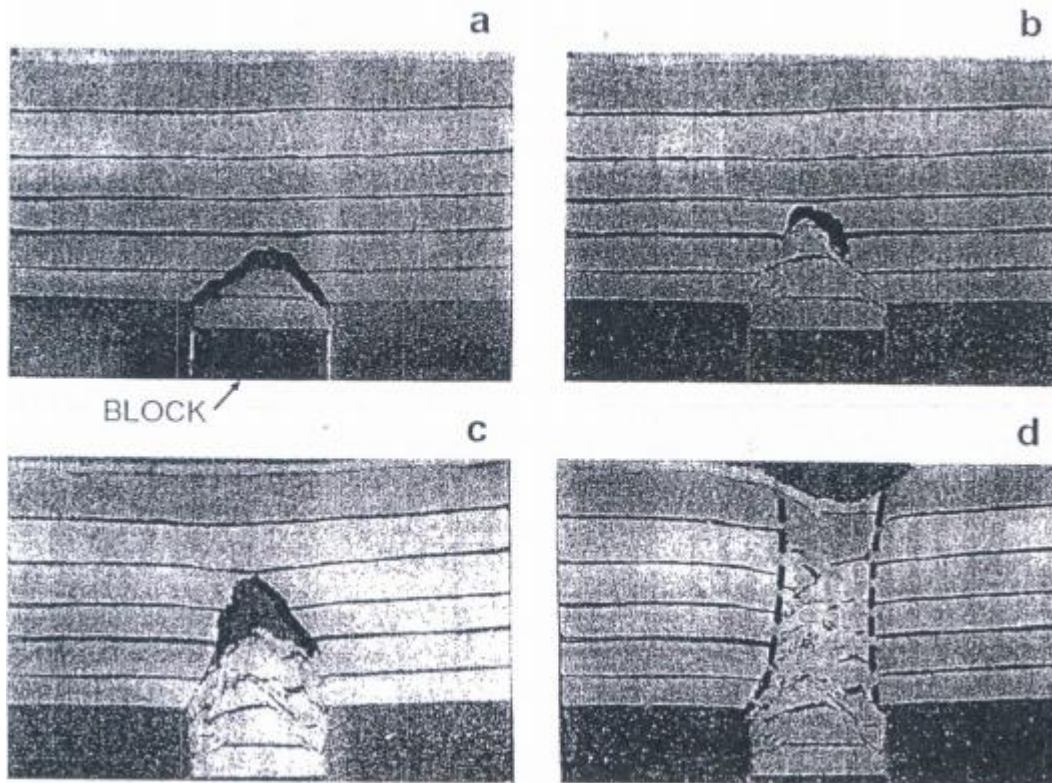


Figura 8: Modelo físico de falla progresiva (Kvapil, 2008)

Tras examinar el comportamiento de este tipo de modelos, se llegó a las siguientes conclusiones cualitativas (Kvapil, 2008):

- La presencia de material grueso en el flujo gravitacional genera irregularidades en el flujo como la formación de arcos o colgaduras.
- La formación de arcos grandes o pequeños es un fenómeno usual para cualquier tipo de material. Estos arcos se pueden generar debido a la geometría de las bateas o puntos de extracción y a causas naturales. De igual forma, pueden provocar distintos tipos de dificultades para la extracción del mineral y generar riesgos en la labor minera. Por ejemplo, la falla abrupta de un gran arco sobre los puntos de extracción puede resultar en un peligroso *air blast*.

2.3. Colgadas en puntos de extracción

Dentro de los factores que más afectan la productividad dentro de una mina explotada por los métodos de *block* o *panel caving* se encuentran las colgadas en los puntos de extracción. Las colgadas son un impedimento temporal al azar del flujo de mineral en la zona de un punto de extracción. Su ocurrencia implica un cese de extracción desde el punto afectado, disminuyendo su disponibilidad.

Las colgadas pueden formar 2 tipos de arcos, los que son en continuo y los que se forman en material grueso. Los arcos continuos ocurren debido a compresión. Es importante entender que los arcos son el resultado del material intentando recuperar el equilibrio (Kvapil, 2008).

2.3.1. Arcos continuos

Los arcos continuos son resultado del incremento de compresión del material en los *abutments* (zona de concentración de esfuerzos) y la relajación bajo el arco. El material, finalmente, se separa debido a los esfuerzos de corte bajo el arco y la compresión del arco. La Figura 9 muestra el instante en que el material bajo el arco se separa del arco. Se denota (A) como los *abutments*, (1) el arco, (2) la zona de separación, (3) es la zona separada bajo el arco, y (5) y (6) son los puntos desde donde se extrae. Los arcos se pueden formar debido a que los *abutments* son las zonas más resistentes fuera de la zona de flujo gravitacional.

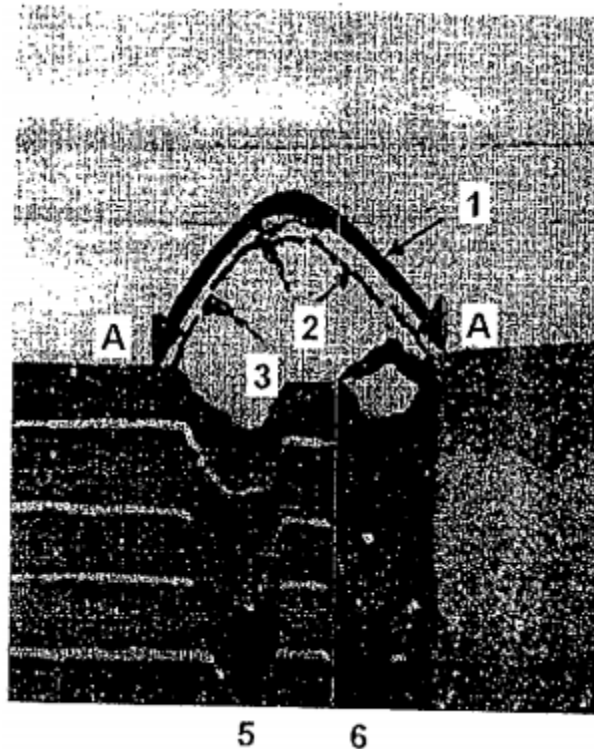


Figura 9: Zonas en arco cohesivo

La profundidad a la que se generan los arcos, o sea, la carga que actúa, es uno de los factores que más influyen en la forma del arco. A medida que aumenta la profundidad (H [m]), el ángulo de fricción interna disminuye. Como simplificación, se considera que el ángulo de

fricción interna (ϕ) disminuye en función de un ángulo de reducción (Ψ) el cual se define con la fórmula empírica mostrada en la Ecuación 3.

$$\Psi = \frac{\gamma H \cos(\phi)}{S \sin(\phi)} * \frac{9.81}{3}$$

Ecuación 3: Ángulo de reducción

Donde:

γ = Peso/volumen [toneladas/m³].

S = Resistencia al corte de la roca in situ.

Con el ángulo de reducción calculado se obtiene el ángulo de fricción interna a utilizar en los cálculos (ϕ_{decr}) con la Ecuación 4.

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

Ecuación 4: Ángulo de fricción interna

Utilizando la Figura 10 se puede estimar la forma del arco una vez teniendo calculado ϕ_{decr} . Este diagrama se presenta en forma de zonas, donde la zona 1 es para arcos altos, la zona 2 para arcos altos medios, la zona 3 para arcos bajos y la zona 4 para arcos planos. La relación mostrada es aproximada y considera las propiedades del material, así como, las condiciones aplicadas.

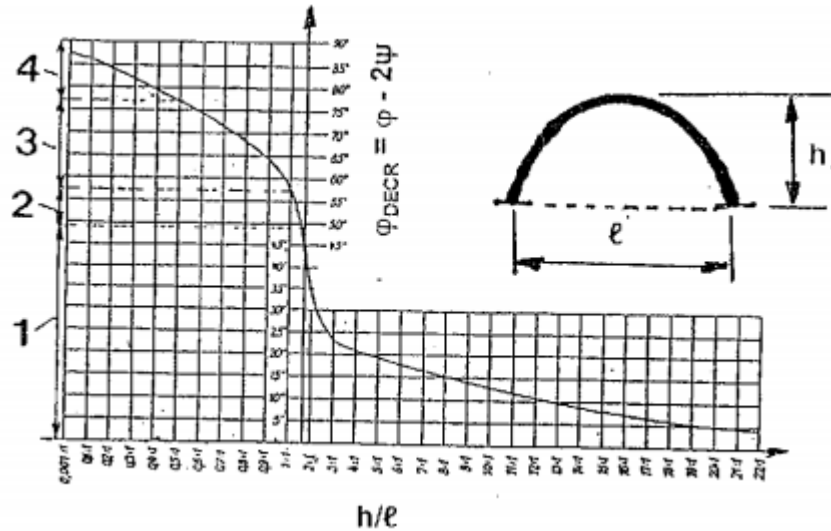


Figura 10: Estimación forma del arco

2.3.2. Arcos mecánicos

Los arcos mecánicos se forman debido a material grueso y pueden generar problemas operacionales para la extracción minera. Estos arcos se pueden formar en cualquier parte dentro de la zona de extracción y tienen forma parabólica (Figura 11).

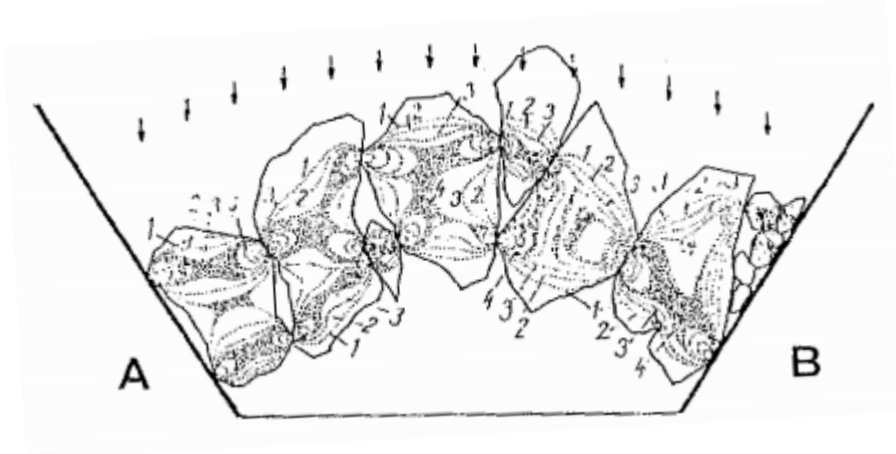


Figura 11: Arco mecánico

La Figura 12 y la Figura 13 muestran la altura de arcos en función de la inclinación de la pared. Además, muestran la distribución de esfuerzos en la geometría simplificada.

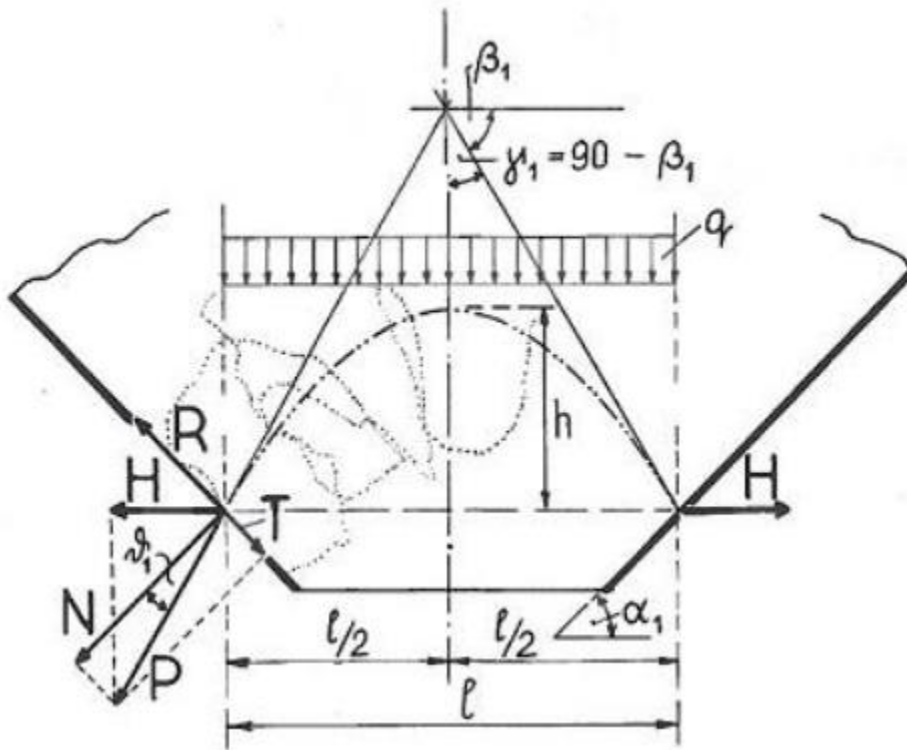


Figura 12: Diagrama de esfuerzos para arco mecánico alto (Kvapil, 2008)

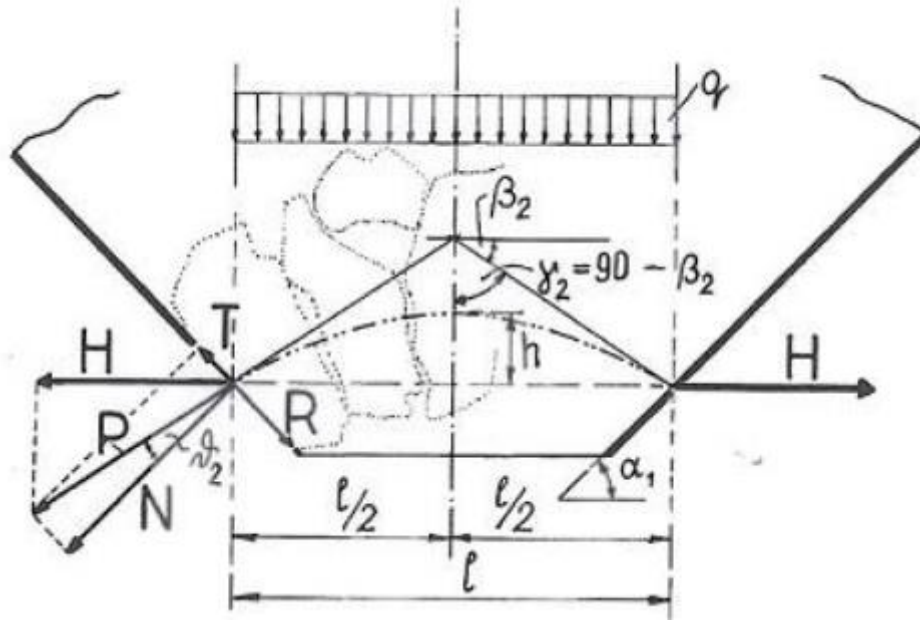


Figura 13: Diagrama de esfuerzos para arco mecánico bajo (Kvapil, 2008)

Se puede resumir que la formación de arcos en materiales gruesos es como sigue:

- La principal causa de formación de arcos es la reducción del ancho del flujo gravitacional del material grueso en el punto de extracción.
- Los arcos mecánicos son formados por la capa inferior de bloques que se trancan entre ellos sobre la salida del material. Estos arcos se forman más fácilmente si la fragmentación es más gruesa.
- Los arcos suelen tener forma parabólica.
- La altura del arco mecánico depende de la inclinación de las paredes en la descarga o punto de extracción. La altura se vuelve menor si las paredes son más inclinadas.
- Los esfuerzos en las estructuras de las paredes incrementa si disminuye la altura del arco.
- Paredes con inclinación excesiva (sobre 60°) son peligrosas en las operaciones mineras. Es adecuado utilizar paredes con ángulo superior al de fricción interna del material, considerando un factor de seguridad de 1.05 para paredes lisas y de 1.15 para rugosas.
- Los arcos se forman con mayor facilidad si la movilidad del material es baja.
- Los arcos planos se forman con mayor facilidad si las partículas con más irregulares y resistentes. Materiales pegajosos ayudan en la formación de arcos.
- Un punto de extracción pequeño aumenta la probabilidad de formación de arcos y un aumento del tamaño del punto disminuye esta probabilidad.

2.4. Guías de diseño

El modelo empírico de Laubscher (1994) es lo más utilizado actualmente para determinar el espaciamiento entre los puntos de extracción y establecer estrategias de control de tiraje en minas de *block/panel caving*. Este modelo es muy limitado, ya que considera rangos de tamaños y de calidad de roca acotados, y no una combinación de estos. Además, no existe validación de los datos utilizados en esta guía de diseño. Debido a lo anterior, es que esta herramienta no es aplicable a casos en que ocurran grandes migraciones de finos, sin mencionar casos con humedad. Este modelo se ve en la Figura 14.

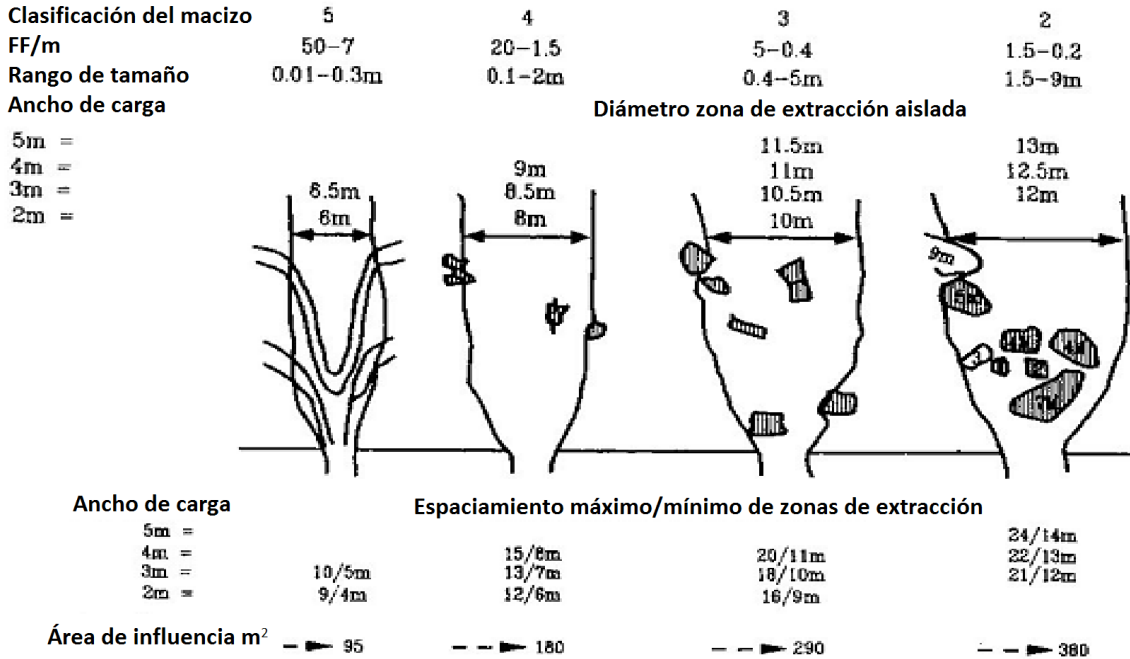


Figura 14: Máximo/mínimo espaciamiento de zonas de extracción (Laubscher, 1994)

Kvapil (2008) formuló una metodología para determinar las dimensiones de abertura mínimas requeridas para material grueso. Las fórmulas utilizadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Dimensiones de aberturas (Kvapil, 2008)

Área de apertura de salida	
Apertura cuadrada	Apertura circular
$F_a = (5 \times D)^2 \times K$	$F_\phi = 0.85 \times (5 \times D)^2 \times K$
Ancho de apertura de salida	
Largo de uno de los lados de apertura cuadrada	Díámetro de apertura circular
$a = \sqrt{(5 \times D)^2 \times K}$	$d = \sqrt{\frac{0.85 \times (5 \times D)^2 \times K}{0.785}}$

Donde D es el diámetro promedio de la roca y K es el coeficiente que se obtiene del gráfico de la Figura 15.

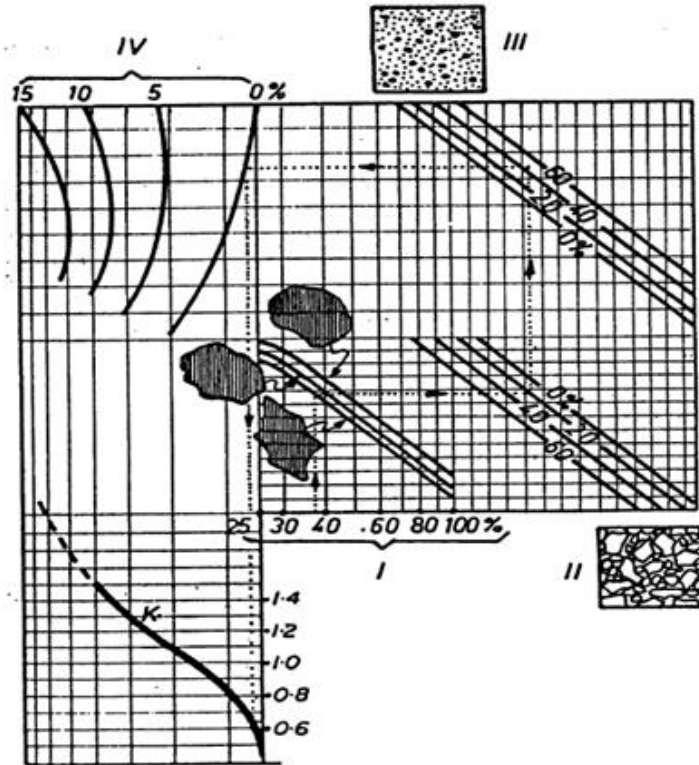


Figura 15: Determinación de K (Kvapil, 2008)

Este gráfico asigna valores de K para distintas distribuciones granulométricas, considerando un máximo de 15 [%] de presencia de finos. Acá se consideran cuatro tipos de tamaño de material, partiendo de grueso hasta finos, sin haber clasificación explícita de estos tamaños.

2.5. Experimentos de flujo confinado

Fuenzalida (2012) en su Tesis de Magíster “Estudio del flujo gravitacional confinado y su aplicación a minería de caving”, tenía como objetivos mejorar el entendimiento sobre mecanismos físicos en un flujo gravitacional confinado aplicado a minería de *caving* a través de un set experimental, diseñar y construir un equipo con el fin de entender los mecanismos que ocurren durante el flujo confinado de roca hundida. Además, buscaba mejorar el entendimiento sobre la relación entre esfuerzo y propiedades del material en la fragmentación del material durante el flujo gravitacional confinado, estudiar el efecto de la sobrecarga aplicada en la capacidad de fluir del material y desarrollar una aplicación a minería de caving que relacione el régimen de esfuerzos a escala mina, con los esfuerzos aplicados en los experimentos.

Dentro de sus alcances, destacan que se estudiaba el efecto del tamaño de las partículas y la magnitud de la carga aplicada por la prensa y que no se estudiaba el efecto que tiene el tiempo de los ensayos en la fragmentación y compactación del material.

Además, por medio de ensayos de flujo confinado, se estudió la capacidad de fluir del material, su fragmentación y compactación durante los ensayos y el efecto del esfuerzo vertical en las zonas de flujo del material.

En la Figura 16 se muestra un gráfico que representa el efecto de la carga vertical y el efecto del tamaño de partícula en la fluidez del material para los experimentos realizados por Fuenzalida.

