



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

**ESTUDIO EXPLORATORIO SOBRE LOS MECANISMOS Y LAS CONSECUENCIAS DE EVENTOS
DE INRUSH OF FINES PARA APLICACIONES EN MINERÍA DE BLOCK CAVING**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

CARLOS OSIEL SEBASTIÁN VALDÉS FLORES

PROFESOR GUÍA:

RAÚL LUIS CASTRO RUIZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

PABLO ANDRÉS ÁLVAREZ TORRES

RENÉ ESTEBAN GÓMEZ PUIGPINOS

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR

AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil de Minas.

AUTOR: Carlos Valdés Flores

FECHA: Septiembre de 2020

PROFESOR GUÍA: Raúl Castro Ruiz

RESUMEN

Hoy en día la mayor parte de la producción de minerales en el mundo se sustenta en base a rajos en una relación 4 a 1 con la minería subterránea. Sin embargo, a medida que las operaciones mineras se envejecen y los rajos se profundizan, la minería subterránea adquiere mayor protagonismo. Actualmente, las operaciones mineras subterráneas operan a cientos de metros en el subsuelo, pero al igual que los rajos, su mineral se agota y se vuelve necesario profundizar aún más, encontrándose con innumerables incertidumbres dentro de la corteza terrestre.

Los objetivos principales de este estudio son, en primer lugar, determinar si ciertos mecanismos permiten la generación de eventos de *Entrada abrupta de materiales finos o Inrush of fines* en puntos de extracción de Block y Panel Caving, y en segundo lugar, cuantificar el impacto de estos eventos en un nivel de producción de este tipo de métodos.

Para lograr esto, se cuenta con un modelo físico a escala de 1:50, con dimensiones de 40 [cm] x 74 [cm] x 100 [cm] que representa una batea de producción, y un material de composición Cuarzo igual Sericita. Con estos elementos, además de artefactos y utensilios de laboratorio, se desarrollan cinco grupos experimentales donde cada uno refleja un conjunto de condiciones operacionales únicas como por ejemplo que exista uno de los dos puntos de extracción bloqueado.

Entre los principales resultados de este trabajo de título, se tiene que la configuración experimental (a escala de laboratorio) o la condición operacional (a escala de mina) incide notablemente en la ocurrencia de estos fenómenos y también en las consecuencias que éstos generan. Se observa que, por ejemplo, el uso de pretiles permite reducir drásticamente las velocidades de flujo del frente de material al interior de la zanja, pero se debe tener especial cuidado en las características de estas estructuras de modo de evitar las graves consecuencias que tiene el material que va detrás del frente y que fluye más lentamente que éste.

Las conclusiones más importantes se refieren a la comparación entre las diferentes configuraciones operacionales (grupos) desde el punto de vista de sus consecuencias.

ESTUDIO EXPLORATORIO SOBRE LOS MECANISMOS Y LAS CONSECUENCIAS DE EVENTOS DE INRUSH OF FINES PARA APLICACIONES EN MINERÍA DE BLOCK CAVING

ABSTRACT

Nowadays, great part of the mineral commodities production around the world is based on open pits in a relation of 4 by 1 with underground mines. However, as operations become old and open pits deepen, underground mining achieves more leadership. Currently, underground operations works several hundred meters inside the earth, but as same as open pits, their mineral is depleted, so deepening more becomes necessary, finding several uncertainties inside the earth crust.

The main objectives of this study are, first, to find out if certain mechanisms let the generation of *Inrush of fines* in Block and Panel Caving drawponits, and second, to quantify the impact of these events in a Production Level.

To achieve this, it is used a physical model scaled at 1:50 with 40 [cm] x 74 [cm] x 100 [cm] dimensions which represents a production drawbell, and a material mainly compounds of Quartz and Sericite in the same proportion. Using that, besides of laboratory artefacts and elements, five groups of experiments were developed, where each one of these is associated to specific operational conditions, such as have or not have one of the two drawpoints blocked.

Among the principal results of this undergraduate thesis, it was observed that experimental configurations (at laboratory scale) or operational conditions (at mine scale) affect enormously the occurrence and the consequences of these phenomena. It is noticed that, for example, using obstacles let to drastically reduce the front material flow rate or velocity inside the drift, but care must be taken on the characteristics of these structures, with the objective of avoiding the serious consequences associated to the material which goes behind of the front and flows slower than it.

Main conclusions are related to the comparison among the different operational conditions (groups) from the point of view of their consequences.

AGRADECIMIENTOS

Una sola página de agradecimientos es muy poco espacio como para referirse a todas y cada una de las personas que estuvieron, directa o indirectamente, relacionadas con este trabajo.

Yo soy oriundo de Constitución, región del Maule, un pueblo hermoso ubicado al final de la ruta L-30-M, al cual quiero demasiado y del cual me siento orgulloso de pertenecer. Si bien no es la comuna más conocida del país, Constitución adquirió mucha fama después del terremoto de 2010, tras haberse convertido en el epicentro de las pérdidas de vidas. Constitución tardó años en recuperarse social, infraestructural y económicamente, pero eso ya es parte del pasado y hoy es una ciudad llena de vida.

¿Por qué empezar mis agradecimientos con un párrafo como el anterior? Bueno, razones hay de sobra, partiendo por el hecho de que me ha tocado leer bastantes tesis y memorias, y las dedicatorias a esta altura me parecen planas o incluso peor, estándares, con una creatividad que no va más allá de modificar los nombres de los padres y de los compañeros de trabajo; yo en cambio quise hacer algo diferente. Constitución es para mí el pueblo más valioso, porque allí viven las dos personas más importantes para mí en todo el mundo, mi papá José y mi mamá Fresia, a quienes les debo todo lo que soy y lo que pueda llegar a ser. *¿Qué tienen que ver los decesos acontecidos en febrero de 2010 con esta memoria?* Lo cierto es que tienen relación, y bastante, porque mi trabajo de *Inrush of fines* busca evitar que ocurran fatalidades ligadas a ellos. *¿Y por qué mencionar la lenta recuperación de Constitución?* Esta pregunta se la dejo a usted lector, porque tanto usted como yo sabemos lo que cuesta una vida humana en el contexto de la minería.

Los últimos siete años los he vivido en Santiago, con un ritmo de vida muy diferente a lo que se puede ver en Constitución. Es cierto que acá la gente corre, se insulta y es más “fría” que en regiones, pero yo he podido comprobar que esto es sólo un escudo frente a la dura vida capitalina. En la Universidad de Chile comencé siendo alumno de Plan Común, como muchos, y decidí ser ingeniero de minas porque me gusta la tierra y descubrir las maravillas que existen bajo el suelo. En esta aventura conocí mucha gente maravillosa: mis compañeros de generación y mis profesores, y sin planearlo demasiado llegué al BCLab: el laboratorio de modelamiento físico de Block Caving ubicado en la parte baja del edificio del Departamento de Ingeniería de Minas.

Debo admitir que ser parte del equipo humano del BCLab ha sido la experiencia más enriquecedora que he tenido. No puedo decir que fue fácil, porque sería una mentira; mi experiencia en este laboratorio podría describirla mejor como “fuerte” y “apasionante”. Mi profesor guía, Sr. Raúl Castro, me dejó en claro desde el comienzo que aquí ya no están los padres para solucionar tus problemas, ni los abuelos ni los tíos: sólo tú eres el responsable de solucionarlos. *¿Y si me equivoco?* Sólo preocúpate de buscar una solución, y si te equivocas no importa, para eso hay instancias de revisión con personas que saben más que tú: aprovéchalas para aprender y enmendar los errores. Esto ha sido, quizás, el mayor aprendizaje que tendré de mi profesor guía y es por esto que hoy sólo puedo darle las gracias: “Gracias profesor, de verdad, muchas gracias”.

Pero el equipo humano del BCLab no se compone sólo de dos personas. En este lugar también conocí a Sebastián, a Nicolás, a Bastian (estos tres últimos ya no están), a Omar, a Pablo, a Lenin y al profesor René, quién es parte de mi comisión evaluadora; también conocí más cercanamente a Anisse y a Don David, quienes me ayudaron en diversos pasos durante el desarrollo de este trabajo. *¿Qué puedo decirles a todos ustedes?* “Que ha sido genial conocerlos”.

También quiero darle las gracias a Pablo por ayudarme en la recta final de esta maratón.

¿Creíste que me había olvidado de ti, Álvaro? Eso es bien difícil. Tú eres muy importante para mí, no sólo por este trabajo, sino también a cada una de las actividades que he tenido que desarrollar en el laboratorio ya sea como memorista, como investigador de COVID-19, como ayudante y también como auxiliar de algunos cursos. Tú me diste tu apoyo en cada una de esas. Eso es algo que difícilmente olvidaré. Por estas razones Álvaro, y muchas otras más, sólo te puedo decir: “Gracias, muchas gracias”.

A modo de finalizar estos agradecimientos, no me queda más que invitar al lector a introducirse en este trabajo. Espero que los resultados y los comentarios que se entregan aquí se conviertan en un aporte a la minería del futuro. Las incertidumbres que supone operar en condiciones cada vez más extremas conllevarán a errores, a atrasos y, probablemente, a fallecimientos, y es por esta razón que no se debe esperar a que los fenómenos ocurran para estudiarlos. Tanto el modelamiento físico como el matemático nos permiten observar lo que ocurre en una mina sin estar expuestos a los riesgos de una. Veamos entonces que descubrimos...

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

CAPÍTULO 1:

ESTRUCTURA E INTRODUCCIÓN AL TRABAJO DE TÍTULO	1
I. Estructura del trabajo.....	1
II. Introducción	4
III. Objetivos de la memoria	6
IV. Alcances.....	7
V. Motivación.....	8

CAPÍTULO 2:

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	9
I. Origen del concepto de <i>Inrush of fines</i>	9
II. Colgaduras: concepto y nociones básicas	9
III. Formación de colgaduras: concepto de arco estable.....	10
IV. Formación de un arco estable: según el tipo de colgadura	10
V. Formación de colgaduras mecánicas: comunes e hipotéticas	11
VI. Definición de colgaduras para efectos de este trabajo de título	13
VII. Fragmentación del material y relación con colgaduras	14
VIII. Mecanismos de acumulación de materiales granulares finos: ejemplos.....	14
IX. Fuerzas de interacción en materiales finos.....	15
X. Declaración de materiales finos en minas de caving	15
XI. Conclusiones de la revisión.	16

CAPÍTULO 3:

HIPÓTESIS Y ACTIVIDADES DE COMPROBACIÓN	17
I. Hipótesis y actividades de comprobación para grupo 1	17
II. Hipótesis y actividades de comprobación para grupo 2	17
III. Hipótesis y actividades de comprobación para grupo 3	18
IV. Hipótesis y actividades de comprobación para grupo 4	18
V. Hipótesis y actividades de comprobación para grupo 5	19

CAPÍTULO 4:

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	20
I. Escenario minero como contexto del estudio.....	20
II. Escalamiento de variables	21
III. Modelo y materiales.....	22
IV. Setup de los grupos experimentales	25
V. Variables fijas, variables móviles y parámetros a observar	31
VI. Procedimiento experimental.....	35
VII. Preparación del material.....	38
VIII. Ecuaciones a utilizar en la memoria	39

CAPÍTULO 5:

RESULTADOS EXPERIMENTALES	42
I. Parámetros observados en el grupo experimental 1	42
II. Parámetros observados, momentum lineal y fuerza de arrastre del grupo 2	44
III. Parámetros observados, momentum lineal y fuerza de arrastre del grupo 3	46
IV. Parámetros observados, momentum lineal y fuerza de arrastre del grupo 4	48
V. Parámetros observados, momentum lineal y fuerza de arrastre del grupo 5	50

CAPÍTULO 6:

ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	52
I. Análisis de los resultados exclusivos del grupo 1	52
II. Análisis de los resultados exclusivos del grupo 2	54
III. Análisis de los resultados exclusivos del grupo 3	60
IV. Análisis de los resultados exclusivos del grupo 4	64
V. Análisis de los resultados exclusivos del grupo 5	66
VI. Comparación de parámetros comunes en grupos 2 a 5	71
VII. Corroboración de hipótesis de trabajo	84

CAPÍTULO 7:

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
I. Conclusiones.....	85
II. Recomendaciones	87
III. BIBLIOGRAFÍA	89

CAPÍTULO 8:

ANEXOS.....	93
ANEXO A: Propiedades del material	93
ANEXO B: Procedimiento experimental detallado.....	94
ANEXO C: Preparación de material grueso en forma detallada.....	99
ANEXO D: Preparación de material fino en forma detallada	101
ANEXO E: Extracto de planilla de registro en grupo 1.....	102
ANEXO F: Otros resultados del grupo 2 (condiciones finales)	103
ANEXO G: Otros resultados del grupo 3 (condiciones finales).....	104
ANEXO H: Otros resultados del grupo 4 (condiciones finales).....	106
ANEXO I: Otros resultados del grupo 5 (condiciones finales)	108

Lista de Tablas

	Pág.
<i>Tabla 1: "Benchmark acerca de materiales finos en minas de caving"</i>	16
<i>Tabla 2: "Análisis de similitud desde un punto de vista práctico"</i>	21
<i>Tabla 3: "Factores de escala numéricos"</i>	21
<i>Tabla 4: "Variables fijas del grupo experimental 2"</i>	31
<i>Tabla 5: "Variables móviles de los grupos experimentales 2 a 5"</i>	31
<i>Tabla 6: "Variables fijas del grupo experimental 3"</i>	32
<i>Tabla 7: "Variables fijas del grupo experimental 4"</i>	33
<i>Tabla 8: "Variables fijas del grupo experimental 5"</i>	34
<i>Tabla 9: "Estadísticas básicas de masa y volumen extraído por baldada"</i>	42
<i>Tabla 10: "Valores de parámetros observados en grupo 2"</i>	44
<i>Tabla 11: "Momentum lineal del material expulsado en el grupo 2"</i>	45
<i>Tabla 12: "Diferencia de tiempo medidas en el análisis de video en grupo 2"</i>	45
<i>Tabla 13: "Fuerza de arrastre del material fino en grupo 2"</i>	45
<i>Tabla 14: "Valores de parámetros observados en grupo 3"</i>	46
<i>Tabla 15: "Momentum lineal de material expulsado en grupo 3"</i>	46
<i>Tabla 16: "Momentum lineal de material retenido en la zanja en grupo 3"</i>	47
<i>Tabla 17: "Diferencia de tiempo medidas en el análisis de video en grupo 3"</i>	47
<i>Tabla 18: "Fuerza de arrastre del material fino en grupo 3"</i>	47
<i>Tabla 19: "Valores de parámetros observados en grupo 4"</i>	48
<i>Tabla 20: "Momentum lineal de material expulsado en grupo 4"</i>	48
<i>Tabla 21: "Diferencia de tiempo medidas en el análisis de video en grupo 4"</i>	49
<i>Tabla 22: "Fuerza de arrastre del material fino en grupo 4"</i>	49
<i>Tabla 23: "Valores de parámetros observados en grupo 5"</i>	50
<i>Tabla 24: "Momentum lineal de material expulsado en grupo 5"</i>	51
<i>Tabla 25: "Diferencia de tiempo medidas en el análisis de video en grupo 5"</i>	51
<i>Tabla 26: "Fuerza de arrastre del material fino en grupo 5"</i>	51
<i>Tabla 27: "Valores de MP, DFM y FF en el grupo 2"</i>	58
<i>Tabla 28: "FFT del grupo 2"</i>	59
<i>Tabla 29: "Comparación numérica de velocidades en grupo 2"</i>	59
<i>Tabla 30: "Velocidad teórica en los puntos A, B y C del grupo 3"</i>	62

Lista de Tablas

	Pág.
<i>Tabla 31: "Comparación numérica de velocidades en grupo 3"</i>	63
<i>Tabla 32: "Valores de MP, DFM, FF y FFT del grupo 4"</i>	64
<i>Tabla 33: "Comparación numérica de velocidades en grupo 2"</i>	65
<i>Tabla 34: "Valores de MP, DFM,"</i>	69
<i>Tabla 35: "Comparación numérica de velocidades en grupo 5"</i>	70
<i>Tabla 36: "Comparación de Ángulo final y ángulo de quiebre en grupo 4"</i>	75
<i>Tabla 37: "Fuerza de arrastre del material fino"</i>	81
<i>Tabla 38: "Propiedades del material grueso"</i>	93
<i>Tabla 39: "Propiedades del material fino"</i>	93
<i>Tabla 40: Preparación de material grueso en grupo experimental 1"</i>	99
<i>Tabla 41: Preparación de material grueso en grupos 4 y 5"</i>	99
<i>Tabla 42: Preparación de material fino en grupo experimental 1"</i>	101
<i>Tabla 43: "Preparación de material fino para los grupos experimentales 2 a 5"</i>	101
<i>Tabla 44: "Extracto planilla de registro grupo 1, setup 1"</i>	102
<i>Tabla 45: "Extracto planilla de registro grupo 1, setup 2"</i>	102
<i>Tabla 46: "Extracto planilla de registro grupo 1, setup 3"</i>	102

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1: "Colgadura hipotética en la propagación horizontal del cave back"</i>	11
<i>Figura 2: "Colgadura hipotética de finos generados por cizalle"</i>	13
<i>Figura 3: "Dimensiones reales del layout y límites a estudiar a escala real"</i>	22
<i>Figura 4: "Dimensiones reales de batea y zanja de producción"</i>	22
<i>Figura 5: "Dimensiones generales del modelo a escala de laboratorio"</i>	23
<i>Figura 6: "Dimensiones de la batea y zanja de producción a escala de laboratorio"</i>	23
<i>Figura 7: "Distancia entre puntos a través del pilar mayor"</i>	23
<i>Figura 8: "Fotografías del modelo"</i>	24
<i>Figura 9: "Setup 1 del grupo experimental 1"</i>	25
<i>Figura 10: "Setup 2 del grupo experimental 1"</i>	25
<i>Figura 11: "Setup 3 del grupo experimental 1"</i>	25
<i>Figura 12: "Fotografía de las palas mecanizadas a escala de laboratorio"</i>	26
<i>Figura 13: "Dimensiones a escala de laboratorio de palas mecanizadas"</i>	26
<i>Figura 14: "Setup experimental del grupo 2"</i>	26
<i>Figura 15: "Vista superior de Sistema de compuertas"</i>	27
<i>Figura 16: "Sistema de accionamiento de compuertas: Cuerda de sacrificio"</i>	27
<i>Figura 17: "Setup experimental del grupo 3"</i>	27
<i>Figura 18: "Geometría del obstáculo tipo pretil"</i>	27
<i>Figura 19: "Setup experimental del grupo 4"</i>	28
<i>Figura 20: "Setup modificado del grupo experimental 4"</i>	28
<i>Figura 21: "Vista lateral de CMA"</i>	29
<i>Figura 22: "Vista frontal de CMA"</i>	29
<i>Figura 23: "Setup experimental del grupo 5"</i>	29
<i>Figura 24: "Setup modificado del grupo experimental 5"</i>	29
<i>Figura 25: "Vista lateral de UCMA"</i>	30
<i>Figura 26: "Vista frontal de UCMA"</i>	30
<i>Figura 27: "Vista lateral de UCMA incluyendo material no consolidado"</i>	30
<i>Figura 28: "Vista superior de UCMA incluyendo UCM dentro de la batea"</i>	30
<i>Figura 29: "Vista frontal de UCMA incluyendo UCM dentro de la batea"</i>	30
<i>Figura 30: "Procedimiento experimental del grupo 1"</i>	35

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 31: "Procedimiento experimental del grupo 2"</i>	36
<i>Figura 32: "Procedimiento experimental del grupo 3"</i>	36
<i>Figura 33: "Procedimiento experimental del grupo 4"</i>	37
<i>Figura 34: "Procedimiento experimental del grupo 5"</i>	37
<i>Figura 35: "Aparición de material fino en setup 1, ext. 40"</i>	43
<i>Figura 36: "Aparición de material fino en setup 2, ext. 100"</i>	43
<i>Figura 37: "Aparición de material fino en setup 3, ext. 30"</i>	43
<i>Figura 38: "Caso especial en setup 3, ext. 50"</i>	43
<i>Figura 39: "Flujo focalizado en setup 1"</i>	53
<i>Figura 40: "Flujo distribuido en setup 2"</i>	53
<i>Figura 41: "R en función de Hf en el grupo experimental 2"</i>	55
<i>Figura 42: "Comparación directa entre velocidad teórica y velocidad experimental"</i>	57
<i>Figura 43: "Representación de MP y DFM para grupo experimental 2"</i>	58
<i>Figura 44: "Comparación de velocidad teórica y empírica en grupo 2"</i>	59
<i>Figura 45: "H_{mb} en grupo experimental 3"</i>	61
<i>Figura 46: "Puntos A, B y C en el obstáculo (pretil)"</i>	62
<i>Figura 47: "Comparación de velocidad teórica y empírica en grupo 3"</i>	63
<i>Figura 48: "Representación de MP y DFM en grupo experimental 4"</i>	64
<i>Figura 49: "Comparación de velocidad teórica y empírica en grupo 4"</i>	65
<i>Figura 50: "Comparación de velocidad teórica y empírica en grupo 5"</i>	69
<i>Figura 51: "Masas expulsadas en grupos experimentales 2 a 5"</i>	71
<i>Figura 52: "Ángulos finales en grupos experimentales 2 a 5"</i>	73
<i>Figura 53: "Distancias alcanzadas en grupos experimentales 2 a 5"</i>	74
<i>Figura 54: "Perfil para Hf = 3 [cm]"</i>	75
<i>Figura 55: "Perfil para Hf = 5 [cm]"</i>	75
<i>Figura 56: "Ejemplo de perfil de deposición para Hf = 10 [cm] en grupo 3"</i>	76
<i>Figura 57: "Velocidades empíricas en grupos experimentales 2 a 5"</i>	77
<i>Figura 58: "Momentum lineal del frente de material en grupos 2 a 5"</i>	80
<i>Figura 59: "Fuerza de arrastre del material fino en grupos 2 a 5"</i>	82
<i>Figura 60: "Cajones de clasificación"</i>	100

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 61: "Harnero eléctrico con mallas ASTM"	100
Figura 62: "Tamices ASTM"	100
Figura 63: "Vista lateral de batea en grupo 2 para $H_f = 3$ [cm]"	103
Figura 64: "Vista lateral de batea en grupo 2 para $H_f = 5$ [cm]"	103
Figura 65: "Vista lateral de batea en grupo 2 para $H_f = 10$ [cm]"	103
Figura 66: "Vista lateral de batea en grupo 2 para $H_f = 15$ [cm]"	103
Figura 67: "Vista frontal de zanja en grupo 3 para $H_f = 3$ [cm]"	104
Figura 68: "Vista lateral de batea en grupo 3 para $H_f = 3$ [cm]"	104
Figura 69: "Vista frontal de zanja en grupo 3 para $H_f = 5$ [cm]"	104
Figura 70: "Vista lateral de batea en grupo 3 para $H_f = 5$ [cm]"	104
Figura 71: "Vista frontal de zanja en grupo 3 para $H_f = 10$ [cm]"	105
Figura 72: "Vista lateral de batea en grupo 3 para $H_f = 10$ [cm]"	105
Figura 73: "Vista frontal de zanja en grupo 3 para $H_f = 15$ [cm]"	105
Figura 74: "Vista lateral de batea en grupo 3 para $H_f = 15$ [cm]"	105
Figura 75: "Vista frontal de zanja en grupo 4 para $H_f = 3$ [cm]"	106
Figura 76: "Vista lateral de batea en grupo 3 para $H_f = 3$ [cm]"	106
Figura 77: "Vista frontal de zanja en grupo 4 para $H_f = 5$ [cm]"	106
Figura 78: "Vista lateral de batea en grupo 3 para $H_f = 5$ [cm]"	106
Figura 79: "Vista frontal de zanja en grupo 4 para $H_f = 10$ [cm]"	107
Figura 80: "Vista lateral de batea en grupo 4 para $H_f = 10$ [cm]"	107
Figura 81: "Vista frontal de zanja en grupo 4 para $H_f = 15$ [cm]"	107
Figura 82: "Vista lateral de batea en grupo 4 para $H_f = 15$ [cm]"	107
Figura 83: "Vista frontal de zanja en grupo 5 para $H_f = 3$ [cm]"	108
Figura 84: "Vista lateral de batea en grupo 5 para $H_f = 3$ [cm]"	108
Figura 85: "Vista frontal de zanja en grupo 5 para $H_f = 5$ [cm]"	108
Figura 86: "Vista lateral de batea en grupo 5 para $H_f = 5$ [cm]"	108
Figura 87: "Vista frontal de zanja en grupo 5 para $H_f = 10$ [cm]"	109
Figura 88: "Vista lateral de batea en grupo 5 para $H_f = 10$ [cm]"	109
Figura 89: "Vista frontal de zanja en grupo 5 para $H_f = 15$ [cm]"	109
Figura 90: "Vista lateral de batea en grupo 5 para $H_f = 15$ [cm]"	109

Lista de Ecuaciones

	Pág.
<i>Ecuación 1: "Cálculo de velocidad empírica, R"</i>	39
<i>Ecuación 2: "Cálculo de momentum lineal, Mom"</i>	39
<i>Ecuación 3: "Cálculo de fuerza de arrastre, F"</i>	39
<i>Ecuación 4: "Transformación entre energías cinética y potencial sin pérdidas"</i>	40
<i>Ecuación 5: "Cálculo de MP en grupos 2 a 5"</i>	40
<i>Ecuación 6: "Cálculo de DFM para grupo 2 (y 3)"</i>	40
<i>Ecuación 7: "Cálculo de DFM para grupos 4 y 5"</i>	41
<i>Ecuación 8: "Cálculo de H_{cm}' para grupos 4 y 5"</i>	41
<i>Ecuación 9: "Disminución de energía según diferencia de velocidad"</i>	41

Lista de Esquemas

	Pág.
<i>Esquema 1: "Estructura de la Introducción"</i>	1
<i>Esquema 2: "Estructura de la Hipótesis de trabajo"</i>	2
<i>Esquema 3: "Estructura de la Metodología experimental"</i>	2
<i>Esquema 4: "Estructura de los Resultados experimentales"</i>	3

CAPÍTULO 1:

ESTRUCTURA E INTRODUCCIÓN AL TRABAJO DE TÍTULO

I. Estructura del trabajo

Este subcapítulo tiene como fin dar una idea general del trabajo de título, dado que en las siguientes páginas se desarrollan diversos grupos experimentales (conjuntos de experimentos) los cuales poseen su propia hipótesis, objetivo, setup y resultados.

Este informe comienza con una **Introducción** al tema de la memoria, la cual busca principalmente insertar al lector en el contexto en que este trabajo se desarrolla. La introducción finaliza con la exposición del tema específico a tratar (ver Esquema 1).



Esquema 1: "Estructura de la Introducción"

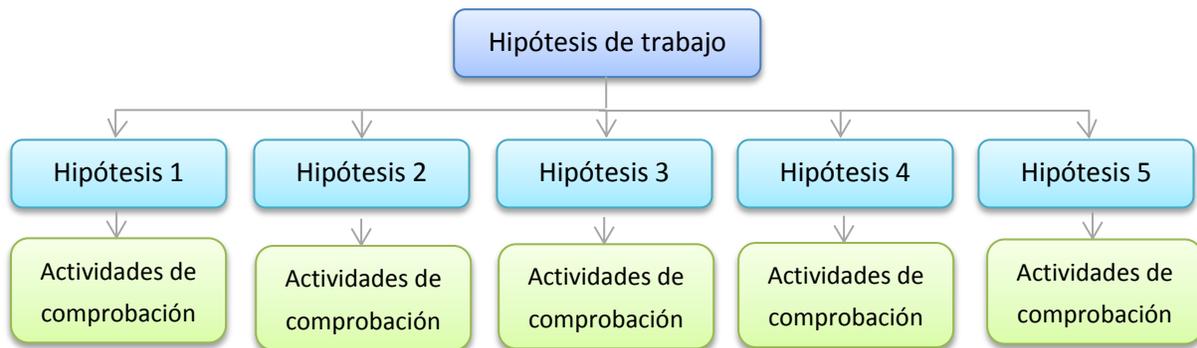
En el capítulo de **Objetivos de la memoria** se redactan los objetivos generales y específicos del estudio. Estos objetivos se materializan en el capítulo de Hipótesis de trabajo y actividades de comprobación.

En el capítulo de **Alcances** se declaran los límites de las conclusiones de este trabajo. El principal punto de los alcances es manifestar que este estudio es exploratorio y que, por lo tanto, los mecanismos que se describen son hipotéticos.

El capítulo de **Motivación** busca concientizar al lector acerca de la importancia de realizar estudios como éste, de carácter proactivo. Eventos de *Inrush of fines* existen, aun cuando son poco conocidos en el contexto dado en este estudio; por esta razón no se puede esperar que los eventos ocurran para comenzar a estudiarlos.

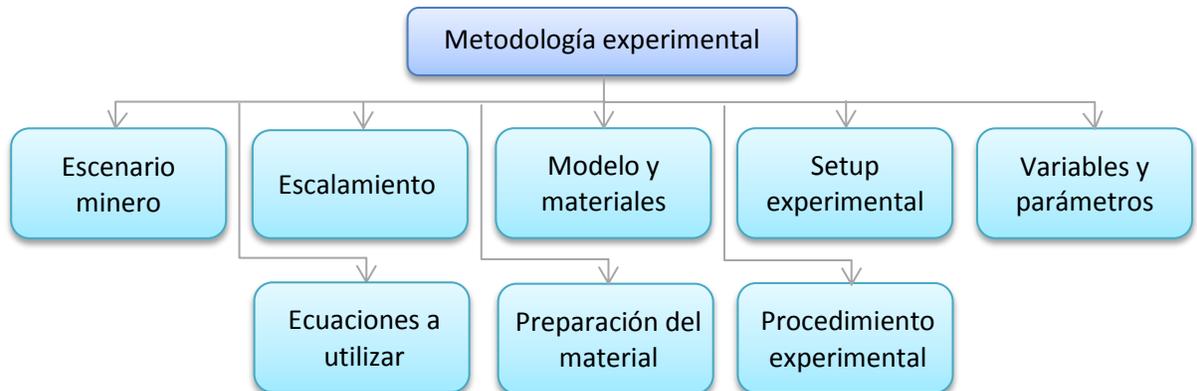
En el capítulo de **Revisión bibliográfica** se entrega información acerca de trabajos semejantes y que signifiquen un precedente para este estudio exploratorio. Tras leer sus líneas, el lector comprenderá que estos fenómenos son bastante comunes en piques y chimeneas, mas en puntos de extracción no lo son. No obstante, en una operación minera específica, *Inrush of fines* se han registrado en puntos de extracción a tasas de varios eventos al año.

El siguiente capítulo se refiere a las **Hipótesis de trabajo y actividades de comprobación**. Es importante mencionar que se han desarrollado cinco grupos experimentales, y cada uno tiene su propia hipótesis (ver Esquema 2).



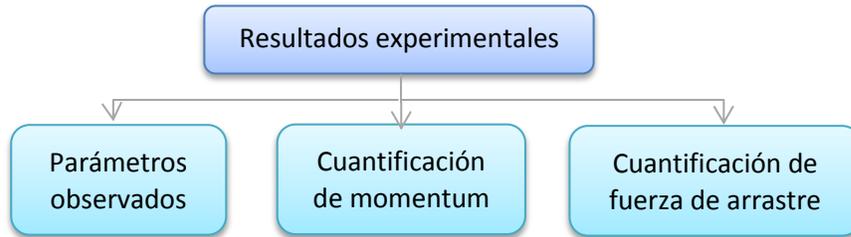
Esquema 2: "Estructura de la Hipótesis de trabajo y actividades de comprobación"

En el capítulo de **Metodología experimental** se muestra el escenario minero en el cual este trabajo está enmarcado y también se discute acerca del escalamiento de variables. Las hipótesis y los objetivos del capítulo anterior permiten construir el modelo, y posterior a ello se definen los setups. Por cada grupo experimental se incluye también la descripción de las variables fijas, las variables a modificar y los parámetros que se pretenden observar en cada ensayo (ver Esquema 3).



Esquema 3: "Estructura de la Metodología experimental"

Luego de la metodología, el estudio continúa con el capítulo de **Resultados experimentales**. En este capítulo el foco está en presentar los valores de aquellos parámetros que se busca observar en función de las variables que se modifican de un ensayo al siguiente. Dentro de este capítulo se entrega, también, una cuantificación del momentum lineal y adicionalmente se calcula la fuerza de arrastre del material al fluir dentro de una zanja (ver Esquema 4).



Esquema 4: "Estructura de los Resultados experimentales"

En el capítulo de **Análisis de los resultados experimentales** se busca dar una interpretación de los resultados obtenidos, abordando no sólo la implicancia de las variables modificadas, sino también recalcando el rol tanto de las variables fijas como de las observaciones del comportamiento del flujo granular. Además de lo anterior, en este capítulo se desarrollan comparaciones entre las velocidades empíricas, los momentum lineales y las fuerzas de arrastre, y además se establecen comparaciones entre las velocidades empíricas y teóricas.

Este trabajo finaliza su cuerpo principal con sus **Conclusiones, Recomendaciones y Referencias bibliográficas**. Tal como se menciona en el capítulo de alcances, las conclusiones deben usarse con cautela, puesto que las condiciones de laboratorio son muy diferentes a las condiciones de una mina real. En las recomendaciones se menciona como este trabajo podría continuar en el futuro, evaluando otras variables y tomando las consideraciones apropiadas. Por último, se entregan las referencias utilizadas en este trabajo, relacionadas principalmente con la revisión bibliográfica.

El informe finaliza con el capítulo de **Anexos**, en el cual se entregan los detalles, las planillas de datos y otros elementos que permitirán al lector tener una visión más exacta de cada paso realizado.

Nota importante: Algunos textos de este informe se encuentran levemente coloreados (tono azul marino), los cuales hacen referencia a otras partes del informe; los textos marcados en **negrita** mencionan ideas claves del trabajo; y frases "entre comillas" indican definiciones de conceptos que ya se han entregado en páginas anteriores, pero que es necesario recordar.



II. Introducción

La minería, siendo una de las industrias más prósperas y que más flujos de capitales mueve en el mundo, no está exenta de los mismos desafíos que enfrentan industrias más pequeñas: la maximización de la seguridad en las personas, la minimización del impacto ambiental y la competitividad, son los tres aspectos claves para el éxito de cualquier negocio en el siglo XXI.

Debido a lo anterior, es que la minería a nivel global se encuentra en un proceso continuo de transformación, en su forma de cielo abierto y también subterránea. La apuesta de las grandes compañías ha sido la utilización de métodos masivos de explotación, la incorporación de los avances tecnológicos, la actualización de las políticas de seguridad y la reducción del impacto medioambiental. Estas transformaciones han tenido, tienen y seguirán teniendo consecuencias en las actuales operaciones y también en los futuros proyectos.

A pesar de los innegables avances de la minería en los últimos 30 años, existe un desafío que ni la tecnología ni el conocimiento pueden solucionar y que es la **no renovación de los recursos naturales**. Si bien es cierto que hay grandes esfuerzos por reutilizar los materiales provenientes del subsuelo, es difícil pensar que en el corto o mediano plazo la demanda de minerales y commodities se sustente sólo por esta vía. La no renovación de los recursos naturales entonces obliga a buscar nuevos yacimientos, y el dilema está en que la mayoría de los depósitos de minerales en el mundo han sido ya descubiertos y en su gran mayoría han comenzado a ser explotados.

Actualmente, la producción de la gran minería se sustenta principalmente en rajos, en una proporción aproximada de 4 a 1 con la minería subterránea. Sin embargo, el futuro de las principales operaciones no se basa en rajos, sino en métodos de explotación subterráneos y masivos, a fin de prolongar la vida de las minas y mantener la competitividad.

Hoy existe una amplia bibliografía técnica, se desarrollan softwares y se celebran congresos internacionales sobre como diseñar, construir y planificar minas subterráneas masivas. Uno de los temas más reiterativos en los últimos años ha sido la profundización de las operaciones y las complicaciones que esto genera. El dilema está en que la mayoría de las minas subterráneas opera a profundidades entre los 300 y 800 metros bajo el suelo, y se espera que con el tiempo alcancen incluso mayores profundidades. En este sentido cobran vital importancia los avances

en tecnología y el conocimiento con el fin de lidiar con las incertidumbres que supone la corteza terrestre.

La pregunta que cabe por responder es: *¿Serán el nivel de esfuerzos pre y post minería, los estallidos de roca, los desplomes, las colgaduras, los sobre tamaños, los bombeos de agua barro y la entrada de dilución, los únicos desafíos a los que las mineras se verán enfrentadas, o aparecerán otros a medida que se alejan de la superficie?* Responder esta interrogante no es trivial, ya que existe poco conocimiento acerca del subsuelo, de su composición específica y de sus deformaciones.

Por ello se desarrolla este trabajo de título, a fin de observar eventos que podrían ocurrir en la minería subterránea, en especial en las operaciones de caving. Si bien es cierto que los mecanismos presentados en este estudio aún no han sido demostrados (es decir, son hipótesis que intentar explicar el problema) y que se cuenta con poca evidencia de los hechos, registros de *Inrush of fines* en minas reales existen.

Un ***Inrush of fines*** se define como la entrada abrupta de materiales de baja granulometría en cualquier tipo de galería de una mina subterránea como por ejemplo: calles, zanjas, piques, chimeneas, abanicos productivos (como un Sublevel Caving), galerías slot, etc., pero en el caso de este trabajo de título el foco se encuentra en los puntos de extracción.

La fuente de energía que explicaría este fenómeno es la energía potencial, la cual podría manifestarse de diferentes modos y en el caso particular de este estudio se utiliza a las **colgaduras como la justificación más fehaciente.**

A lo largo de este trabajo, el lector se encontrará con cinco diferentes configuraciones o grupos experimentales, a fin de evaluar la factibilidad de un *Inrush of fines*. Cada una de estas situaciones refleja un conjunto de condiciones operacionales únicas, condiciones que en colaboración con variables móviles permiten generar observaciones y medir determinados parámetros.

III. Objetivos de la memoria

Los principales objetivos de este trabajo de título son cuatro y se describen a continuación.

Objetivo general de la memoria:

- **Explorar** los mecanismos de generación de eventos de *Inrush of fines* y **estudiar** las consecuencias de estos eventos en galerías de producción de PC/BC bajo diferentes condiciones operacionales.

Objetivos específicos:

- **Realizar** una revisión bibliográfica del tema de *Inrush of fines* a fin de contar con estudios o información acerca de estos eventos. El enfoque debe estar en los puntos de extracción de PC/BC.
- **Concluir** de la revisión bibliográfica cuáles serán los mecanismos a evaluar, qué materiales se van a utilizar y cómo será la forma la forma general del setup experimental.
- **Definir** las hipótesis de trabajo y **explicitar** qué actividades permitirán comprobar o desmentir cada una de las hipótesis.
- **Construir** el setup experimental y preparar las muestras.
- **Crear** la metodología experimental.
- **Colectar** los artefactos y dispositivos necesarios para cumplir con la metodología experimental.
- **Realizar** ensayos tal como se describen en la metodología.
- **Medir** determinadas variables en cada uno de los ensayos.
- **Realizar** grabaciones de video con el objeto de tener mayor información acerca del movimiento del material.
- **Colectar** los datos experimentales y **obtener** resultados concernientes tanto a la generación de eventos de *Inrush of fines* así como también a sus consecuencias.
- **Comparar** las diferentes configuraciones experimentales descritas en la metodología y **concluir** en cuál de ellas se generan los eventos de *Inrush of fines* con las peores consecuencias.

IV. Alcances

Además de que los *Inrush of fines* son explicados por medio de **mecanismos hipotéticos**, en este estudio los eventos sólo se relacionan a operaciones de PC/BC (Panel y Block Caving) y esto es fundamentalmente por el modelo experimental utilizado. A pesar de ello, los resultados de este trabajo también son aplicables a métodos que incluyan caserones (Sublevel Stopping) o abanicos productivos (Sublevel Caving).

Otra limitación del trabajo, y tal como se explica más en detalle en el capítulo de Metodología experimental, subcapítulo de Escalamiento de variables, es el no cumplimiento en forma total de las reglas de escala declaradas por Castro (Castro, 2006). La similitud geométrica es satisfecha a través del escalamiento de distancias, áreas y los tamaños del material utilizado. La similitud cinemática es satisfecha a través del escalamiento de las velocidades de caída libre y flujo sobre el suelo. No obstante, **la similitud dinámica no es satisfecha en su totalidad**, puesto que la resistencia al impacto de un material granular a pequeña escala no es la misma que para rocas con fracturas a escala real. Esto está relacionado también a la aceleración de gravedad y a la diferencia en el comportamiento del material granular ante caídas medidas en centímetros en comparación a caídas medidas en metros.

Otras limitaciones son mencionadas a lo largo de este trabajo, especialmente en el capítulo de Análisis de resultados experimentales. Por ejemplo, en los apartados de Comparación de velocidades empíricas y teóricas, se declaran algunos supuestos a fin de sustentar una comparación entre estas dos velocidades.

V. Motivación

Tal como se menciona en la introducción, la bibliografía relacionada directamente y que se transforme en un precedente de este estudio es escasa, habiendo sólo una operación minera que ha registrado estos eventos. Este caso es presentado en la revisión bibliográfica.

Lo que sí se ha encontrado, y en abundancia, es una gran cantidad de casos que comparten puntos en común con lo planteado por el autor, pero no corresponden a *Inrush of fines* en puntos de extracción de PC/BC. Dichos casos también son abordados en el capítulo de Revisión bibliográfica.

La Motivación se basa fundamentalmente en llevar el conocimiento más allá de los casos observados hasta la fecha. Más que construir una maqueta y obtener resultados en el contexto de un laboratorio, el objetivo último es aventurar escenarios dentro de las operaciones mineras subterráneas, a fin de tomar decisiones oportunas y con fundamentos técnicos que las respalden.

En este último punto está el valor de este trabajo de título: **en observar, cuantificar y tomar decisiones** acerca de fenómenos poco registrados. Estos eventos seguramente serán observados con mayor frecuencia en un futuro no muy lejano, a medida que las operaciones mineras se profundizan en el subsuelo y se enfrentan a nuevos desafíos e incertezas dentro de La Tierra.

CAPÍTULO 2:

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Como se menciona en la introducción, un *Inrush of fines* se explicaría en base a una acumulación de energía potencial. El mecanismo que estaría relacionado a la acumulación de energía potencial es una **colgadura**, aunque en ocasiones de forma muy diferente a lo ampliamente conocido, y por ello, en esta revisión se busca ahondar más en estos mecanismos. La revisión culmina con un benchmark acerca del tamaño de los materiales que son declarados *fines* en minería de caving.

I. Origen del concepto de *Inrush of fines*

El concepto de *Inrush of fines* tiene su origen en los eventos de caída de material granular, por acción de la gravedad, desde excavaciones verticales (piques, chimeneas y caserones) tanto construidas como en construcción.

De acuerdo con el registro del Departamento de Recursos Minerales, Minería y Energía del Estado de Queensland, Australia, los incidentes de *Inrush* de materiales granulares finos no son casos aislados. Por ejemplo, en abril de 2012 un *Inrush* de finos aconteció luego de que unas operaciones de desarrollo interceptaran un pozo de mapeo geológico; dicho pozo era conocido, pero no estaba en los planos de construcción (Business Bulletin, BB, 2012).

II. Colgaduras: concepto y nociones básicas

Desde un punto de vista general, una colgadura puede definirse como el impedimento del flujo de material tanto en la entrada como en la zona del flujo (Hadjigeorgiou y Lessard, 2007), o bien desde el punto de vista de los puntos de extracción, una colgadura puede definirse como la formación de un arco estable de rocas o bloques que se atascan en lo alto de la columna de mineral y deja inoperantes el o los puntos de extracción afectados (Troncoso, 2006).

Para efectos de este trabajo de título, una colgadura es el **impedimento del flujo de material granular dentro de un canal, el cual está dispuesto vertical o semi vertical y que en condiciones normales este canal sí posibilita dicho flujo**. Los canales de flujo más fáciles de reconocer son los piques y chimeneas, mas los caserones de un Sublevel Stopping y los elipsoides de flujo de las operaciones de caving también son ejemplos de canales.

III. Formación de colgaduras: concepto de arco estable

Toda colgadura está asociada a una acumulación de energía potencial, y en este sentido las colgaduras se caracterizan por formar un **arco estable**. Este arco recibe una fuerza lateral (proveniente de los límites del canal de flujo) suficiente para compensar el peso del material colgado. Esta fuerza lateral se transmite de roca en roca a través de tracción y cohesión, y también dentro de las rocas a través de la resistencia al corte.

En función de su arco estable, las colgaduras se diferencian en dos grupos: las colgaduras mecánicas y las colgaduras cohesivas. Szwedzicki (Szwedzicki, 2007), entre otros autores, definió las colgaduras estableciendo que aquellas que son mecánicas se dan en materiales secos y de tamaños grandes en relación con el diámetro del canal, mientras que las colgaduras cohesivas aparecen en materiales finos generalmente asociados a humedad.

IV. Formación de un arco estable: según el tipo de colgadura

i. Colgaduras mecánicas

Las investigaciones relacionadas con la formación de arcos estables datan de al menos 80 años, siendo Aytaman (Aytaman, 1960) el primero en realizar estudios acabados sobre este fenómeno. Según Aytaman, la ocurrencia de colgaduras se relaciona con el diámetro del canal de flujo y el tamaño máximo de las partículas. Si la razón entre ambos tamaños es superior a 4.2, es muy poco probable que se formen arcos estables, y desde luego colgaduras.

En la actualidad el criterio más usado para evitar la formación de arcos mecánicos fue dado por Engineers International Inc. (Engineers International, 1983) quienes establecieron que para una razón de 5 entre ambos diámetros, se garantizaba un flujo libre de colgaduras.

ii. Colgaduras cohesivas

El estudio más completo acerca de este tipo de colgaduras fue realizado por Hambley (Hambley, 1987), quien concluyó que la formación de estos arcos no sólo dependía de la razón de los diámetros del canal y las partículas, sino también de la cohesión relacionada a la humedad, y de la densidad y del ángulo de fricción del material seco.

V. Formación de colgaduras mecánicas: comunes e hipotéticas

i. Colgaduras comunes

Las definiciones comunes de colgaduras mecánicas varían de autor en autor. Por ejemplo, para Moss, Russell y Jones (Moss, Russell y Jones, 2004) las bajas colgaduras son aquellas que tienen su arco estable a una altura inferior de 9 [m] desde el suelo del punto de extracción, mientras que las altas colgaduras se consideran a partir de los 9 [m]. Para Kurniawan y Setyoko, (Kurniawan y Setyoko, 2008), en cambio, las bajas colgaduras se producen en la visera del punto de extracción, las medianas colgaduras desde la visera y hasta 4 [m] sobre ella, mientras que las altas colgaduras se consideran sobre los 4 [m].

Un caso excepcional de colgadura a gran altura y en material in situ ocurrió en 2016 en el Bloque PC1 de la mina Cadia East operada por Block Caving. Esto aconteció debido al **estrechamiento del cave back** en su propagación a la superficie y su conexión con rocas competentes a escasa profundidad (Lett y Brunton, 2016).

ii. Colgaduras hipotéticas

Desde mayo de 2011 y hasta octubre de 2019 eventos de *Inrush of fines* han sido registrados en una importante operación minera de PC/BC en el estado de New South Wales, Australia. De acuerdo al estudio de Castro, Álvarez y Lett (Castro, Álvarez y Lett, 2020, para ser publicado), la respuesta a estos eventos estaría relacionada a colgaduras en el **frente horizontal de propagación del cave back**, acompañado por la existencia de materiales finos sobre la roca quebrada. Este caso se representa en la Figura 1.

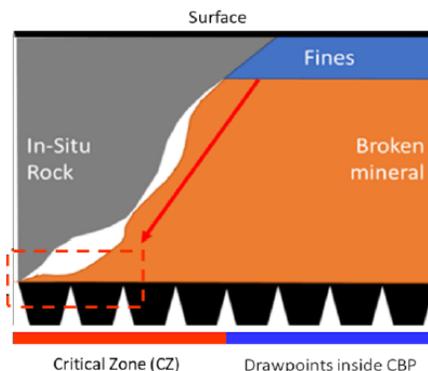


Figura 1: "Colgadura hipotética en la propagación horizontal del cave back (Castro, Álvarez y Lett, 2020)"

Donde **Critical Zone** representa el área con la mayor cantidad de registros de *Inrush of fines* y **CBP** es la proyección vertical en el footprint de la región más estrecha del cave back al momento de contacto con la superficie.