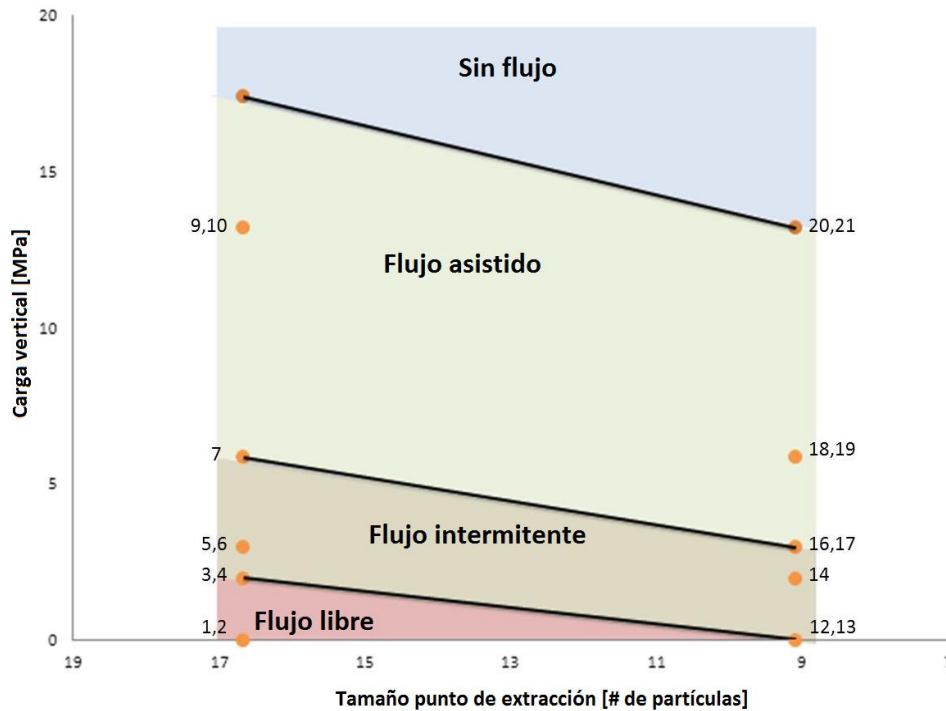


Figura 16: Efecto de la carga vertical en la fluidez del material

Finalmente, sus resultados y conclusiones principales fueron que a mayor carga vertical aplicada, se obtiene una mayor compactación y fragmentación. Así mismo, se tiene una

reducción en las características del flujo, resultando en colgaduras. Además, concluyó que el tamaño de las partículas no tiene efecto significativo en la geometría de las zonas de flujo.

Mientras tanto, Gómez (2014) con su Memoria “Modelo de fragmentación secundaria y colgaduras en minería de caving”, tenía como objetivo general proponer un modelo de conminución de material granular, además de generar una estimación de la frecuencia de colgaduras aplicado a minería por hundimiento. Ambos modelos basados en la realización de ensayos experimentales a escala de laboratorio, bajo altos esfuerzos verticales.

Dentro de sus alcances se tenía que la generación de los modelos de predicción de colgaduras y de fragmentación secundaria serían en función de la presión vertical y de la distribución granulométrica. Así mismo, no se consideraría el efecto de la presión horizontal ni la incidencia de la presencia de finos y humedad. Además, el material a utilizar corresponde a grava.

Con el fin de entender el impacto del confinamiento sobre la generación de colgaduras, Gómez buscó un modelo capaz de representar el comportamiento observado en sus experimentos, llegando a la relación definida por la Ecuación 5.

$$H_g = H_{g0} * \exp(-r*\sigma_v)$$

Ecuación 5: Modelo de predicción de colgaduras (Gómez, 2014)

Donde “ H_g ” es el material que pasa entre eventos de colgaduras [masa/colgadura]; “ H_{g0} ” y “ r ” son parámetros de ajuste del modelo que dan cuenta de la tendencia a colgarse para diferentes esfuerzos aplicados propios del material ensayado; “ σ_v ” corresponde al esfuerzo vertical aplicado [MPa].

Sus conclusiones generales fueron que a mayor carga vertical aplicada se obtiene una disminución de las capacidades de flujo de la grava y se tiene un aumento de la fragmentación secundaria.

2.6. Conclusiones del capítulo

Las conclusiones obtenidas de la revisión del estado del arte actual del flujo gravitacional son descritas a continuación:

Es importante el estudio realizado de las variables que inciden sobre el flujo gravitacional y sobre la formación de coladuras, con el fin de poder determinar cuáles de éstas son las que mayor impacto tienen. En consecuencia, se considera que, dentro de las variables manejables experimentalmente, lo que se estudia es el efecto de la granulometría, presencia de finos, carga vertical aplicada y humedad presente.

Los modelos físicos que se han utilizado hasta el momento consideran curvas granulométricas muy limitadas, usando prácticamente mono tamaños, haciéndose necesario considerar el efecto tanto del uso de una curva granulométrica real escalada como el efecto de la presencia de finos. La aplicación de una carga vertical de gran magnitud para simular los esfuerzos presentes en una columna de material de gran altura empezó a ser utilizada hace poco y se debe hacer más investigación al respecto, ya que las alturas de columna actuales superan los 200 metros, generando un gran esfuerzo vertical sobre los puntos de extracción.

Las guías de diseño actuales son muy limitadas, ya que no consideran amplias curvas granulométricas, presencia de humedad ni altos porcentajes de finos.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Introducción

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados para esta investigación se desarrolla una metodología experimental. Dicha metodología explicita el equipo de laboratorio, las características del diseño y los resultados que se pueden obtener. Además, detalla todo el proceso que se debe llevar a cabo para la obtención de un experimento exitoso. Así mismo, explica el cómo se caracterizan el material a ensayar, los resultados de fluidez y los tipos de colgaduras. También, se explica cómo se calculan los esfuerzos dentro del set experimental. Finalmente, se detallan las curvas granulométricas que se utilizan en los experimentos, los cuales también se explicitan.

Este capítulo describe en detalle la metodología experimental utilizada en el desarrollo de los experimentos.

3.2. Descripción ensayos de flujo confinado

Los experimentos de flujo confinado se realizan en el laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile y se experimenta con un modelo físico con escala 1:75 que representa una batea tipo Andina junto a una galería y equipo de extracción. El modelo emula los esfuerzos verticales a los que se somete una batea de extracción.

3.2.1. Equipo de laboratorio

Dentro del equipo de laboratorio se encuentra una prensa hidráulica convencional, no servoasistida, con una carga máxima de 1,800 [kN] y que utiliza un sensor de presión con un lector digital portátil para medir la carga. Además, se cuenta con un cilindro de acero, cuya forma tiene el fin de evitar la concentración de esfuerzos locales en singularidades del contenedor del material. El equipo es capaz de resistir una presión máxima de 30 [MPa] y tiene dimensiones de 340 [mm] de diámetro interno y una altura de 700 [mm], además, consta de un pistón con el cual la prensa ejerce la presión. Tiene capacidad de unos 75 a 80 [kg] de material. Estas dimensiones se deben al tamaño de la prensa. En la Figura 17 se ve tanto la prensa hidráulica como el cilindro y sus dimensiones. Este cilindro se instala en la prensa con la ayuda de un teclé.

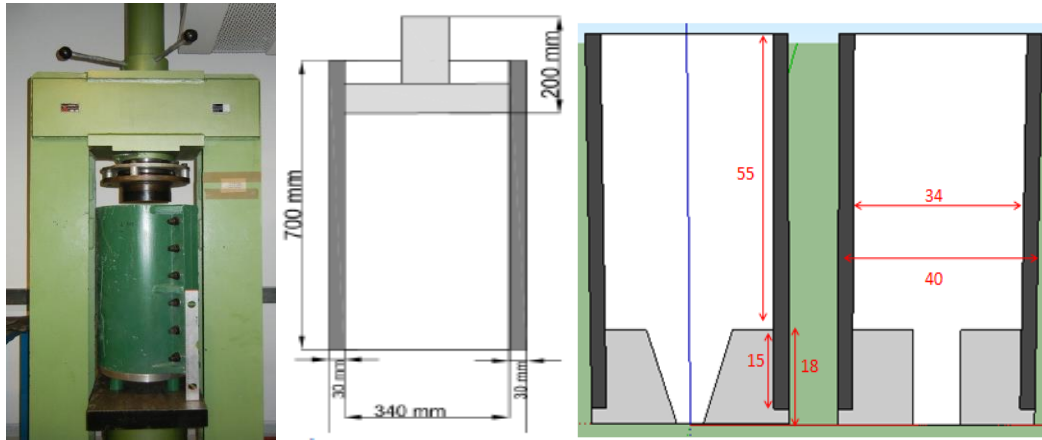


Figura 17: Prensa hidráulica con cilindro instalado y sus dimensiones [cm]

Dentro del cilindro se sitúa una batea tipo Andina (escala 1:75). En la Figura 18 se ven las dimensiones de la batea y cómo queda ésta como base del cilindro. Como se mencionó en el Capítulo 2, no existe un equipo laboratorio estándar para estudiar el flujo gravitacional de material confinado, por lo que éste se debió diseñar y construir para cumplir con los objetivos de esta investigación. El diseño de la batea depende de la variante de *block/panel caving* a implementar en un sector productivo, lo que se debe a las condiciones de borde que restringen la metodología de construcción de la batea. Para hundimiento convencional se tiene un tipo de batea que se construye en dos etapas, la primera desde el nivel de producción y la segunda desde el nivel de hundimiento. Para hundimiento previo y avanzado se tiene un tipo de batea especial, que es independiente del nivel de hundimiento, la cual se construye íntegramente desde el nivel de producción (Cavieres et al).

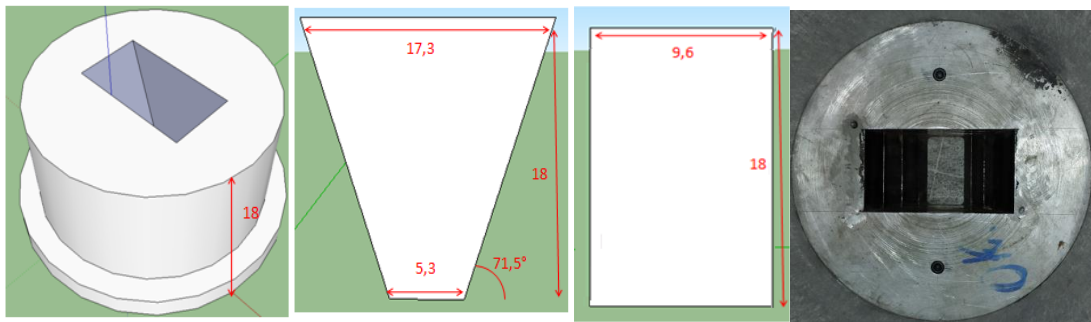


Figura 18: Dimensiones batea [cm], Batea instalada en cilindro

Para el diseño final de la batea se estudian diferentes alternativas con tal de optar por el mejor diseño. El detalle de ese estudio se encuentra en ANEXO A. Las bateas resultantes de tipo Teniente, para hundimiento convencional y avanzado o previo, tienen escalas de 1:117 y 1:114 respectivamente, por lo que son muy pequeñas para poder lograr desarrollar un sistema de extracción similar al de un LHD.

Debido a lo anterior, es que se decide utilizar una batea tipo Andina, la cual es de menor tamaño pudiéndose escalar de varias maneras. En la Tabla 2 se muestran las ventajas y desventajas que tienen las 3 escalas estudiadas.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL
INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

Tabla 2: Ventajas y desventajas bateas tipo Andina

Escala	Ventajas	Desventajas
1:50	Sistema de extracción de mineral de mayor tamaño	Altura de la batea muy grande, disminuyendo la cantidad de material dentro del cilindro. O sea, disminuye la razón Diámetro:H (altura de material), que debería ser mayor a 2.5 (Nedderman, 1992). Además, hace que base del cilindro sea muy pesada.
	Realización de cada experimento más rápido	Demasiada área de la base está siendo utilizada por la batea, volviendo poco representativo el modelo con respecto al área de influencia real de esta batea.
1:75	Sistema de extracción de mineral de tamaño intermedio.	Gran altura de batea, disminuyendo la cantidad de material en el cilindro.
	Realización de cada experimento en tiempo intermedio	
	Representa de mejor manera como es en la realidad el área de influencia de una batea tipo Andina.	
1:100	Altura de la batea baja, aumentando la cantidad de material en el cilindro y disminuyendo el peso de la batea.	Sistema de extracción de mineral muy pequeño.
		Realización de cada experimento en tiempo muy grande.
		Mucho espacio no utilizado en los bordes del modelo debido a un sobredimensionamiento del área de influencia de la batea.

En ANEXO B se encuentran las Figuras que representan el volumen que utilizaría cada batea en el modelo.

Finalmente, en cuanto a la batea, se decide utilizar la tipo Andina con escala de 1:75, que a pesar de no presentar un gran contenido de material, se tiene que es una escala en la cual es posible construir un sistema de extracción de material que imite a un LHD.

En cuanto al sistema de extracción de material, se busca reproducir de manera exacta el movimiento que realiza un LHD. Aquí, la pala avanza hasta el material, se rota para recogerlo y luego se devuelve hasta el hueco, donde deposita el material. Además, se requiere saber de las dimensiones de la zanja a considerar, ya que ésta limita el tamaño máximo del que se puede diseñar el sistema. También, se debe tener en cuenta la escala con la que se trabaja, para así poder tener todo de un tamaño acorde. En este caso se considera un tamaño de balde con respecto a un LHD de 15 [yd³] junto a una altura de calle de 4.8 [cm] y un ancho de calle de 5.3 [cm]. Todas las medidas anteriores se deben al escalamiento hecho (1:75). En la Figura 19 se tiene una vista isométrica del sistema.

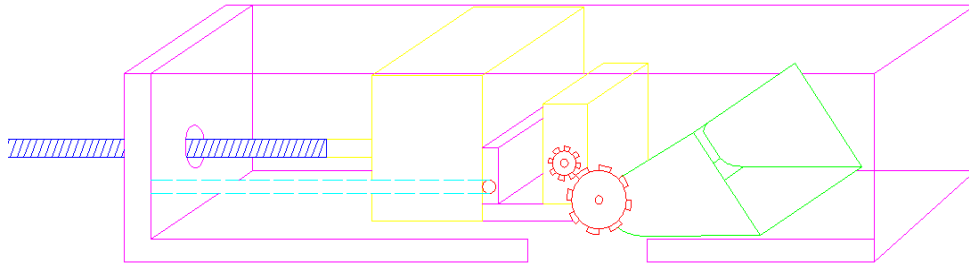


Figura 19: Vista isométrica sistema de extracción de material

3.2.2. Diseño

El sistema está diseñado para trabajar con materiales granulares, tanto finos como gruesos, con poca presencia de agua, ya que el cilindro no está hecho de acero inoxidable. Además, no se le puede añadir agua directamente debido a que el cilindro no tiene un sistema que evite las filtraciones.

3.2.3. Resultados esperados

Los resultados que se pueden obtener de este tipo de experimento son los siguientes:

- Forma de flujo por medio de marcadores.
- Fragmentación secundaria.
- Compactación.
- Frecuencia y altura de colgaduras.
- Fluidez del material.

3.3. Descripción de experimentos

La metodología experimental empleada en los experimentos de flujo confinado es la siguiente:

1. Preparación del Material:
 - Mediante tamices se logra la curva granulométrica deseada para el experimento.
 - En el laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Universidad de Chile se cuenta con tamices de 38, 45, 53, 75, 106, 150, 212, 300, 425, 600, 850, 1180, 1700, 2360, 3350, 4750, 12700 y 25400 micrones.
 - Para cada curva granulométrica se deben tener 75 [kg] de material (mezcla).
 - Luego de tamizar, se debe homogenizar el material.
 - En caso de ser necesario, el material es humedecido hasta alcanzar la humedad requerida y homogenizado nuevamente.
2. Montaje:
 - Se carga el material en el cilindro y luego, éste es posicionado por medio del teclé en la prensa hidráulica.
 - Se coloca el pistón (tapa) y luego se aplica el confinamiento hasta alcanzar la presión requerida.

3. Ensayos:
 - Cada ensayo dura de 2 a 4 horas.
 - Se utiliza una presión constante de confinamiento, la cual se mantiene operando la prensa de forma manual a medida que se extrae el material.
 - Se realizan 100 ciclos de extracción.
 - Se registra la masa extraída.
 - Se registran las características de las colgaduras.
4. Resultados:
 - Se obtiene la frecuencia, altura y tipo de colgaduras.

En la Figura 20 se tiene un diagrama de la metodología experimental antes explicada.

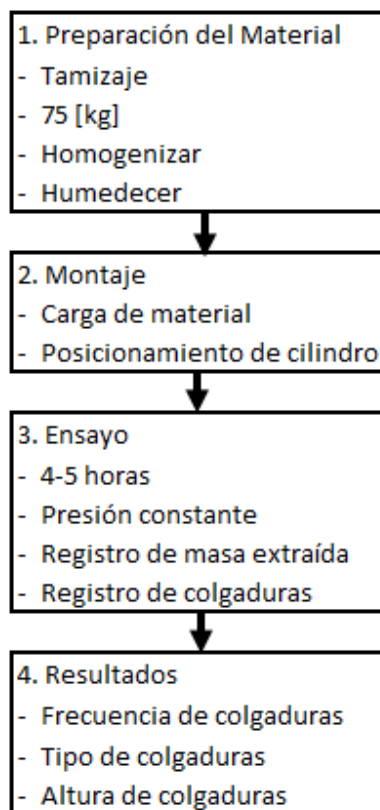


Figura 20: Metodología experimental

3.4. Caracterización de material

Para el material a utilizar en los experimentos se requiere medir sus características de tamaño de partícula o uniformidad y el factor de forma de los fragmentos. Además, se necesita determinar la humedad del material.

3.4.1. Uniformidad y curvatura

La pendiente y forma general de la distribución granulométrica puede ser descrita por medio del coeficiente de uniformidad (C_U) y el coeficiente de curvatura (C_Z) (Craig, 2004).

Ambos coeficientes, de uniformidad (Ecuación 6) y curvatura (Ecuación 7) están definidos de la siguiente forma:

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

Ecuación 6: Coeficiente de uniformidad (Craig, 2004)

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

Ecuación 7: Coeficiente de curvatura (Craig, 2004)

Donde D_{10} está definido como el tamaño efectivo y representa al tamaño bajo el cual se encuentra el 10% de las partículas, y D_{60} y D_{30} representan el tamaño bajo el cual se encuentra el 60% y 30% de las partículas, respectivamente. A mayor índice de uniformidad, mayor es el rango de tamaños de las partículas. Un coeficiente de curvatura entre 1 y 3 indica una buena gradación de las partículas.

3.4.2. Esfericidad y redondez

Para caracterizar la forma de las partículas hay 2 escalas que son importantes. Sus definiciones se encuentran a continuación (Cho et al, 2006):

1. Esfericidad: Refleja la similitud entre el largo, la altura y el ancho de partícula. Puede ser cuantificada como el diámetro del círculo inscrito mayor en relación al círculo circunscrito menor. La Ecuación 8 representa cómo se calcula esta característica.

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

Ecuación 8: Definición de esfericidad (Cho et al, 2006)

Donde r_{max-in} corresponde al radio del círculo mayor inscrito y $r_{min-cir}$ al radio del círculo menor circunscrito.

2. Redondez: Describe la escala de las características superficiales mayores, las cuales suelen ser de 1 orden menor al tamaño de la partícula. Se cuantifica como el radio de curvatura medio de las características superficiales con respecto al radio del círculo mayor que se puede inscribir en la partícula. La Ecuación 9 muestra cómo se determina la redondez.

$$redondez (R) = \frac{r_i N}{r_{max-in}}$$

Ecuación 9: Definición de redondez (Cho et al, 2006)

Donde $r_i N$ es el radio de curvatura medio de las características superficiales y r_{max-in} es el radio del círculo mayor inscrito. En la Figura 21 se muestra como se calculan los radios antes descritos.

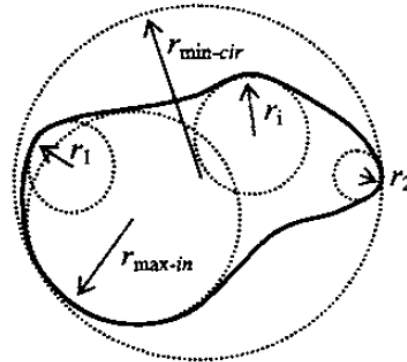


Figura 21: Radios en partícula

En la Figura 22 se tiene de forma cualitativa el efecto de la esfericidad y redondez en la forma de la partícula y asignándole definiciones desde angulosas hasta redondeadas.

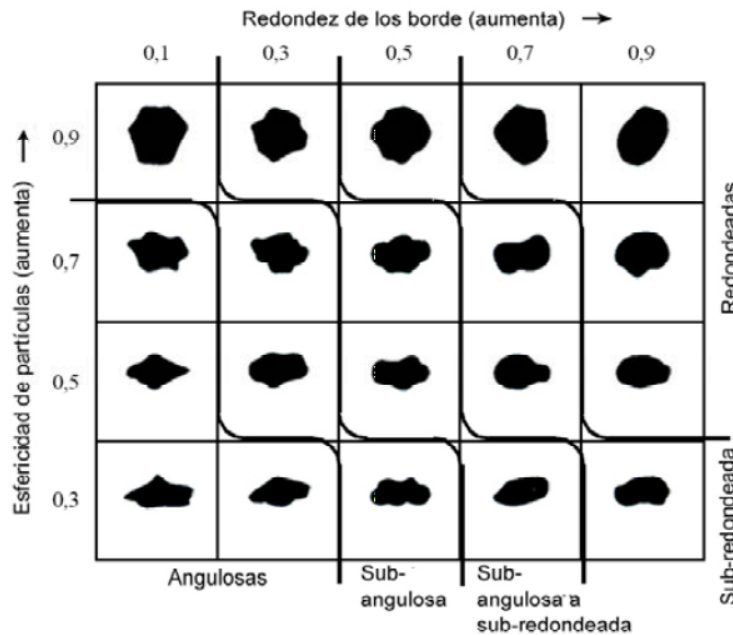


Figura 22: Definición de esfericidad y redondez (Hoz, 2007)

3.4.3. Contenido de humedad

Se define $H [\%] = \frac{M_L}{M_S} \times 100 \%$, como la humedad presente en un material, donde: M_L es la masa de líquido en el sólido y M_S es la masa del sólido.

M_L se calcula como la diferencia entre la masa de una muestra antes, y la masa de esta luego de secado, asumiendo que se tiene un 0% de agua final. Mientras que M_S es la masa final de la muestra luego del secado.

3.5. Fluidez del material

Para determinar la fluidez del material en términos cualitativos se utiliza la caracterización hecha por Fuenzalida (2012). Al fluir el material, éste puede presentar 4 estados, los cuales se describen a continuación:

- Flujo libre (*free flow*): El material fluye libremente sin interrupción debido a la acción de la gravedad a través del punto de extracción.
- Flujo intermitente (*intermittent flow*): El material fluye con interrupciones intermitentes debido a los arcos mecánicos formados por la compactación del material. Éstos se desmoronan por el esfuerzo vertical aplicado por la prensa hidráulica.
- Flujo asistido (*assisted flow*): Para que el material pueda fluir, es necesario perturbar los arcos mecánicos de forma manual.
- Sin flujo (*no flow*): El material no fluye de ningún modo, inclusive perturbándolo manualmente.