De acuerdo con Castro, Álvarez y Lett (Castro, Álvarez y Lett, 2020) estas colgaduras aparecen debido a la reducida velocidad de propagación horizontal del cave back en comparación con las altas tasas de extracción del material quebrado, lo cual originaría desde intersticios hasta huecos (también llamados **air gaps**) semi verticales suficientemente amplios para permitir la caída de materiales finos desde niveles superiores.

Sin embargo, a partir del mismo trabajo de estos autores, se pueden reconocer otros mecanismos hipotéticos para la generación de *Inrush of fines* y que no estarían relacionados al cave back y al material quebrado, sino solamente al material y a las tasas de extracción.

Según el Índice de uniformidad de la mina subterránea estudiada, el cual representa la regularidad en la extracción de material quebrado desde un determinado punto de extracción en comparación con los puntos vecinos de éste (Susaeta, 2004), **el flujo del material es prácticamente aislado** teniéndose un promedio en el Nivel de Producción de tan sólo 6% de uniformidad. Las mayores tasas de extracción se encuentran en el seno del footprint y la mayor cantidad de *Inrush of fines* se ha registrado en el contorno de esta área.

En base a esto, la generación de *Inrush of fines* no necesita de una acumulación previa de materiales finos en niveles superiores, tal como muestra la Figura 1, sino que las fuerzas de conminución por cizalle entre el **material quebrado prácticamente inmóvil** y el **material quebrado extraído a alta velocidad** originan suficiente material fino en el contacto entre ambos materiales y la gravedad, posteriormente, permitiría su acumulación.

Las colgaduras, por su parte, tienen un rol fundamental en este mecanismo, ya que por fino que sea el material, éste también es susceptible a colgarse. En este sentido, el canal de flujo corresponde a la zona de cizalle, la cual puede adquirir forma de veta semi vertical y tener grosores a escala centimétrica o métrica. Este caso se puede representar por la Figura 2.

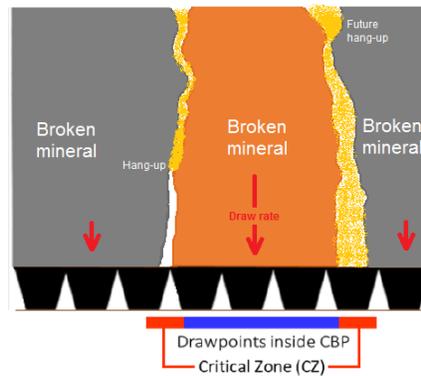


Figura 2: "Colgadura hipotética de finos generados por cizalle"

VI. Definición de colgaduras para efectos de este trabajo de título

- **Tipo 1:** Colgaduras formadas en la visera del punto de extracción. Se componen de material quebrado y se asocian principalmente a fragmentación secundaria. Su canal de flujo está dado por el elipsoide de movimiento y las estructuras mineras.
- **Tipo 2:** Colgaduras formadas dentro de la batea. Se componen de material quebrado y se asocian principalmente a fragmentación secundaria. Su canal de flujo está dado por el elipsoide de movimiento y la batea.
- **Tipo 3:** Colgaduras formadas sobre el Nivel de Hundimiento (UCL, en inglés). Se pueden generar tanto en material quebrado como en material in situ desprendido del cave back. Se asocian a fragmentación primaria o secundaria según su altura y cercanía al cave back. Su canal de flujo es el elipsoide de movimiento o los elipsoides en caso de interacción.
- **Tipo 4:** Colgaduras formadas en el cave back. Se componen de material in situ no desprendido de éste, y por lo tanto, se relacionan a fragmentación primaria. Su canal de flujo puede ser la proyección vertical del footprint de producción, regiones estrechas del cave back o el espacio semi vertical en el cual el cave back se propaga horizontalmente.
- **Tipo 5:** Colgaduras formadas a cualquier altura sobre los puntos de extracción y que no se relacionan directamente a fragmentación primaria o secundaria. Este material es muy fino en comparación con las regiones circundantes y podría formarse por mecanismos tales como el cizalle. Su canal de flujo puede ser cualquiera que permita el escurrimiento del fino.

Los conceptos de fragmentación se exponen en el siguiente subcapítulo.

VII. Fragmentación del material y relación con colgaduras

La fragmentación primaria corresponde a los bloques que el cave back entrega debido a su desestabilización. El cave back se desestabiliza debido al área abierta de la operación de caving y de la extracción de material quebrado a través del Nivel de Producción (Esterhuizen, 1994).

La fragmentación secundaria corresponde a los bloques que efectivamente son extraídos desde los puntos de extracción y que producto de procesos de conminución al interior de la columna de mineral, éste tiene un tamaño menor que aquel entregado por el cave back (Pierce, 2010).

Tanto la fragmentación primaria como la secundaria se originan por el actuar de dos fuerzas principales: la gravedad y el roce. Debido a esto, el flujo de material a través de los elipsoides de movimiento se denomina **flujo gravitacional**.

VIII. Mecanismos de acumulación de materiales granulares finos: ejemplos

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, un *Inrush of fines* necesita la acumulación de finos a una altura considerable, altura que se puede alcanzar con la existencia de una colgadura. Pero, *¿Son los mecanismos mostrados en las Figuras 1 y 2 los únicos modos de alcanzar una acumulación de finos en altura?* La respuesta, sin lugar a dudas, es no.

Un mecanismo de acumulación bastante común, se puede ver en galerías verticales en construcción, especialmente en aquellas más angostas. Por ejemplo, en septiembre de 2017 en una mina del Estado de Queensland, Australia, se construía una chimenea utilizando raise borer. En dichas labores, el detrito no fluyó por la excavación, sino que éste quedó retenido y se acumuló, luego de un tiempo se desestabilizó y cayó a alta velocidad (BB, 2017).

En otras ocasiones, el material reduce su tamaño por acciones propias del hombre y se acumula local y temporalmente. Por ejemplo, en febrero de 2018, también en el Estado de Queensland, un pique de traspaso de mineral fue descolgado usando explosivos; tras la inspección de la excavación se constató que el material colgado se liberó, que era más fino que las rocas colgadas y que además sobrepasó el área restringida con barricadas (BB, 2018).

Algunos mecanismos de acumulación pueden asociarse a faenas ya cerradas, en donde el material quebrado y fino se encuentra en niveles superiores agotados. Estos casos pueden ser observados en complejos mineros de varios niveles productivos, tal como en División El Teniente de Codelco, Chile; en Malmberget mine de LKAB, Suecia y también en casos de Sublevel caving como Kiruna mine de LKAB, también en Suecia.

Pero, los materiales finos también pueden acumularse en forma natural. Un ejemplo de materiales no consolidados ubicados sobre un cuerpo mineral que podría ser explotado por minería de caving, puede observarse en el depósito Inca de Oro. El depósito corresponde a un pórfido de Cu – Au – Mo y se ubica a 100 Km al NE de la ciudad de Copiapó, en la Región de Atacama, Chile. De acuerdo con Soto (Soto, 2010) el material no consolidado asociado a este depósito corresponde a un conjunto polimíctico de **gravas** que afloran en una gran extensión en la zona sur del Desierto de Atacama. Si bien este yacimiento comenzará a ser explotado por medio de un rajo, la posibilidad de transformar la futura mina en una operación subterránea existe, y por tanto, también existen los riesgos asociados a trabajar en las cercanías de materiales finos no consolidados.

IX. Fuerzas de interacción en materiales finos

De acuerdo con Pineda (Pineda, 2012), además de las fuerzas asociadas al flujo gravitacional, esto es roce y gravedad, al utilizarse granulometrías muy bajas aparecen fuerzas microscópicas, tales como las fuerzas capilares asociadas a la humedad, las fuerzas de Van der Waals asociadas a las cargas superficiales, las fuerzas magnéticas, entre otras.

Dado que el foco de este estudio no es la cuantificación de las fuerzas microscópicas, ya que a escala real dichas fuerzas tienen muy baja incidencia, es necesario evitar el uso de materiales extremadamente pequeños. Pineda recomienda descartar materiales bajo #50 ASTM, y en el caso de este trabajo se decide **descartar materiales bajo #30 ASTM**.

X. Declaración de materiales finos en minas de caving

Con el fin de determinar el tamaño ideal de los materiales a utilizar, se realiza un benchmark sobre operaciones de PC/BC y también sobre algunos estudios experimentales, en los cuales se declara o bien se utiliza material fino. Esto se entrega en la Tabla 1.

Tabla 1: "Benchmark acerca de materiales finos en minas de caving"

Nombre de la operación o estudio	<i>A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model</i>	Esmeralda (El Teniente)	Diablo Regimiento (El Teniente)	<i>Experimental quantification of hang up for block caving applications</i>	<i>Cuantificación del riesgo de ingreso de agua barro en El Teniente</i>
Propietario o autor	R. Castro, R. Trueman, A. Halim	CODELCO Chile	CODELCO Chile	R. Castro, R. Gómez, A. Hekmat	Á. Pérez
Método	PC/BC	PC	PC	PC/BC	PC/BC
Escala	1:30	-	-	1:75	(Modelo numérico)
Tamaño máximo [cm]	30	5	2	30	25
Tamaño mínimo [cm]	3	2	0.08	12	-
d ₅₀ [cm]	24	3	1	19	-
Referencia	(Castro, Trueman y Halim, 2007)	(Sánchez, 2017)	(Sánchez, 2017)	(Castro, Gómez y Hekmat, 2016)	(Pérez, 2017)

XI. Conclusiones de la revisión.

Si bien se han reconocido varios mecanismos de acumulación de finos, aún existen otras formas de lograr un efecto similar e incluso podría haber mecanismos que estén fuera del conocimiento del autor de este texto. Por ejemplo, Irribarra (Irribarra, 2014) y Arancibia (Arancibia, 2020) analizan el fenómeno de **migración de finos** a través del flujo intersticial en el borde de los elipsoides de movimiento. Este mecanismo de acumulación también podría ser asociado a eventos de *Inrush of fines*, ya que es muy similar a aquel descrito en la Figura 2.

Además de la acumulación de finos, los eventos de *Inrush of fines* de la literatura siempre están asociados a una colgadura, en los diversos modos en que éstas se pueden presentar. Por esta razón, la existencia de una colgadura se considera un **factor imprescindible** para la ocurrencia de estos fenómenos en materiales granulares secos.

Por último, y dado el benchmark realizado acerca de materiales finos, es que se decide utilizar un material con **tamaño máximo de 12 [cm] a escala real**. En cuanto a las colgaduras, se ha decidido **recrear eventos de *Inrush of fines* con colgaduras a alturas de 30 [m]** sobre el Nivel de Hundimiento.

CAPÍTULO 3:

HIPÓTESIS Y ACTIVIDADES DE COMPROBACIÓN

I. Hipótesis y actividades de comprobación para grupo 1

i. Hipótesis

Una acumulación o “bolsón” de material fino a escala métrica, en contacto con un material granular grueso, es capaz de generar un *Inrush of fines* desde un punto de extracción de PC/BC y bajo un protocolo de extracción estándar con palas mecanizadas.

ii. Actividades de comprobación

Las actividades para la comprobación o rechazo de la hipótesis son las siguientes:

- Realizar extracciones de material bajo un protocolo estándar y registrar cada masa.
- Registrar cualquier evento extraordinario durante el procedimiento.
- Registrar la primera entrada de material fino en el punto de extracción.

II. Hipótesis y actividades de comprobación para grupo 2

i. Hipótesis

Una acumulación de material fino a escala métrica, sostenido por una colgadura varios metros sobre el Nivel de Hundimiento y sin presencia de gruesos, es capaz de generar un *Inrush of fines* desde un punto de extracción de PC/BC.

ii. Actividades de comprobación

Las actividades para la comprobación o rechazo de la hipótesis son las siguientes:

- Cuantificar la masa de material expulsado desde el punto de extracción en el cual se desarrolla el evento de *Inrush of fines*, y que es capaz de alcanzar el punto contrario.
- Medir el ángulo de deposición del material fino.
- Medir la distancia alcanzada por el material fino.
- Realizar grabaciones y cuantificar la velocidad del material al fluir por la zanja.

III. Hipótesis y actividades de comprobación para grupo 3

i. Hipótesis

Una acumulación de material fino a escala métrica, sostenido por una colgadura varios metros sobre el Nivel de Hundimiento y sin presencia de gruesos, no es capaz de generar un *Inrush of fines* desde un punto de extracción de PC/BC, cuando existe un obstáculo tipo pretil al interior de la zanja de producción.

ii. Actividades de comprobación

Las actividades para la comprobación o rechazo de la hipótesis son las siguientes:

- Cuantificar la masa de material expulsado desde el punto de extracción en el cual se desarrolla el evento de *Inrush of fines*, y que es capaz de alcanzar el punto contrario bajo el pilar mayor (pilar corona).
- Medir la distancia alcanzada por el material fino.
- Cuantificar la masa de material que sale desde el punto de extracción y que sobrepasa el obstáculo (pretil), pero que no alcanza a ser expulsado.
- Si el material fino es capaz de saltar sobre el obstáculo, entonces se debe medir la altura que éste tiene al interactuar con la calle de producción (bullnose).
- Realizar grabaciones y cuantificar la velocidad del material tras su paso por sobre el pretil.

IV. Hipótesis y actividades de comprobación para grupo 4

i. Hipótesis

Una acumulación de material fino a escala métrica, sostenido por una colgadura varios metros sobre el Nivel de Hundimiento de PC/BC, y estando uno de los dos puntos de extracción (de la misma batea) bloqueado con material grueso y consolidado, es capaz de generar un *Inrush of fines* en el punto habilitado con resultados más peligrosos que en caso de estar ambos puntos habilitados.

ii. Actividades de comprobación

Las actividades para la comprobación o rechazo de la hipótesis son las siguientes:

- Cuantificar la masa de material expulsado desde el punto de extracción en el cual se desarrolla el evento de *Inrush of fines*, y que es capaz de alcanzar el punto contrario bajo el pilar mayor (pilar corona).
- Medir el ángulo de deposición del material fino.
- Realizar grabaciones y cuantificar la velocidad del material al fluir por la zanja.
- Medir la distancia alcanzada por el material fino.

V. Hipótesis y actividades de comprobación para grupo 5

i. Hipótesis

Una acumulación de material fino a escala métrica, sostenido por una colgadura varios metros sobre el Nivel de Hundimiento de PC/BC, y estando uno de los dos puntos de extracción (de la misma batea) bloqueado con material no consolidado, es capaz de generar un *Inrush of fines* en el punto habilitado con resultados aún más peligrosos que lo visto en el grupo 4, lo cual se debe fundamentalmente al desplazamiento de rocas mayores.

ii. Actividades de comprobación

Las actividades para la comprobación o rechazo de la hipótesis son las siguientes:

- Cuantificar la masa de material expulsado desde el punto de extracción en el cual se desarrolla el evento de *Inrush of fines*, y que es capaz de alcanzar el punto contrario bajo el pilar mayor (pilar corona).
- Medir el ángulo de deposición del material fino.
- Realizar grabaciones y cuantificar la velocidad del material fluyendo por la zanja.
- Medir la distancia alcanzada por el material fino. Registrar el tamaño y la distancia alcanzada, desde el punto de extracción, de las partículas gruesas que podrían ser desplazadas.

La materialización de estas actividades, así como las variables que nacen a partir de éstas, es abordada en el siguiente capítulo (Metodología Experimental).

CAPÍTULO 4:

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se detalla el modelo utilizado en los experimentos, se mencionan los parámetros que se busca observar y se describen los procedimientos de cada ensayo. El corazón de la metodología es definir el o los setups asociados a cada grupo experimental, los cuales están íntimamente ligados a las hipótesis de trabajo y los objetivos específicos.

La metodología experimental escrita en las siguientes páginas sólo recoge los aspectos claves y que dan un **entendimiento global** de las actividades realizadas. Para más detalles de la metodología, se invita al lector a visitar el capítulo de Anexos.

I. Escenario minero como contexto del estudio

El modelo de laboratorio está basado en el diseño de una **batea de producción y sus dos puntos de extracción**, en el contexto de la Mina Chuquicamata Subterránea, en su periodo de Ingeniería de Detalle (SRK, 2015; Sotomayor, 2016). De acuerdo a este estudio, las condiciones base son las siguientes:

- Distancia entre calles de 32 [m].
- Distancia entre Nivel de Producción y Nivel de Hundimiento de 15.4 [m].
- Altura de batea de 10.5 [m].
- Malla Tipo Teniente.
- Hundimiento convencional:
 - Ángulo de batea en pilar mayor: 90°.
 - Ángulo de batea en pilar menor: 63°.
- Sección de galería zanja de 4.9 x 4.9 [m²].
- Distancia de 20 [m] entre galerías zanja en forma paralela a la calle de producción.
- Largo de batea de 28 [m].

Estas condiciones son fijas en todos los grupos experimentales. El modelo es construido a una escala de **1:50**, de modo que el factor de escalamiento para satisfacer la similitud geométrica es $\lambda = 50$.

II. Escalamiento de variables

Si bien Power (Power, 2004) concluye que para escalas mayores a 1:30 (por ejemplo 1:20 o 1:10) los resultados obtenidos son cercanos a la escala mina, en esta oportunidad se utiliza un modelo a escala 1:50 con las limitaciones declaradas en el capítulo de Alcances.

De acuerdo con Castro (Castro, 2006) un estudio en el contexto de laboratorio tiene aplicabilidad a escala mina si una serie de reglas de escalamiento son satisfechas, a lo cual este autor llamó **análisis de similitud**. En la práctica, la similitud entre un modelo de laboratorio y una mina a escala real se alcanza si se satisfacen las condiciones de la Tabla 2.

Tabla 2: "Análisis de similitud desde un punto de vista práctico"

Similitud	Se alcanza similitud si:
Geométrica	Se escala de forma correcta la altura y área de una columna de mineral, así como también la geometría del punto de extracción y la distribución de granulométrica del material.
Cinemática	Se realiza la extracción del mineral a una tasa semejante a una mina real. Además la tasa con que el material fluye, tanto dentro de la batea como en la zanja, es debidamente escalada.
Dinámica	Se tiene la misma masa específica entre el modelo y la mina, lo cual se traduce en que las interacciones entre partículas y entre partículas y bordes, son similares. Además se debe tener la misma densidad y ángulo de fricción interna.

De acuerdo con la Tabla 2 y las conclusiones obtenidas por los autores antes mencionados, los factores de escalamiento que permiten alcanzar la similitud entre el modelo y la mina se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: "Factores de escala numéricos"

Dimensión	Factor de escala teórico	Factor de escala numérico
Longitud	λ	50
Área	λ^2	2.5×10^3
Volumen	λ^3	1.25×10^5
Tiempo	$\lambda^{1/2}$	7.07
Peso (Fuerzas)	λ^3	1.25×10^5
Esfuerzos	λ	50
Velocidad	$\lambda^{1/2}$	7.07
Ángulo de fricción interna	1	1

III. Modelo y materiales

En base a los factores de escala numéricos presentados anteriormente, se puede construir el modelo y también se puede escalar el tamaño del material a utilizar. Ambos temas son tratados en dos apartados diferentes.

i. Construcción del modelo

De acuerdo a la Ingeniería de Detalles de la Mina Chuquicamata Subterránea, un fragmento del layout de producción con sus dimensiones se representa por la Figura 3. En esta figura además se muestran los límites que se pretenden estudiar (borde de tono azul), los cuales están dados por una batea de producción (Sotomayor, 2016).

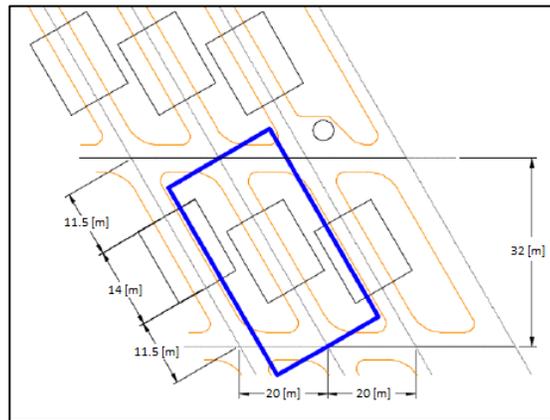


Figura 3: "Dimensiones reales del layout y límites a estudiar a escala real"

Para el caso de la batea y de la galería zanja, las dimensiones se muestran en la Figura 4.

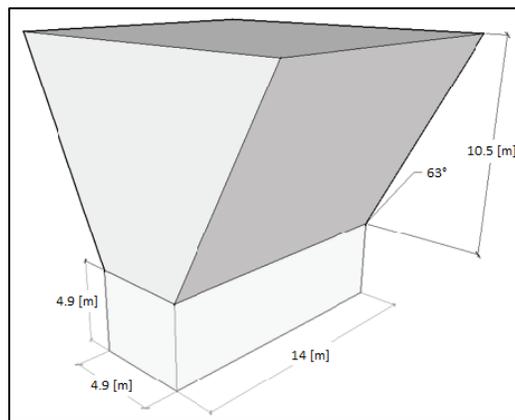


Figura 4: "Dimensiones reales de batea y zanja de producción"

A fin de lograr la similitud geométrica a una escala de **1:50**, se construye el modelo mostrado en la Figura 5. Para el caso de la batea y de la galería zanja, se tienen las dimensiones a escala de laboratorio mostradas en la Figura 6.

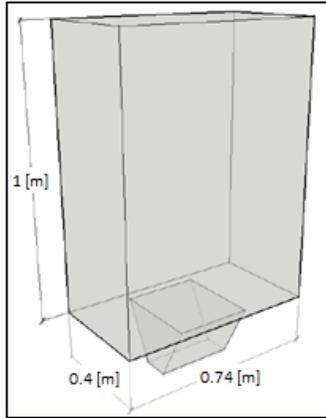


Figura 5: "Dimensiones generales del modelo a escala de laboratorio"

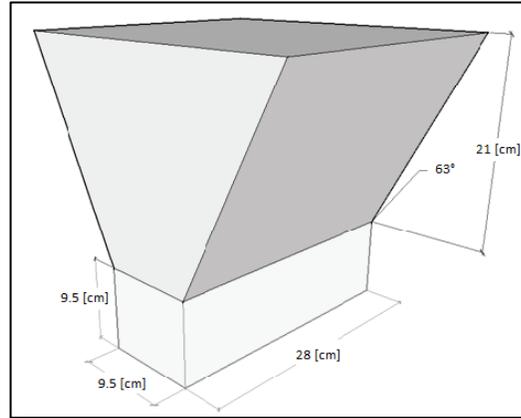


Figura 6: "Dimensiones de la batea y zanja de producción a escala de laboratorio"

La galería zanja tiene una longitud de 23 [m] entre dos puntos de extracción a lo largo del pilar mayor, distancia que en este modelo equivale a 46 [cm]. Para efectos prácticos, el modelo es construido con una distancia entre puntos a lo largo del pilar mayor de 50 [cm]. Esta configuración se muestra en la Figura 7.

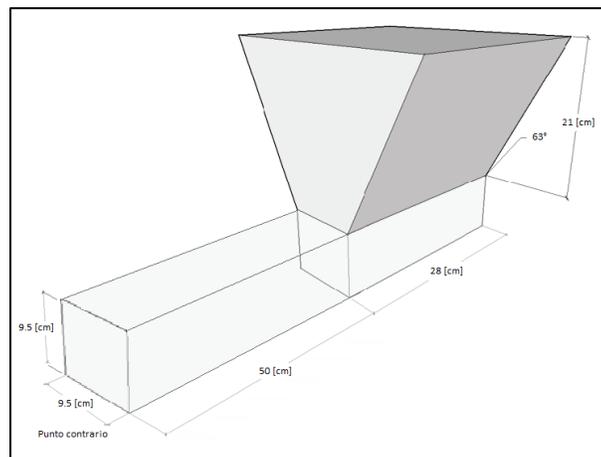


Figura 7: "Distancia entre puntos a través del pilar mayor"

En la Figura 8 se muestran dos fotografías del modelo: en (A) se muestra una vista lateral global y en (B) una vista lateral de la batea.

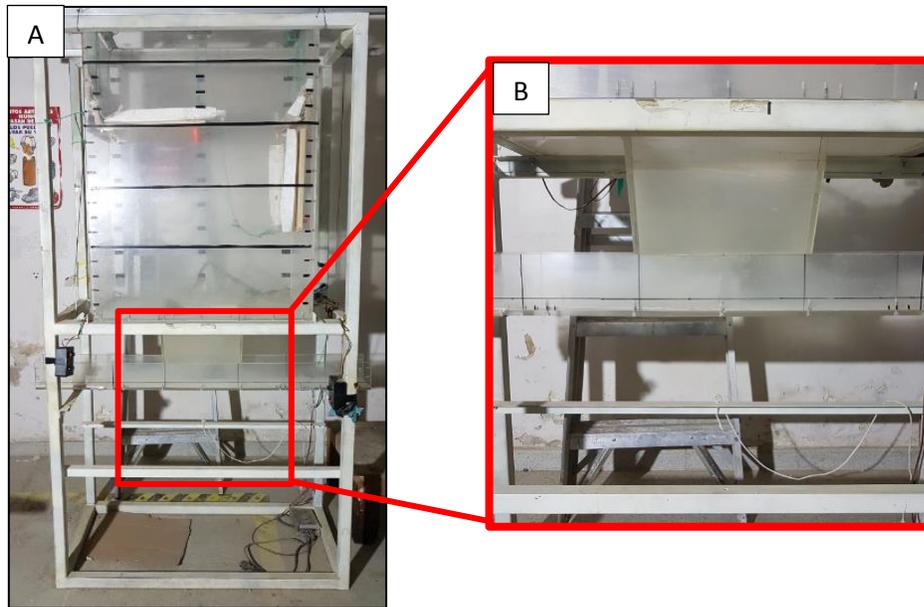


Figura 8: "Fotografías del modelo"

ii. Material utilizado

De acuerdo con el capítulo de Revisión bibliográfica, la declaración de materiales finos en minas de caving, así como en algunos estudios de flujo gravitacional, **es variable**, razón por la cual se utiliza un **material fino** que tiene la siguiente distribución granulométrica básica:

- Tamaño máximo a escala mina: 12 [cm]. A escala de laboratorio: 2.36 [mm] (#8 ASTM).
- Tamaño mínimo a escala mina: 3 [cm]. A escala de laboratorio: 0.6 [mm] (#30 ASTM).

Además del material fino, en algunos grupos experimentales se utiliza **material grueso** a fin de comprobar la respectiva hipótesis de trabajo. Este material tiene la siguiente distribución granulométrica básica:

- Tamaño máximo a escala mina: 145 [cm]. A escala de laboratorio: 29 [mm] ($1\frac{1}{8}$ ASTM).
- Tamaño mínimo a escala mina: 3 [cm]. A escala de laboratorio: 0.6 [mm] (#30 ASTM).

La distribución granulométrica exacta del material utilizado, tanto fino como grueso, así como de otras propiedades de interés puede ser consultada en el capítulo de Anexos, subcapítulo de **ANEXO A: Propiedades del material**.

IV. Setup de los grupos experimentales

De acuerdo a las hipótesis y los objetivos específicos se diseñan los setups. En varios de los siguientes esquemas se tiene simbología, la cual se explica en un subcapítulo posterior.

i. Setup experimental del grupo 1

En este grupo se busca evaluar la capacidad de generar un *Inrush of fines* a partir de material fino en contacto con grueso. Por lo tanto, se desarrollan **tres setups**, los cuales se muestran en las Figuras 9, 10 y 11. En estas figuras, el **color oro** representa el material fino mientras que el **color marrón** representa el material grueso.

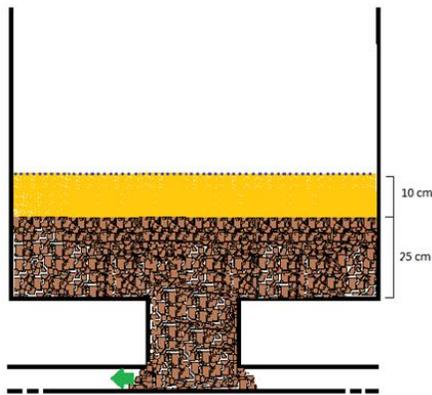


Figura 9: "Setup 1 del grupo experimental 1"

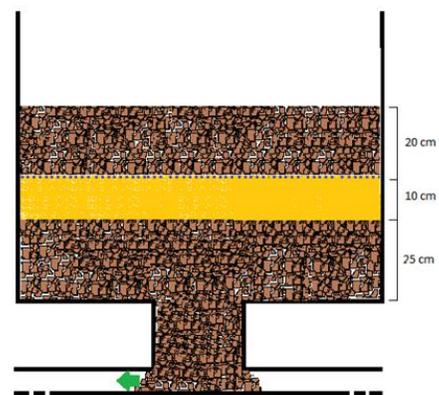


Figura 10: "Setup 2 del grupo experimental 1"

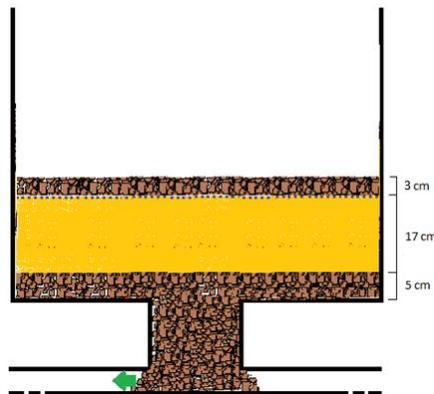


Figura 11: "Setup 3 del grupo experimental 1"

En el caso de este grupo experimental, se utiliza un sistema de extracción mecanizado dado por palas LHD de 14 [yd³] a escala mina u 85 [cm³] a escala de laboratorio. En la Figura 12 se muestra una fotografía de estas palas y en la Figura 13 se muestran esquemas con sus dimensiones: (A) es una vista frontal y (B) una vista lateral.

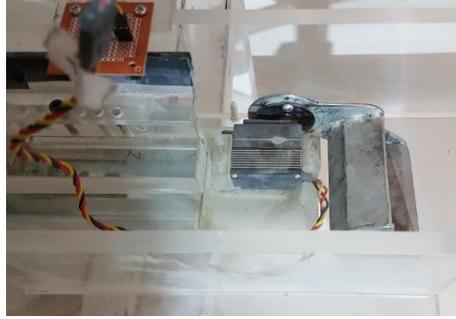


Figura 12: "Fotografía de las palas mecanizadas a escala de laboratorio"

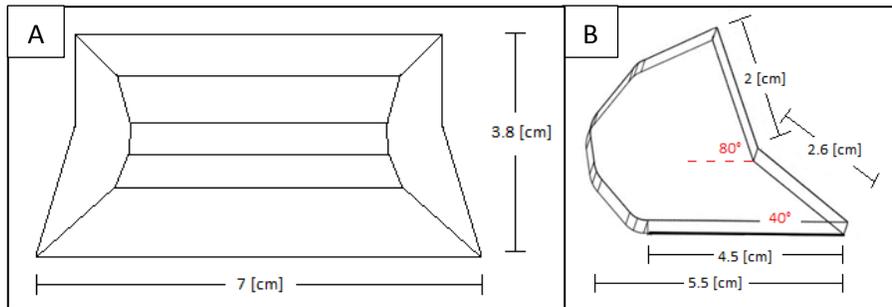


Figura 13: "Dimensiones a escala de laboratorio de palas mecanizadas"

ii. Setup experimental del grupo 2

En este grupo experimental se desarrolla sólo un setup, el cual se muestra en la Figura 14. FMS significa Material Fino Suspendido.

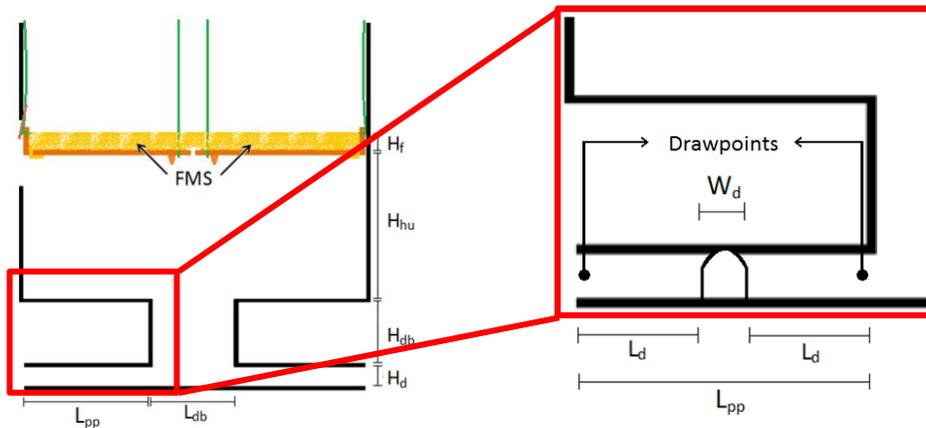


Figura 14: "Setup experimental del grupo 2"

Con el objetivo de simular una colgadura a gran altura se diseñan compuertas, las cuales son suspendidas por un sistema de bisagras, cables y poleas. Todo este sistema toma su fuerza desde una cuerda, denominada **cuerda de sacrificio** la cual es destruida y reemplazada de una repetición a la siguiente. Por el canto de las compuertas se coloca un sistema anti

filtrado de finos, el cual en la práctica consiste en la colocación de pliegos de papel pegados y acomodados de modo de evitar la caída de este material. En las Figuras 15 y 16 se muestran imágenes de este sistema de suspensión.

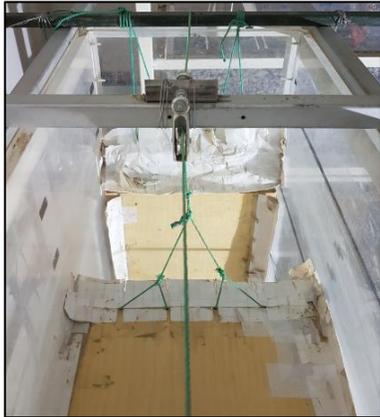


Figura 15: "Vista superior de Sistema de compuertas"



Figura 16: "Sistema de accionamiento de compuertas: Cuerda de sacrificio"

iii. Setup experimental del grupo 3

En este grupo experimental se desarrolla sólo un setup, el cual se muestra en la Figura 17.

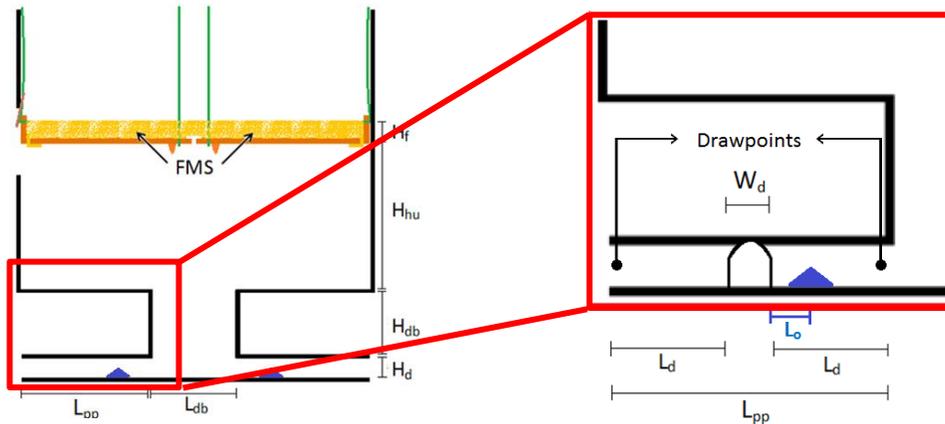


Figura 17: "Setup experimental del grupo 3"

En el caso del pretil, se tiene la geometría indicada en la Figura 18.

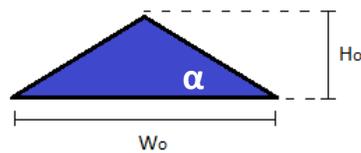


Figura 18: "Geometría del obstáculo tipo pretil"

iv. Setup experimental del grupo 4

En este grupo experimental se desarrolla sólo un setup, el cual se muestra en la Figura 19. El **color oro** representa el material fino mientras que el **color marrón** representa el material grueso (CM).

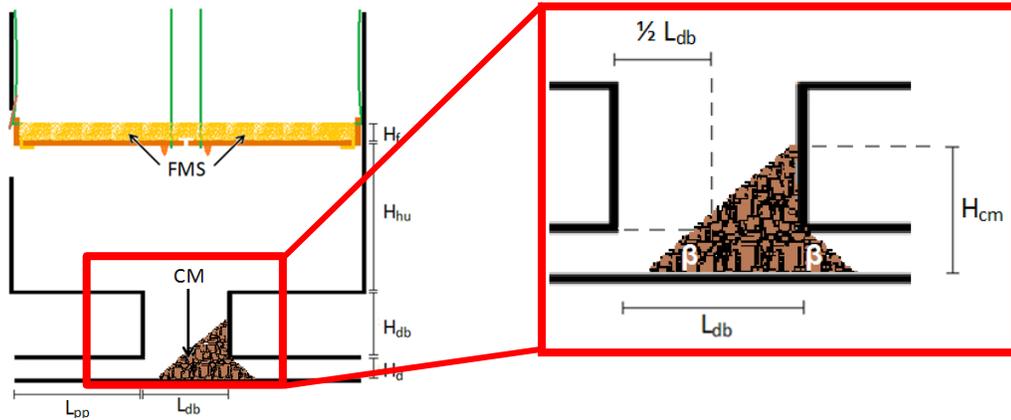


Figura 19: "Setup experimental del grupo 4"

Esta configuración se prueba en varios ensayos, y se observa que en cada repetición se hace necesaria una nueva masa de CM dada la mezcla producida entre el material fino y el material grueso. Por ello se construye un setup modificado que se muestra en la Figura 20. En esta configuración la sigla **CMA** significa **Artefacto de Material Consolidado**.

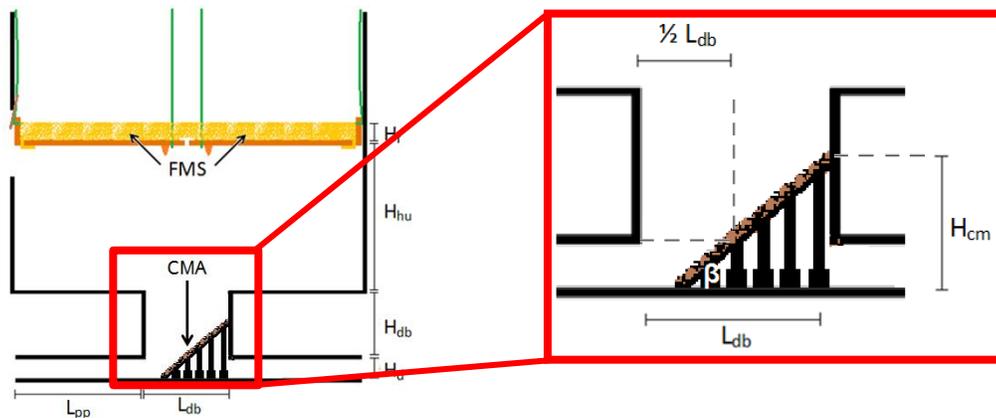


Figura 20: "Setup modificado del grupo experimental 4"

En las Figuras 21 y 22 se muestran fotografías del artefacto mencionado anteriormente. Esta estructura se construye con materiales de fácil adquisición, se utiliza además material grueso adherido con pegamento y se mantiene la geometría del material al interior de la batea, incluyendo su ángulo de reposo (β).



Figura 21: "Vista lateral de CMA"



Figura 22: "Vista frontal de CMA"

v. Setup experimental del grupo 5

En este grupo experimental se desarrolla sólo un setup, el cual se muestra en la Figura 23. El **color oro** representa el material fino y el **color marrón** representa el material grueso.

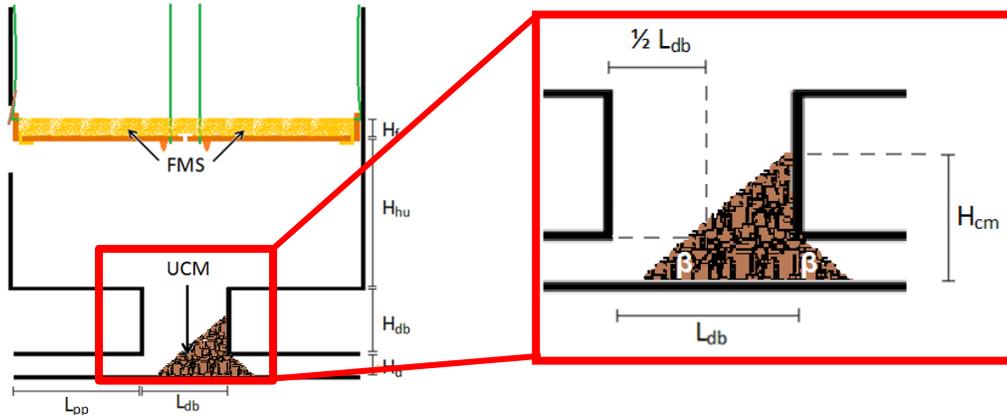


Figura 23: "Setup experimental del grupo 5"

Al igual que en el caso del grupo 4, en este grupo 5 se construye un setup modificado y éste se muestra en la Figura 24. La sigla **UCMA** significa **Artefacto de Material No Consolidado**.

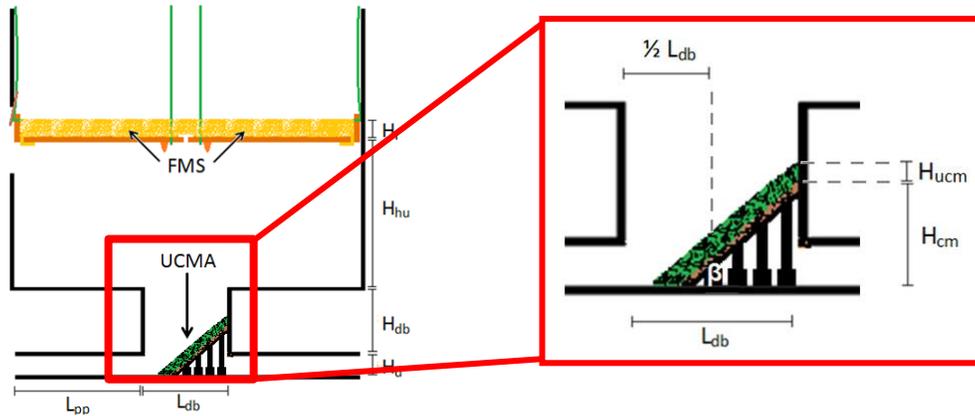


Figura 24: "Setup modificado del grupo experimental 5"

En las Figuras 25 y 26 se muestran fotografías del artefacto mencionado anteriormente, en este caso sólo exhibiendo la estructura rígida caracterizada por la altura H_{cm} . Al igual que en el grupo 4, se mantiene la geometría del material y su ángulo de reposo (β).



Figura 25: "Vista lateral de UCMA"



Figura 26: "Vista frontal de UCMA"

En las Figuras 27, 28 y 29 se muestran fotografías de la disposición del UCMA, incluido el material granular no consolidado (UCM), al interior de la batea del modelo.

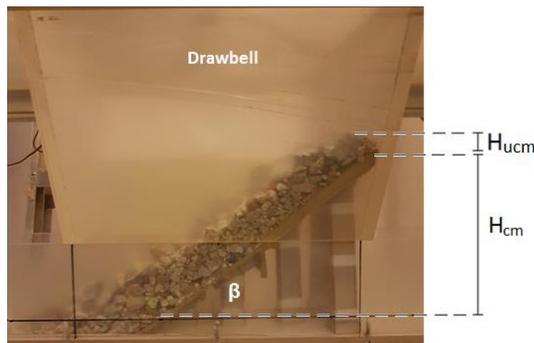


Figura 27: "Vista lateral de UCMA incluyendo material no consolidado"



Figura 28: "Vista superior de UCMA incluyendo UCM dentro de la batea"



Figura 29: "Vista frontal de UCMA incluyendo UCM dentro de la batea"

V. Variables fijas, variables móviles y parámetros a observar

i. Variables y parámetros del grupo experimental 1

a) Variables

En el caso de este grupo experimental, **no se utilizan variables móviles**. Todas las variables son consideradas fijas y con los valores mostrados en los setups experimentales.

b) Parámetros

- Masa de cada extracción con palas mecanizadas.
- Primera aparición de finos en el punto de extracción.

ii. Variables y parámetros del grupo experimental 2

a) Variables

En el caso de este grupo experimental, las variables fijas se muestran en la Tabla 4. Por su parte, las variables móviles se muestran en la Tabla 5. Las variables móviles de este grupo experimental son las mismas y con valores idénticos en los siguientes grupos.

Tabla 4: "Variables fijas del grupo experimental 2"

Variable	Significado	Valor fijo [cm] (Escala de laboratorio)	Valor fijo [m] (Escala mina)
H_{hu}	Altura de material fino sobre UCL	65	32.5
H_{db}	Altura de la batea	21	11.5
H_d	Altura de la galería zanja	9.5	4.75
L_{pp}	Distancia entre puntos de extracción bajo el pilar mayor	50	25
L_d	Largo de la galería zanja	20	10
W_d	Ancho de la calle	9.8	4.9
L_{db}	Largo de la batea	28	14
H_m	Altura de medición	4.75, 2	2.4, 1

Tabla 5: "Variables móviles de los grupos experimentales 2 a 5"

Variable	Significado	Valor fijo [cm] (Escala de laboratorio)	Valor fijo [m] (Escala mina)
H_f	Altura de FMS	3, 5, 10 y 15	1.5, 2.5, 5 y 7.5

A modo de recordatorio, FMS es la sigla de Material Fino Suspendido (inglés).

b) Parámetros

- Masa de material fino expulsado desde un punto de extracción hasta el punto contrario a través del pilar mayor (**M**).
- Ángulo final de deposición del material fino dentro de la zanja (ϕ).
- Distancia alcanzada por el material fino dentro de la zanja y medida a una altura específica desde el suelo (**D**, en función de H_m).
- Velocidad experimental del material al fluir dentro de la zanja, obtenida por análisis de video (**R**).

iii. Variables y parámetros del grupo experimental 3

a) Variables

En este grupo experimental, las variables fijas se muestran en la Tabla 6. Las variables móviles en esta configuración son las mismas que en el grupo anterior.

Tabla 6: "Variables fijas del grupo experimental 3"

Variable	Significado	Valor fijo [cm] (Escala de laboratorio)	Valor fijo [m] (Escala mina)
H_{hu}	Altura del material fino desde el UCL	65	32.5
H_{db}	Altura de la batea	21	11.5
H_d	Altura de la galería zanja	9.5	4.75
L_{pp}	Distancia entre puntos de extracción a través del pilar mayor	50	25
L_d	Largo de la galería zanja	20	10
W_d	Ancho de la calle	9.8	4.9
L_{db}	Largo de la batea	28	14
H_m	Altura de medición	2	1
H_o	Altura del obstáculo	3	1.5
W_o	Ancho del obstáculo	8.6	4.3
L_o	Distancia desde el obstáculo hasta el bullnose	8.3	4.1
α	Ángulo del obstáculo ($^\circ$)	35	35

*Excepto en el ángulo del pretil.

b) Parámetros

- Masa de material fino expulsado desde un punto hasta el punto contrario a través del pilar mayor (**M**).
- Distancia alcanzada por el material fino dentro de la zanja y medida a una altura específica desde el suelo (**D**). Se utiliza sólo un H_m desde este grupo en adelante.

- Probabilidad de ocurrencia de D, de acuerdo a su definición.
- Masa pasante sobre el obstáculo (M_p).
- Altura del material en el contacto con el bullnose (H_{mb}).
- Velocidad experimental del material al fluir dentro de la zanja, obtenida por análisis de video (R).

iv. Variables y parámetros del grupo experimental 4

a) Variables

En el caso de este grupo experimental, las variables fijas se muestran en la Tabla 7. Las variables móviles en esta configuración son las mismas que en el grupo anterior.

Tabla 7: "Variables fijas del grupo experimental 4"

Variable	Significado	Valor fijo [cm*] (Escala de laboratorio)	Valor fijo [m*] (Escala mina)
H_{hu}	Altura del material fino desde el UCL	65	32.5
H_{db}	Altura de la batea	21	11.5
H_d	Altura de la galería zanja	9.5	4.75
L_{pp}	Distancia entre puntos de extracción a través del pilar mayor	50	25
L_d	Largo de la galería zanja	20	10
W_d	Ancho de la calle	9.8	4.9
L_{db}	Largo de la batea	28	14
H_m	Altura de medición	2	1
β	Ángulo de CMA (Artefacto de Material Consolidado)	40°	40°
H_{cm}	Altura de CMA dentro de la batea	22.6	11.3

*Excepto en el ángulo del material y/o del artefacto.

b) Parámetros

- Masa de material fino expulsado desde un punto hasta el punto contrario a través del pilar mayor (M).
- Ángulo final de deposición del material fino dentro de la zanja (ϕ).
- Velocidad experimental del material al fluir dentro de la zanja, obtenida por análisis de video (R).
- Distancia alcanzada por el material fino dentro de la zanja y medida a una altura específica desde el suelo (D). Se utiliza sólo un H_m .

v. Variables y parámetros del grupo experimental 5

a) Variables

En el caso de este grupo experimental, las variables fijas se muestran en la Tabla 8. Las variables móviles en esta configuración son las mismas que en el grupo anterior.