3.6. Colgaduras

En la Figura 23 se muestra la clasificación utilizada para definir el tipo de colgadura. Las colgaduras en los puntos de extracción son las que forman una pared de material en el punto de extracción, imposibilitando la extracción. Las de batea baja son las que se generan con forma de arco dentro de la batea, mientras que las de batea alta, son las que forman un arco por sobre la batea.

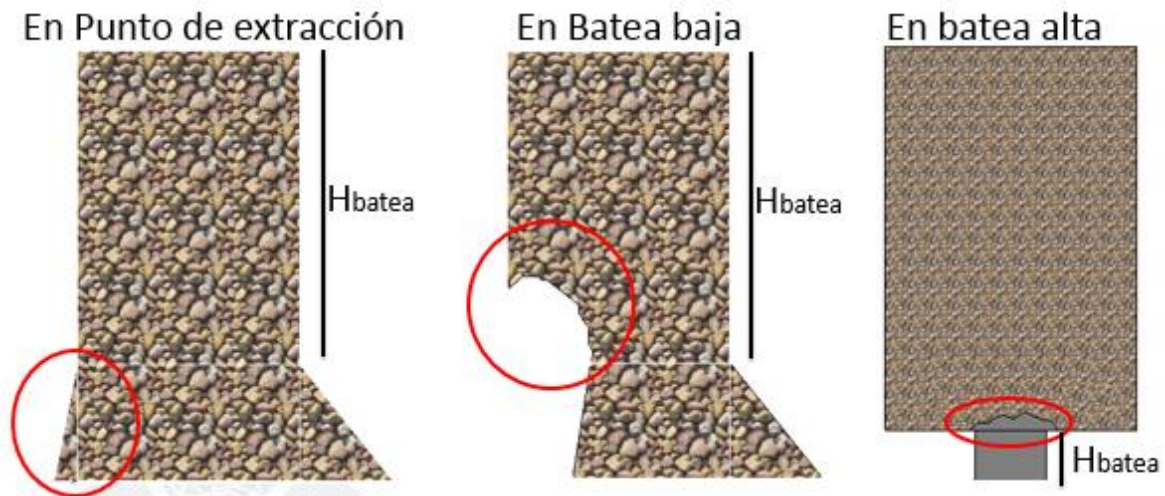


Figura 23: Clasificación de colgaduras

3.7. Cálculo de esfuerzos

Para el cálculo de esfuerzos se utiliza el análisis Janssen-Walker (Nedderman, 1992) y se considera un área a representar de un macro bloque de 41,600 [m²] y un perímetro de 865 [m], teniéndose un radio hidráulico de 48.1 [m]. La altura de columna considerada es de 776 [m].

En los experimentos se consideran mezclas de finos con mineral en la columna y se tiene un radio hidráulico de 0.34 [m] y una altura de columna de 0.45 [m].

Asumiendo para el modelo una densidad del material de 2,700 [kg/m³] (con 30 [%] esponjamiento 2.077 [kg/m³]), una densidad de finos de 2,000 [kg/m³], una mezcla de 30 [%] de finos y 70 [%] de mineral, un esponjamiento del orden de 30 [%] y una aceleración de gravedad de 9.8 [m/s²], se obtiene un peso específico de mezcla de 19 [kN/m³].

Un dato obtenido de Orellana (2012) fue el ángulo de fricción del mineral, 33.4° para el prototipo y el ángulo de fricción de la pared del modelo que corresponde a 19.5°, con esto, al aplicar la función tangente a estos ángulos se obtiene el coeficiente de fricción que equivale a 0.66 y 0.35 respectivamente según la Ecuación 10.

$$\mu = \tan(\phi)$$

Ecuación 10: Relación coeficiente de fricción con ángulo de fricción

Así mismo, se consideró la relación de la Ecuación 11 entre los esfuerzos verticales y los horizontales:

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v$$

Ecuación 11: Relación esfuerzos verticales y horizontales

Donde:

$$K_0 = (1 - \sin(\phi'))$$

Ecuación 12: Definición de K₀

Con los datos anteriores es posible estimar la carga teórica para el caso teórico y del modelo, donde se tienen 3.045 y 0.0068 [MPa], respectivamente sobre cada nivel de producción. Así, se obtiene que la carga que debe aplicar la prensa hidráulica para lograr replicar los esfuerzos es 268 [kN], que medidos por medio de la presión de aceite de la prensa, equivalen a 6 [MPa].

La carga vertical aplicada replica, en la batea del modelo, los esfuerzos verticales que se esperan encontrar en los puntos de extracción de un nivel de producción bajo 700 [m] de columna de material. Los resultados del cálculo se muestran en la Tabla 3.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL
INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

Tabla 3: Resultados metodología Janssen-Walker

		Modelo	Unidad
Ángulo de fricción	33.4	33.4	°
Ángulo de fricción pared	33.4	19.5	°
W	1	0.606	-
Coefficiente fricción pared	0.659	0.354	-
Constante Janssen	0.449	0.315	-
Peso específico	19.00	20.12	[kN/m ³]
Área	41,600	0.090	[m ²]
Perímetro	865	1.068	[m]
Radio hidráulico	192.37	0.34	[m]
Profundidad	700	0.45	[m]
Carga vertical Janssen	3,045	6.83	[kN/m ²]
Carga vertical	3.045	0.0068	[MPa]

De la misma manera, se calcularon las profundidades que replican algunos valores de carga aplicables por la prensa, para así saber que altura de columna se está replicando. Estos resultados se muestran en Tabla 4.

Tabla 4: Alturas de columna en función del esfuerzo

Característica	Valor			Unidad
	1.5	3	6	
Carga prensa	45	108	700	[MPa]
Profundidad	0.75	1.5	3	[m]
Esfuerzo sobre nivel de producción				[MPa]

3.8. Granulometrías

En minería de *caving*, la mayoría de la investigación realizada sobre los mecanismos que controlan el flujo gravitacional se ha llevado a cabo con modelos numéricos idealizados o modelos físicos escalados en gravas o arenas con distribuciones granulométricas estrechas. En contraste, lo que se encuentra en la realidad son partículas con distribuciones granulométricas más complejas que afectan el flujo de material resultando en colgaduras y otras interferencias (Sharrock y Hashim, 2009).

Debido a lo anterior es que se busca utilizar curvas granulométricas más complejas, resultando en que las granulometrías con las que se realizan los experimentos son las esperadas para el proyecto mina Chuquicamata Subterránea y, siendo los finos, relave secado de la mina Chuquicamata. Además, el material a utilizar es de la misma mina. En la Figura 24 se grafican las curvas granulométricas del relave (finos), la esperada en Chuquicamata Subterránea (Chuquicamata) y la escalada para los experimentos (Cilindro). En la Tabla 29 y en la Tabla 30 (ANEXO C) se muestran estas curvas en detalle.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL
INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

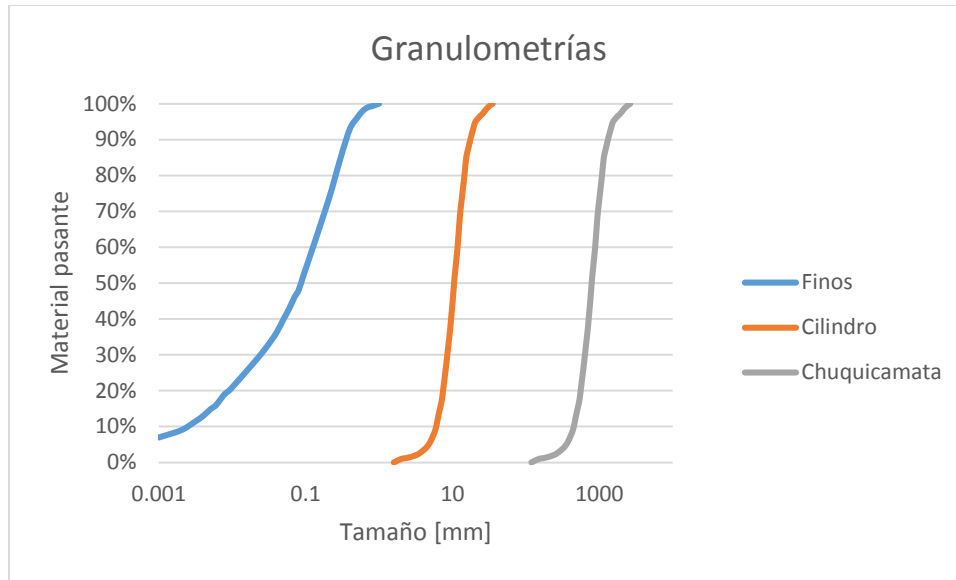


Figura 24: Granulometrías a utilizar

En la Tabla 5 se muestra la masa de material requerido por malla (tamaño) para lograr la escala 1:75.

Tabla 5: Masas por malla

Malla	Tamaño [mm]	Material pasante [%]	Porcentaje Retenido[%]	Masa [kg]
#12+#16	1.700	1.09	1.09	0.82
#8+#12	2.360	1.18	0.09	0.06
#6+#8	3.350	2.22	1.04	0.77
#4+#6	4.750	5.03	2.82	2.11
1/4+#4	6.350	12.25	7.21	5.41
3/8+1/4"	9.525	39.11	26.86	20.14
1/2+3/8"	12.700	68.80	29.69	22.27
3/4+1/2"	19.050	92.39	23.59	17.69
7/8+3/4"	22.225	95.71	3.32	2.48
1+7/8"	25.400	97.50	1.79	1.34
1/ 1/8+1"	28.575	100.00	2.50	1.87
			Total	75.00

Por otro lado, en la Figura 25, se encuentra como queda hecho el ajuste por tamaños. Cabe destacar que la masa total considerada (75 [kg]) es la necesaria para cada experimento (sin considerar finos).

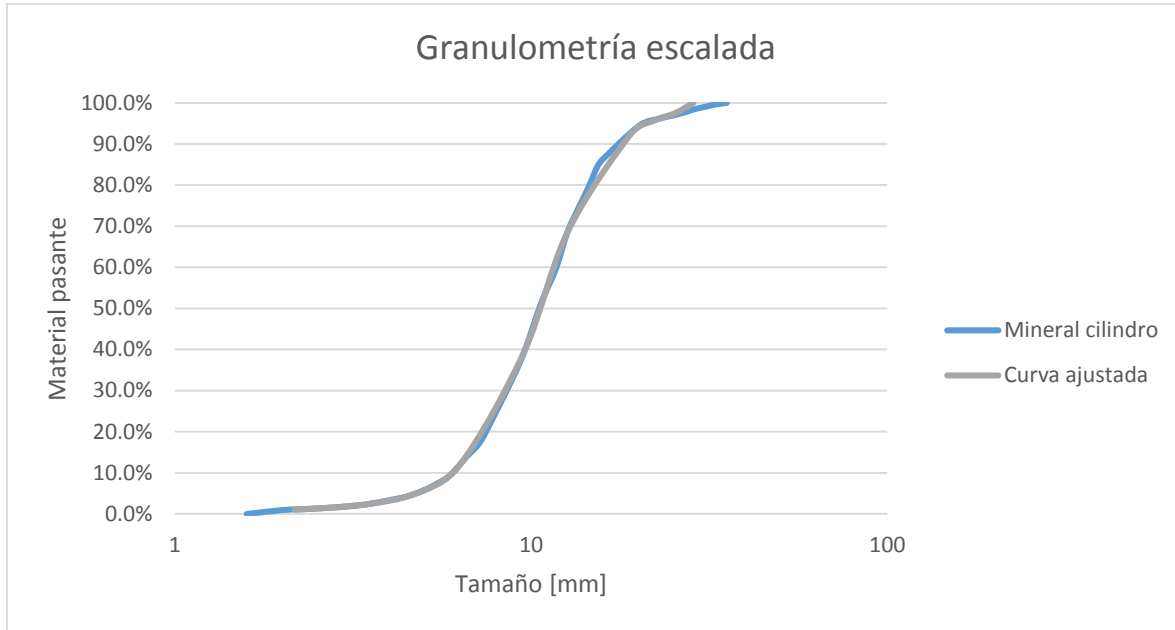


Figura 25: Comparación curva granulométrica

3.9. Experimentos a realizar

Los experimentos a hacer son los mostrados en la Tabla 6, donde “X” indica experimento realizado y “-” indica no realizado.

Tabla 6: Experimentos realizados

Factores			Carga vertical σ_v [MPa]				
Tamaño d_{80} [mm]	Humedad [%]	Finos [%]	0	1.5	3	6	10
15.6	0	0	X	X	X	X	X
15.6	0	20	X	X	X	X	-
15.6	0	40	X	X	X	X	-
15.6	3	20	X	X	X	X	-
15.6	6	40	X	-	-	-	-

El objetivo de haber escogido las mezclas antes mostradas es estudiar el impacto que tendría en la formación y tipo de colgaduras una alta presencia de finos en los puntos de extracción, pudiendo tener éstos presencia de humedad.

Se considera el caso base como el experimento con 0 [%] de humedad y con 0 [%] de finos. En el Capítulo 5 se explica, en base a los resultados experimentales, el por qué no se llevan a cabo los experimentos denotados con “-”.

3.10. Conclusiones del capítulo

Debido a la importancia y al poco conocimiento que se tiene en términos de flujo gravitacional confinado es que se propone estudiar el efecto de la carga vertical, presencia de finos, y humedad por medio de un set experimental capaz de replicar los esfuerzos existentes en una mina de *block/panel caving*.

En este capítulo se describió la metodología utilizada para caracterizar el material a utilizar en los experimentos. Las características cuyas metodologías de cuantificación se presentaron son:

- Granulometría.
- Índices de uniformidad y curvatura.
- Coeficientes de esfericidad y redondez.
- Contenido de humedad.

Además, se describió cómo se calificarían la condición de flujo y los tipos de colgaduras resultantes de los experimentos. También, se explicó cómo se calculan los esfuerzos, a través de la solución de Janssen, utilizados en los ensayos.

Ya que gran parte de lo investigado sobre los mecanismos que controlan el flujo de material en modelos físicos se ha realizado con gravas o arenas con distribuciones granulométricas estrechas es que se decide utilizar mineral de la mina Chuquicamata escalado con respecto a la granulometría esperada en la mina Chuquicamata Subterránea con la adición de finos.

Finalmente, se explicitaron los 18 experimentos que se realizan, cuyos resultados y análisis se muestran los capítulos siguientes.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos de los experimentos realizados por medio de la metodología recién planteada.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1. Introducción

En el presente capítulo se presentan los resultados de los 18 experimentos de flujo gravitacional confinado de material granular realizados en esta investigación. En específico, se detallan los resultados de la caracterización del material, donde las curvas granulométricas se caracterizan por sus coeficientes de uniformidad y curvatura, mientras tanto, el material por su procedencia, esfericidad, redondez y humedad.

En tanto a los experimentos, se muestran los resultados de la frecuencia de colgaduras, el índice de colgaduras, la altura promedio de colgaduras, la condición de flujo, y la altura y diámetro de la colgadura alta.

4.2. Caracterización del material

La caracterización del material utilizado en los experimentos se muestra a continuación.

4.2.1. Uniformidad y curvatura

Con las curvas granulométricas ya definidas, se calcula el índice de uniformidad (Tabla 7) y el de curvatura de cada una de las curvas (Tabla 8).

Tabla 7: Índice de uniformidad

Índice de uniformidad ($C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$)		
Mineral	20% finos	40% finos
1.96	118.49	465.80

Tabla 8: Índice de curvatura

Índice de curvatura ($C_Z = \frac{D_{30}^2}{D_{60}D_{10}}$)		
Mineral	20% finos	40% finos
1.19	44.91	0.21

4.2.2. Esfericidad y redondez

Utilizando la metodología antes descrita, se calcula la esfericidad y redondez del material, que en este caso, es material de la mina Chuquicamata. Para determinar la esfericidad se circunscribe el círculo menor y se inscribe el círculo mayor. Para determinar la redondez se inscriben círculos en cada curvatura de la muestra y se determina su radio. En la Tabla 9 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de 30 muestras. El detalle de los cálculos se encuentra en el ANEXO D.

Tabla 9: Esfericidad y redondez

Radio promedio círculos inscritos (r_iN)	Radio menor circunscrito ($r_{min-cir}$)	Radio mayor inscrito (r_{max-in})	Esfericidad ($\frac{r_{max-in}}{r_{min-cir}}$)	Redondez ($\frac{r_iN}{r_{max-in}}$)
0.65 [cm]	2.55 [cm]	1.27 [cm]	0.52	0.53

Los resultados obtenidos de esfericidad y redondez para el material se aplican en la matriz de factor de forma modificado por Hoz (2007) como se muestra en Figura 26.

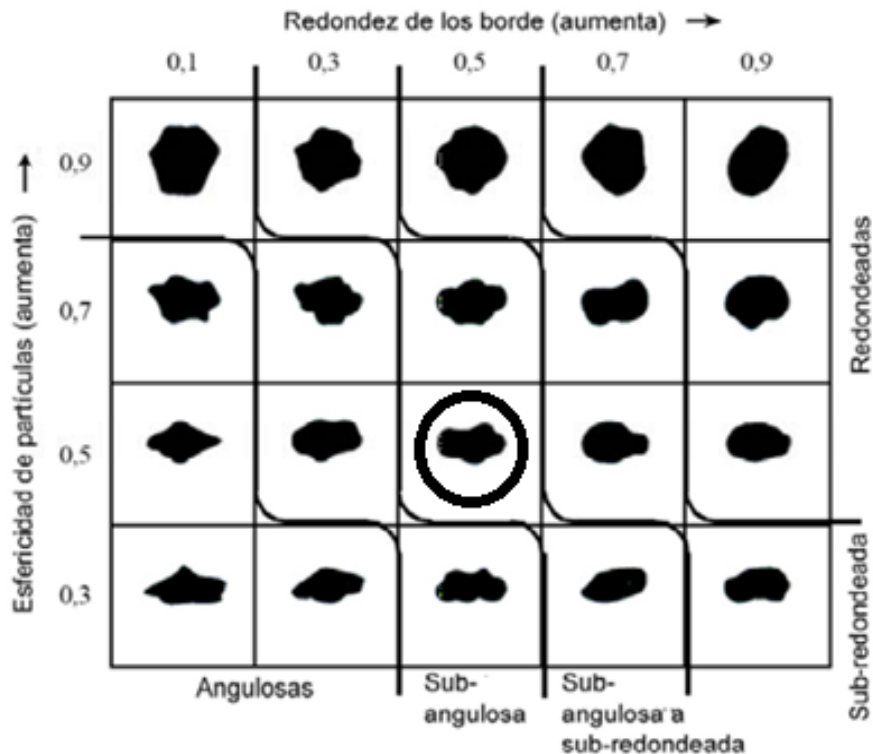


Figura 26: Factor de forma para material utilizado en experimentos (Hoz, 2007)

Los valores de esfericidad y redondez determinan que el material a utilizar presenta fragmentos “subangulosos a subredondeados”.

4.2.3. Contenido de humedad

La humedad presente en el material se determina para cada una de las curvas granulométricas a utilizar en los experimentos. La humedad o cantidad de agua a añadir en cada experimento es en función del porcentaje de fino presente, usándose una humedad de 15 [%] en relación a los finos. En otras palabras, se añaden 1.5 litros de agua por cada 10 kilogramos de finos en la mezcla de material. En la Tabla 10 se muestra el porcentaje de humedad para cada porcentaje de fino a experimentar.

Tabla 10: Humedad por curva

Humedad [%]	Finos [%]
0	0
3	20
6	40

4.3. Frecuencia e índice de colgaduras

Para cada experimento realizado se registró la masa extraída antes de la generación de colgaduras altas, las cuales eran imposibles de descolgar, y por ende, daban por terminado el experimento. En la Tabla 11 se encuentran los resultados del número de colgaduras obtenidas por experimento. Para el caso base, o sea, con 0 [%] de humedad y 0 [%] de finos, y a una carga vertical de 10 [MPa], no hubo flujo de material, por lo que no se pudieron medir colgaduras.

Tabla 11: Resultados número de colgaduras [#]

Factores		Carga vertical [MPa]				
Humedad [%]	Finos [%]	0	1.5	3	6	10
0	0	3	5	5	7	-
0	20	6	4	8	6	-
0	40	11	8	7	5	-
3	20	10	6	5	6	-
6	40	4	-	-	-	-

En la Tabla 12 se encuentran los resultados de la masa de material extraída durante los experimentos.

Tabla 12: Resultados masa extraída [g]

Factores		Carga vertical [MPa]				
Humedad [%]	Finos [%]	0	1.5	3	6	10
0	0	5,333	4,910	4,575	4,195	-
0	20	6,126	3,855	3,020	3,260	-
0	40	5,576	3,766	3,934	2,476	-
3	20	3,522	1,986	1,556	2,160	-
6	40	924	-	-	-	-

Con los datos de masa extraída y el número de colgaduras es posible calcular la frecuencia de colgaduras, cuyos resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13: Resultados frecuencia de colgaduras [g/colgadura]

Factores		Carga vertical [MPa]				
Humedad [%]	Finos [%]	0	1.5	3	6	10
0	0	1,778	982	915	599	-
0	20	1,021	964	378	543	-
0	40	507	471	562	495	-
3	20	352	331	259	360	-
6	40	231	-	-	-	-

En la Figura 27 se muestran gráficamente los resultados anteriores.

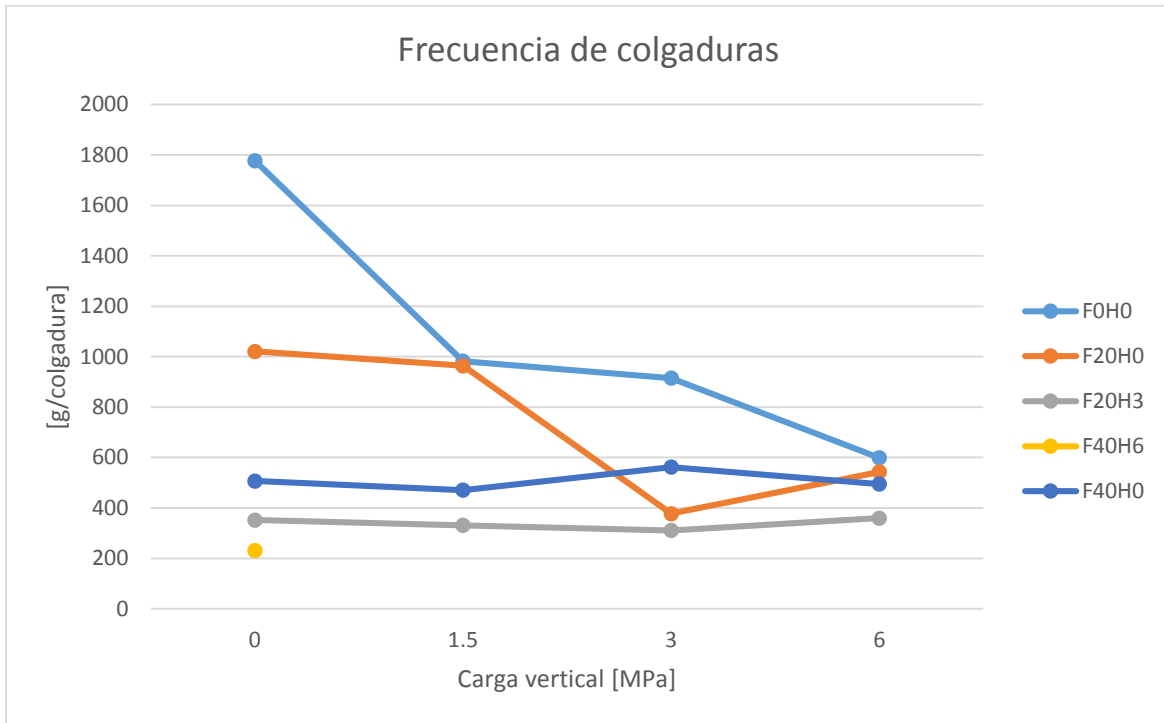


Figura 27: Resultados frecuencia de colgaduras [g/colgadura]

Donde, para esta, y todas las figuras posteriores:

- F0H0 indica al caso base (finos 0 [%] y humedad 0 [%]),
- F20H0 indica un 20 [%] de finos y 0 [%] de humedad,
- F20H3 indica 20 [%] de finos y 3 [%] de humedad,
- F40H6 indica 40 [%] de finos y 6 [%] de humedad, y
- F40H0 indica 40 [%] de finos y 0 [%] de humedad.