Tabla 8: "Variables fijas del grupo experimental 5"

Variable	Significado	Valor fijo [cm*] (Escala de laboratorio)	Valor fijo [m*] (Escala mina)
H_{hu}	Altura del material fino desde el UCL	65	32.5
H_{db}	Altura de la batea	21	11.5
H_d	Altura de la galería zanja	9.5	4.75
L_{pp}	Distancia entre puntos de extracción a través del pilar mayor	50	25
L_d	Largo de la galería zanja	20	10
W_d	Ancho de la calle	9.8	4.9
L_{db}	Largo de la batea	28	14
H_m	Altura de medición	2	1
β	Ángulo de UCMA (Artefacto de Material Consolidado)	40°	40°
H_{cm}	Altura de UCMA dentro de la batea	19	9.5
H_{ucm}	Altura del material no consolidado por sobre la estructura rígida	3.6	1.8

*Excepto en el ángulo del material y/o del artefacto.

b) Parámetros

- Masa de material fino expulsado desde un punto hasta el punto contrario a través del pilar mayor (**M**).
- Distancia alcanzada por el material fino dentro de la zanja y medida a una altura específica desde el suelo (**D**). Se utiliza sólo un H_m .
- Ángulo final de deposición del material fino dentro de la zanja (ϕ).
- Velocidad experimental del material al fluir dentro de la zanja, obtenida por análisis de video (**R**).
- Tamaño (**S_c**) y Distancia (**D_c**) desde el punto de extracción de partículas gruesas desplazadas y/o expulsadas por el material fino.
- Probabilidad de tener rocas expulsadas y Probabilidad de tener rocas dentro de la zanja (desplazadas).

Para el caso de S_c y D_c se tienen las siguientes consideraciones:

- Consideraciones para el Tamaño, S_c :

Los tamaños de las rocas son obtenidos como el largo de las partículas en forma paralela a la zanja. Los tamaños a medir son:

- Tamaño de la roca más grande dentro de la zanja (S_{cb}).
- Tamaño de la o las rocas que se encuentren a la máxima distancia desde el punto de extracción y dentro de la zanja (S_{cm}).
- Tamaño de las rocas expulsadas (S_{ce}).

- Consideraciones para la distancia, D_c :

Las distancias de las rocas, medidas desde el punto de extracción hasta el centro de ellas, son obtenidas en dos formatos:

- Distancia alcanzada por la partícula más grande (D_{cb}).
- Máxima distancia alcanzada por cualquier partícula dentro de la zanja (D_{cm}).

VI. Procedimiento experimental

En este subcapítulo se entrega al lector un marco general de los pasos adoptados para realizar cada uno de los ensayos de laboratorio.

i. Procedimiento experimental del grupo 1

El procedimiento experimental del grupo 1 puede resumirse en el esquema de la Figura 30.

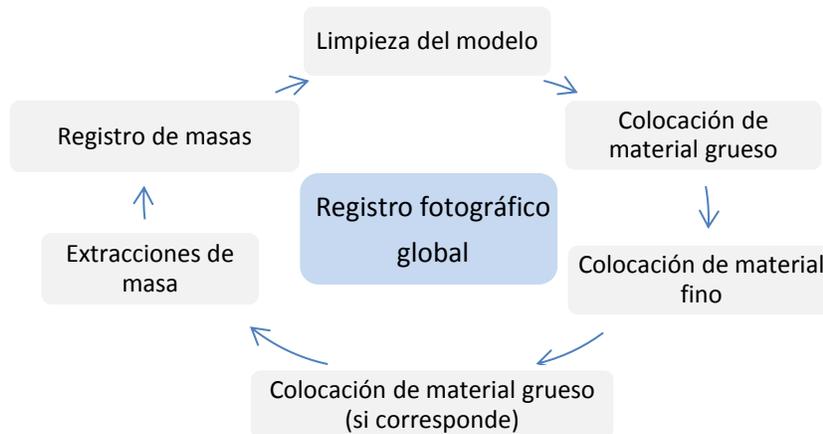


Figura 30: "Procedimiento experimental del grupo 1"

Para más detalles, consultar capítulo de Anexos, subcapítulo de Procedimiento experimental detallado del grupo 1. Este procedimiento se repite 1 vez por cada setup del grupo 1.

ii. Procedimiento experimental del grupo 2

El procedimiento experimental del grupo 2 puede resumirse en el esquema de la Figura 31.

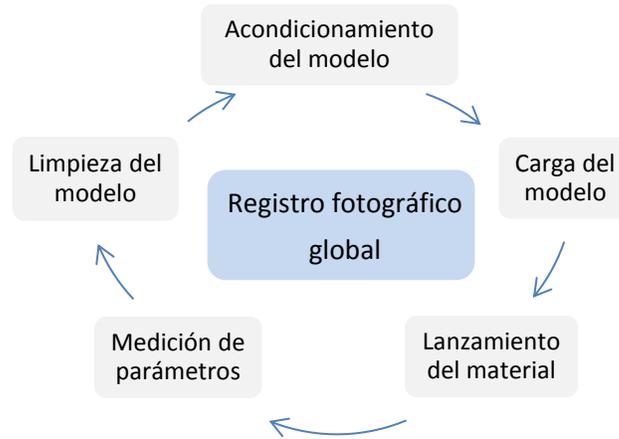


Figura 31: "Procedimiento experimental del grupo 2"

iii. Procedimiento experimental del grupo 3

El procedimiento experimental del grupo 3 puede resumirse en el esquema de la Figura 32.

La actividad de colocación de obstáculo sólo se realiza una vez al comienzo de este grupo.

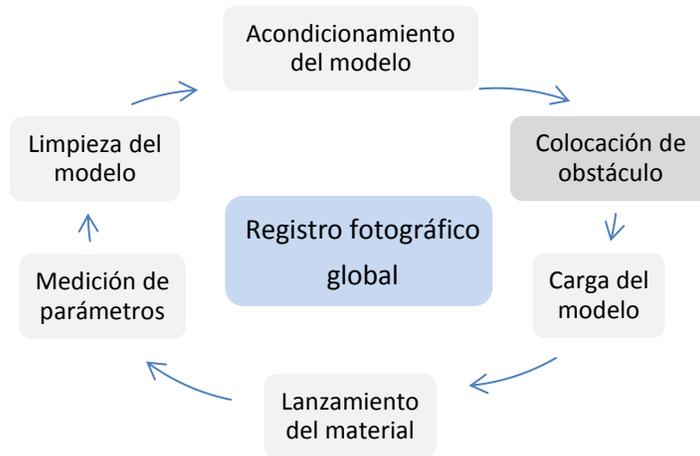


Figura 32: "Procedimiento experimental del grupo 3"

iv. Procedimiento experimental del grupo 4

El procedimiento experimental del grupo 4 puede resumirse en el esquema de la Figura 33.

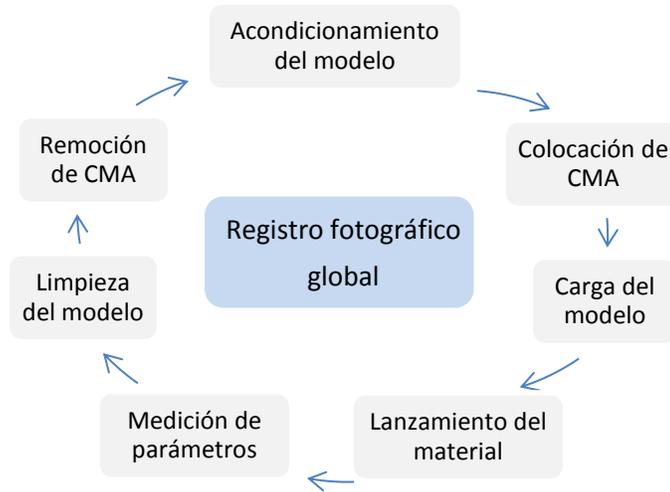


Figura 33: "Procedimiento experimental del grupo 4"

v. Procedimiento experimental del grupo 5

El procedimiento experimental del grupo 4 puede resumirse en el esquema de la Figura 34.



Figura 34: "Procedimiento experimental del grupo 5"

Para más detalles, consultar subcapítulo de [Procedimiento experimental detallado en grupos 2 a 5](#). **Estos procedimientos se repiten 20 veces por setup: 4 veces por cada uno de los 4 valores de la variable H_f más 1 vez por setup para grabación de video** (ver Tabla 5).

VII. Preparación del material

En este subcapítulo se describe la preparación del material, tanto fino como grueso, de una forma general y sin ahondar demasiado en detalles. Una revisión más minuciosa de la preparación del material puede consultarse en los anexos.

i. Preparación del material grueso

El material grueso es el primero en ser tratado, y para lograr este fin se utilizan tres diferentes equipos o grupos de implementos: cajones de clasificación, harnero eléctrico y tamices. En la Figuras 60, 61 y 62 del capítulo de Anexos, subcapítulo de ANEXO C: Preparación de material grueso en forma detallada, se pueden ver estos elementos. En la Tabla 40, ubicada en el subcapítulo antes mencionado, se pueden visualizar las masas retenidas en cada intervalo de tamaño y para cada uno de los tres setups del grupo 1. En la Tabla 41 se muestra el material grueso total utilizado en los grupos experimentales 4 y 5.

Finalmente, en el mismo subcapítulo, se puede leer el procedimiento detallado para la obtención del material grueso.

ii. Preparación del material fino

El material a usar en primera instancia es aquel bajo #8 (ASTM) que no es requerido en el tratamiento del material grueso. En la Tabla 42, ubicada en el subcapítulo ANEXO D: Preparación de material fino en forma detallada, dentro de los Anexos, se visualiza la masa retenida en cada intervalo de tamaño y en función de cada setup experimental del grupo 1, mientras que en la Tabla 43 se visualiza la masa retenida en cada intervalo de tamaño y en función de cada H_f (3 [cm], 5 [cm], 10 [cm] y 15 [cm]), aplicable a los grupos experimentales 2, 3, 4 y 5.

En caso de no completar las masas retenidas utilizando el material remanente del grueso, ya sea en alguno de los setups del grupo 1 o en alguno de los H_f de los demás grupos, se debe utilizar material fresco, cuidando que sea de la misma composición (Q=S). El procedimiento detallado puede consultarse en el subcapítulo antes mencionado.

VIII. Ecuaciones a utilizar en la memoria

Las ecuaciones de este subcapítulo se utilizan principalmente en los Resultados y Análisis de resultados experimentales.

i. Ecuación para el cálculo de la velocidad empírica

$$R = \frac{\text{Distancia}}{100 * \Delta t}$$

Ecuación 1: "Cálculo de velocidad empírica, R"

Dónde: **R**: Velocidad empírica del material al fluir por la zanja [m/s]. **Distancia**: Distancia fija que recorre el material en el video usado para el análisis [cm]. **Δt**: Tiempo que tarda el material en recorrer la distancia seleccionada [s].

Nota: Dado que R es un parámetro que se obtiene del análisis de video, su desviación estándar se calcula comparando los flujos salientes desde los dos puntos de extracción.

ii. Ecuación para el cálculo del momentum lineal

$$Mom = R * M \pm |R * M| * \left(\frac{\sigma(R)}{|R|} + \frac{\sigma(M)}{|M|} \right)$$

Ecuación 2: "Cálculo de momentum lineal, Mom"

Dónde: **Mom**: Momentum lineal del material al fluir por la zanja [kg m/s]. **R**: Velocidad empírica del material [m/s]. **M**: Masa de material utilizada para la obtención de momentum (M o M_p, cuyas diferencias se muestran en el capítulo de Análisis) [kg]. **σ(R)**, **σ(M)**: Desviación estándar de R y M, respectivamente. **|R|**, **|M|**: Valor absoluto de R y M, respectivamente.

Nota: El símbolo ± indica la Desviación estándar de Mom.

iii. Ecuación para el cálculo de la fuerza de arrastre

$$F = \frac{Mom}{\Delta t} \pm \left| \frac{Mom}{\Delta t} \right| * \left(\frac{\sigma(Mom)}{|Mom|} + \frac{\sigma(\Delta t)}{|\Delta t|} \right)$$

Ecuación 3: "Cálculo de fuerza de arrastre, F"

Dónde: **F**: Fuerza de arrastre del material [N]. **Mom**: Momentum lineal del material al fluir por la zanja [kg m/s]. **Δt**: Tiempo que tarda el material en recorrer la distancia seleccionada [s]. $\sigma(\text{Mom})$, $\sigma(\Delta t)$: Desviación estándar de Mom y Δt, respectivamente. **|Mom|**, **|Δt|**: Valor absoluto de Mom y Δt, respectivamente.

Nota: El símbolo ± indica la Desviación estándar de F.

iv. Ecuación para balance de energías sin pérdidas

$$m * g * \Delta h = \frac{1}{2} * m * \Delta [v^2]$$

Ecuación 4: "Transformación entre energías cinética y potencial sin pérdidas"

Dónde: **m**: Masa de una partícula [kg]. **g**: Aceleración de gravedad [m/s²]. **Δh**: Cambio de altura en la cual una partícula experimenta cambio de velocidad [m]. **Δ [v²]**: Cambio de velocidades cuadráticas de una partícula en la componente vertical [m/s].

Nota: Esta ecuación es una idealización del sistema. Las pérdidas se contabilizan más tarde.

v. Ecuación para el cálculo de MP en grupos 2 a 5

$$MP = \left(\text{AnchoG} + 2 * \frac{H_{db}}{\tan(\theta)} \right) * L_{db} * \rho * H_f$$

Ecuación 5: "Cálculo de MP en grupos 2 a 5"

Dónde: **MP**: Masa proyectada sobre la batea [Kg]. **AnchoG**: Ancho de galería [m]. **H_{db}**: Altura de batea. **θ**: Ángulo de batea en pilar menor (63°). **L_{db}**: Largo de batea [m]. **ρ**: Densidad aparente del material [kg/m³]. **H_f**: Altura de FMS (ver variables móviles) [m].

vi. Ecuación para el cálculo de DFM en grupos 2 y 3

$$DFM = \left(H_d * L_{db} * \text{AnchoG} + 2 * \frac{H_d}{\tan \phi} * H_d * \frac{\text{AnchoG}}{2} \right) * \rho$$

Ecuación 6: "Cálculo de DFM para grupo 2 (y 3)"

Dónde: **DFM**: Masa de relleno de la zanja [kg]. **H_d**: Alto de galería (ver variables fijas) [m]. **L_{db}**: Largo de batea (ver variables fijas) [m]. **AnchoG**: Ancho de galería [m]. **φ**: Promedio de ángulos de deposición [°]. **ρ**: Densidad aparente del material [kg/m³].

Nota 1: Esta ecuación también es aplicada al grupo experimental 3 considerando los ángulos de deposición del grupo 2. La implicancia de esto es que la velocidad teórica dentro de la zanja en el grupo 2 es igual a la velocidad teórica en el Punto A del grupo 3.

Nota 2: El promedio de ángulos de deposición para cada H_f se obtiene de acuerdo con los ángulos de deposición en los ensayos de un mismo H_f y además considerando los dos puntos de extracción.

vii. Ecuación para el cálculo de DFM en grupos 4 y 5

$$DFM = \left(\frac{H_d^2}{\tan \phi} + 2 * H_d * \left[L_{ab} - \frac{H_{cm}'}{\tan \beta} \right] + H_d * \left[\frac{1}{2} * L_{ab} - \frac{H_d}{\tan \beta} \right] \right) * \frac{AnchoG}{2} \rho$$

Ecuación 7: "Cálculo de DFM para grupos 4 y 5"

Dónde: **DFM:** Masa de relleno de la zanja [kg]. **H_d :** Alto de galería [m]. **L_{ab} :** Largo de batea [m]. **AnchoG:** Ancho de galería [m]. **ϕ :** Promedio de ángulos de deposición [°]. **ρ :** Densidad aparente del material [kg/m³]. **H_{cm}' :** Altura del artefacto completo. **β :** Ángulo del artefacto equivalente al ángulo de reposo del material granular grueso (40°).

Nota: El promedio de ángulos de deposición para cada H_f se obtiene de acuerdo con los ángulos de deposición en los ensayos de un mismo H_f .

viii. Ecuación para el cálculo de H_{cm}' en grupos 4 y 5

$$H_{cm}' = \begin{cases} H_{cm} & \text{en grupo experimental 4} \\ H_{cm} + H_{ucm} & \text{en grupo experimental 5} \end{cases}$$

Ecuación 8: "Cálculo de H_{cm}' para grupos 4 y 5"

Dónde: **H_{cm} :** Altura del artefacto con material rígido. **H_{ucm} :** Altura del material no consolidado por sobre el artefacto.

ix. Ecuación para el cálculo de disminución de energía

$$Pérdidas de energía = 100 * \left(1 - \frac{v_{exp}^2}{v_{teo}^2} \right)$$

Ecuación 9: "Disminución de energía según diferencia de velocidad"

Dónde: **v_{exp} :** Velocidad experimental [m/s]. **v_{teo} :** Velocidad teórica [m/s].

CAPÍTULO 5:

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se entregan los resultados de los parámetros que se busca observar en cada uno de los grupos. La discusión de estos valores se realiza en el capítulo de Análisis de resultados.

I. Parámetros observados en el grupo experimental 1

El resultado más importante de este grupo experimental es que no se registraron eventos de *Inrush of fines*. No obstante, un evento asociado al setup 3 sí permite tener nociones acerca del mecanismo de estos fenómenos.

i. Masa y volumen de cada extracción con palas mecanizadas

En el capítulo de Anexos, subcapítulo de ANEXO E: Extracto de planilla de registro en grupo 1, se muestran extractos de los registros de masas extraídas por cada setup experimental. En la Tabla 9 se muestran las estadísticas básicas de las masas extraídas, así como también el volumen asociado, considerando una densidad aparente de $1.56 \text{ [g/cm}^3\text{]}$.

Tabla 9: "Estadísticas básicas de masa y volumen extraído por baldada"

Setup experim.	Cantidad de extracciones	Promedio masa extraída [g]	Des. Est. Masa extraída [g]	Promedio volumen extraído [cm ³]	Des. Est. Volumen extraído [cm ³]
1	350	125.3	16	80	10.2
2	450	115.4	14.7	74	9.4
3	200	88	19	56.4	12

El objetivo principal de estos resultados es mostrar que el protocolo de extracción llevado a cabo se ajusta a una extracción común en minería, representando un rango de 10.4 [ton] (setup 1) a 15.7 [ton] (setup 3) a escala real.

ii. Aparición de finos en el punto habilitado

Para el caso del setup 1, el material fino aparece en el punto habilitado entre las extracciones N°40 y N°45. Para el caso del setup 2, el material fino aparece en el punto habilitado entre las extracciones N°100 y N°105. Finalmente, para el caso del setup 3, el material fino aparece entre las extracciones N°30 y N°35.

A fin de comparar los tres setups, se presentan en esta página una serie de fotografías. En la Figura 35 se muestra la extracción N°40 del setup 1, en la Figura 36 se muestra la extracción N° 100 ligada al setup 2, y en la Figura 37 se exhibe la extracción N°30 asociada al setup 3.

iii. Casos especiales

En la extracción N°50 del setup 3, posterior a la aparición de material fino que sucede en la extracción N°30, ocurre una entrada abrupta de material fino, desplazando en parte al material grueso más superficial de la pila. Este registro se muestra en la Figura 38.

Este evento de *Entrada abrupta de finos* **no es catalogado como *Inrush of fines*** en el sentido dado en el capítulo de Introducción, sin embargo, las observaciones que se generan sirven como referencia para los setups de los grupos siguientes.



Figura 35: "Aparición de material fino en setup 1, ext. 40"



Figura 36: "Aparición de material fino en setup 2, ext. 100"



Figura 37: "Aparición de material fino en setup 3, ext. 30"



Figura 38: "Caso especial en setup 3, ext. 50"

II. Parámetros observados, momentum lineal y fuerza de arrastre del grupo 2

En este subcapítulo, al igual que en los siguientes, se establece una división por cada resultado del grupo, esto es parámetros, momentum lineal y fuerza de arrastre.

i. Parámetros observados

En la Tabla 10 se muestran los valores tomados por los parámetros observados del grupo 2, los cuales están en función de H_f ("Altura de material fino suspendido"). Cabe recordar que los valores promedio y las desviaciones estándares provienen de los **20 ensayos** realizados en este grupo: 16 ensayos para medir M , ϕ y D , y 4 ensayos para medir R .

Tabla 10: "Valores de parámetros observados en grupo 2"

Parámetros		$H_f = 3$ [cm]	$H_f = 5$ [cm]	$H_f = 10$ [cm]	$H_f = 15$ [cm]
Promedio M [g]		0.8	25.6	39.4	42.5
D. Estánd. M [g]		1.4*	11.3	11.4	8.4
Promedio R [m/s]		2.6	2.4	2.6	3.6
D. Estánd. R [m/s]		0.6	0.2	0.6	0.8
$H_m = 4.75$ [cm]	Promedio ϕ [°]	27	30	32	34
	D. Estánd. ϕ [°]	1.3	1	1.4	0.5
	Promedio D [cm]	4.9	6.3	6.1	5.9
	D. Estánd. D [cm]	0.3	0.1	0.2	0.1
$H_m = 2$ [cm]	Promedio ϕ [°]	16	21	23	24
	D. Estánd. ϕ [°]	1.5	0.5	0.6	0.8
	Promedio D [cm]	13.4	13.1	12.2	12.1
	D. Estánd. D [cm]	2.3	1.2	1	0.7

*Los casos negativos se discuten en el Análisis.

En el caso de R ("velocidad experimental"), se utiliza la Ecuación 1.

En las Figuras 63 – 66 ubicadas en el capítulo de Anexos, subcapítulo de ANEXO F: Otros resultados del grupo 2 (condiciones finales), se entregan fotografías representativas de las condiciones finales de los ensayos realizados en este grupo.

Sólo en este grupo experimental se utilizan dos valores para el parámetro H_m (4.75 [cm] y 2 [cm]), el cual representa la altura desde del suelo a la cual se miden tanto D [cm] como ϕ [°]. En los siguientes grupos experimentales (Grupos 4 y 5) se utiliza un único valor para el parámetro H_m : 2 [cm] a escala de laboratorio.

ii. Momentum lineal (Mom)

Si se considera el promedio y la desviación de la masa expulsada hasta el punto contrario y el promedio y la desviación de la velocidad experimental, se puede obtener el momentum lineal asociado al frente del material que avanza por la zanja, utilizando para ello la Ecuación 2.

En base a lo anterior se tienen los resultados de la Tabla 11.

Tabla 11: "Momentum lineal del material expulsado en el grupo 2"

H_f [cm]	Promedio Momentum lineal [Kg m/s]	D.Estánd. Momentum lineal [Kg m/s]
3	0.002	0.004
5	0.060	0.031
10	0.100	0.053
15	0.153	0.065

iii. Fuerza de arrastre (F)

De acuerdo a la Ecuación 3, F depende del Momentum lineal (Mom) y de la Diferencia de tiempo en la cual es calculada la velocidad empírica según el análisis de video (Δt).

De modo de hacer uso de dicha ecuación, en la Tabla 12 se muestran los promedios y las desviaciones estándares de las diferencias de tiempo en cada H_f . Usando la Ecuación 3 y los resultados de las Tablas 11 y 12, se construye la Tabla 13 la cual muestra la Fuerza de arrastre del material (F).

Tabla 12: "Diferencia de tiempo medidas en el análisis de video en grupo 2"

H_f [cm]	Promedio Δt [s]	D.Estánd. Δt [s]
3	0.059	0.009
5	0.065	0.002
10	0.061	0.012
15	0.044	0.012

Tabla 13: "Fuerza de arrastre del material fino en grupo 2"

H_f [cm]	Promedio F [N]	D.Estánd F [N]
3	0.037	0.078
5	0.919	0.516
10	1.646	1.228
15	3.477	2.506

III. Parámetros observados, momentum lineal y fuerza de arrastre del grupo 3

i. Parámetros observados

En la Tabla 14 se muestran los valores tomados por los parámetros observados del grupo 3 y que están en función de H_f . Al igual que en el Grupo 2, se realizan en total **20 ensayos**.

Tabla 14: "Valores de parámetros observados en grupo 3"

Parámetros	$H_f = 3$ [cm]	$H_f = 5$ [cm]	$H_f = 10$ [cm]	$H_f = 15$ [cm]
Promedio M [g]	0	0	6.3	9.4
D. Estánd. M [g]	0	0	2.3	5
Promedio M_p [m/s]	18.1	138.8	108.1	118.8
D. Estánd. M_p [m/s]	14.9	31.6	17.1	19
Promedio R [m/s]	1.2	1.4	1.6	2
D. Estánd. R [m/s]	0.2	0.3	0	0.1
Promedio D [cm]	0	15.4	14.3	14.1
D. Estánd. D [cm]	0	0.4	0.5	0.3
Probabilidad de D [%]*	0	100	50	50
Promedio H_{mb} [cm]	2	6.5	8.5	9
D. Estánd. H_{mb} [cm]	1.4	0.7	0.7**	0.7**

*No en todos los casos D se pudo medir, y esto se debe a la presencia del pretil.

**En estos casos el material sobrepasó el límite superior del modelo.

En las Figuras 67 – 74 ubicadas en el subcapítulo de ANEXO G: Otros resultados del grupo 3 (condiciones finales), dentro de los Anexos, se entregan fotografías representativas de las condiciones finales de los ensayos realizados en este grupo.

ii. Momentum lineal (Mom)

Si se considera el promedio y la desviación de la masa expulsada hasta el punto contrario y el promedio y la desviación de la velocidad experimental, se puede obtener el momentum lineal asociado al frente del material que avanza por la zanja, utilizando para ello la Ecuación 2. En base a lo anterior se tienen los resultados de la Tabla 15.

Tabla 15: "Momentum lineal de material expulsado en grupo 3"

H_f [cm]	Promedio Momentum lineal [Kg m/s]	D.Estánd. Momentum lineal [m/s]
3	0	0
5	0	0
10	0.01	0
15	0.02	0.01

Por otra parte, el momentum lineal también puede ser calculado en base a la masa de material que sobrepasa el obstáculo. Esta masa, si bien, no llega al punto de extracción contrario, **sí puede alcanzar la misma velocidad** que dicho material. Estos resultados (utilizando **M_p**: Masa pasante del obstáculo, y **R**: velocidad empírica) se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16: "Momentum lineal de material retenido en la zanja en grupo 3"

H _f [cm]	Promedio Momentum lineal [Kg m/s]	D.Estánd. Momentum lineal [Kg m/s]
3	0.02	0.02
5	0.19	0.08
10	0.16	0.02
15	0.22	0.04

iii. Fuerza de arrastre del material (F)

A fin de usar la Ecuación 3, en la Tabla 17 se muestran los promedios y las desviaciones estándares de las diferencias de tiempo en los grupos experimentales. Usando la Ecuación 3 y los resultados de las Tablas 15, 16 y 17, se construye la Tabla 18 la cual muestra la Fuerza de arrastre del material (F).

Tabla 17: "Diferencia de tiempo medidas en el análisis de video en grupo 3"

H _f [cm]	Masa expulsada		Masa pasante	
	Promedio Δt [s]	D.Estánd. Δt [s]	Promedio Δt [s]	D.Estánd. Δt [s]
3	0.069	0.01	0.069	0.01
5	0.058	0.01	0.058	0.01
10	0.049	0	0.049	0
15	0.040	0.003	0.040	0.003

Tabla 18: "Fuerza de arrastre del material fino en grupo 3"

H _f [cm]	Masa expulsada		Masa pasante	
	Promedio F [N]	D.Estánd. F [N]	Promedio F [N]	D.Estánd. F [N]
3	0	0	0.304	0.359
5	0	0	3.349	2.086
10	0.202	0.078	3.293	0.550
15	0.463	0.318	5.401	1.553

IV. Parámetros observados, momentum lineal y fuerza de arrastre del grupo 4

i. Parámetros observados

En la Tabla 19 se muestran los valores tomados por los parámetros observados del grupo 4 y que están en función de H_f . Al igual que en el Grupo 2, se realizan en total **20 ensayos**.

Tabla 19: "Valores de parámetros observados en grupo 4"

Parámetros	$H_f = 3$ [cm]	$H_f = 5$ [cm]	$H_f = 10$ [cm]	$H_f = 15$ [cm]
Promedio M [g]	6.3	38.8	57.5	71.3
D. Estánd. M [g]	2.5	6.3	5	2.5
Promedio D [cm]	16.8	12.3	11.1	11
D. Estánd. D [cm]	1.2	0.6	0.3	0.1
Promedio R [m/s]	1.9	2	2.7	3
D. Estánd. R [m/s]*	0	0	0	0
Promedio ϕ [°]	17	24	27	30
D. Estánd. ϕ [°]	1	1	0.5	0.5

*Debido a que se realizó sólo un video por H_f y además se tuvo un punto boqueado, sólo se tiene una medición de velocidad experimental, sin desviación.

En las Figuras 75 - 82 ubicadas en el capítulo de Anexos, subcapítulo de ANEXO H: Otros resultados del grupo 4 (condiciones finales), se entregan fotografías representativas de las condiciones finales de los experimentos realizados en este grupo.

ii. Momentum lineal (Mom)

Si se considera el promedio y la desviación de la masa expulsada hasta el punto contrario y el promedio de la velocidad experimental (ésta no tiene desviación), se puede obtener el momentum lineal asociado al frente del material que avanza por la zanja, utilizando para ello la Ecuación 2. En base a lo anterior se tienen los resultados de la Tabla 20.

Tabla 20: "Momentum lineal de material expulsado en grupo 4"

H_f [cm]	Promedio Momentum lineal [Kg m/s]	D.Estánd. Momentum lineal [m/s]
3	0.012	0.004
5	0.078	0.012
10	0.155	0.014
15	0.214	0.008

iii. Fuerza de arrastre del material (F)

De acuerdo a la Ecuación 3, F depende del Momentum lineal (Mom) y de la Diferencia de tiempo en la cual es calculada la velocidad empírica (Δt).

De modo de hacer uso de dicha ecuación, en la Tabla 21 se muestran los promedios y las desviaciones estándares de las diferencias de tiempo según H_f . Usando la Ecuación 3 y los resultados de las Tablas 20 y 21, se construye la Tabla 22 la cual muestra la Fuerza de arrastre del material (F).

Tabla 21: "Diferencia de tiempo medidas en el análisis de video en grupo 4"

H_f [cm]	Promedio Δt [s]	D.Estánd. Δt [s]*
3	0.101	0
5	0.099	0
10	0.073	0
15	0.066	0

*Debido a que se realizó sólo un video por H_f y además se tuvo un punto boqueado, sólo se tiene una medición de velocidad experimental y sólo un Δt , sin desviación.

Tabla 22: "Fuerza de arrastre del material fino en grupo 4"

H_f [cm]	Promedio F [N]	D.Estánd. F [N]
3	0.118	0.047
5	0.783	0.127
10	2.127	0.185
15	3.239	0.114

V. Parámetros observados, momentum lineal y fuerza de arrastre del grupo 5

i. Parámetros observados

En la Tabla 23 se muestran los valores tomados por los parámetros observados del grupo 5 y que están en función de H_f . Al igual que en el Grupo 2, se realizan en total **20 ensayos**.

Tabla 23: "Valores de parámetros observados en grupo 5"

Parámetros	$H_f = 3$ [cm]	$H_f = 5$ [cm]	$H_f = 10$ [cm]	$H_f = 15$ [cm]
Promedio M [g]	3.8	16.3	26.3	38.8
D. Estánd. M [g]	2.5	4.8	4.8	2.5
Promedio D [cm]	13.6	11.5	10.8	11
D. Estánd. D [cm]	1.3	1	0.3	0
Promedio R [m/s]	2.4	2.9	4	4.1
D. Estánd. R [m/s]*	0	0	0	0
Promedio ϕ [°]	17	29	31	31
D. Estánd. ϕ [°]	0.8	1	1	0.8
Promedio S_{cb} [cm]	2.8	2.7	2.9	3.3
D. Estánd. S_{cb} [cm]	0.3	0.3	0.3	0.5
Promedio S_{cm} [cm]	2	2	1.8	1.4
D. Estánd. S_{cm} [cm]	1.3	0.9	0.6	0.8
Promedio S_{ce} [cm]	-	0.5	1	0.8
D. Estánd. S_{ce} [cm]	-	0	0	0.4
Promedio D_{cb} [cm]	22.7	20.7	30.5	20.8
D. Estánd. D_{cb} [cm]	11.6	4.7	8.5	5.4
Promedio D_{cm} [cm]	25.3	24.3	35.5	31.8
D. Estánd. D_{cm} [cm]	9.2	3.8	5.8	8.1
Probabilidad rocas dentro de zanja [%]	75	75	100	100
Probabilidad rocas expulsadas [%]	0	25	50	50

*Debido a que se realizó sólo un video por H_f y además se tuvo un punto boqueado, sólo se tiene una medición de velocidad experimental, sin desviación.

S_c y D_c son parámetros exclusivos de este grupo y que lo diferencian de los grupos restantes. S_c se refiere al tamaño y D_c a la distancia que alcanzan las partículas gruesas. Ambas utilizan otro **subíndice: "sub" b**: la partícula más grande, **"sub" m**: la partícula que alcanza la máxima distancia dentro de la zanja, y **"sub" e** (sólo para S_c): la o las partículas expulsadas.

En las Figuras 83 – 90 ubicadas en el capítulo de Anexos, subcapítulo de ANEXO I: Otros resultados del grupo 5 (condiciones finales), se entregan fotografías representativas de las condiciones finales de los experimentos realizados en este grupo.

ii. Momentum lineal (Mom)

Si se considera el promedio y la desviación de la masa expulsada hasta el punto contrario y el promedio de la velocidad experimental (ésta no tiene desviación), se puede obtener el momentum lineal asociado al frente del material que avanza por la zanja, utilizando para ello la Ecuación 2. En base a lo anterior se tienen los resultados de la Tabla 24.

Tabla 24: "Momentum lineal de material expulsado en grupo 5"

H_f [cm]	Promedio Momentum lineal [Kg m/s]	D.Estánd. Momentum lineal [m/s]
3	0.009	0.006
5	0.047	0.014
10	0.105	0.019
15	0.159	0.010

iii. Fuerza de arrastre del material (F)

En la Tabla 25 se muestran los promedios y las desviaciones estándares de las diferencias de tiempo en los grupos experimentales. Usando la Ecuación 3 y los resultados de las Tablas 24 y 25, se construye la Tabla 26 la cual muestra la Fuerza de arrastre del material (F).

Tabla 25: "Diferencia de tiempo medidas en el análisis de video en grupo 5"

H_f [cm]	Promedio Δt [s]	D.Estánd. Δt [s]*
3	0.082	0
5	0.067	0
10	0.05	0
15	0.048	0

*Debido a que se realizó sólo un video por H_f y además se tuvo un punto boqueado, sólo se tiene una medición de velocidad experimental, sin desviación.

Tabla 26: "Fuerza de arrastre del material fino en grupo 5"

H_f [cm]	Promedio F [N]	D.Estánd. F [N]
3	0.110	0.073
5	0.703	0.207
10	2.100	0.383
15	3.477	2.506

CAPÍTULO 6:

ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se busca dar interpretación de los resultados obtenidos, así como de realizar comparaciones entre algunos de los parámetros observados. En este capítulo también se pretende llevar los resultados a escala de laboratorio hacia la escala mina, de modo de obtener conclusiones adecuadas y que sirvan para lidiar con las consecuencias de eventos de *Inrush of fines*.

I. Análisis de los resultados exclusivos del grupo 1

i. Aparición de finos en punto de extracción

Como se puede desprender del capítulo de Resultados, la aparición de finos está fuertemente condicionada por la configuración inicial.

Como bien es sabido a partir del trabajo de Irribarra (Irribarra, 2014) y Arancibia (Arancibia, 2020), los materiales finos tienden a fluir preferentemente por los intersticios de las partículas gruesas en especial cuando éstas se mueven en forma horizontal. Sin embargo, cuando existe una determinada carga sobre un bolsón de partículas finas, dicha conclusión parece no ser del todo correcta y esto se pudo constatar en el setup 2 de este grupo experimental.

Una posible explicación de este fenómeno puede estar ligada a la carga que el material grueso impone sobre el fino, agregando una componente extra de peso sobre cada partícula fina, y por lo tanto, haciendo más difícil que éstas migren en forma vertical. Esta componente extra de peso es **vertical** en el contacto del fino con la capa de grueso superior, pero en el contacto del fino con la capa de grueso inferior tiene **más de un sentido** en el espacio debido a la transferencia de esfuerzos entre las partículas finas.

Lo anterior debe verse reflejado en como fluye el fino, existiendo un flujo focalizado central en el setup 1 y un flujo más distribuido en el setup 2. Esto puede verse en la Figura 39 por parte del setup 1 y la Figura 40 del setup 2. En estas figuras se puede ver claramente como el fino fluye de una u otra forma.



Figura 39: "Flujo focalizado en setup 1"



Figura 40: "Flujo distribuido en setup 2"

ii. Caso especial de flujo de fino

En la extracción N°50 del setup 3 se tuvo una entrada abrupta de material fino, y que no es catalogada como *Inrush of fines*. Dicha entrada abrupta se inicia como un flujo por sobre las partículas más gruesas y tiene la fuerza suficiente para arrastrar unas cuantas de estas partículas. El material mezclado tuvo un alcance de 15 [cm] desde el punto de extracción a escala de laboratorio, lo cual equivale a 7.5 [m] a escala mina. Dicha distancia es el doble de la longitud de la pila de extracción en condiciones normales.

iii. Conclusiones preliminares del grupo experimental 1

- **La interacción de materiales de diferentes granulometrías, de la forma abordada en este estudio, no permite la formación de *Inrush of fines*.** Esta conclusión es la más importante de los tres setups iniciales, en los cuales se observa que dicha interacción impide el libre flujo de material fino. Por esta razón, y a fin de generar de forma artificial un *Inrush of fines* se debe dejar de utilizar material grueso en contacto con fino.
- **Se debe utilizar una fuente de energía adicional.** Esta conclusión está ligada con la observación anterior y además se desconoce si la sola presencia del material fino es suficiente para la generación de un *Inrush*.
- Como recomendación de trabajo futuro, se podría evaluar si la presencia de material de baja granulometría en ausencia de material grueso y con un protocolo de extracción adecuado, propicia la formación de un *Inrush of fines*. Esta configuración no es implementada en este estudio y representa una arista interesante para la investigación.

II. Análisis de los resultados exclusivos del grupo 2

i. Uso de diferentes H_m para las mediciones de D y ϕ

De acuerdo a los resultados de este grupo (ver [Tabla 10](#)), la modificación de H_m (que representa la “altura de medición desde el suelo”) incide en el resultado de los valores de D y ϕ (“Distancia” y “Ángulo del material depositado”, respectivamente). Como es de esperar, para un mayor H_m , D disminuye y ϕ aumenta. Esto se debe a la forma pseudo parabólica o exponencial del material al depositarse.

Entre los dos valores de H_m para medir D y ϕ se opta por utilizar, desde este instante en adelante e incluyendo los grupos experimentales 3, 4 y 5, un valor de H_m igual a 2 [cm] o 1 [m] a escala real. Esta altura es adecuada en el caso de que una persona tome muestras dentro de una galería de producción, luego de haber ocurrido el fenómeno.

ii. Casos negativos de Masas expulsadas (M)

De acuerdo con los resultados de la [Tabla 10](#), para el caso de $H_f = 3$ [cm] (es decir, una “altura de 3 [cm] de fino suspendido sobre el sistema de compuertas”), se tiene que el promedio de masa expulsada corresponde a 0.8 [g] con una desviación estándar de 1.4 [g]. Lo anterior equivale a que posibles resultados negativos pueden aparecer. En rigor, no pueden existir resultados negativos para esta variable a pesar de lo que matemáticamente se obtenga. Las razones de por qué se obtienen estos resultados son:

- **Una gran variabilidad de las masas expulsadas.** Un gran número de masas expulsadas de 0 [g] de acuerdo al registro del equipo de medición, y un bajo número de masas sobre los 5 [g].
- **El equipo utilizado para medir las masas expulsadas tiene una precisión de 5 [g] siendo ésta también la masa mínima detectable.** Esto incide en los resultados, dado que muchas masas expulsadas existen y son visibles, pero al momento de pesarlas el equipo registra 0 [g]. Como recomendación, se debe usar un equipo con mayor precisión para este tipo de experimentos: una precisión de 0.5 [g] o 1 [g] sería adecuada.

iii. Comportamiento de R (velocidad empírica) según H_f

En este grupo experimental, R (“velocidad experimental”) muestra un comportamiento extraño en función de H_f (“altura de material suspendido”). De forma de facilitar el análisis, se muestra la Figura 41.

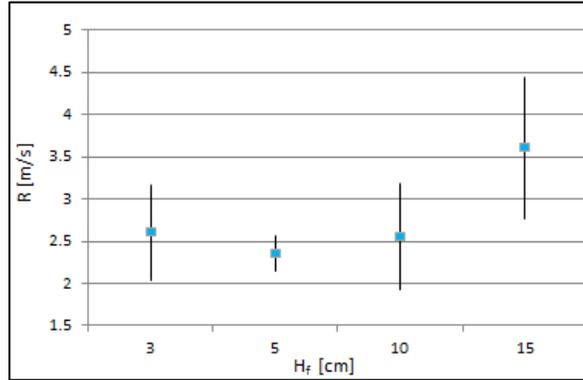


Figura 41: "R en función de H_f en el grupo experimental 2"

A partir de la Figura 41 se puede desprender que R muestra un comportamiento parabólico según H_f con un mínimo cercano a $H_f = 5$ [cm]. Las razones de por qué R tiene este comportamiento pueden resumirse en:

- Para $H_f = 3$ [cm], el material depositado **no alcanza la visera del punto de extracción**, de modo que el material puede entrar libremente en la zanja.
- Para $H_f = 5$ [cm], el material depositado **sí alcanza la visera del punto de extracción**, de modo que la visera se transforma en un obstáculo para la libre circulación del flujo.
- A pesar de que la visera se comporta como un obstáculo en los ensayos con $H_f = 5$ [cm] y superiores, la cantidad de masa suspendida y su aporte en energía potencial opacan el efecto de la visera y permiten el aumento de R para mayores H_f (ver Figura 41).

La interacción visera – material se demuestra en el perfil del material al depositarse y al finalizar el ensayo. Lo anterior puede visualizarse en las Figuras 63, 64, 65 y 66 en el subcapítulo de ANEXO F: Otros resultados del grupo 2 (condiciones finales) de los Anexos, y a modo de ejemplo se presenta a continuación la Figura 63 (H_f de 3 [cm]) y la Figura 66 (H_f de 15 [cm]).



Figura 63: " Vista lateral de batea en grupo 2 para $H_f = 3$ [cm]"



Figura 66: " Vista lateral de batea en grupo 2 para $H_f = 15$ [cm]"

Esta observación tiene una fuerte implicancia en una operación real, ya que la velocidad con que el material sale expulsado es una de las principales fuentes de riesgo para las personas y los equipos. Se puede establecer, entonces, que tanto pequeñas como grandes masas colgadas a gran altura son igualmente perjudiciales, y los rasgos geométricos de las excavaciones influirán notablemente en su impacto.

iv. Comparación de velocidades empíricas y teóricas

La "velocidad experimental" (R) de este grupo se entrega en la [Tabla 10](#) y el siguiente paso es compararla con la velocidad que tiene el material al fluir dentro de la zanja, desde un punto de vista teórico y sin considerar ninguna pérdida de energía. El fin último de esta comparación es determinar el efecto del roce, de los rebotes y de los golpes del material al caer y luego fluir. **Para obtener la velocidad teórica de flujo se toman los siguientes supuestos:**

- La velocidad dentro de la zanja puede ser aproximada a la velocidad final en caída libre.
- En primera instancia, no se consideran las pérdidas de energía por roce, rebotes y golpes.
- No se considera el efecto de la reducción de área a través de la batea.
- No se considera el efecto de la interacción entre la visera de la zanja y el material al depositarse, la cual se sabe actúa como un obstáculo.

Una primera comparación entre velocidad teórica y experimental se puede realizar utilizando la Ecuación 4. Si esta ecuación se usa directamente, se tiene la comparación entre velocidades exhibida en la Figura 42. La velocidad teórica tiene una ligera variación dada por los cambios en H_f (cambios en altura, y desde luego en cantidad, de material suspendido).

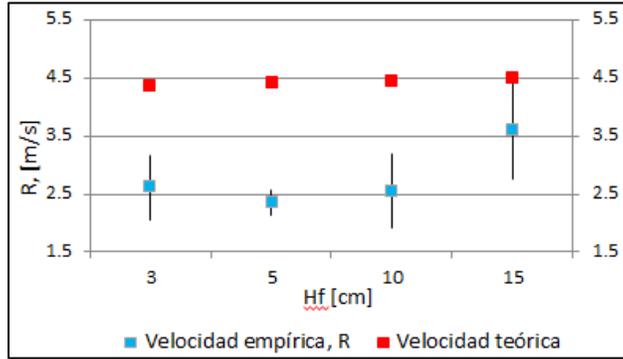


Figura 42: "Comparación directa entre velocidad teórica y velocidad experimental"

Sin embargo, se puede constatar que gran parte de la masa suspendida (FMS) no entra en la zanja al momento de lanzar el material, y por esta razón la comparación entre ambas velocidades debe tener inserta dicha consideración.

La solución tomada consiste en comparar la velocidad experimental (R) con una velocidad teórica que esté asociada exclusivamente a la masa entrante a la zanja. Además se determina que la masa del material que está por fuera de la proyección de la batea no aporta energía al sistema, y por tanto, no se ve reflejada en la velocidad.

Dado lo anterior, se introducen dos conceptos: "Masa proyectada sobre la batea" (**MP**) y "Masa de relleno de la zanja" (**DFM**), ambos exhibidos en la Figura 43. Acto seguido se determina la razón entre ambas (DFM/MP) la cual se denomina "Factor de relleno" (FF). Los valores de MP, DFM y FF en función de H_f ("altura de material suspendido") se muestran en la Tabla 27. Los cálculos de MP y DFM se realizan en base a la Ecuación 5 y Ecuación 6, respectivamente.

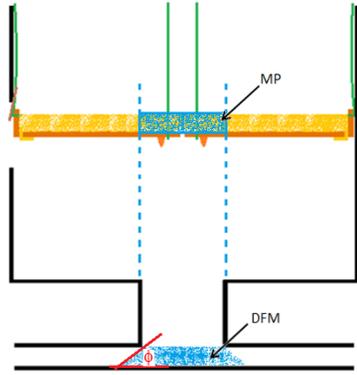


Figura 43: "Representación de MP y DFM para grupo experimental 2"

Tabla 27: "Valores de MP, DFM y FF en el grupo 2"

H_f [cm]	MP [Kg]	DFM [Kg]*	FF
3	3.5	6.6	1.89
5	5.8	6.1	1.04
10	11.6	5.8	0.5
15	17.4	5.7	0.33

*Se calcula a partir del promedio de Ángulos finales de deposición (ϕ) considerando $H_m = 2$ [cm]. La explicación de por qué el ángulo de deposición crece con H_f se entrega en un subcapítulo posterior haciendo uso del concepto de **Componente de caos**.

Considerando los valores de FF de la Tabla 27 y las observaciones que se realizan en los experimentos, se puede desprender que:

- Para $H_f = 3$ [cm], MP es mucho más pequeña de DFM ($FF > 1$), por lo tanto, parte de DFM es material que rebota desde las compuertas y luego aterriza sobre MP después de su deposición dentro de la zanja.
- Para $H_f = 5$ [cm], MP y DFM son similares ($FF \approx 1$).
- Para $H_f = 10$ [cm] y $H_f = 15$ [cm], MP es mucho más grande que DFM ($FF < 1$), por lo tanto parte de MP no entrará en la zanja.

Las observaciones anteriores tienen un rol crítico en la velocidad del material dentro de la zanja, porque:

- Si MP es menor que o igual que DFM, la energía potencial inicial asociada a MP puede ser **completamente transformada en energía cinética** y luego como velocidad dentro de la zanja.
- Si MP es mayor que DFM, la energía potencial inicial de MP debe transformarse en energía cinética para DFM, por lo tanto, la velocidad de DFM debe ser mayor que aquella calculada teórica y directamente.