En la Tabla 14 se muestra el resultado de escalar la frecuencia de colgaduras a escala mina.

Tabla 14: Resultados frecuencia de colgaduras [toneladas/colgaduras]

Factores		Carga vertical [MPa]				
Humedad [%]	Finos [%]	0	1.5	3	6	10
0	0	750	414	386	253	-
0	20	431	407	159	229	-
0	40	214	199	237	209	-
3	20	149	140	131	152	-
6	40	97	-	-	-	-

El escalamiento se realiza con la Ecuación 13.

$$\left[\frac{\text{toneladas}}{\text{colgaduras}} \right] = \left[\frac{\text{gramos}}{\text{colgaduras}} \right] * 75^3 [\text{Factor escala volumétrica}] * \frac{1}{1,000,000} \left[\frac{\text{toneladas}}{\text{gramos}} \right]$$

Ecuación 13: Escalamiento

En la Figura 28 se encuentran gráficamente los resultados anteriores.

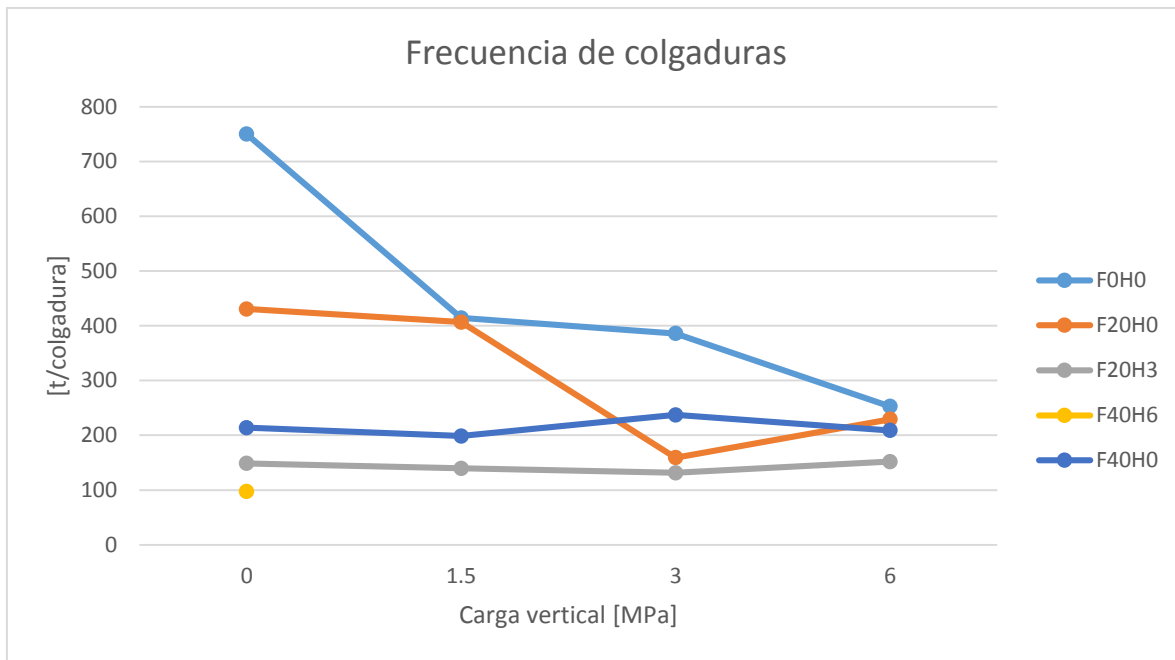


Figura 28: Resultados frecuencia de colgaduras [toneladas/colgaduras]

Con el escalamiento anterior, se calcula el índice de colgaduras, índice que indica el número de colgaduras observadas por cada mil toneladas extraídas. La Tabla 15 muestra el índice de colgaduras obtenido para cada experimento.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS
INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

Tabla 15: Resultados índice de colgaduras [colgaduras/1,000 ton]

Factores		Carga vertical [MPa]				
Humedad [%]	Finos [%]	0	1.5	3	6	10
0	0	1.3	2.4	2.6	4.0	
0	20	2.3	2.5	6.3	4.4	-
0	40	4.7	5.0	4.2	4.8	-
3	20	6.7	7.2	7.6	6.6	-
6	40	10.3	-	-	-	-

En la Figura 29 se encuentran los resultados anteriores gráficamente.

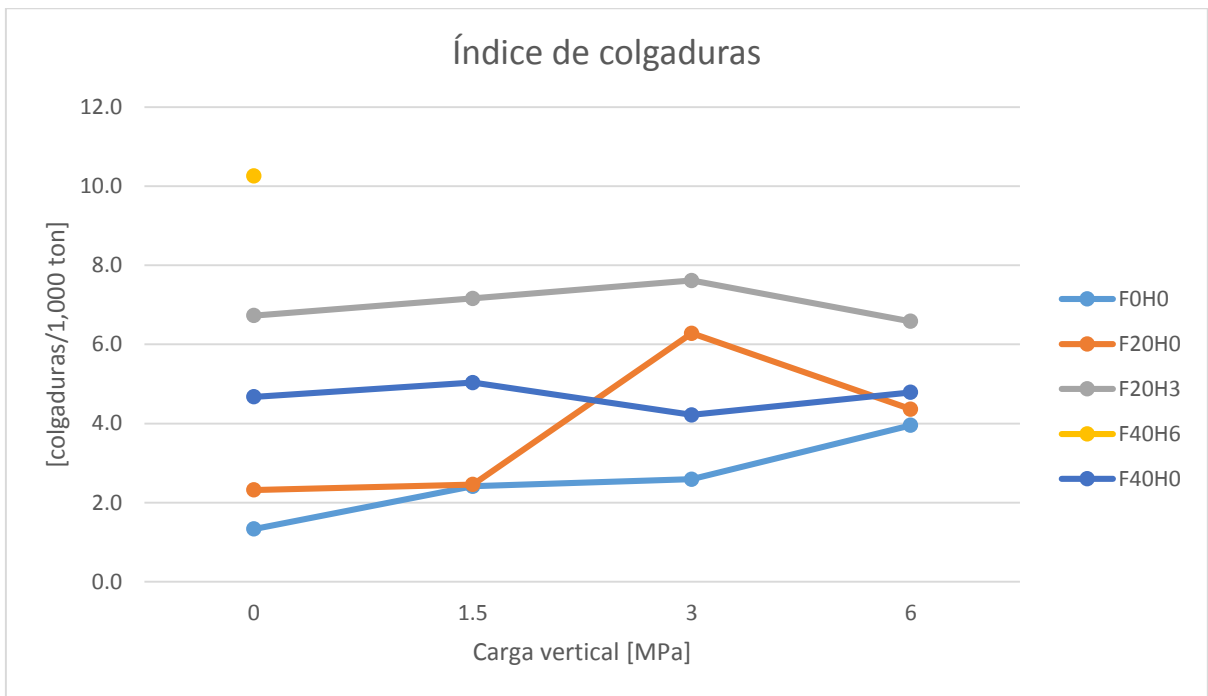


Figura 29: Resultados índice de colgaduras [colgaduras/1,000 ton]

4.4. Altura promedio de colgaduras

La Tabla 16 muestra la altura promedio de las colgaduras observadas.

Tabla 16: Resultados altura promedio colgaduras [cm]

Factores		Carga vertical				
Humedad [%]	Finos [%]	0	1.5	3	6	10
0	0	0.0	1.4	5.3	10.3	-
0	20	2.7	5.3	3.3	3.3	-
0	40	0.0	2.6	3.2	5.2	-
3	20	2.0	8.2	3.2	3.3	-
6	40	5.3	-	-	-	-

En la Figura 30 se encuentran graficados los resultados anteriores.

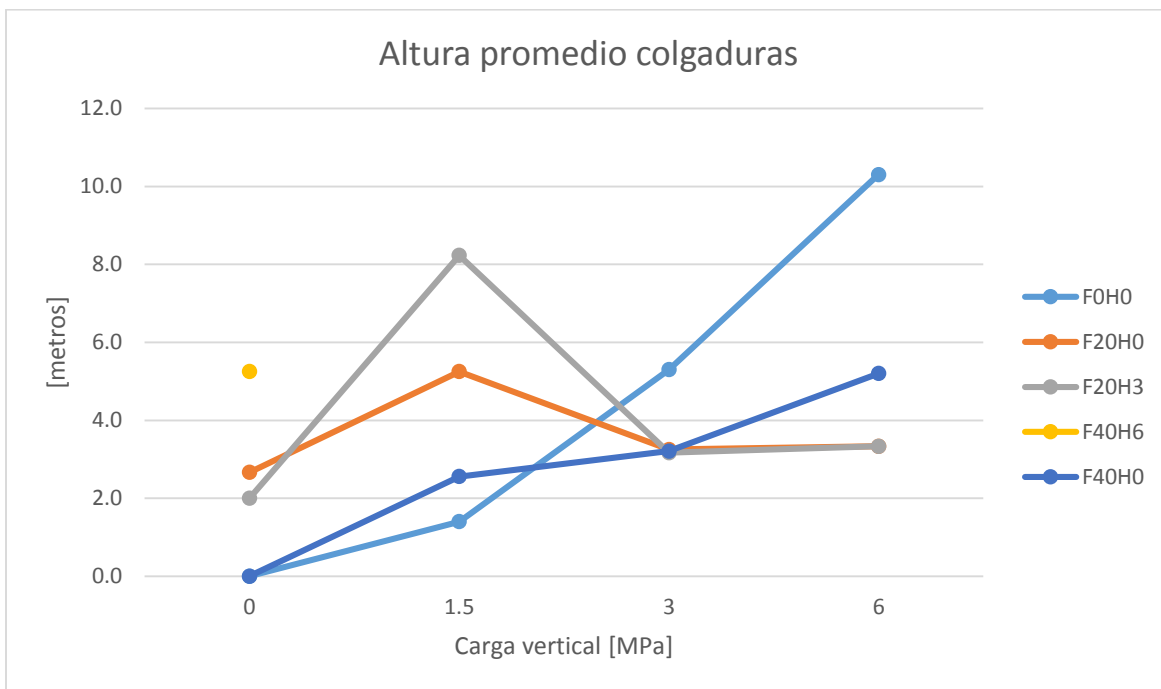


Figura 30: Resultados altura promedio colgaduras [cm]

Cabe señalar que las colgaduras en el punto de extracción se consideraron con altura igual a 0 [cm]. Además, se registró la condición de flujo observada en cada uno de los experimentos.

4.5. Condición de flujo

En la Tabla 17 se muestran las condiciones de flujo obtenidas en los experimentos.

Tabla 17: Resultados condición de flujo

Factores		Carga vertical [MPa]				
Humedad [%]	Finos [%]	0	1.5	3	6	10
0	0	Flujo libre	Flujo intermitente	Flujo intermitente	Flujo asistido	Sin flujo
0	20	Flujo intermitente	Flujo asistido	Flujo asistido	Flujo asistido	-
0	40	Flujo asistido	Flujo asistido	Flujo asistido	Flujo asistido	-
3	20	Flujo asistido	Flujo asistido	Flujo asistido	Flujo asistido	-
6	40	Sin flujo	-	-	-	-

4.6. Altura y diámetro elipsoide de colgadura alta

Finalmente, al darse por concluido el experimento, se procedió a medir la altura y el diámetro de los elipsoides formados debido a la extracción del material. Las dimensiones luego fueron transformadas a escala de mina. Los casos que no tienen datos se deben a que no hubo formación de colgadura alta o porque se imposibilitaba la medición del diámetro. En la Tabla 18 se muestran los resultados ya escalados.

Tabla 18: Resultados altura/diámetro colgadura alta [m]

Factores		Carga vertical [MPa]				
Humedad [%]	Finos [%]	0	1.5	3	6	10
0	0	-	-	-	16.1/6.0	-
0	20	-	13.5/7.5	12.8/6.0	13.5/-	-
0	40	-	15.4/2.5	16.9/-	11.3/-	-
3	20	15.0/-	13.9/3.0	14.3/3.8	15/4.5	-
6	40	-	-	-	-	-

4.7. Conclusiones del capítulo

De la caracterización de material se obtuvo que las mezclas del material con el fino generan un material poco uniforme y con un gran índice de curvatura. En cuanto al factor de forma, el material es subangulosos a subredondeados.

De los resultados experimentales se observó que:

- La carga vertical tiene un impacto negativo en la fluidez del material.
- Aumento del porcentaje de finos disminuye las condiciones de flujo del material.
- Presencia de humedad junto a finos aumenta drásticamente la formación de colgaduras.
- No se observa un patrón evidente en la altura de colgaduras ni en la altura y diámetro del elipsoide en la colgadura alta.

En el siguiente capítulo se encuentra un análisis más exhaustivo de los resultados de los experimentos realizados.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Introducción

En el capítulo actual, se muestra el análisis de los resultados expuestos en el capítulo anterior y la aplicabilidad de los modelos expuestos en la revisión bibliográfica. Además, se postula un modelo multivariable de predicción de colgaduras.

5.2. Frecuencia e índice de colgaduras

De lo observado en los resultados, se puede concluir que la variación de la carga vertical tiene un gran impacto en la fluidez del material, teniéndose un aumento del índice de colgaduras a medida que el confinamiento incrementa (Figura 29). Además, se puede notar que la presencia de finos también genera que las colgaduras ocurran con mayor facilidad. En cuanto a la humedad, se evidencia que su presencia es la que más influye, teniéndose índices de colgaduras sobre 6 [colgaduras/1,000ton].

En la Figura 31 se muestran los ajustes hechos para determinar la frecuencia de colgaduras, donde las curvas ajustadas son las punteadas y tienen antepuesta una “A” en su nombre.

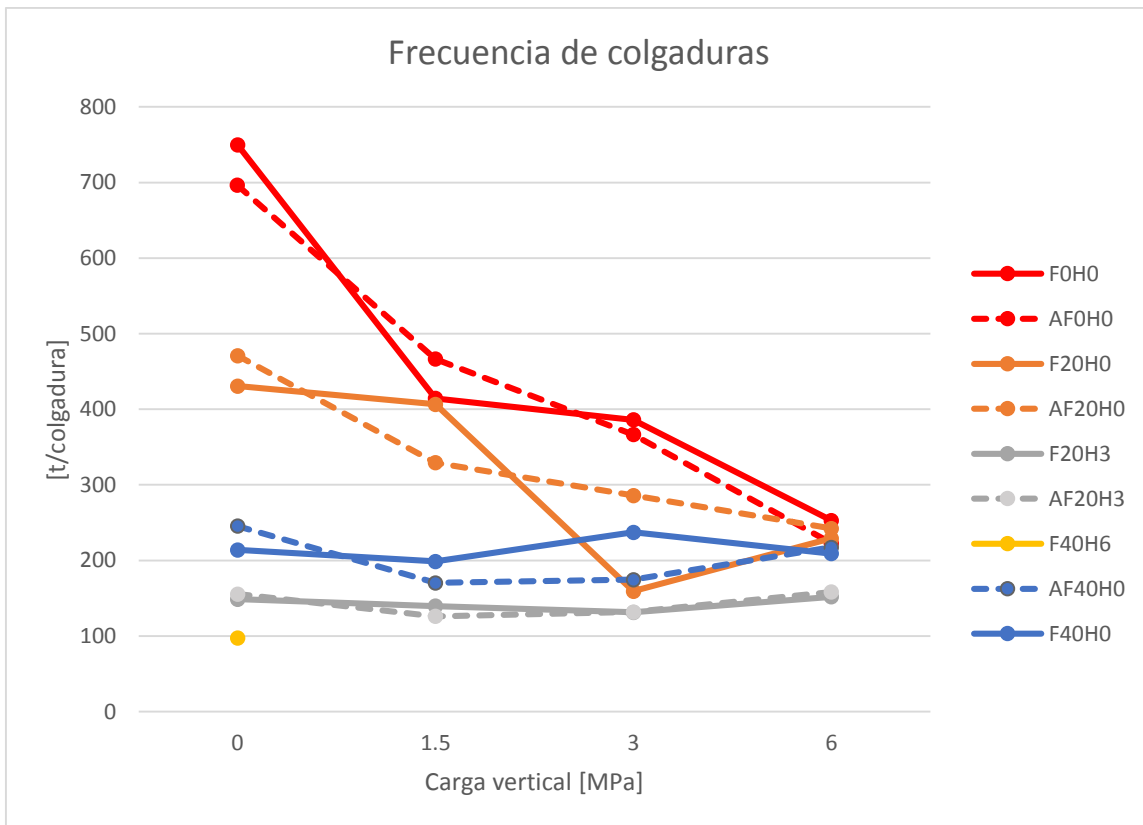


Figura 31: Ajuste de curvas, frecuencia de colgaduras

Para realizar estos ajustes se utilizó el modelo multivariable definido por la Ecuación 14.

$$F_c \left[\frac{\text{toneladas}}{\text{colgadura}} \right] = C - a * \sigma_v^b * \left(\frac{c}{c + F} \right) * \left(\frac{d}{d + H} \right) - e * F - f * H + \sigma_v * F * g$$

Ecuación 14: Frecuencia de colgaduras [toneladas/colgadura]

Donde:

F_c = frecuencia de colgaduras, o sea, la cantidad de toneladas que se extraen entre cada colgadura.

σ_v = carga vertical aplicada.

F = porcentaje de finos presentes [%].

H = porcentaje de humedad presente [%].

C = constante de ajuste relacionada a la frecuencia de colgaduras obtenidas en el caso base.

a, b, c, d, e, f, g = constantes de ajuste.

Para los ajustes antes mostrados se utilizaron los valores de la Tabla 19.

Tabla 19: Factores de ajuste utilizados

C	a	b	c	d	e	f	g
696.19	185.88	0.52	62.94	1.66	11.27	105.10	1.09

Cabe señalar que la Ecuación 14 es aplicable solo para el rango de confinamientos trabajados en esta investigación y que no se ajustó para el caso en que hay presencia de 40 [%] de finos y 6 [%] de humedad debido al único dato presente. Además, el modelo mostrado dista bastante al obtenido por Gómez (2014), donde el factor que más afecta a la frecuencia de colgaduras es la carga vertical de manera exponencial (Capítulo 2).

Finalmente, el índice de colgaduras observado en los experimentos, para el caso base, se condice con los vistos en algunas faenas, como por ejemplo, en TTE 4 Sur, donde se pueden observar índices de hasta 3.79 [colgaduras/1,000 ton] (Maass, 2013).

5.3. Altura promedio de colgaduras

Para la altura promedio de colgaduras (Figura 30), solo se ve un efecto importante de la carga vertical en el caso que no hay finos ni humedad, así como, en el caso con 20 [%] finos y 0 [%] de humedad, donde al aumentar la carga vertical se tiene un incremento de la altura. En el ANEXO E se encuentran Figuras que muestran algunas de las fotografías sacadas de las colgaduras obtenidas.

5.4. Condición de flujo

Para las condiciones de flujo (Tabla 17), se observa que un aumento de la carga vertical implica una disminución de la capacidad de fluir del material. Así mismo, un aumento del porcentaje de fino o la adición de humedad genera una disminución apreciable de la fluidez. Lo anterior se refleja en el gráfico de la Figura 32, donde los puntos amarillos indican los

experimentos realizados (sin humedad) y las áreas de colores, las diferentes condiciones de flujo. Cabe señalar que los casos con humedad no se graficaron debido a que éstos mostraban solo dos condiciones de flujo; flujo asistido y sin flujo.

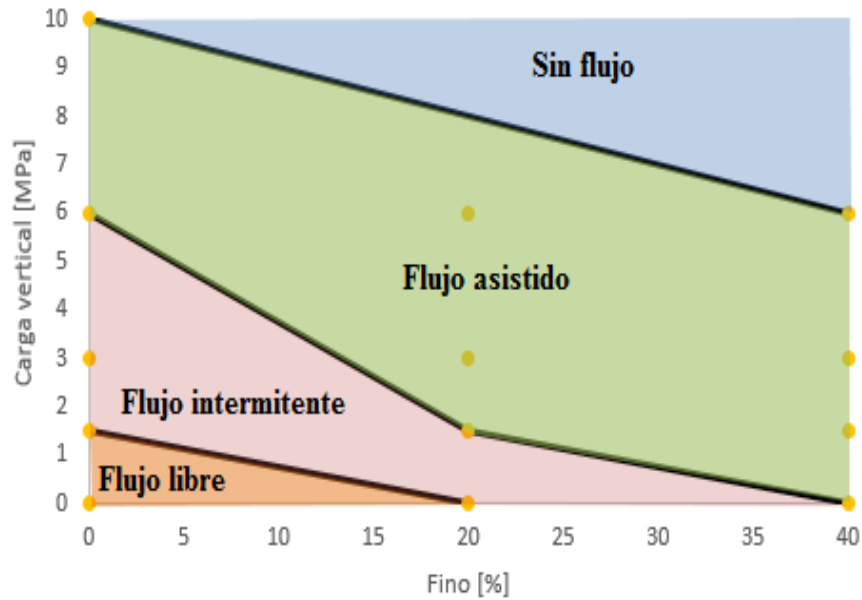


Figura 32: Efecto de presencia de finos y carga vertical en condiciones de flujo

Estos resultados se contradicen con los obtenidos por Fuenzalida (2012), quien observó en sus experimentos que la condición de flujo del material mejoraba al haber un aumento en la relación de tamaño de abertura con el tamaño medio de partícula, mientras que aquí se tiene que un aumento del porcentaje finos, o sea, una disminución del tamaño medio de partícula, genera un deterioro de la condición de flujo. Lo mencionado se muestra en la Figura 33.