A partir de lo anterior, se concluye que FF (DFM/MP) tiene un rol importante en la velocidad del material, y por esta razón se obtiene un **"FF transformado" (FFT)** que represente su efecto en la velocidad y éste se entrega en la Tabla 28.

Para lograr lo anterior se modifica la Ecuación 4 y se utiliza: **Energía potencial = masa(MP) x g x h** y **Energía cinética igual a $\frac{1}{2}$ masa(DFM) x v^2** . Con lo anterior, la velocidad teórica de

MP aplicada a DFM sí puede compararse con la velocidad experimental. Esta comparación se muestra en la Figura 44. En esta figura, los cuadrados verdes representan la nueva forma de cálculo para la velocidad teórica, considerando FFT.

Tabla 28: "FFT del grupo 2"

H_f [cm]	FF	FFT
3	1.89	1
5	1.04	1
10	0.5	0.5
15	0.33	0.3

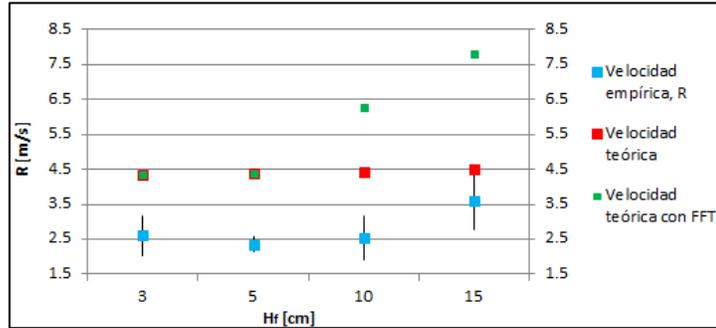


Figura 44: "Comparación de velocidad teórica y empírica en grupo 2"

Teniendo la comparación entre velocidad teórica y empírica, se puede saber cuáles son las pérdidas de energía asociadas al sistema en su conjunto. En la Tabla 29 se muestra la comparación numérica, incluyendo la "Diferencia porcentual de velocidades" (FR).

Tabla 29: "Comparación numérica de velocidades en grupo 2"

H_f [cm]	Velocidad experimental [m/s]	Velocidad teórica con FF [m/s]	FR
3	2.6	4.4	0.6
5	2.4	4.4	0.54
10	2.6	6.3	0.41
15	3.6	7.8	0.46

En base a la Tabla 29, se puede desprender que, en promedio, existe un **50% de disminución de velocidad**, lo cual traducido a energía, significa un **75% de pérdidas de energía** según la Ecuación 9. Estas pérdidas se deben a los efectos de fricción, rebotes y golpes del material con la geometría del modelo.

III. Análisis de los resultados exclusivos del grupo 3

i. Probabilidad de D y casos de $D = 0$

De acuerdo a los resultados en este grupo experimental (ver Tabla 14), algunas mediciones de D son nulas al igual que la probabilidad de D. A modo de recordatorio, **D** es la “distancia, medida desde el punto de extracción, a la cual el material muestra una altura de 2 [cm] desde el suelo”, mientras que la **Probabilidad de D** se calcula de acuerdo a la “cantidad de veces que el material alcanza dicha altura, pero sólo después del centro del pretil y entre repeticiones del mismo H_f ”. Por ejemplo, si se utiliza un $H_f = 5$ [cm] y en dos de las cuatro repeticiones, el material pasa el pretil y alcanza los 2 [cm] desde el suelo, la Probabilidad de D para $H_f = 5$ [cm] es de un 50%.

Los casos de $D = 0$ están ligados a la Probabilidad = 0, es decir, en ninguna de las repeticiones del mismo H_f se logra tener distancias medibles después del pretil, y a la altura solicitada.

El uso de Probabilidad de $D = 0$ (implicando $D = 0$ en los resultados) tiene aplicación directa en minería subterránea. Con los resultados obtenidos se ha podido establecer que para $H_f = 3$ [cm] es prácticamente imposible que el material sobrepase el pretil, mientras que para $H_f = 5$ [cm] o más, es ciento por ciento probable que el material sobrepase dicho obstáculo. Además, para $H_f = 10$ [cm] o 15 [cm] es probable que el material sobrepase el pretil y además muestre una altura desde el suelo de más de 2 [cm].

ii. Masas expulsadas nulas ($M = 0$)

Como se expresa en el análisis del grupo experimental 2, la principal razón de tener masas expulsadas nulas se debe a la escasa precisión del aparato de medición, no obstante en el caso del grupo experimental 3 se suma otra razón. La razón adicional es la imposibilidad del material de alcanzar el punto de extracción contrario tras su interacción con el pretil, especialmente para los bajos H_f .

iii. H_{mb} y material sobresaliente del modelo

Si bien el análisis de video no puede ser mostrado en estas páginas por razones obvias, varias conclusiones pueden ser obtenidas de estas grabaciones, en especial el parámetro H_{mb} (“altura a la cual el material interactúa con el bullnose tras sobrepasar el pretil”). De modo de facilitar el análisis, se presenta la Figura 45.

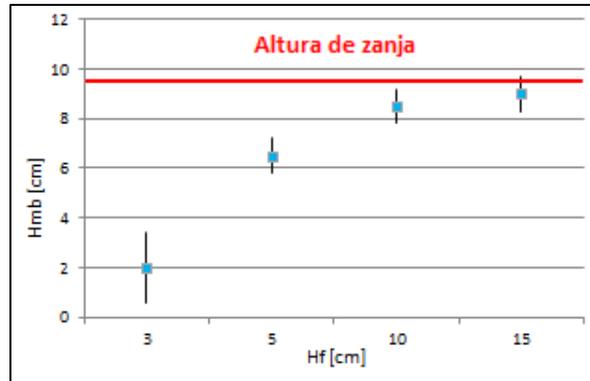


Figura 45: "H_{mb} en grupo experimental 3"

En la Figura 45, H_{mb} muestra variabilidad (barras de desviación estándar) dado que los dos puntos de extracción se encuentran habilitados y limitados por los obstáculos o pretilos.

Según esta figura, en los casos de H_f = 15 [cm] el material puede, eventualmente, sobresalir de los límites del modelo justo en la posición del bullnose. De acuerdo a lo observado en el análisis de video, el material no sobrepasa el modelo justo en la posición del bullnose, **mas éste sí sobrepasa el modelo más allá de esta ubicación**. Esta observación tiene una gran aplicabilidad a escala mina, dado que si un evento de este tipo ocurriera, el material impactaría directamente los sistemas de eléctrico, electrónico y de comunicaciones que habitualmente se colocan en la parte superior de las calles de producción.

En los otros casos (H_f de 3, 5 y 10 [cm]), y de acuerdo al análisis de video, el material alcanza su máxima altitud en el bullnose o dentro de la zanja, por lo cual, ante un evento de esta categoría, los sistemas mencionados anteriormente podrían seguir operativos.

iv. Comparación de velocidades empíricas y teóricas

La comparación que se realiza a continuación es similar a la efectuada en el subcapítulo del Grupo 2, mas se realizan algunos cambios en función de la energía que el material utiliza para ascender hasta el punto más alto del pretil, **y se asume que la velocidad del flujo en el contacto material - pretil es igual a la velocidad en caída libre**: este supuesto es equivalente al supuesto del Grupo 2, en el cual se consideró que la velocidad teórica del flujo dentro de la zanja se podía aproximar a la velocidad teórica en caída libre.

Dado lo anterior, se consideran tres puntos para estudiar dentro de la trayectoria del material. Estos tres puntos son llamados A, B y C, y se esquematizan en la Figura 46. En el

punto A, de acuerdo a los alcances y supuestos, la velocidad teórica se aproxima a la velocidad final en caída libre. En el punto B la velocidad disminuye debido al incremento de la energía potencial (las pérdidas de energía por fricción, rebotes y golpes se cuantifican más adelante). Finalmente, en el punto C el material interactúa con el bullnose a una determinada altura (equivalente a H_{mb} en la Tabla 14).

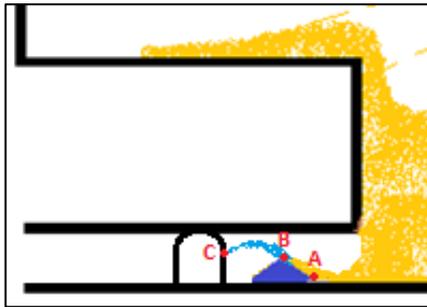


Figura 46: "Puntos A, B y C en el obstáculo (pretil)"

En función de la Ecuación 4, y a la utilización de los conceptos de **MP y DFM**, explicados en el análisis del Grupo 2, se puede obtener la velocidad teórica en cada uno de los tres puntos. Estos resultados se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30: "Velocidad teórica en los puntos A, B y C del grupo 3"

H_f [cm]	v_A [m/s]	v_B [m/s]	v_C [m/s]
3	4.4	4.3	4.3
5	4.4	4.3	4.2
10	6.3	6.2	6.1
15	7.8	7.8	7.7

La velocidad calculada en el punto C se puede denominar **Velocidad teórica usando FFT**, y puede ser comparada directamente con la **Velocidad experimental (R)**. Dicha comparación se realiza en la Figura 47.

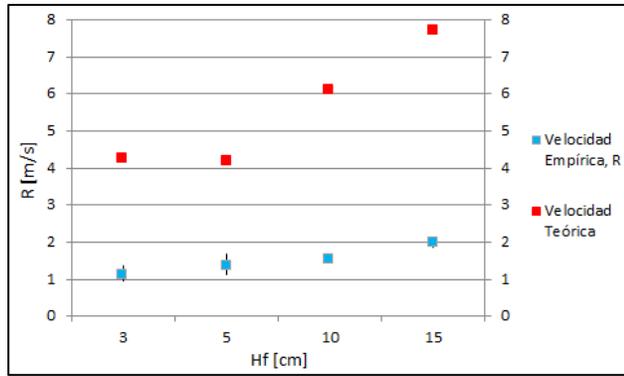


Figura 47: "Comparación de velocidad teórica y empírica en grupo 3"

Teniendo la comparación entre velocidad teórica y empírica, se puede saber cuáles son las pérdidas de energía asociadas al sistema en su conjunto y también aquellas debidas sólo al obstáculo, incluyendo fricción, rebotes y golpes. En la Tabla 31 se muestra la comparación numérica entre las velocidades, incluyendo la "diferencia porcentual de velocidades" (FR).

Tabla 31: "Comparación numérica de velocidades en grupo 3"

H _f [cm]	Velocidad experimental [m/s]	Velocidad teórica con FF [m/s]	FR
3	1.2	4.3	0.72
5	1.4	4.2	0.66
10	1.6	6.1	0.73
15	2	7.7	0.74

En base a la Tabla 31, se puede desprender que existe aproximadamente un **70% de disminución de velocidad**, lo cual traducido a energía, significa un **91% de pérdidas de energía** según la Ecuación 9. Estas pérdidas se deben a los efectos de fricción, rebotes y golpes del material con la geometría del modelo y también debido a la interacción con el pretil.

Dado lo anterior, se puede concluir que el uso del pretil supone un **16% de pérdidas adicionales de energía** por sobre aquellas cuantificadas en el grupo experimental 2.

IV. Análisis de los resultados exclusivos del grupo 4

i. Desviación estándar nula en las velocidades empíricas

Como puede visualizarse en los resultados de este grupo experimental (ver Tabla 19), las velocidades empíricas no tienen desviación estándar y la razón de esto es la configuración o setup experimental. En esta configuración uno de los puntos de extracción se encuentra bloqueado con material compacto (CM) dejando sólo uno de los puntos habilitados, aunque no con toda la sección abierta (ver Figura 20).

Además del hecho de que sólo uno de los dos puntos se encuentra habilitado, sólo se realiza una grabación o video por cada H_f (3 [cm], 5 [cm], 10 [cm] y 15 [cm]), razón por la cual sólo se cuenta con un dato de la velocidad para cada H_f .

ii. Comparación de velocidades teóricas y empíricas

La comparación que se realiza en este apartado es diferente de aquella aplicada para los grupos 2 y 3, porque difiere en la definición del concepto de DFM. MP mantiene su definición como masa proyectada sobre la batea, **mas DFM debe recalcularse** dada la presencia del CMA o Artefacto de Material Consolidado. En la Figura 48 se muestra la nueva definición de ambos conceptos. Luego en la Tabla 32 se muestran sus valores, el cociente (FF) entre ambas y también el cociente corregido (FFT). El cálculo de DFM se realiza en base a la Ecuación 7 y la Ecuación 8.

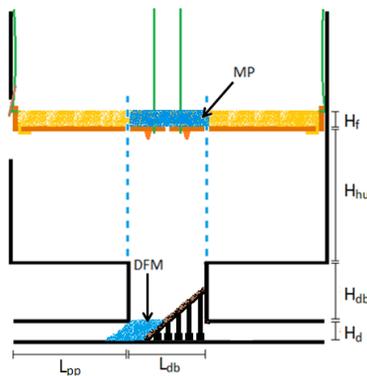


Figura 48: "Representación de MP y DFM en grupo experimental 4"

Tabla 32: "Valores de MP, DFM, FF y FFT del grupo 4"

H_f [cm]	MP [Kg]	DFM [Kg]*	FF	FFT
3	3.5	3	0.87	0.87
5	5.8	2.4	0.41	0.41
10	11.6	2.2	0.19	0.19
15	17.4	2.1	0.12	0.12

*DFM fue calcula en base al promedio de ángulos de reposo (ϕ) de cada H_f .

Utilizando FFT y la Ecuación 4, la velocidad teórica de MP aplicada a DFM sí puede compararse con la velocidad experimental. Esta comparación se muestra en la Figura 49.

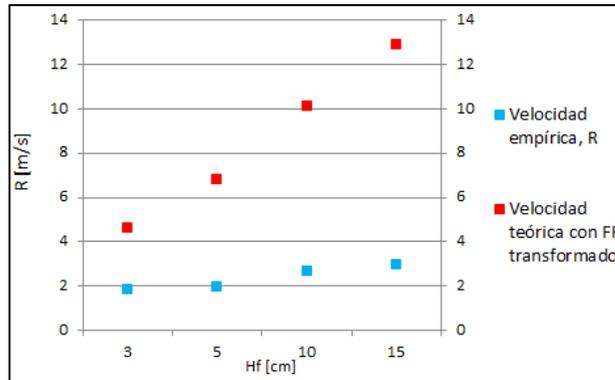


Figura 49: "Comparación de velocidad teórica y empírica en grupo 4"

Teniendo la comparación entre velocidad teórica y empírica, se puede saber cuáles son las pérdidas de energía asociadas al sistema en su conjunto además de la presencia del CMA, incluyendo fricción, rebotes y golpes. En la Tabla 33 se muestra la comparación numérica entre las velocidades, incluyendo la diferencia porcentual de velocidades (FR).

Tabla 33: "Comparación numérica de velocidades en grupo 2"

H _f [cm]	Velocidad experimental [m/s]	Velocidad teórica con FF [m/s]	FR
3	1.9	4.6	0.59
5	2	6.8	0.70
10	2.7	10.1	0.73
15	3	12.9	0.76

En base a la Tabla 33, se puede desprender que, en promedio, existe un **70% de disminución de velocidad**, lo cual traducido a energía, significa un **91% de pérdidas de energía** según la Ecuación 9. Estas pérdidas se deben a los efectos de fricción, rebotes y golpes del material con la geometría del modelo y también debido a la presencia del CMA.

Dado lo anterior, se puede concluir que el uso del CMA supone un **16% de pérdidas adicionales de energía** por sobre aquellas cuantificadas en el grupo experimental 2.

V. Análisis de los resultados exclusivos del grupo 5

i. Desviación estándar nula en las velocidades empíricas

En este grupo experimental (ver Tabla 23), sólo se realiza una grabación por cada H_f y dado que se tuvo uno de los dos puntos bloqueado (esta vez con material no consolidado), sólo se obtiene una medición de la velocidad empírica para cada H_f .

ii. Tamaño de las rocas desplazadas

En primer lugar, se debe precisar que el término “roca” se refiere a aquellas partículas pertenecientes al material grueso no consolidado y que se utilizan en el UCMA (Artefacto de Material No Consolidado), las cuales siguen la distribución granulométrica de la Tabla 41 ubicada en los Anexos, subcapítulo de ANEXO C: Preparación de material grueso en forma detallada. Para efectos prácticos, las rocas corresponden a “partículas visiblemente más grandes que aquellas utilizadas en el Material Fino Suspendido (FMS)”.

En este setup experimental se busca observar la capacidad del material fino de desplazar rocas más grandes que éste. Los parámetros observados son: S_{cb} (“Tamaño de la roca más grande desplazada”), S_{cm} (“Tamaño de la roca que alcanza la máxima distancia”) y S_{ce} (“Tamaño de la roca más grande que es expulsada y alcanza el punto de extracción contrario”). Los resultados indican que:

- Para el caso de S_{cb} (“Tamaño de la roca más grande desplazada”) la tendencia es a aumentar conforme crece H_f , teniendo un mínimo en $H_f = 5$ [cm]. De forma muy similar al caso del parámetro R en el grupo experimental 2, la razón de por qué S_{cb} muestra esta tendencia se explica por la interacción del material fino con la visera del punto de extracción, justo antes de entrar en la zanja. En otras palabras, para un H_f que garantice que el material depositado no alcanza la visera, éste puede desplazar libremente las rocas, mientras que a partir de $H_f = 5$ [cm] dicha interacción se transforma en un obstáculo. No obstante, la mayor cantidad de energía disponible en los mayores H_f merma el efecto de la visera.

Desde un punto de vista real, el material fino es capaz de mover rocas tan grandes como 1.4 a 1.6 [m] con velocidades de hasta 20 [m/s] (según Tabla 23 y aplicando escala) lo cual es absolutamente letal para las personas y totalmente destructivo para los equipos.

- Para el caso de S_{cm} (“Tamaño de la roca que alcanza la máxima distancia”) la tendencia es a disminuir levemente conforme crece H_f . Hasta el momento de este análisis, no se tuvo claridad acerca de los motivos específicos que dan origen a este comportamiento. Una posible explicación puede estar relacionada con el perfil de deposición del material fino, específicamente con el “Ángulo final” (ϕ). En general, las rocas que alcanzan la máxima distancia no son las rocas más grandes, sino las intermedias, dejando las más pequeñas como rocas expulsadas (S_{ce}). Como estas rocas intermedias no pueden ser expulsadas, su única forma de desplazamiento es a través del empuje del material fino. Entonces, dado que ϕ aumenta con H_f se tiene que el talud de material depositado adquiere una forma más vertical cuando H_f crece, por lo tanto, la elevación del material fino desde el suelo y al interior de la zanja es menor e impide el arrastre de las partículas gruesas.

Si bien es cierto que la masa expulsada al punto contrario aumenta linealmente con H_f , lo cual debería implicar que más material ingresa en la zanja y es capaz de alcanzar dicho punto contrario, en la ejecución de los ensayos se observa que esto **sí es cierto, pero con menores elevaciones desde el suelo**. En otras palabras, para mayores H_f el material fino fluye con más masa dentro de la zanja y más masa alcanza el punto contrario, pero se desplaza a una menor elevación. Luego, al tener menos elevación, es más difícil desplazar rocas de tamaños intermedios.

- Con respecto a S_{ce} (“Tamaño de la roca más grande que es expulsada y alcanza el punto de extracción contrario”) no en todos los ensayos se observan rocas que sean expulsadas, de hecho para ninguna de las repeticiones de $H_f = 3$ [cm] se obtienen rocas expulsadas. Lo curioso de este parámetro es el hecho de que las rocas más grandes expulsadas al punto contrario se encuentran en los casos de $H_f = 10$ [cm] y no en los casos de $H_f = 15$ [cm] como es de esperar.

La respuesta va ligada al hecho de que sólo en el caso de $H_f = 15$ [cm] (es decir, “15 [cm] de material fino suspendido”) se obtiene variabilidad en el sentido de que **más de una**

roca es expulsada. Para el caso de los ensayos con $H_f = 5$ y 10 [cm] **sólo una roca es expulsada.** En definitiva, el tamaño de las rocas expulsadas aumenta con H_f y a partir de un cierto valor de esta variable puede haber más de una roca expulsada.

Al escalar a mina los tamaños de las rocas expulsadas se tiene que estas rocas alcanzan diámetros máximos de 0.5 [m], lo cual a velocidades en torno a los 30 [m/s] son completamente letales para el ser humano.

iii. Distancias de las rocas desplazadas

Las distancias observadas corresponden a D_{cb} y D_{cm} las cuales representan, respectivamente, la “Distancia alcanzada por la roca más grande” y la “Distancia máxima alcanzada por una roca al interior de la zanja y no expulsada al punto contrario”. Los resultados indican que:

- Para el caso de D_{cb} (“Distancia alcanzada por la roca más grande”) no hay una tendencia clara con respecto a H_f . De acuerdo a esto, se puede desprender que la distancia alcanzada por las rocas más grandes tras un evento de *Inrush of fines* no depende de la cantidad de material fino suspendido, sino que esta distancia tiende a mantener un valor constante de 25 [cm] a escala de laboratorio independientemente de H_f .

Una posible explicación a este fenómeno, el cual a simple vista es **contradictorio**, puede estar ligada a S_{cb} (“Tamaño de la roca más grande desplazada”). Como bien se menciona en el análisis para este parámetro, S_{cb} en líneas generales aumenta con H_f . Si las partículas más grandes desplazadas aumentan su tamaño conforme crece H_f es de esperar que la distancia alcanzada por estas partículas (D_{cb}) no varíe, dado que el aumento de la energía potencial, de la mano de H_f , está siendo utilizado para sobrepasar tanto el peso como el roce de estas partículas y propiciar que se muevan, pero no es suficiente para mover las rocas a mayores distancias.

Ahora bien, para H_f mayores que los utilizados en este trabajo, se debería observar cambios más notorios en D_{cb} . Esto porque las rocas no consolidadas utilizadas en el artefacto UCMA tienen un tamaño máximo conocido, y por lo tanto debería existir un umbral de energía potencial, esto significa un umbral de H_f , al cual parte de esta energía se utilice para dar impulsos mayores a las rocas.

- Para el caso de D_{cm} , el cual corresponde a la “Máxima distancia alcanzada por una roca dentro de la zanja”, ésta muestra un comportamiento muy similar a D_{cb} con una leve tendencia a aumentar conforme crece H_f . Se puede argumentar, también, que esta tendencia está relacionada con S_{cm} .

Como se comenta en páginas anteriores, S_{cm} (“Tamaño de la roca que alcanza la máxima distancia dentro de la zanja”) disminuye ligeramente conforme crece H_f , lo cual se explica por medio de la altura de la película del material fino mientras fluye al interior de la galería. Por lo tanto, si D_{cm} y S_{cm} tienen comportamientos discrepantes con H_f , la verdadera variable que en rigor es **invariante** corresponde al trabajo que realiza el material fino. Es decir, la capacidad que tiene el material fino de desplazar rocas intermedias (“entre 1 y 3 [cm] a escala de laboratorio o entre 0.5 y 1.5 [m] a escala real”) no es dependiente de H_f . En otras palabras, para las rocas intermedias existe un trade off entre tamaño y distancia.

iv. Comparación de velocidades teóricas y empíricas

La comparación que se realiza en este subcapítulo es la misma que la aplicada en el grupo 4, sólo con ligeros cambios en los valores de DFM (“masa de relleno de la zanja”) según los nuevos ángulos finales de deposición (ϕ). En la Tabla 34 se muestran los valores de MP y DFM de este grupo, el cociente FF y también el cociente corregido (FFT). El cálculo de DFM se realiza en base a la Ecuación 7 y la Ecuación 8. Utilizando FFT y la Ecuación 4, la velocidad teórica de MP aplicada a DFM sí puede compararse con la velocidad experimental (ver Figura 50).

Tabla 34: "Valores de MP, DFM, FF y FFT del grupo 5"

H_f [cm]	MP [Kg]	DFM [Kg]*	FF	FFT
3	3.5	2.9	0.85	0.85
5	5.8	2.1	0.36	0.36
10	11.6	2.0	0.17	0.17
15	17.4	2.0	0.12	0.12

*DFM fue calculada en base al promedio de ángulos de reposo (ϕ) de cada H_f .