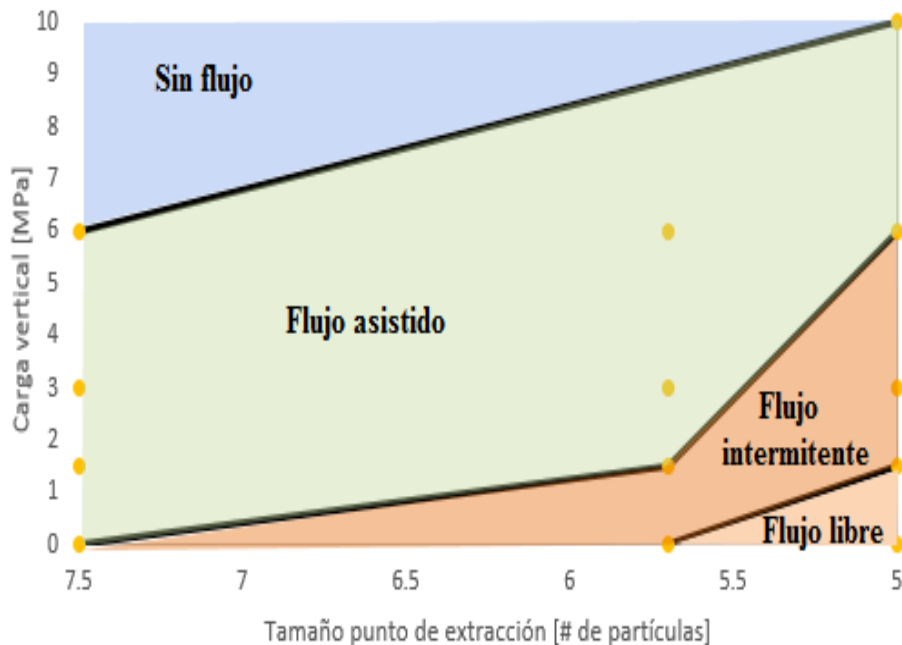


Figura 33: Condición de flujo del material

Debido a lo anterior es que no es aplicable el gráfico de Fuenzalida (2012) cuando se tienen curvas granulométricas complejas, en especial para altas presencias de finos.

Experimentos con una carga vertical de 10 [MPa] se realizaron solo para el caso base debido que éste no presentó flujo de material y para los otros casos (con fino o humedad) solo se observó una disminución de la condición de flujo, entonces se esperaba que se tuviera el mismo resultado. De forma similar, para el caso de 40 [%] de finos y 6 [%] de humedad, en el cual el material no fluyó al no tener una carga aplicada, se esperaba que, para las mismas condiciones y agregándole confinamiento, el material siguiera sin fluir.

En la mina Deep Ore Zone (DOZ), la cual es operada por *block caving*, se tienen formaciones de chimeneas debido a la compactación del mineral quebrado que no fue extraído con rapidez (Sahupala et al, 2008), situación similar a la observada en los experimentos realizados. El material consolidado en DOZ tiene que ser perforado y tronado para poder quebrarlo, atrasando la producción en esas bateas.

5.5. Altura y diámetro elipsoide de colgadura alta

Se observa que no existe gran variación en la altura de la colgadura alta, considerando cualquiera de las variables estudiadas. En cuanto al diámetro del elipsoide, se ve un pequeño aumento al incrementar el confinamiento para los experimentos que tienen 20 [%] de finos y 3 [%] de humedad. Ambos resultados se ven en la Tabla 18.

5.6. Conclusiones del capítulo

Las conclusiones obtenidas del análisis de resultados de los experimentos realizados se listan a continuación:

- Fue posible ajustar un modelo multivariable de frecuencia de colgaduras que funcionara dentro de los rangos de carga vertical, presencia de finos y humedad utilizados en los experimentos.
- La presencia de finos junto a humedad es el factor que más impacta negativamente en la frecuencia de colgaduras. En cuanto al efecto de la carga vertical, ésta incide perjudicialmente cuando se tienen bajos porcentajes de finos y no hay presencia de humedad.
- La altura promedio de las colgaduras solo presenta una tendencia con respecto a la carga vertical para dos casos en específico.
- La condición de flujo presenta comportamiento similar a frecuencia de colgaduras, teniéndose que cuando la última decrece, empeora la condición de flujo.
- La presencia de finos, a pesar de disminuir el tamaño de partícula medio, deteriora la condición de flujo y disminuye la frecuencia de colgaduras.
- En cuanto a la altura y diámetro del elipsoide en la colgadura alta, no se observa que estas características sigan un patrón con respecto a algunas de las variables estudiadas.

El próximo capítulo explica las conclusiones generales de esta investigación junto a las recomendaciones y el trabajo futuro que queda por hacer.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

7.1. Conclusiones generales

Los experimentos con el modelo escalado permitieron estudiar el efecto del confinamiento, tamaño de partícula, humedad y presencia de finos en la fluidez del material. Se espera que a medida que la profundidad y altura de columna en las minas de *caving* aumente, el número de colgaduras incremente, si es que la fragmentación se mantiene constante.

Respecto a los experimentos hechos para la determinación de la fluidez de las distintas mezclas se concluye lo siguiente:

- Para el caso base, se tiene que el principal factor de colgaduras es la aparición de grandes colpas en el punto de extracción.
- Para los experimentos con humedad, se tiene que el flujo debe ser asistido o incluso inexistente. Consecuentemente, estos experimentos son los que presentan mayor índice de colgaduras.
- La presencia de humedad y finos genera una disminución de ciclos de extracción, o sea, de masa total extraída previo a la formación de una colgadura alta. Así mismo, disminuyen la capacidad de fluir del material, generando un mayor índice de colgaduras, al igual que incrementando la carga vertical.
- Las colgaduras altas sobre la batea se forman solo en presencia de confinamiento, o humedad y fino en conjunto. Las dimensiones del elipsoide formado no es predecible con las variables estudiadas, ya que no se observó una correlación.
- Los resultados obtenidos no distan de lo observado en las minas, teniéndose índice de colgaduras y formaciones de chimeneas debido a compactación, similares. Cabe destacar que en los experimentos se utiliza un solo punto de extracción, por lo que se podría estar sobre estimando el índice de colgaduras.
- Finalmente, se puede concluir que, en el caso de que se haya una gran presencia de finos (sobre 20 [%]) en los puntos de extracción y con presencia de humedad (6 [%]) o, en el caso de que se tengan cargas verticales muy altas (10 [MPa]), la fluidez del material se vería drásticamente disminuida, llegando hasta el extremo de observarse el no flujo.

7.2. Recomendaciones y trabajo futuro

Debido a que el set experimental fue diseñado para replicar una batea en específico, y tomando en cuenta el número de experimentos realizados, aún hay factores que se deben considerar y trabajar en el futuro, ya que existe un gran rango de cargas verticales, presencia de finos y humedad, y distribuciones granulométricas con las que aún no se ha experimentado. Así mismo, no se ha experimentado con más o diferentes bateas.

Los resultados experimentales muestran que la cantidad de colgaduras puede ser predicha para efectos de diseño minero. Pero, esto necesita más investigación y análisis. Se espera que este tipo de experimentos se volverá un estándar en la minería de *caving*, especialmente considerando las inciertas condiciones futuras.

Además, faltan estudios en el área de la fragmentación secundaria producto de los esfuerzos verticales y la distribución de esfuerzos generada dentro del material confinado. Así mismo, se podrían estudiar los esfuerzos producidos en el sistema de extracción de material y el factor de llenado de éste, junto a la determinación de la cohesión y ángulo de fricción interna del material ensayado (mezcla de finos, gruesos y humedad). También, falta ensayar habilitando dos puntos de extracción y utilizando más de una batea, para así ver la interacción de las zonas de flujo.

Otro enfoque con el que se podría abordar este tema es estimar, por medio de simulaciones, el efecto de las colgaduras sobre la productividad.

Finalmente, es necesario validar los resultados y el modelo obtenidos con la metodología expuesta con minas particulares, en otras palabras, tomar el material y su granulometría, escalarlo y experimentar con dicho material para finalmente comparar los resultados obtenidos con datos mina y ver si se asemejan.

BIBLIOGRAFÍA

1. Brown, E T, 2007. Block caving geomechanics, 2nd ed. Julius Kruttschnitt Minerals Research Centre, the University of Queensland: Brisbane.
2. Brunton, I, Sharrock, G and Lett, J. 2012. Full scale near field flow behavior at the Ridgeway Depps Block Cave Mine. Proceedings of MassMin 2012, Sudbury, Canada.
3. Carter, C J and Russell, F M, 2000. Modelling and design of block caving at Bingham Canyon. Proceedings MassMin 2000, Brisbane, (Ed: G Chitombo), 347-356- Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.
4. Castro, R. 2014. Presentación Paradigms and Facts in Block Caving Planning. Mine planning workshop. Caving 2014, Santiago, Chile.
5. Castro, R and Whitten, W. 2007. A new cellular automaton to model gravity flow in block caving based on physical modelling observations. In proceedings of the 33th APCOM conference, Santiago, Chile.
6. Castro, R. 2006. Study of the mechanisms of gravity flow for block caving. PhD Thesis, the University of Queensland, Brisbane, Australia.
7. Cavieres, P., Contreras, E., Arce, J. Dimensionamiento de mallas de extracción, bateas recolectoras y pilar corona para método panel caving en roca primaria, mina El Teniente.
8. Chacón, J, Gopfert, H and Ovalle, A. 2004. Thirty years evolution of block caving in Chile. Proceedings of MassMin 2004, Santiago, (Ed(s): A. Karzulovic and M. Alfaro), 387-392.
9. Chitombo, G.P. 2010. Cave mining-16 years after Laubscher's 1994 paper 'Cave mining-state of the art'. Proceedings of the Second International Symposium on Block Caving and Sublevel Caving, Y.Potvin (Ed), 20-22 Abril 2010, Perth, Australia.
10. Cho, G., Dodds, D. and Santamarina, J. C. 2006. Particle shape effects on packing density, Stiffness and Strength: Natural and crushed sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 132, 5, pp. 591-602.
11. Craig, R. F. 2004. Soil Mechanics, 7th, Spon Press: New York.
12. Flores, G, 2004. Geotechnical challenges of the transition from open pit to underground cave mining at Chuquicamata Mine. Proceedings MassMin 2004, Santiago, (Ed: A Karzulovic and M Alfaro), 591-602.
13. Flores, G E, 2005. Rock mass response to the transition from open pit to underground cave Mining. PhD thesis (unpublished), University of Queensland, Brisbane.
14. Fuenzalida, M. 2012. Estudio del flujo gravitacional confinado y su aplicación a la minería de caving. Tesis de Magíster en minería. Universidad de Chile, Chile.
15. Gómez, R. 2014. Modelo de fragmentación secundaria y colgaduras en minería de caving. Memoria de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Chile.
16. Heslop, T G, 2000. Block caving – controllable risks and fatal flaws. Proceedings MassMin 2000, Brisbane, (Ed: G Chitombo), 437-456. Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.
17. Hoz, K. 2007. Estimación de los parámetros al corte en suelos granulares. Tesis de Magíster. Universidad de Chile, Chile.

18. Kvapil D R. 2008. Gravity flow in Sublevel and panel caving – A common sense approach.
19. Laubscher, D. 1994. “Cave Mining – the state of the art”. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, pp.279-293.
20. Maass, S. 2013. Alternativas tecnológicas para descuelgue de zanjas. Tesis Magíster en minería. Universidad de Chile, Chile.
21. Morales, D., Olivares R. Análisis de daños inducidos por tronadura de socavación del tercer panel de división Andina, Codelco Chile.
22. Nedderman, R., M. 1992. Statics and Kinematics of Granular Materials.
23. Orellana, L. F. 2012. Diseño de la tecnología de minería continua a partir de experimentos en laboratorio. Tesis de Magíster en minería. Universidad de Chile, Chile.
24. Ovalle, A. 2014. Presentación Long Term Mine Planning. Mine planning workshop. Caving 2014, Santiago, Chile.
25. Potvin, Y., Thomas, E., Fourie, A. Handbook on Mine Fill.
26. Sahupala, H., Brannon, C., Annavarapu S. and Osborne K. Recovery of extraction level pillars in the Deep Ore Zone (DOZ) block cave, PT Freeport Indonesia. Proceedings MassMin 2008, Lulea, (Ed: H Schunnesson and E Nordlund), 191-202.
27. Sharrock, G. B., and Hashim, H., 2009. Disturbed Flow in Block Caving. Proc. American Rock Mechanics Symposium, Asheville, USA, July 2009, p12.
28. Summers, J, 2000. Analysis and management of mining risk. Proceedings MassMin 2000, Brisbane, (Ed: G Chitombo), 63-82. Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.
29. Vargas, R. 2010. Metodología de diseño de malla de extracción en block y panel caving incorporando back-análisis. Tesis de Magíster en Minería. Universidad de Chile, Chile.

ANEXO A

Diseño equipo experimental

Introducción

En el presente capítulo se explica cómo se obtiene el diseño de la batea y del sistema de extracción a utilizar en los experimentos.

Diseño de bateas

Los diseños de la batea y del pilar corona son dependientes entre sí, ya que determinando la geometría de la batea, queda determinada inmediatamente la geometría del pilar corona. El diseño de la batea depende de la variante de *block/panel caving* a implementar en un sector productivo, lo que se debe a las condiciones de borde que restringen la metodología de construcción de la batea. Para hundimiento convencional se tiene un tipo de batea que se construye en dos etapas, la primera desde el nivel de producción y la segunda desde el nivel de hundimiento. Para hundimiento previo y avanzado se tiene un tipo de batea especial, que es independiente del nivel de hundimiento, la cual se construye íntegramente desde el nivel de producción (Cavieres et al).

Parametrización del diseño de batea

La distancia entre calles paralela a la zanja ($D_{c//z}$) es determinada cuando se definen los diseños de las mallas de extracción, por ejemplo 17.32 y 20 [m]. La distancia calle/visera (D_{cv}) se calcula, como se muestra en la Ecuación 15, en base a la suma de la distancia desde el centro de la calle hasta el punto de extracción (D_{cpe}), más el ancho de visera (A_v). El ancho de la visera depende de la variante de *block/panel caving* a implementar. Para hundimiento convencional $A_v = 1$ [m] y para hundimiento previo y hundimiento avanzado $A_v = 0.5$ [m].

$$D_{cv} = D_{cpe} + A_v [m]$$

Ecuación 15: Cálculo distancia calle/visera

La altura de la galería zanja (H_{gz}) es función de las dimensiones del equipo LHD y de la normativa legal vigente, la cual establece las distancias mínimas entre el equipo LHD y las paredes y techo de las galerías.

El ápex, según los últimos estudios, se recomienda lo más pequeño posible. Para hundimiento convencional el ápex es equivalente al ancho de la galería del nivel de hundimiento. En la Tabla 20 se muestra el ápex utilizado en algunos sectores de la mina El Teniente.

INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

Tabla 20: Dimensiones de ápex en sectores de El Teniente

Dimensión Malla [Dc⊥c/2 x Dz//c] [m]	Ápex [m]	Referencia
15 x 17.32	3.6	Ten-4 Sur
15 x 20	3.6	Ten-4 Sur
17 x 20	4	Diablo Regimiento

La visera debe ser lo más robusta posible y como una forma de mejorar su estabilidad se fortifica con cables. La altura de la visera (Hv) es muy importante en la estabilidad del pilar corona, ya que a mayor altura de visera, más estable es ésta y viceversa, por ello se recomienda tener la mayor altura de visera posible. No obstante, de acuerdo al tipo de batea a utilizar, a causa de condiciones de borde en la construcción, se tienen alturas menores que lo deseado. En la Tabla 21 se muestran los valores máximos y mínimos según el tipo de hundimiento para la altura de visera.

Tabla 21: Altura de visera según variante de *caving*

Tipo de hundimiento	Altura de la visera (Hv) [m]	
	Valor mínimo	Valor máximo
Convencional	7.94	11.4
Previo o Avanzado	4	5.41

El ángulo de la visera debe ser lo más cercano a 90°, para así reducir la abrasión producto del paso del mineral y además evitar que el pilar corona esté expuesto a recibir mayores impactos producto de las caídas de grandes bloques, ya que se tiene menor cantidad de área expuesta. En la mina El Teniente, el ángulo de visera ha variado entre 81° y 90°. En la Tabla 22 se muestran los ángulos de visera estandarizados para las distintas variantes de hundimiento.

Tabla 22: Ángulo de visera según tipo de hundimiento

Tipo de hundimiento	Ángulo de Visera α
Convencional	82°
Previo Avanzado	90°

El ángulo de talud de batea (β) corresponde al ángulo de la pared superior a la visera, la cual recibe el flujo de mineral. Este ángulo debe ser mayor que el ángulo de escurrimiento del mineral. Según el área tronadura de la División El Teniente, β debe ser lo más cercano a 45°, de tal forma de favorecer un flujo normal de mineral, evitando generar zonas sin movimiento sobre el pilar corona. En la Tabla 23 se encuentran los ángulos de talud según tipo de hundimiento.

INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

Tabla 23: Ángulo de talud según tipo de hundimiento

Tipo de hundimiento	Ángulo de Talud β
Convencional	40°
Previo o avanzado	50°

La altura de talud de batea (H_t) para los distintos tipos de hundimiento se calcula utilizando la Ecuación 16 para hundimiento convencional o la Ecuación 17 para hundimiento previo o avanzado.

$$H_t = \tan(\beta) \left[D_{cv} - \frac{ap}{2} - \frac{H_v}{\tan(\alpha)} \right]$$

Ecuación 16: Altura de talud de batea para hundimiento convencional

$$H_t = \tan(\beta) \left[D_{cv} - \frac{ap}{2} \right]$$

Ecuación 17: Altura de talud de batea para hundimiento avanzado o previo

La distancia entre los niveles de producción y hundimiento (D_{nn}) es función de los tres parámetros mostrados en la Ecuación 18. El cálculo de esta distancia se realiza mediante iteraciones, buscando evitar valores fraccionarios.

$$D_{nn} = H_{gz} + H_v + H_t$$

Ecuación 18: Determinación distancia entre niveles de producción y hundimiento

El ancho del pilar corona (A_{cp}) equivale a dos veces la distancia entre el centro de la valle y la visera (D_{cv}). Lo anterior se ilustra en la Ecuación 19.

$$A_{cp} = 2D_{cv}$$

Ecuación 19: Ancho del pilar corona

La altura del pilar corona equivale a la suma entre la altura de la visera (H_v) y la altura de la batea (H_t), como se muestra en la Ecuación 20.

$$H_{cp} = H_v + H_t$$

Ecuación 20: Altura del pilar corona

La distancia entre zanjas perpendicular a las zanjas ($D_{z\perp z}$) se obtiene de la misma malla de extracción, mediante la Ecuación 21.

$$D_{z\perp z} = \text{sen}(60^\circ) D_{z//c}$$

Ecuación 21: Distancia entre zanjas perpendicular a la zanja

La distancia entre bateas perpendicular a la zanja (D_{bb}) queda definido en el diseño de excavación de la batea (tiros en abanico). En la mina El Teniente, tanto para hundimiento convencional como avanzado o previo, esta distancia es de 1 metro, existiendo algunos casos de 0 y 1.32 metros. Lo anterior queda mejor explicitado en la Tabla 24.

Tabla 24: Distancia entre bateas o ápex menor

Tipo de hundimiento	Malla $D_c \perp c/2 \times D_z // c$ [m]	Distancia entre Bateas [m]
Convencional	15 x 17.32	1
	15 x 20	1.32
Previo o Avanzado	15 x 17.32	0
		1

Ángulo pared entre bateas (ω) depende del diseño de excavación de la batea (abanicos de perforación). Lo anterior se refleja en la Tabla 25.

Tabla 25: Ángulo pared entre bateas

Tipo de hundimiento	Malla $D_c \perp c/2 \times D_z // c$ [m] x [m]	Ángulo pared Batea
Convencional	15 x 17.32	64°
	15 x 20	61°
Previo o Avanzado	15 x 17.32	70°
		71°

La sección de la galería zanja (A_{gz}) es función de la dimensión del equipo LHD y de la normativa legal vigente.

Escalamiento

Para poder realizar experimentos que representen lo más posible la realidad, se debe realizar un escalamiento desde las dimensiones que se obtengan de la batea a las dimensiones que sean factibles utilizar en el cilindro.

Para hacer el escalamiento se requiere conocer al área de influencia (A_{inf}) de una batea, lo que considera el área superior de la batea junto al área de la parte superior del pilar corona y del ápex. La Ecuación 22 representa el cálculo para obtener esta área.

$$A_{inf} = \left[\left(ap + D_{pe} + 2 \left(H_v \cos(\alpha) + \frac{H_t}{\tan(\beta)} \right) \right) \times \left(D_{bb} + A_{gz} + \frac{2(D_{nn} - H_{gz})}{\tan(\omega)} \right) \right]$$

Ecuación 22: Área de influencia de una batea

Teniendo esa área rectangular se puede determinar, con la Ecuación 23, un círculo que tenga diámetro (D_{inf}) igual a la diagonal del rectángulo.

$$D_{inf} = \left[\left(ap + D_{pe} + 2 \left(H_v \cos(\alpha) + \frac{H_t}{\tan(\beta)} \right) \right)^2 + \left(D_{bb} + A_{gz} + \frac{2(D_{nn} - H_{gz})}{\tan(\omega)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 23: Diámetro de influencia de una batea

Luego, es necesario escalar este diámetro al del cilindro (D_{cil}), con lo que la razón queda de la forma, $D_{inf} : D_{cil}$.

Aplicación metodología de diseño

Para el diseño final de la batea se estudian diferentes alternativas con tal de optar por el mejor diseño.

Para el diseño de bateas para hundimiento convencional, avanzado o previo se tienen las siguientes consideraciones iniciales:

- Utilización de medidas de una malla tipo Teniente de 15 x 17.32 metros, operativizada por un LHD de 13 yd³. Esta malla se muestra en la Figura 34.
- Ancho de zanjas (Agz) y calles (Ac) de 5 metros.
- Ancho de calles del nivel de hundimiento de 4 metros.

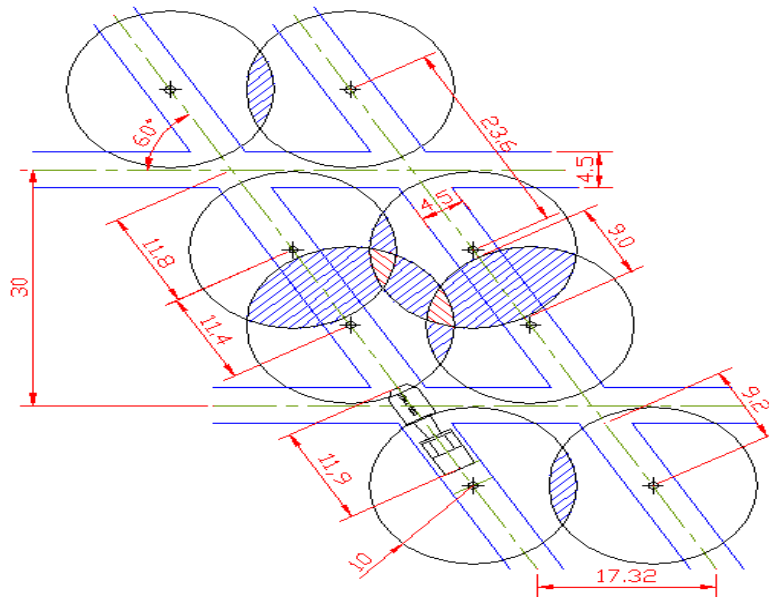


Figura 34: Malla de 15 x 17.32 [m] operativizada con LHD de 13 [yd³]

En el caso de la batea tipo Andina, las consideraciones iniciales varían, teniéndose:

- Utilización de medidas de una malla tipo Teniente de 13 x 13 metros, operativizada por un LHD de 6 yd³.
- Ancho de zanjas (Agz) y calles (Ac) de 4 metros.
- Ancho calles nivel de hundimiento de 4 metros.

INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

En la Tabla 26 se muestran los parámetros de entrada utilizados para el diseño de cada batea.

Tabla 26: Parámetros de entrada diseño bateas

Parámetro de entrada	Convencional	Avanzado o previo	Andina	Unidad
Distancia entre calles paralela a la zanja (Dc/z)	30	30	26	[m]
Altura de la galería zanja (Hg _z)	4	4	2.6	[m]
Ápex (ap)	4	4	4	[m]
Altura de la visera (H _v)	8	4	13.5	[m]
Ancho de la visera (A _v)	1	1	0	[m]
Ángulo de la visera (α)	82	90	90	°
Ángulo del talud de la batea (β)	40	50	90	°
Distancia entre el centro de la calle al punto de extracción (D _{cpe})	11.8	11.8	9.4	[m]
Distancia entre puntos de extracción (D _{pe})	11.4	11.4	7.2	[m]
Distancia entre bateas perpendicular a la zanja (D _{bb})	1	1	0	[m]
Ángulo pared batea (ω)	66.5	66.5	71.5	°

Mientras que en la Tabla 27 se muestran los parámetros de salida del diseño.

Tabla 27: Parámetros de salida diseño bateas

Parámetro de salida	Convencional	Avanzado o previo	Andina	Unidad
Distancia calle a visera (D _{cv})	12.8	12.3	9.4	[m]
Altura del talud de la batea (H _t)	8.12	12.27	0	[m]
Distancia entre niveles (D _{nn})	20.12	20.27	20.6	[m]
Ancho del pilar corona (A _{cp})	25.6	25.6	18.8	[m]
Altura del pilar corona (H _{cp})	16.12	16.27	13.5	[m]
Rectángulo de influencia	36.84 x 15	35.98 x 15	26 x 13	[m]x[m]
Diámetro círculo de influencia (D _{inf})	39.78	38.98	29	[m]
Razón de escalamiento	1:117	1:114.6	1:85.3	-

Debido a la geometría de la batea tipo Andina, se pueden utilizar distintas escalas, dentro de las cuales se calcula para 1:50, 1:75 y 1:100. Esto es para poder escoger la escala que mejor se ajuste al cilindro y la cual permita el tener un sistema de extracción adecuado. A continuación se encuentra el detalle de los cálculos de los parámetros de salida para cada batea.

Hundimiento convencional.

Parámetros de entrada:

- Distancia entre calles paralela a la zanja ($Dc//z$) = 30 [m].
- Altura de la galería zanja (Hgz) = 4 [m].
- Ápex (ap) = 4 [m].
- Altura de la visera (Hv) = 8 [m].
- Ancho de la visera (Av) = 1 [m].
- Ángulo de la visera (α) = 82° .
- Ángulo del talud de la batea (β) = 40° .
- Distancia entre el centro de la calle al punto de extracción ($Dcpe$) = 11.8 [m].
- Distancia entre puntos de extracción (Dpe) = 11.4 [m].
- Distancia entre bateas perpendicular a la zanja (Dbb) = 1 [m].
- Ángulo pared batea (ω) = 66.5° .

Parámetros de salida:

- Distancia calle a visera (Dcv) = $Dcpe + Av$ = 12.8 [m].
- Altura del talud de la batea (Ht) = $\tan(\beta) \times [Dcv - ap/2 - Hv/\tan(\alpha)]$ = 8.12 [m].
- Distancia entre niveles (Dnn) = $Hgz + Hv + Hz$ = 20.12 [m].
- Ancho del pilar corona (Acp) = $2 \times Dcv$ = 25.6 [m].
- Altura del pilar corona (Hcp) = $Hv + Ht$ = 16.12 [m].
- Rectángulo de influencia = $(ap + Dpe + 2 \times (Hv \times \cos(\alpha) + Ht / \tan(\beta))) \times (Dbb + Agz + 2 \times (Dnn - Hgz) / \tan(\omega))$ = $(4 + 37.25) \times (1 + 4 + 15)$ = 36.84×15 [m].
- Diámetro círculo de influencia ($Dinf$) = $(41.25^2 + 20^2)^{1/2}$ = 39.78 [m].
- Razón de escalamiento = $Dcil:Dinf$ = $0.34:39.78$ = 1:117.

Hundimiento avanzado o previo.

Parámetros de entrada:

- Distancia entre calles paralela a la zanja ($D_{c//z}$) = 30 [m].
- Altura de la galería zanja (H_{gz}) = 4 [m].
- Ápex (ap) = 4 [m].
- Altura de la visera (H_v) = 4 [m].
- Ancho de la visera (A_v) = 1 [m].
- Ángulo de la visera (α) = 90° .
- Ángulo del talud de la batea (β) = 50° .
- Distancia entre el centro de la calle al punto de extracción (D_{cpe}) = 11.8 [m].
- Distancia puntos de extracción (D_{pe}) = 11.4 [m].
- Distancia entre bateas perpendicular a la zanja (D_{bb}) = 1 [m].
- Ángulo pared batea (ω) = 66.5° .

Parámetros de salida:

- Distancia calle a visera (D_{cv}) = $D_{cpe} + A_v = 12.3$ [m].
- Altura del talud de la batea (H_t) = $\tan(\beta) \times [D_{cv} - ap/2 - H_v/\tan(\alpha)] = 12.27$ [m].
- Distancia entre niveles (D_{nn}) = $H_{gz} + H_v + H_z = 20.27$ [m].
- Ancho del pilar corona (A_{cp}) = $2 \times D_{cv} = 25.6$ [m].
- Altura del pilar corona (H_{cp}) = $H_v + H_t = 16.27$ [m].
- Rectángulo de influencia = $(ap + D_{pe} + 2 \times (H_v \times \cos(\alpha) + H_t / \tan(\beta))) \times (D_{bb} + Agz + 2 \times (D_{nn} - H_{gz}) / \tan(\omega)) = (4 + 31.98) \times (1 + 4 + 10) = 35.98 \times 15$ [m].
- Diámetro círculo de influencia (D_{inf}) = $(41.25^2 + 20^2)^{1/2} = 38.98$ [m].
- Razón de escalamiento = $D_{cil}:D_{inf} = 0.34:39.78 = 1:114.6$.

Batea tipo Andina.

Parámetros de entrada:

- Distancia entre calles paralela a la zanja ($D_{c//z}$): 26 [m].
- Altura de la galería zanja (H_{gz}): 3.6 [m].
- Ápex (ap): 4 [m].
- Altura de la visera (H_v): 13.5 [m].
- Ancho de la visera (A_v): 0 [m].
- Ángulo de la visera (α): 90° .
- Ángulo del talud de la batea (β): 90° .
- Distancia entre el centro de la calle al punto de extracción (D_{cpe}): 9.4 [m].
- Distancia puntos de extracción (D_{pe}): 7.2 [m].
- Distancia entre bateas perpendicular a la zanja (D_{bb}): 0 [m].
- Ángulo pared batea (ω): 71.5° .

Parámetros de salida:

- Distancia calle a visera (D_{cv}): $D_{cpe} + A_v = 9.4$ [m].
- Altura del talud de la batea (H_t): $\tan(\beta) \times [D_{cv} - ap/2 - H_v/\tan(\alpha)] = 0$ [m].
- Distancia entre niveles (D_{nn}): 20.6 [m].
- Rectángulo de influencia: $(ap + D_{pe} + 2 \times (H_v \times \cos(\alpha) + H_t / \tan(\beta))) \times (D_{bb} + Agz + 2 \times (D_{nn} - H_{gz}) / \tan(\omega)) = 26 \times 13$ [m].
- Diámetro Círculo de influencia (D_{inf}): $(26^2 + 13^2)^{1/2} = 29$ [m].
- Razón: $D_{cil}:D_{inf} = 0.34:39.78 = 1:85.3$.

Resultados diseño de batea

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los diseños de cada batea. En el ANEXO B se encuentran más resultados del dimensionamiento.

Hundimiento convencional

En la Figura 35, Figura 36 y Figura 37 se observan las dimensiones de la batea para hundimiento convencional calculada.

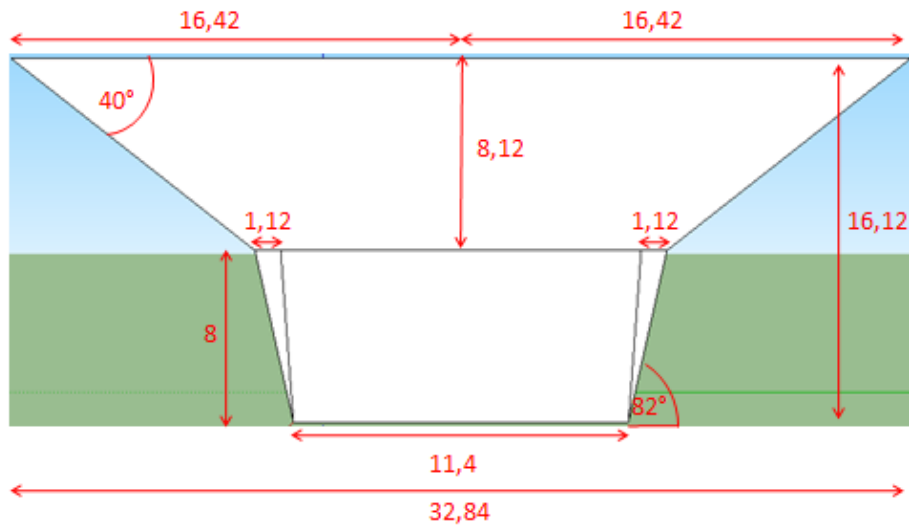


Figura 35: Vista longitudinal batea (HC) [m]

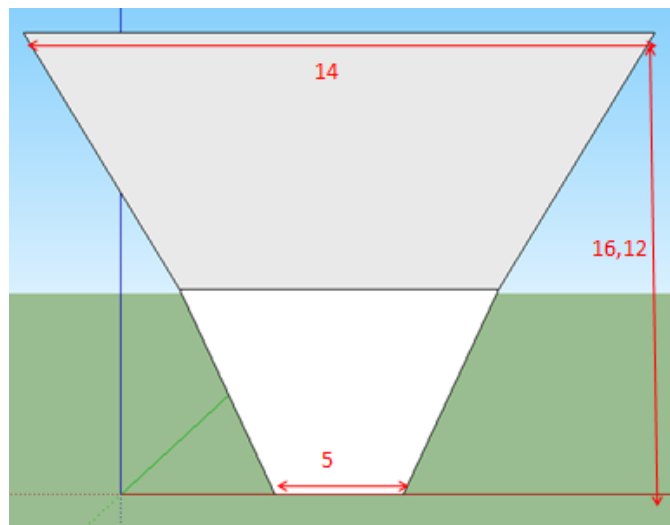


Figura 36: Vista lateral batea (HC) [m]

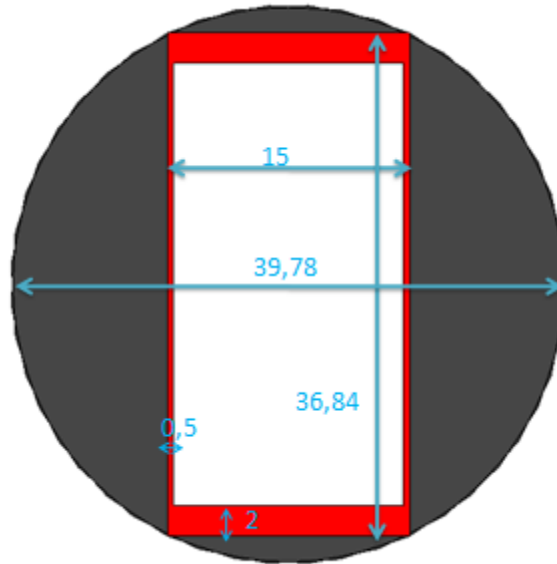


Figura 37: Área influencia batea (HC) [m]

Esta batea, al escalar su diámetro real de 39.78 [m] a un diámetro de 0.34 [m], entrega una razón de 1:117. Los resultados de este escalamiento se pueden ver en la Figura 38, Figura 39 y Figura 40.

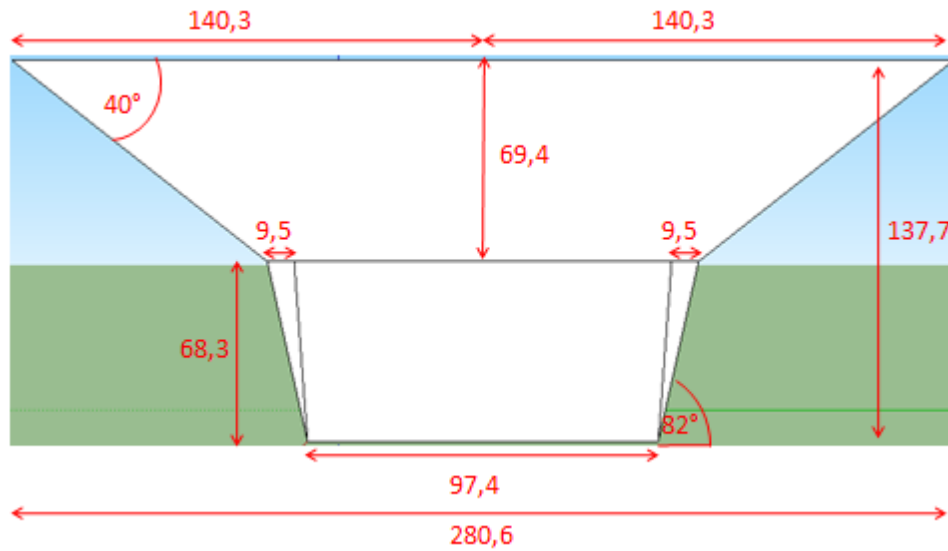


Figura 38: Vista longitudinal batea escalada (HC) [mm]

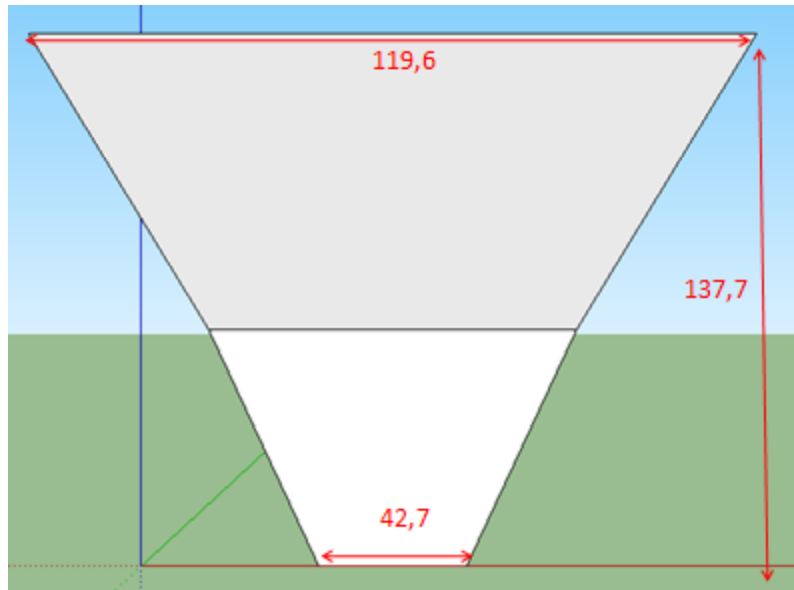


Figura 39: Vista lateral batea escalada (HC) [mm]

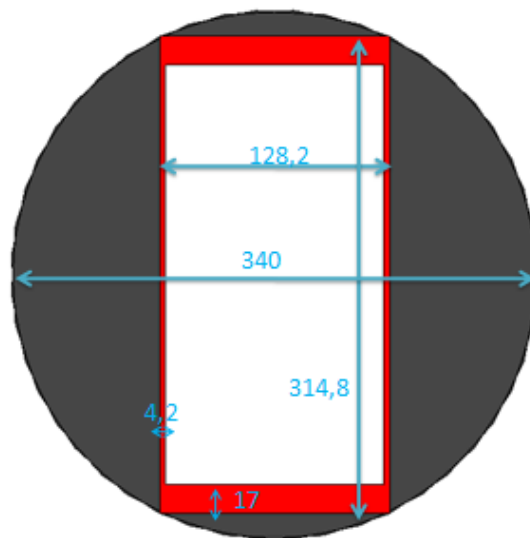


Figura 40: Área de influencia batea escalada (HC) [mm]

En la Figura 41 se muestran las dimensiones de la batea en el sistema de acople. Por otro lado, en la Figura 42 se observa como es el sistema de acople de la batea con la parte inferior del cilindro, cumpliendo la función de base.

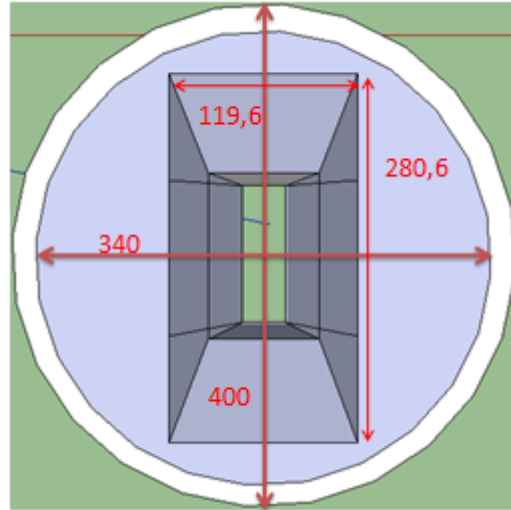


Figura 41: Vista planta batea en base (HC) [mm]

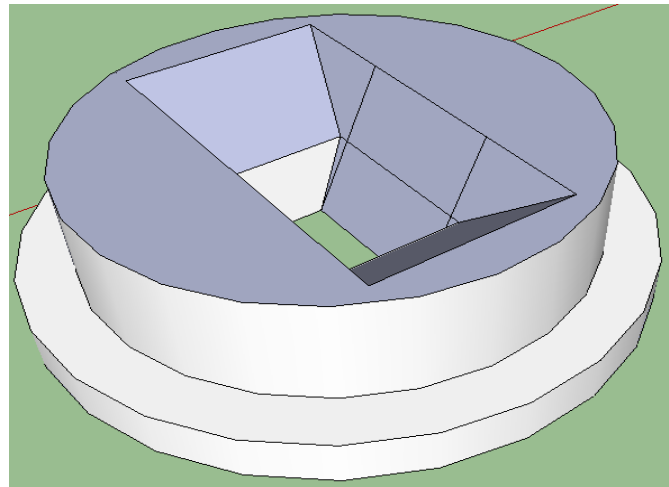


Figura 42: Vista isométrica batea en base (HC)

Hundimiento avanzado o previo

En la Figura 43, Figura 44 y Figura 45 se observan las dimensiones de la batea para hundimiento avanzado o previo calculada.

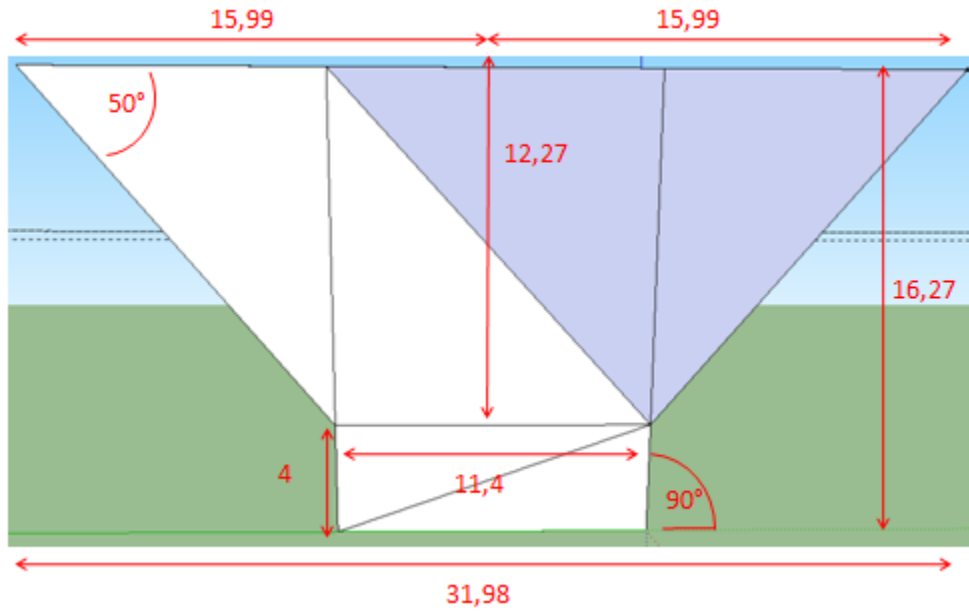


Figura 43: Vista longitudinal batea (HA o P) [m]

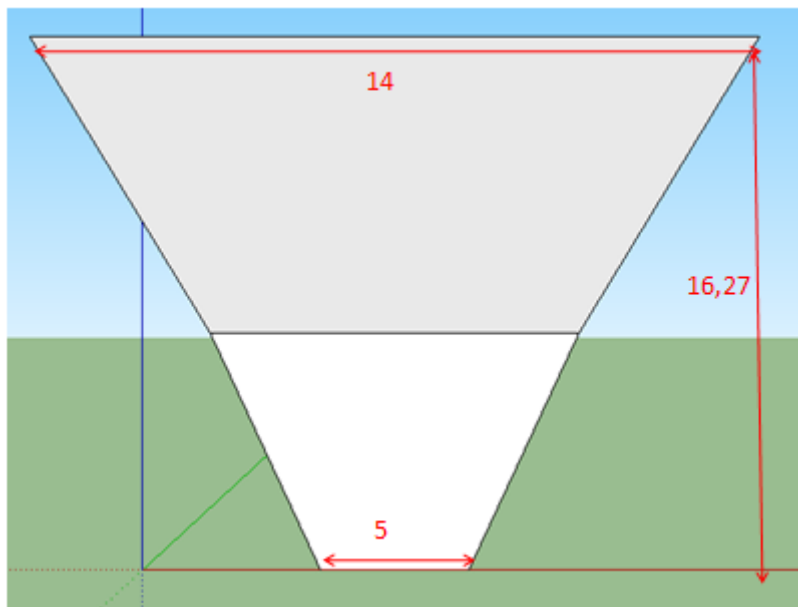


Figura 44: Vista transversal batea (HA o P) [m]

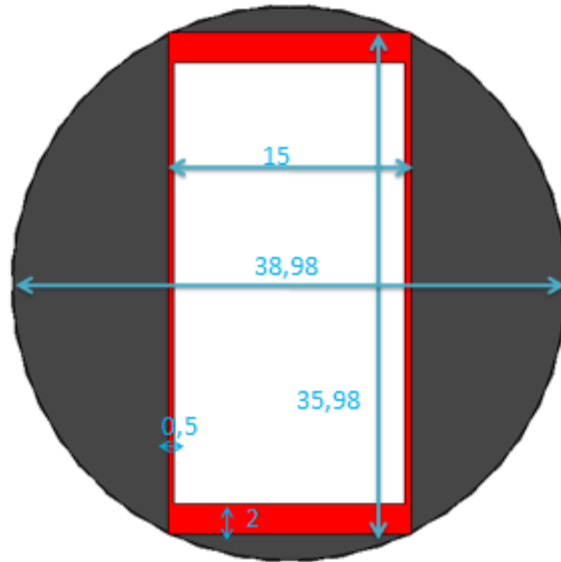


Figura 45: Área de influencia batea (HA o P) [m]

Esta batea al escalar su diámetro real de 38.98 [m] a un diámetro de 0.34 [m] da una razón de 1:114. Este escalamiento se puede ver en la Figura 46, Figura 47 y Figura 48.

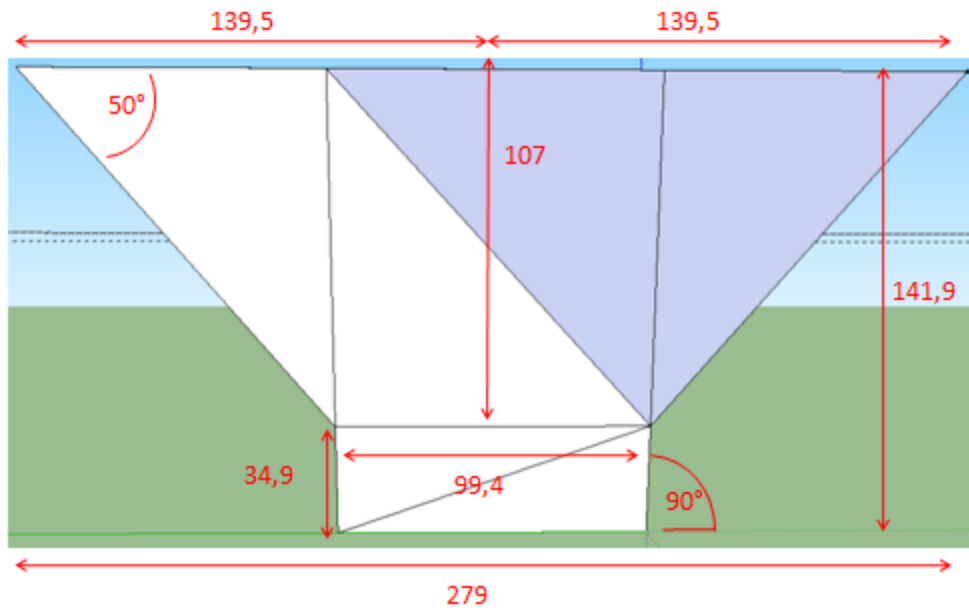


Figura 46: Vista longitudinal batea (HA o P) [mm]

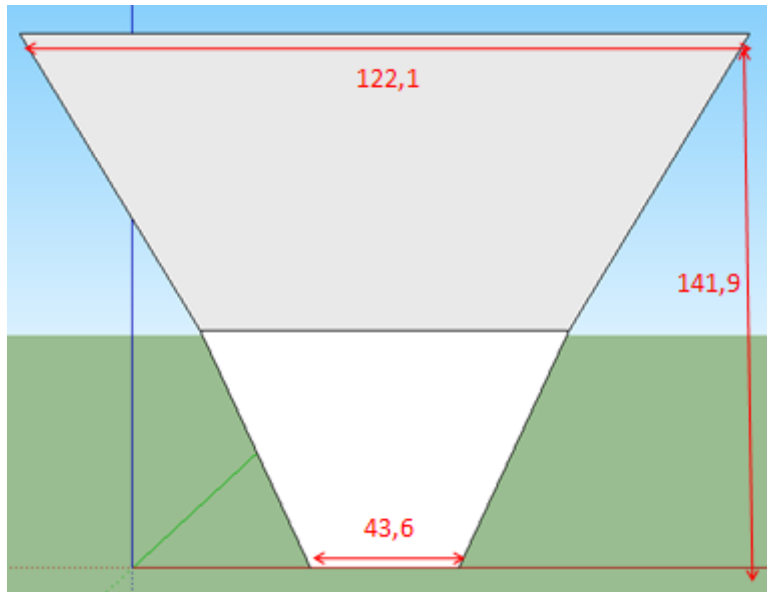


Figura 47: Vista transversal batea (HA o P) [mm]

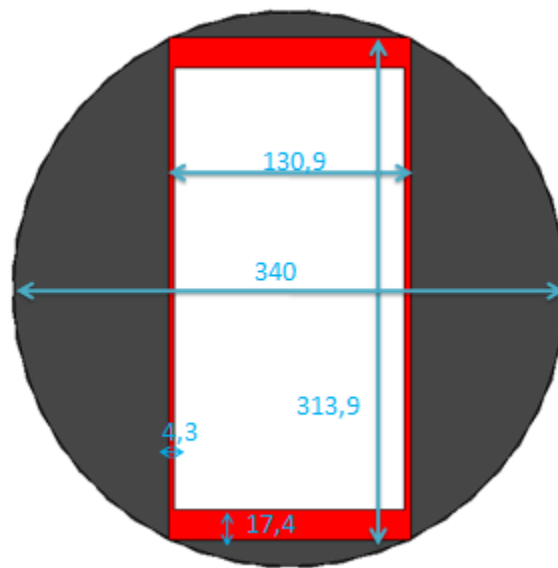


Figura 48: Área influencia batea (HA o P) [mm]

En la Figura 49 se muestran las dimensiones de la batea en el sistema de acople, mientras que, en la Figura 50 se muestra como es el sistema de acople de la batea con la parte inferior del cilindro, cumpliendo la función de base.

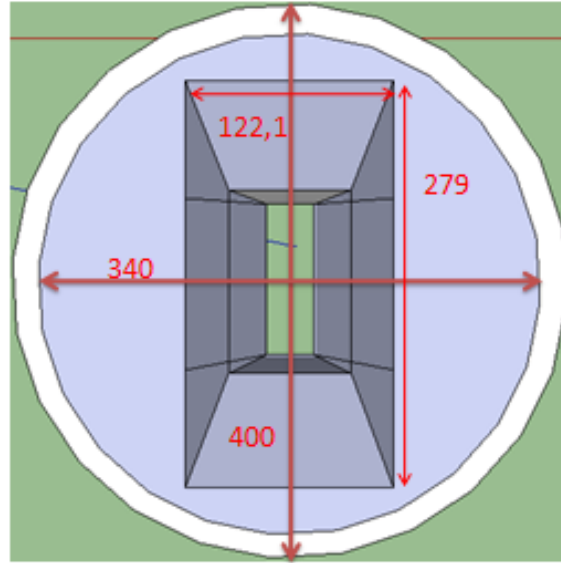


Figura 49: Vista planta batea en base (HA o P) [mm]

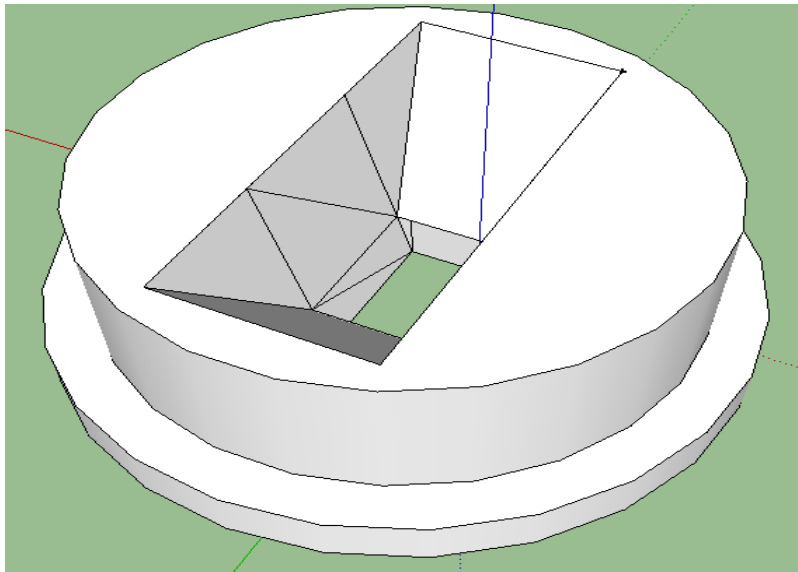


Figura 50: Vista isométrica batea en base (HA o P)

Batea tipo Andina

En la Figura 51, Figura 52 y Figura 53 se observan las dimensiones de la batea tipo Andina.

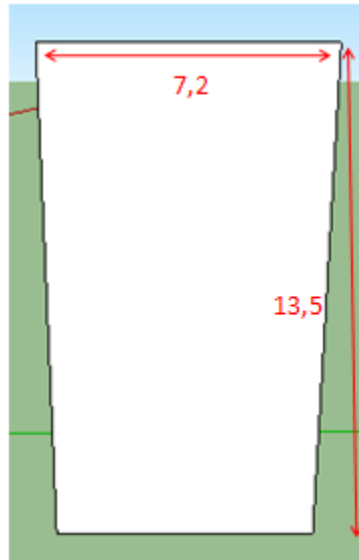


Figura 51: Vista longitudinal batea Andina [m]

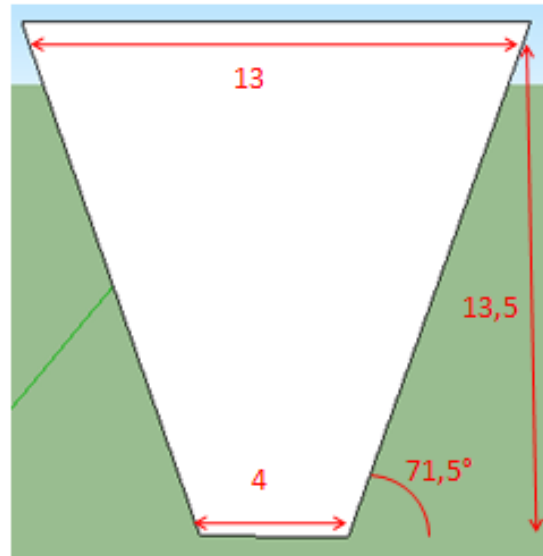


Figura 52: Vista transversal batea Andina [m]

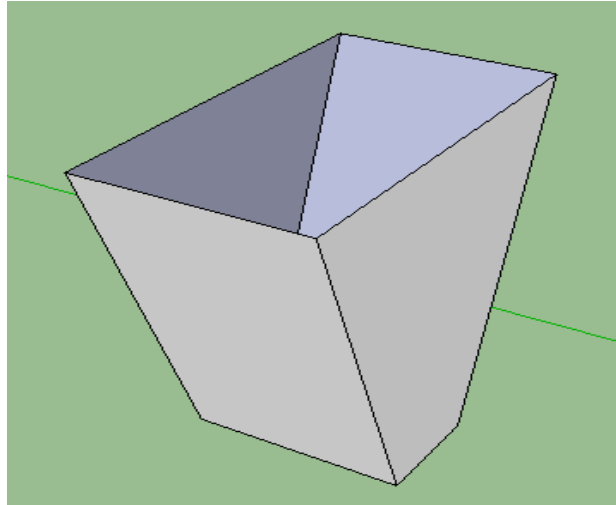


Figura 53: Vista isométrica batea Andina

Debido a las dimensiones de esta batea es que se puede estudiar el comportamiento de distintas escalas en el modelo. Las escalas a estudiar son 1:50, 1:75 y 1:100. En la Figura 54, Figura 55 y Figura 56 se muestra la batea Andina instalada en la base para cada escala. En el capítulo ANEXO B se encuentran las Figuras con las dimensiones de cada una de estas bateas escaladas.

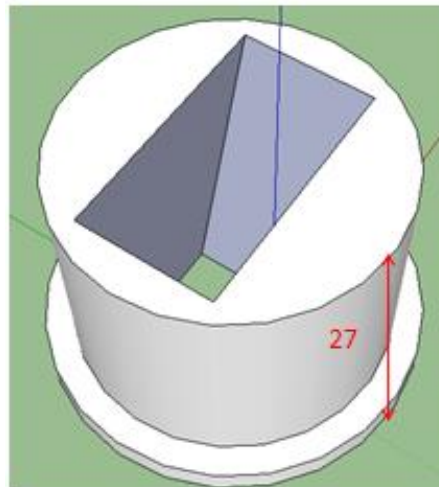


Figura 54: Vista isométrica batea Andina en base 1:50 [cm]

INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

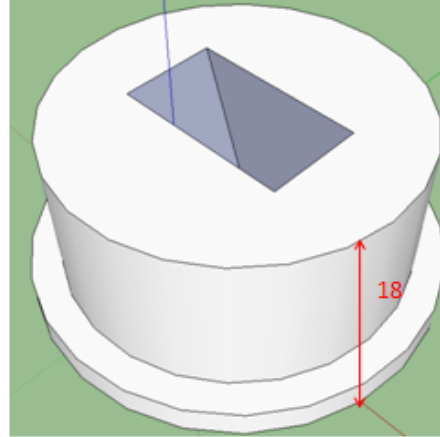


Figura 55: Vista isométrica batea Andina en base 1:75 [cm]

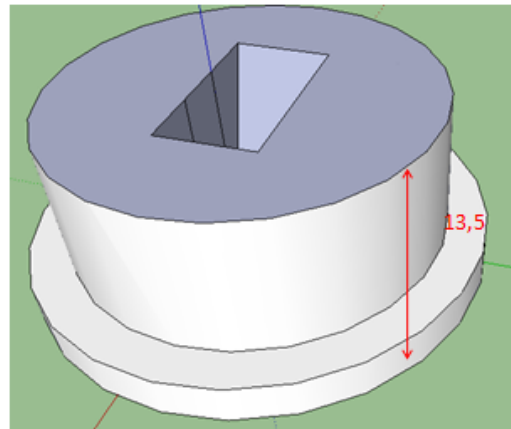


Figura 56: Vista isométrica batea Andina en base 1:100 [cm]

Elección de batea

Como se observa, las bateas tipo Teniente, para hundimiento convencional y avanzado o previo, tienen escalas de 1:117 y 1:114 respectivamente, por lo que son muy pequeñas para poder lograr desarrollar un sistema de extracción similar al de un LHD.

Debido a lo anterior, es que se decide utilizar una batea tipo Andina, la cual es de menor tamaño pudiéndose escalar de varias maneras. En la Tabla 28 se muestran las ventajas y desventajas que tienen las 3 escalas estudiadas.

Tabla 28: Ventajas y desventajas bateas tipo Andina

Escala	Ventajas	Desventajas
1:50	Sistema de extracción de mineral de mayor tamaño	Altura de la batea muy grande, disminuyendo la cantidad de material dentro del cilindro. O sea, disminuye la razón Diámetro:H (altura de material), que debería ser mayor a 2.5 (Nedderman, 1992). Además, hace que base del cilindro sea muy pesada.
	Realización de cada experimento más rápido	Demasiada área de la base está siendo utilizada por la batea, volviendo poco representativo el modelo con respecto al área de influencia real de esta batea.
1:75	Sistema de extracción de mineral de tamaño intermedio.	Gran altura de batea, disminuyendo la cantidad de material en el cilindro.
	Realización de cada experimento en tiempo intermedio	
	Representa de mejor manera como es en la realidad el área de influencia de una batea tipo Andina.	
1:100	Altura de la batea baja, aumentando la cantidad de material en el cilindro y disminuyendo el peso de la batea.	Sistema de extracción de mineral muy pequeño.
		Realización de cada experimento en tiempo muy grande.
		Mucho espacio no utilizado en los bordes del modelo debido a un sobredimensionamiento del área de influencia de la batea.

En ANEXO B se encuentran las Figuras que representan el volumen que utilizaría cada batea en el modelo.

Finalmente, se decide utilizar la batea con escala de 1:75, que a pesar de no presentar un gran contenido de material, se tiene que es una escala en la cual es posible construir un sistema de extracción de material que imite a un LHD.

Sistema de extracción de material

Para el diseño del sistema de extracción de material se requiere saber de las dimensiones de la zanja a considerar, ya que ésta limita el tamaño máximo del que se puede hacer el sistema. También, se debe tener en cuenta la escala con la que se trabaja, para así poder tener todo de un tamaño acorde.

Además, se necesita analizar los grados de libertad de un LHD y las limitantes del modelo a escala para poder reproducir de manera exacta el movimiento del equipo. Para el caso del modelo a escala, se tienen que cambiar los movimientos de extracción debido al poco espacio que se cuenta para el sistema, el cual no permite que se eleve el balde con el material, por lo que se tiene que dejar solo un movimiento rotatorio. Dicha acción no requiere mayor espacio que el del balde en sí, ya que este gira en su propio eje, permitiendo la extracción de material y representando sin mayor dificultad el gesto requerido.

El sistema de extracción se compone de distintos elementos, siendo los principales: balde, motor, stepper, motor servo, tornillos sin fin, engranajes y acrílico. Todo esto da forma a un sistema, el cual a través de dos movimientos puede extraer material de forma continua y regular. En la Figura 57 se muestra la posición de cada componente.

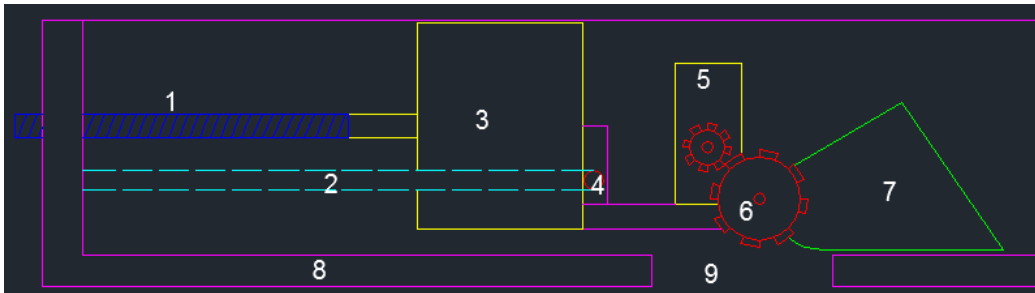


Figura 57: Componentes sistema de extracción

Donde:

1. Tornillo sin fin: Su función es desplazar el balde hacia adelante y hacia atrás sobre un eje móvil fijado a la parte posterior del sistema y unido a un motor.
2. Carril: Espacio en cual se instalarán rodamientos que permitan un desplazamiento en el cual se pueda minimizar el roce.
3. Motor stepper: Su función es hacer girar el tornillo sin fin dando movimiento al sistema.
4. Rodamiento: Permite el desplazamiento y disminuye esfuerzo por roce.
5. Motor servo: Motor cuya función es dar movimiento al sistema de engranajes dispuestos a un costado de este para levantar el balde.
6. Engranajes: Elementos dentados que se ajustan entre sí para dar movimiento y control de velocidad a distintos elementos.
7. Balde: Recipiente en el cual se traslada el material.
8. Base: Base acrílica que sostiene el sistema de extracción.
9. Descarga: Espacio en el cual se verterá el material extraído por el balde.

INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

Se considera un tamaño de balde con respecto a un LHD de 15 [yd³] junto a una altura de calle de 4.8 [cm] y un ancho de calle de 5.3 [cm]. Todas las medidas anteriores se deben al escalamiento hecho (1:75).

En la Figura 58, Figura 59 y Figura 60 se muestran esquemas con las medidas del sistema de extracción diseñado.

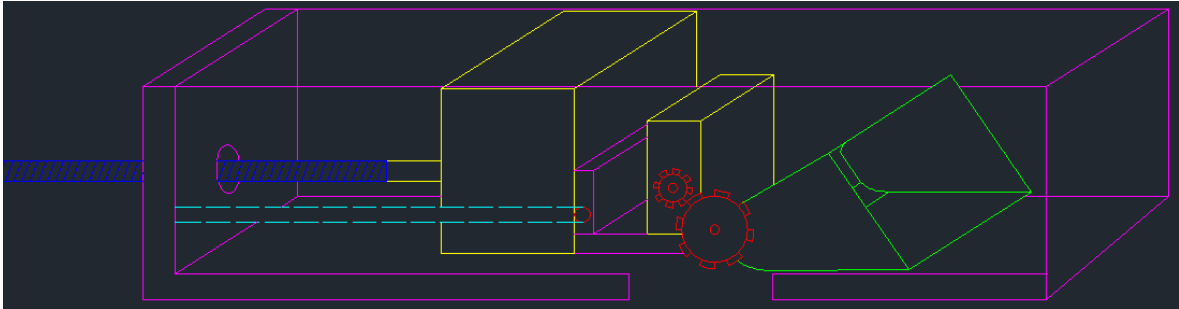


Figura 58: Vista isométrica sistema de extracción de material

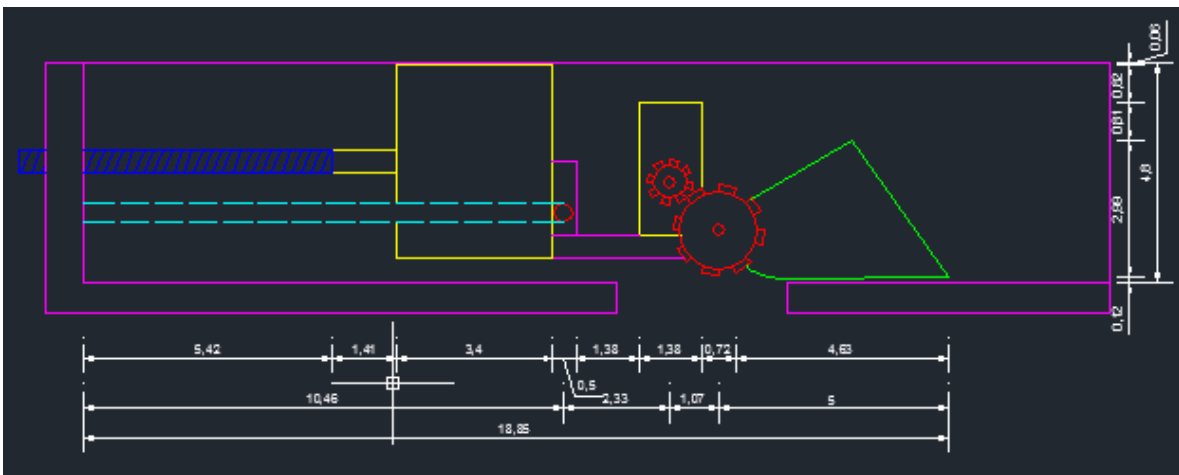


Figura 59: Vista lateral sistema de extracción de material [cm]

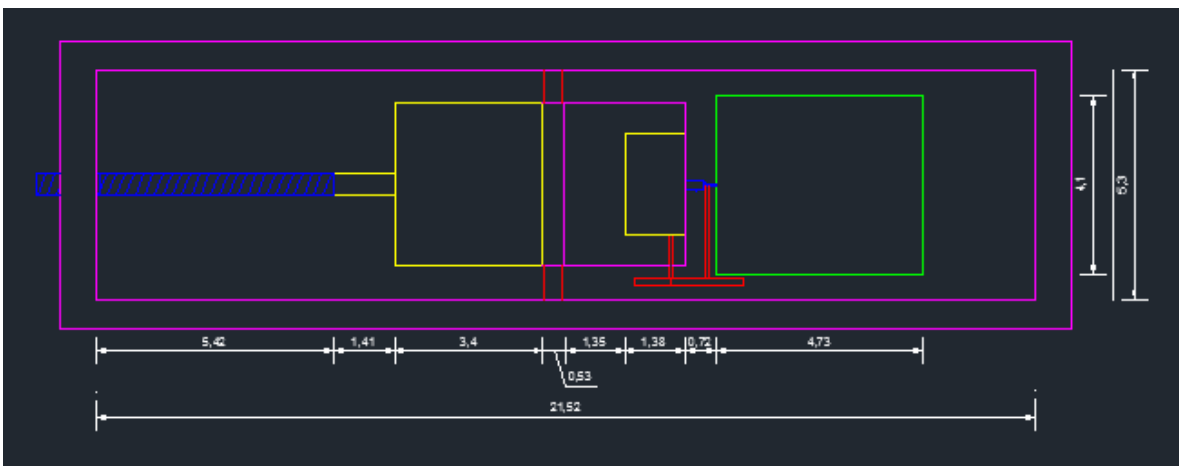


Figura 60: Vista planta sistema de extracción de material [cm]

Así mismo, en la Figura 61 se muestra el motor de paso y en la Figura 62 los servo engranajes.



Figura 61: Motor de paso



Figura 62: Servo engranajes

Para poder utilizar este sistema, se requiere de una calle que una el fondo de la batea con el sistema para que así, éste quede con espacio para poder desplazarse y depositar el material extraído. Resultando en el sistema que se ve en la Figura 63 y Figura 64.

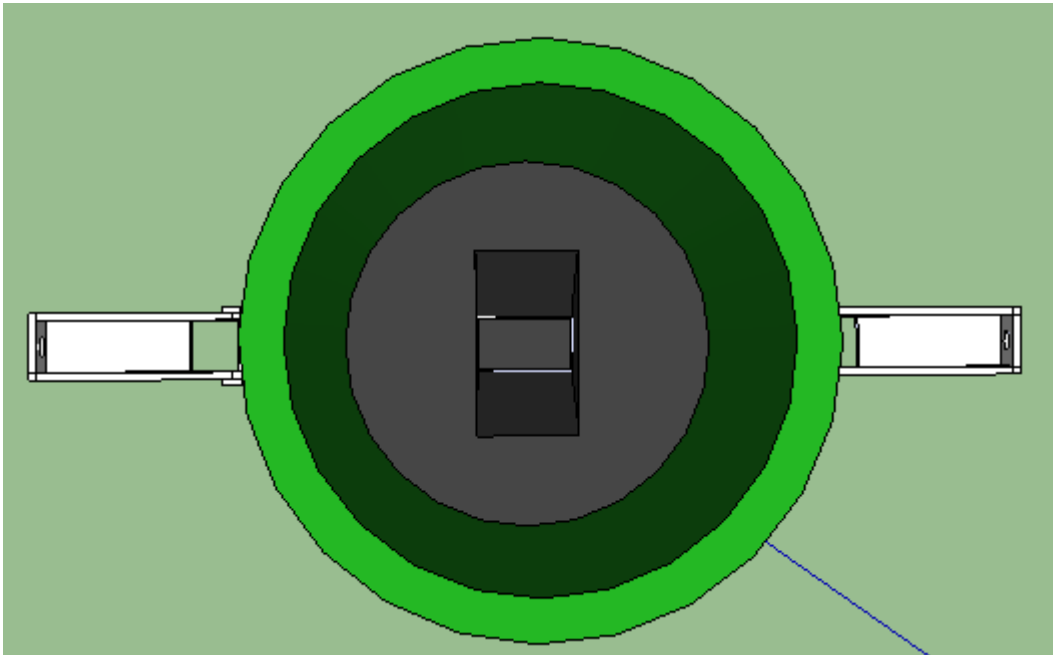


Figura 63: Vista planta sistema de extracción con cilindro

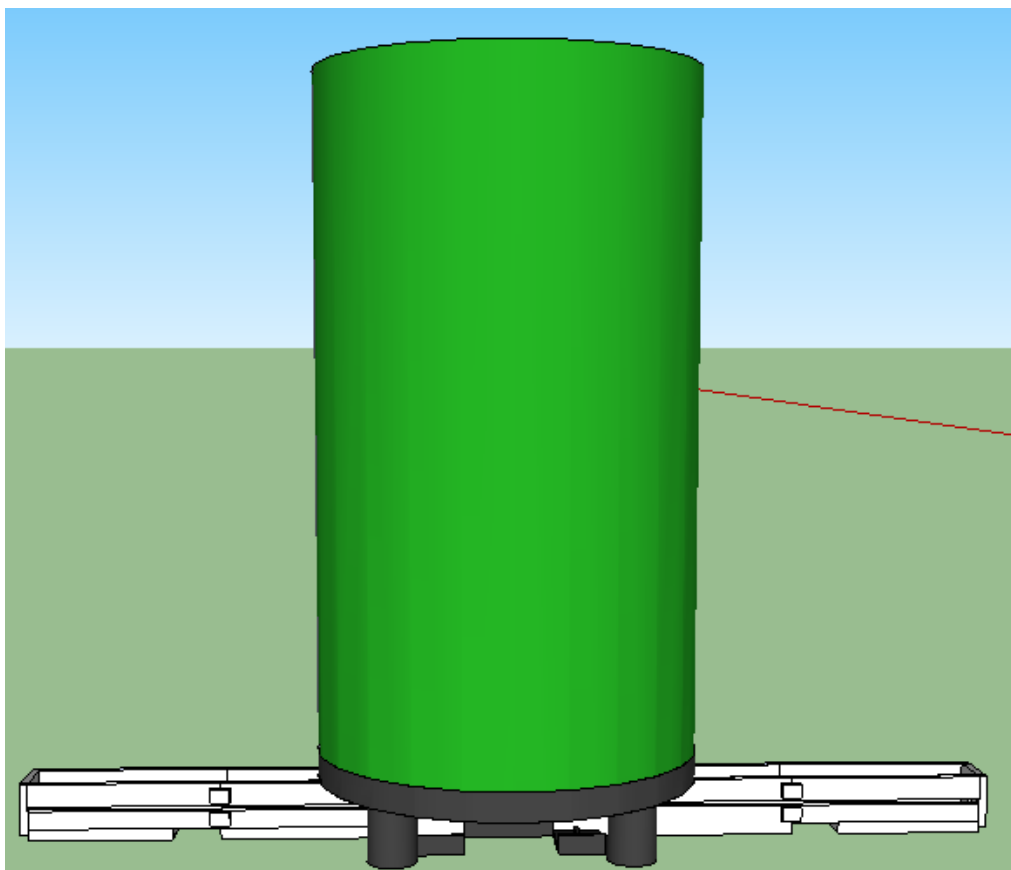


Figura 64: Vista lateral sistema completo

Conclusiones diseño equipo experimental

En cuanto al diseño de la batea, con el objetivo de tener una escala adecuada para el sistema de extracción y para que la batea actúe lo más similar posible a una real, se realizan los cálculos para 3 tipos de bateas distintas, teniéndose finalmente una batea tipo Andina de una malla 13 x 13 metros y a una escala de 1:75. Esta escala es la que mejor representa el área de influencia de una batea tipo Andina en *caving* (comparado a las otras escalas), así como da la posibilidad de replicar de buena manera el trabajo de un equipo LHD.

Sobre el sistema de extracción de material, se desea que este sea lo más parecido posible a un LHD real. Es por esto que se utilizan medidas de pala escaladas y se consideran tamaños de calle presentes en Andina para que corresponda a la batea. También, se cuida que el sistema sea fácil de operar y que ocupe el menor espacio posible debido a las restricciones mismas del cilindro y la prensa.

ANEXO B

Dimensiones dimensionamiento bateas

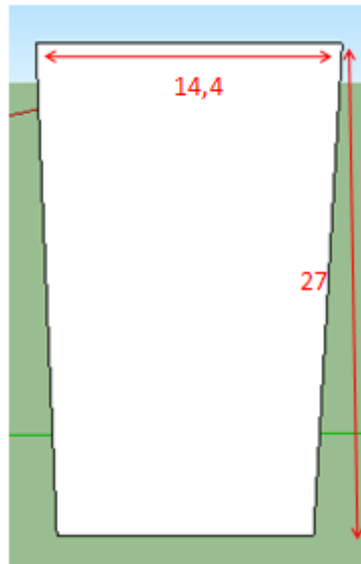


Figura 65: Vista longitudinal batea Andina a escala 1:50 [cm]

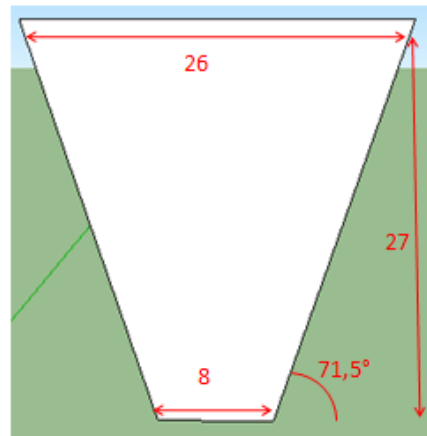


Figura 66: Vista transversal batea Andina a escala 1:50 [cm]

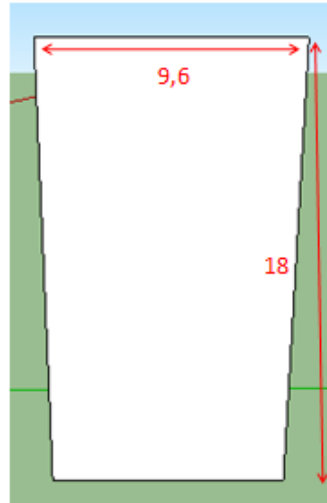


Figura 67: Vista longitudinal batea Andina a escala 1:75 [cm]

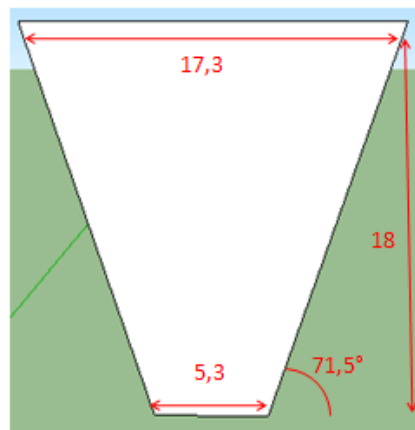


Figura 68: Vista transversal batea Andina a escala 1:75 [cm]

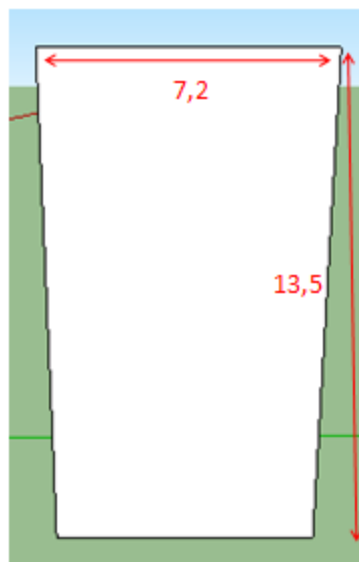


Figura 69: Vista longitudinal batea Andina a escala 1:100 [cm]

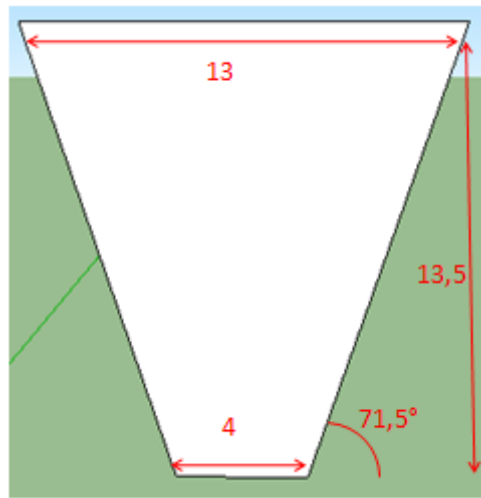


Figura 70: Vista transversal batea Andina a escala 1:100 [cm]

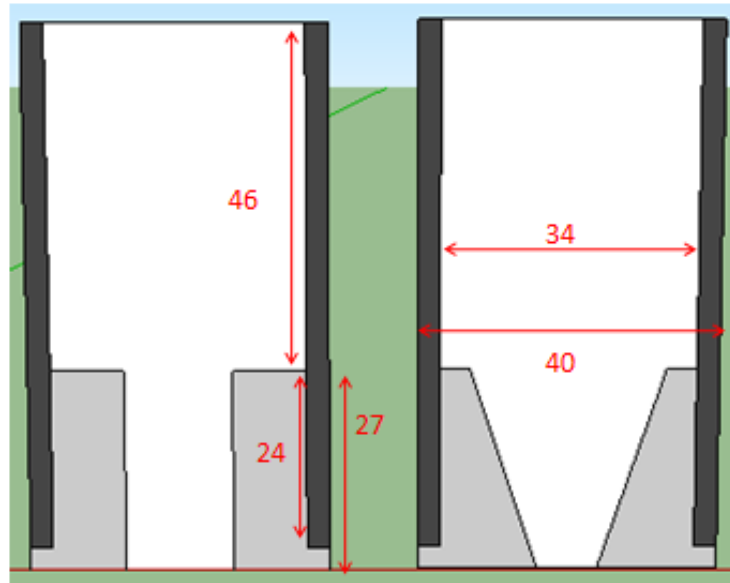


Figura 71: Cortes cilindro con batea Andina a escala 1:50 [cm]

INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

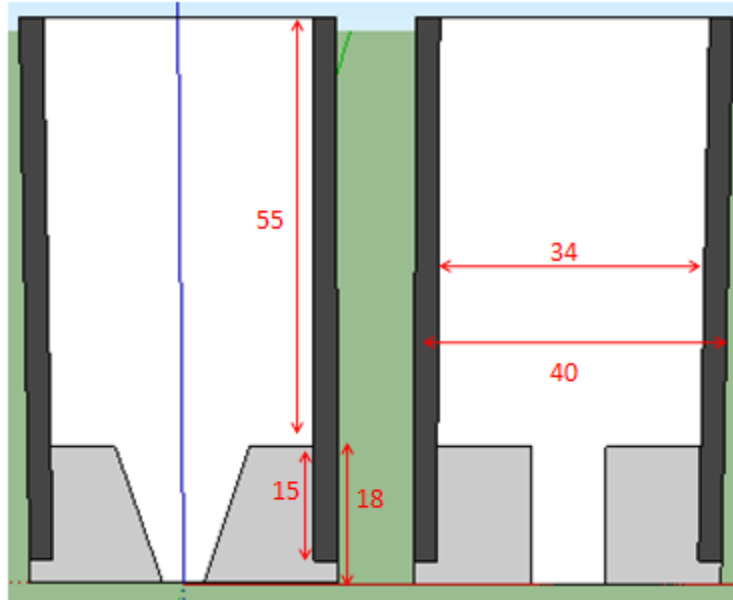


Figura 72: Cortes cilindro con batea Andina a escala 1:75 [cm]

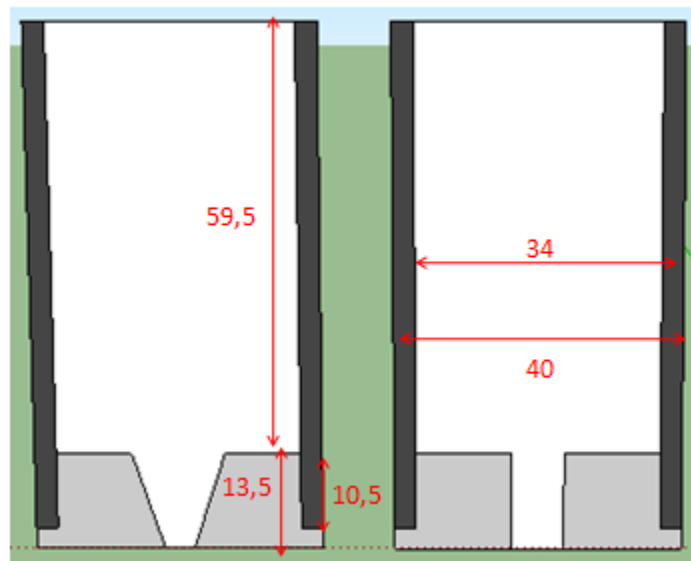


Figura 73: Cortes cilindro con batea Andina a escala 1:100 [cm]

ANEXO C

Granulometrías

Tabla 29: Granulometrías Chuquicamata y finos

Finos		Mineral Chuquicamata	
Tamaño [mm]	Acumulado	Tamaño [mm]	Acumulado
0.001	7.0%	119.5	0.0%
0.002	9.0%	150.5	1.0%
0.003	11.2%	172.3	1.2%
0.004	13.0%	189.7	1.4%
0.005	14.8%	204.3	1.5%
0.006	16.0%	217.1	1.7%
0.007	17.8%	228.6	1.9%
0.009	20.0%	248.5	2.2%
0.01	21.0%	257.4	2.3%
0.02	28.0%	324.3	3.9%
0.03	32.5%	371.2	5.5%
0.05	40.0%	440.2	9.1%
0.06	43.0%	467.7	11.5%
0.07	46.0%	492.4	13.7%
0.08	48.0%	514.8	15.4%
0.09	51.2%	535.4	17.1%
0.1	54.0%	554.6	19.2%
0.2	72.5%	698.7	36.9%
0.3	85.0%	799.8	51.2%
0.4	93.0%	880.3	59.6%
0.5	96.0%	948.3	68.4%
0.6	98.0%	1007.7	73.5%
0.7	99.0%	1060.8	77.5%
0.8	99.3%	1109.1	81.2%
0.9	99.7%	1153.5	84.7%
1.0	100.0%	1194.8	86.3%
		1505.3	94.4%
		1723.2	96.2%
		2171.0	98.5%
		2285.5	98.9%
		2574.0	99.8%
		2657.1	100.0%

INFLUENCIA DE FINO Y HUMEDAD EN FLUJO GRAVITACIONAL CONFINADO

La granulometría que se utiliza en los experimentos, tiene una escala 1:75, mientras que los finos, mantienen su granulometría, como se muestra en la Tabla 30.

Tabla 30: Granulometrías experimentos

Finos		Mineral experimentos	
Tamaño [mm]	Acumulado	Tamaño [mm]	Acumulado
0.001	7.0%	1.6	0.0%
0.002	9.0%	2.0	1.0%
0.003	11.2%	2.3	1.2%
0.004	13.0%	2.5	1.4%
0.005	14.8%	2.7	1.5%
0.006	16.0%	2.9	1.7%
0.007	17.8%	3.0	1.9%
0.008	19.2%	3.2	2.0%
0.009	20.0%	3.3	2.2%
0.01	21.0%	3.4	2.3%
0.02	28.0%	4.3	3.9%
0.03	32.5%	4.9	5.5%
0.04	36.2%	5.4	7.4%
0.05	40.0%	5.9	9.1%
0.06	43.0%	6.2	11.5%
0.07	46.0%	6.6	13.7%
0.08	48.0%	6.9	15.4%
0.09	51.2%	7.1	17.1%
0.1	54.0%	7.4	19.2%
0.2	72.5%	9.3	36.9%
0.3	85.0%	10.7	51.2%
0.4	93.0%	11.7	59.6%
0.5	96.0%	12.6	68.4%
0.6	98.0%	13.4	73.5%
0.7	99.0%	14.1	77.5%
0.8	99.3%	14.8	81.2%
0.9	99.7%	15.4	84.7%
1.0	100.0%	15.9	86.3%
		20.1	94.4%
		23.0	96.2%
		25.3	97.0%
		27.2	97.8%
		30.5	98.9%
		35.4	100.0%

ANEXO D

Determinación de esfericidad y redondez

Tabla 31: Esfericidad y redondez [cm]

Muestra	d1	d2	d3	d4	d5	d6	Media	Rmin-cr	Rmax-in	Esfericidad	Redondez
1	2.35	0.8	0.5	0.25	0.5	0.5	0.44	2.35	0.8	0.34	0.55
2	2.4	1.5	0.7	0.4	0.65	-	0.58	2.4	1.5	0.63	0.39
3	2.65	1.75	1	0.5	0.9	0.5	0.73	2.65	1.75	0.66	0.41
4	3.1	1.5	1.5	0.75	1	0.5	0.94	3.1	1.5	0.48	0.63
5	2	1.45	1	0.75	0.5	1.2	0.86	2	1.45	0.73	0.59
6	2.6	1	0.4	0.25	0.5	0.8	0.49	2.6	1	0.38	0.49
7	2.6	1.5	0.7	1	0.7	0.3	0.68	2.6	1.5	0.58	0.45
8	1.75	1.2	0.5	0.9	0.65	0.5	0.64	1.75	1.2	0.69	0.53
9	2	1	0.65	0.925	0.5	0.6	0.67	2	1	0.50	0.67
10	2.65	1	0.75	0.4	0.4	0.3	0.46	2.65	1	0.38	0.46
11	2.75	1.25	0.3	0.5	1	0.5	0.58	2.75	1.25	0.45	0.46
12	1.85	1.3	0.7	0.7	0.8	0.75	0.74	1.85	1.3	0.70	0.57
13	2.2	1.35	1	0.25	1.25	0.3	0.70	2.2	1.35	0.61	0.52
14	1.45	1.1	0.95	0.6	0.5	0.7	0.69	1.45	1.1	0.76	0.63
15	2.85	1.2	1	0.4	0.25	0.65	0.58	2.85	1.2	0.42	0.48
16	2.65	2	0.6	0.7	0.5	0.25	0.51	2.65	2	0.75	0.26
17	2.5	1.25	0.9	1	0.5	-	0.80	2.5	1.25	0.50	0.64
18	3.25	1.25	1	0.5	0.6	0.5	0.65	3.25	1.25	0.38	0.52
19	2.15	1.25	0.6	0.5	0.9	-	0.67	2.15	1.25	0.58	0.53
20	3.1	1	0.5	0.75	0.5	-	0.58	3.1	1	0.32	0.58
21	3.75	1.3	0.5	0.6	1.1	-	0.73	3.75	1.3	0.35	0.56
22	2	1.2	0.75	-	-	-	0.75	2	1.2	0.60	0.63
23	3.75	1.05	0.7	0.95	0.85	0.4	0.73	3.75	1.05	0.28	0.69
24	2.65	1.4	0.5	-	-	-	0.50	2.65	1.4	0.53	0.36
25	2.1	1.3	1	-	-	-	1.00	2.1	1.3	0.62	0.77
26	3.45	1	0.7	0.6	-	-	0.65	3.45	1	0.29	0.65
27	3.1	1	1	0.6	-	-	0.80	3.1	1	0.32	0.80
28	2.2	1.7	0.4	-	-	-	0.40	2.2	1.7	0.77	0.24
29	2.5	1.3	0.8	-	-	-	0.80	2.5	1.3	0.52	0.62
30	2.2	1.3	0.25	-	-	-	0.25	2.2	1.3	0.59	0.19
Promedio	2.55	1.27	0.73	0.62	0.68	0.54	0.65	2.55	1.27	0.52	0.53
Desviación estándar	0.57	0.26	0.27	0.23	0.26	0.23	0.16	0.57	0.26	0.15	0.14

ANEXO E

Colgaduras observadas



Figura 74: Colgadura alta, caso base, vista inferior



Figura 75: Colgadura alta, caso base, vista superior



Figura 76: Colgadura alta, experimento 20% finos y 15% humedad, vista superior



Figura 77: Colgadura alta, experimento 40% finos, vista inferior



Figura 78: Colgadura en punto de extracción, experimento 40% finos