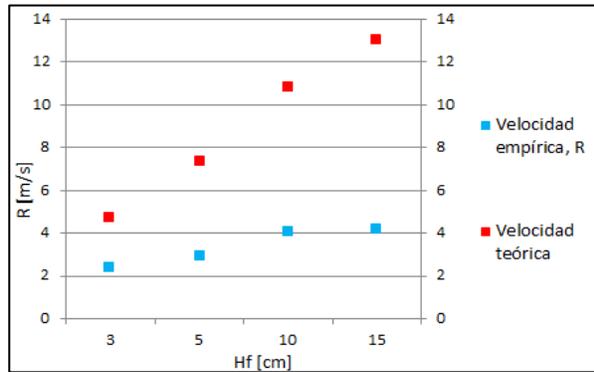


Figura 50: "Comparación de velocidad teórica y empírica en grupo 5"

Teniendo la comparación entre velocidad teórica y empírica, se puede saber cuáles son las pérdidas de energía asociadas al sistema en su conjunto además de la presencia del UCMA, incluyendo fricción, rebotes y golpes. En la Tabla 35 se muestra la comparación numérica entre las velocidades, incluyendo la diferencia porcentual de velocidades (FR).

Tabla 35: "Comparación numérica de velocidades en grupo 5"

Hf [cm]	Velocidad experimental [m/s]	Velocidad teórica con FF [m/s]	FR
3	2.4	4.7	0.48
5	2.9	7.3	0.60
10	4.0	10.7	0.63
15	4.1	12.9	0.68

En base a la Tabla 35, se puede desprender que, en promedio, existe un **60% de disminución de velocidad**, lo cual significa un **84% de pérdidas de energía** según la Ecuación 9. Estas pérdidas se deben a los efectos de fricción, rebotes y golpes del material con la geometría del modelo y también debido a la presencia del UCMA.

Dado lo anterior, se puede concluir que el uso del UCMA supone un **9% de pérdidas adicionales de energía** por sobre aquellas cuantificadas en el grupo experimental 2.

VI. Comparación de parámetros comunes en grupos 2 a 5

i. Comparación entre Masas expulsadas (M)

Si se colectan los resultados de la Tabla 10, Tabla 14, Tabla 19 y Tabla 23 respecto de las masas expulsadas, se puede construir la Figura 51. En todas las demás figuras de este tipo, las líneas de colores indican unión de puntos y no representan necesariamente el comportamiento de la variable (en este caso de M) entre éstos.

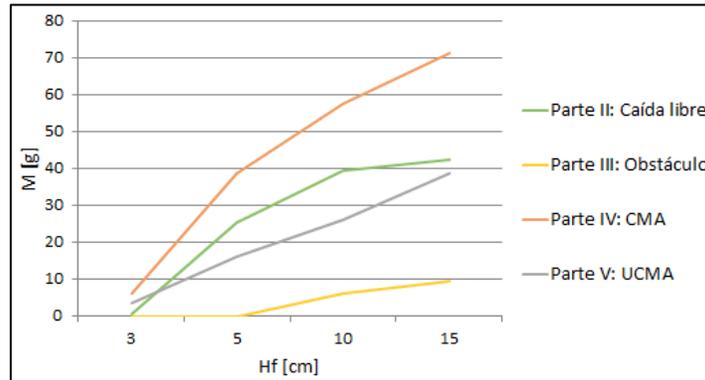


Figura 51: "Masas expulsadas en grupos experimentales 2 a 5"

En esta figura, cada línea representa los resultados promedio de las masas expulsadas, mientras que cada color se relaciona a un grupo experimental. La denominación **Caída libre** se refiere al grupo experimental 2, **Obstáculo** señala al grupo experimental 3, **CMA** denota al grupo experimental 4 y **UCMA** describe al grupo experimental 5.

De acuerdo con la Figura 51, las mayores masas expulsadas son obtenidas en el grupo experimental 4, en cual se utiliza el CMA o "Artefacto de Material Consolidado", mientras que las menores masas expulsadas se obtienen en el grupo experimental 3 donde se utiliza el pretil. Ambos casos representan los extremos de la experimentación desde el punto de vista de la facilidad que tiene el material para fluir, ya que por un lado, en el grupo 3 se tiene un elemento de actúa de obstáculo en la zona donde el material se mueve en forma laminar y adicionalmente no existe ninguna **canalización** del flujo; caso contrario ocurre en el grupo experimental 4 donde sí existe canalización y no se utiliza obstáculo.

Del análisis anterior se puede desprender que cualquier método que incluya colocar un obstáculo dentro de la zanja implicará una gran reducción en la masa expulsada producto de

un evento de *Inrush of Fines*, pudiendo impedir completamente que ésta alcance el punto contrario, que alcance la calle de producción o incluso que sobrepase el obstáculo.

Los otros dos grupos experimentales (2 y 5) muestran resultados intermedios para este parámetro. En el caso del grupo experimental 2 si bien no se tiene un obstáculo, tampoco se tiene un elemento que canalice el flujo. En el caso del grupo 5 tampoco hay obstáculo y si existe un elemento que canaliza el flujo, mas el hecho de existir material suelto (rocas) provoca que una parte de la energía del material fino se utilice en desplazar estas rocas e impida que éste siga desplazándose.

De la comparación entre los grupos 2 y 5 se desprende que, tanto el efecto de pérdida de energía por parte del fino para mover rocas más grandes, como el roce del material fino con el UCMA opacan el efecto canalizador del artefacto, y por ello, en el grupo 5 se tiene menos masa expulsada que en el grupo 2.

ii. Comparación entre Ángulos finales (ϕ)

Como se menciona en el capítulo de Metodología experimental, el Ángulo final (ϕ) sólo se mide a una determinada elevación desde el suelo, que en este caso es $H_m = 2$ [cm] a escala de laboratorio o 1 [m] a escala real, y su objetivo es comparar los perfiles de deposición del material fino. Por esta razón, este ángulo no es medido en el grupo experimental 3.

En el caso de los demás grupos experimentales, se puede notar que ϕ siempre crece con H_f y esto se debe a que a mayor “cantidad de masa suspendida” (es decir, a mayor H_f), el flujo del material fino dentro de la zanja es más caótico y tiende a estabilizarse más rápidamente que para pequeños H_f . Esta tendencia puede ser observada en la Figura 52, la cual es una recopilación de los valores promedio del Ángulo final según H_f y para cada grupo experimental.

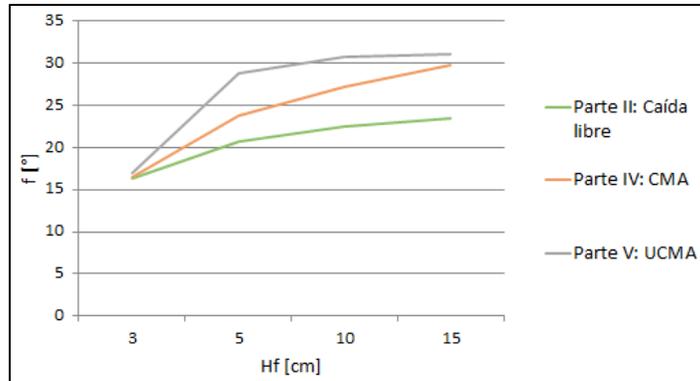


Figura 52: "Ángulos finales en grupos experimentales 2 a 5"

De acuerdo con la Figura 52, los mayores Ángulos finales se obtuvieron en el grupo experimental 5, mediante el uso del UCMA, seguido por el CMA y finalmente, los Ángulos finales más bajos se obtuvieron en el grupo 2.

La explicación de estos valores es simplemente por el comportamiento caótico del material fino no sólo debido a H_f , sino también por las estructuras utilizadas. En el caso del grupo 2, el material entra libremente en la zanja, adquiriendo una **componente de caos** sólo para "grandes cantidades de material", es decir, altos H_f . Al colocar el CMA, el espacio disponible para la entrada de material se reduce, por lo cual aparece otra componente de caos. Y finalmente, al tener material suelto en el grupo 5 se adiciona una nueva componente de caos en la interacción del material fino con el grueso. Cada componente de caos origina pérdidas de energía y cambios de sección que obligaron al material a acomodarse de diferente de forma entre uno y otro grupo experimental.

Es preciso señalar que las pérdidas de energía del sistema no pueden ser atribuidas directamente a las componentes de caos que se señalan, ya que, como se explica más adelante las diferentes configuraciones inducen diferentes pérdidas de energía.

iii. Comparación entre Distancias alcanzadas (D)

Si se toman los datos de la Tabla 10, Tabla 14, Tabla 19 y Tabla 23 referidos a la Distancia alcanzada por el material fino a una elevación H_m del piso y se grafican los promedios por experimento y por H_f , se tendrá la Figura 53.

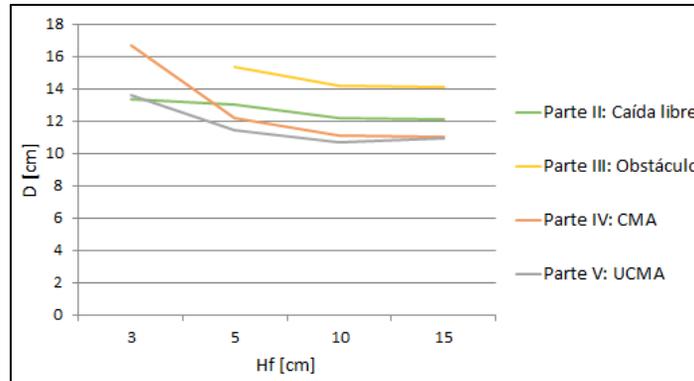


Figura 53: " Distancias alcanzadas en grupos experimentales 2 a 5"

De acuerdo con la Figura 53, las Distancias alcanzadas por el material fino dentro de la zanja y a una elevación de 2 [cm], varían entre 11 y 17 [cm], lo que equivale a 5.5 y 8.5 [m] a escala real. Si se considera que el largo de zanja de la operación minera replicada en este modelo es de 10 [m], entonces el material fino alcanza al menos 1 [m] de altura a tan sólo 1.5 [m] de la calle de producción según los resultados más críticos.

En general, esta distancia varía poco entre los grupos experimentales, mostrando tendencias muy similares al parámetro Ángulo final, pero en un sentido completamente inverso. Esto se debe a que a medida que D crece, ϕ debe disminuir dada la relación geométrica entre ambas.

Un caso curioso ocurre para $H_f = 3$ [cm], respecto de los grupos experimentales 2 y 4. Si se observa la Figura 53 los promedios de los Ángulos finales son muy similares entre estos dos grupos de experimentos, por lo cual debería esperarse que las Distancia alcanzadas también fueran similares. No obstante, hay una diferencia considerable y es más, en el grupo 2 se pasa a tener Distancias más bajas que en el grupo 4, lo cual a primera vista es **contradictorio**.

La explicación de esto proviene de las **observaciones** realizadas durante la ejecución de los ensayos en el grupo experimental 4. Las observaciones realizadas en este grupo indican que sólo para el caso de $H_f = 3$ [cm], el material tras depositarse muestra un perfil diferente en comparación con los otros H_f , y que también es diferente para los otros grupos experimentales.

Por ejemplo, en las Figuras 54 y 55 se muestran los perfiles del material depositado para uno de los ensayos de $H_f = 3$ [cm] y para uno de los ensayos de $H_f = 5$ [cm], respectivamente.

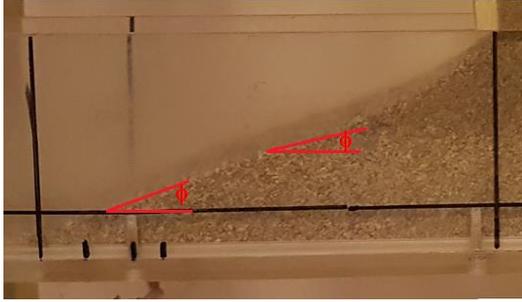


Figura 54: "Perfil para $H_f = 3$ [cm]"



Figura 55: "Perfil para $H_f = 5$ [cm]"

De acuerdo a estas figuras, se puede notar que para el caso de $H_f = 3$ [cm] se tienen dos ángulos característicos: el **Ángulo final de deposición** medido a una elevación de H_m (ϕ) y un **Ángulo de quiebre** ubicado por encima de ϕ . La implicancia de este último ángulo y de la geometría del perfil es que el material puede **adentrarse** en la zanja más que en otros casos, y por lo tanto alcanza mayores distancias, lo que implica entonces, mayores D.

Si se miden los valores de los ángulos de quiebre y se comparan con los Ángulos finales de deposición (ϕ) se puede construir la Tabla 36:

Tabla 36: "Comparación de Ángulo final y ángulo de quiebre en grupo 4"

	$H_f = 3$ [cm] ¹			$H_f = 3$ [cm] ²			$H_f = 3$ [cm] ⁴		
	H_m [cm]	D [cm]	ϕ [°]	H_m [cm]	D [cm]	ϕ [°]	H_m [cm]	D [cm]	ϕ [°]
Punto estándar de medición	2	17.5	17	2	16	17	2	18	17
Punto superior	4.5	10.5	13	3	11	14	3.5	13	13

(1), (2), (4) representan los ensayos 1, 2 y 4 para el mismo H_f dentro del grupo experimental 4.

De acuerdo a la Tabla 36, en el "Punto superior" siempre se obtiene un ángulo menor que aquel medido en el Punto estándar de medición. Esta situación representa, como se dice anteriormente, un **adentramiento** del material al interior de la zanja como si éste se comportara como un bloque de material compacto.

Volviendo a la Figura 53, se puede notar que no hay datos de D para $H_f = 3$ [cm] en el grupo experimental 3. Esto se debe a que en ninguna de las repeticiones de $H_f = 3$ [cm] se tienen

las condiciones estándares de medición de D , es decir, el material no alcanza una elevación de H_m centímetros desde el suelo y considerada sólo después del pretil.

Finalmente, y con respecto a la misma Figura 53, se puede notar que las mayores distancias, alcanzadas a 2 [cm] desde el suelo, se obtienen en el mismo grupo experimental 3, lo cual a simple vista parece **contradictorio**, dada la presencia del pretil y lo dicho en el párrafo anterior. La explicación a esto proviene también de las **observaciones** realizadas tras la deposición y tras el paso del material por sobre el pretil. A modo de ejemplo, se presenta la Figura 56 que corresponde al perfil del material en uno de los ensayos para $H_f = 10$ [cm].



Figura 56: "Ejemplo de perfil de deposición para $H_f = 10$ [cm] en grupo 3"

De acuerdo a la Figura 56, se puede notar que parte de la masa de material producto del evento de *Inrush of fines* es capaz de sobrepasar el pretil, tal como indica la **flecha roja**.

Esta "masa pasante", simbolizada como M_p , es medida y exhibida en la Tabla 14. Lo interesante de esta masa es que al sobrepasar el pretil una parte de ella queda **apoyada** en la cara exterior del obstáculo o la cara que da hacia la calle de producción. Luego, si esta masa apoyada alcanza la altura de medición (H_m) es debidamente medida su distancia D , tal como muestran las **flechas azules**. Por esta razón, y ayudada por la cara exterior del pretil, la masa pasante puede alcanzar la altura de medición y tener una Distancia **medible**. Sin embargo, no en todos los ensayos del mismo H_f , y dentro de este grupo, se logra tener un perfil de material depositado de modo tal que el material pasante alcance H_m . En efecto, y tal como se desprende de la Tabla 14, para el caso de $H_f = 5$ [cm] se obtiene un perfil con

Distancia medible para el 100% de los ensayos, mientras que para los casos de $H_f = 10$ y 15 [cm] sólo se obtiene un perfil de deposición con distancia medible en el 50% de los ensayos.

La implicancia de D a escala mina es altísima, ya que como este parámetro se mide a una altura de 1 [m] desde el suelo, con esta altura el material por fino que sea es capaz de originar serios problemas de seguridad para las personas que estén caminando cerca de la intersección de la calle y la zanja en cuestión, y más aún si se encuentran dentro de la zanja, incluso si están protegidos por el pretil. Sólo en el caso de $H_f = 3$ [cm] se puede garantizar que un pretil de las dimensiones y a las distancias establecidas en este estudio es capaz de frenar completamente el material asociado a un evento de *Inrush of fines*.

iv. Comparación entre velocidades empíricas (R)

De acuerdo a los valores de la Velocidad empírica de la Tabla 10, Tabla 14, Tabla 19 y Tabla 23 se tiene la Figura 57, la cual muestra los promedios de ésta para cada grupo.

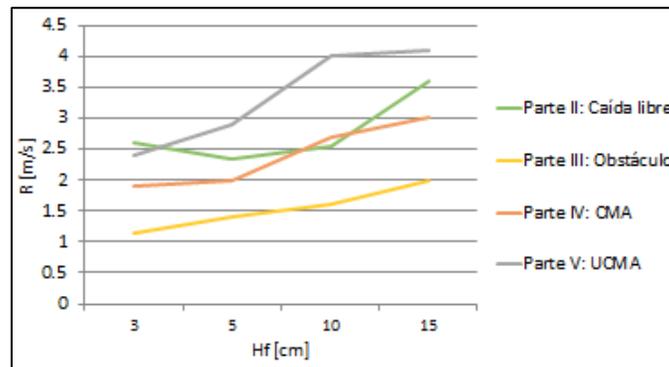


Figura 57: "Velocidades empíricas en grupos experimentales 2 a 5"

De acuerdo a la Figura 57, las velocidades más bajas se obtienen en el grupo 3, y esto está directamente relacionado con la presencia del pretil y también por el hecho de que la velocidad en este grupo se calcula en el tramo pretil – bullnose.

En los grupos 2 y 4 los resultados son similares porque:

- En el caso del grupo 2, el material ingresa libremente en la zanja, con pérdidas de energía relacionadas principalmente a fricción, rebotes y golpes con el modelo hecho de acrílico. Se sabe que otras interacciones también generan pérdidas, pero no son consideradas en este estudio. Sin embargo, antes de entrar en la zanja el material tiene solamente una componente vertical de velocidad, el cual al interactuar con la zanja justo debajo de la

batea, dicha componente se transforma en una componente horizontal. Esta transformación de sentidos de la velocidad también conlleva pérdidas de velocidad en un monto no cuantificado en este estudio. Por esta razón se recomienda estudiar los **cambios en la dirección** del flujo de materiales granulares que caen por acción de la gravedad, de modo de precisar que fracción del 75% de pérdidas de energía vistas en este grupo se asocian a dicha transformación.

- Por su parte, en el grupo 4 también ocurren pérdidas de energía, sin embargo la configuración de este grupo, básicamente el uso del CMA, induce otros fenómenos:
 - En primer lugar, la superficie del CMA ofrece fricción, rebotes y golpes para el movimiento del material.
 - La geometría del CMA, junto con las geometrías de la batea y la zanja, cumple el papel de **canal** para la entrada de material dentro de la zanja.

Cada uno de estos dos roles tiene una consecuencia diferente, si se analiza desde un punto de vista técnico, ya que:

- El CMA debido a fricción, rebotes y golpes genera pérdidas de energía, pero.
- El CMA debido a su geometría genera ganancias, o dicho en otras palabras, provoca un flujo preferencial.

Ambos efectos están combinados y, de acuerdo a los resultados, estos se contra restan y posibilitan que el grupo 4 muestre velocidades muy similares al grupo 2.

En el caso del grupo experimental 5, en el cual se utiliza el “Artefacto de Material No Consolidado” (UCMA), las velocidades calculadas son las más altas para los tres H_f más altos (sólo para $H_f = 3$ [cm] la velocidad es superada en el grupo 2).

Las razones de por qué las más altas velocidades son obtenidas en este grupo son muy similares a las razones que justifican la similitud de las velocidades entre los grupos 2 y 4. La diferencia es que en este grupo (grupo 5) el material no consolidado no ejerce el mismo roce al material fino que aquel que impone la estructura sólida (grupo 4), razón por la cual se generan pérdidas de energía menores. De acuerdo al subcapítulo de [Parámetros observados, momentum lineal y fuerza de arrastre del grupo 5](#), el uso del UCMA genera pérdidas de energía adicionales de tan sólo un 9% por sobre las pérdidas calculadas en el grupo 2, las cuales son menores al 16% de pérdidas adicionales calculadas en el grupo 4.

En base a lo anterior, se puede concluir que **los materiales finos asociados a eventos de *Inrush of fines* son más peligrosos cuando ocurren en puntos de extracción alejados a puntos bloqueados**. Esta conclusión tiene aplicaciones trascendentales a escala mina, ya que las decisiones que puedan tomarse pueden implicar si una persona sufre daños graves o bien pierde la vida.

Por ejemplo, si hay riesgos de *Inrush of fines* y uno de los dos puntos de extracción se encuentra bloqueado con material no consolidado, entonces se debe esperar tener flujos de hasta 28 [m/s] en el punto habilitado con el inminente riesgo de desplazamiento de rocas de más de 1 [m] de diámetro. En cambio, si ambos puntos están habilitados se esperaran velocidades en torno a los 15 – 20 [m/s] y si a lo anterior se suma el uso de un pretil de seguridad, se tendrán velocidades de hasta 10 [m/s].

En suma, se prefiere tener **ambos puntos habilitados** ante la posibilidad de un evento de *Inrush of fines*. Adicionalmente, el uso de un pretil de seguridad ha mostrado grandes reducciones en la velocidad, por lo cual también se recomienda su utilización. No obstante, el uso de este objeto provoca el **salto** del material para los casos de $H_f = 5, 10$ y 15 [cm] con la posibilidad de llegar a la calle de producción a alturas de más de 3 [m]. Por esta razón, **no se recomienda utilizar este obstáculo en estos casos**. Se invita a estudiar más a fondo la interacción del material fino con este tipo de objetos, modificando ya sea su geometría o su posicionamiento, de modo de determinar las configuraciones que aseguren menores riesgos para las personas y los equipos.

v. Comparación entre momentum lineales (Mom)

Si se toman los resultados de Momentum lineal desde la Tabla 11, Tabla 15, Tabla 20 y Tabla 24 y se resumen en una figura, entonces se puede construir la Figura 58.

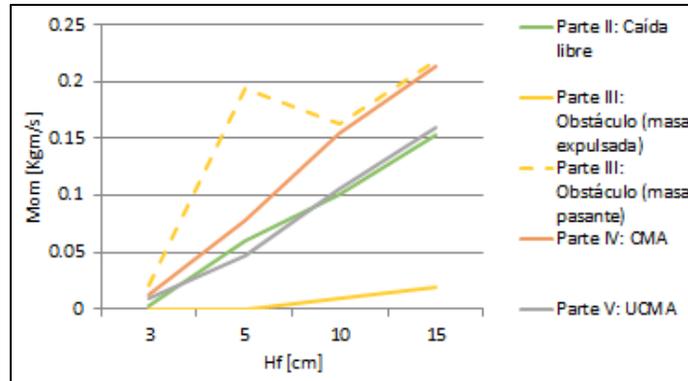


Figura 58: "Momentum lineal del frente de material en grupos 2 a 5"

A partir de la Figura 58, se puede desprender que el uso del pretil genera los menores momentum asociados al frente de material, sin embargo, si se calcula el momentum para la "masa que sobrepasa el pretil y queda retenida en la zanja" (M_p) y se asume que dicha masa tiene la misma velocidad que el frente de masa o "masa expulsada" (M), entonces el momentum generado es más alto que en cualquiera de los grupos experimentales, alcanzando valores en torno a 160 [ton m/s] a escala mina.

Después de los altos valores de momentum calculados en el grupo 3 según la "Masa pasante", la segunda configuración con más altos momentum es la cuarta o grupo experimental 4. El hecho de que esta configuración tenga altos valores de momentum está directamente ligado al hecho que el CMA ("Artefacto de Material Consolidado") tiene la capacidad de **canalizar el flujo**. Lo mismo ocurre en el caso del grupo 5, donde el UCMA también tiene la capacidad de **dirigir el flujo**, pero la presencia de material no consolidado implica un aumento en el caos del flujo, induciendo que disminuya su momentum.

El caso del grupo 2 es equiparable al grupo 5, observándose momentum lineales muy similares. De esta Figura 58 se desprende entonces que la presencia del UCMA genera efectos muy similares, en relación al momentum, al compararlo con una situación que involucre los dos puntos habilitados y sin pretiles. En otras palabras, la presencia del UCMA genera menores masas expulsadas y mayores velocidades empíricas que en el caso del grupo 2, teniendo como resultado momentum muy semejantes entre ambos grupos.

No obstante, y de acuerdo al criterio del autor de este texto, el momentum lineal del material fino **no es el parámetro clave** para determinar la peligrosidad de un evento de *Inrush of fines*. El parámetro que define la peligrosidad es la **Fuerza con que el material se**

mueve al interior de la zanja. Esta fuerza se ha denominado “Fuerza de arrastre del material” (F) y se cuantifica en unidades de Newton [N]. En el siguiente apartado se discute acerca de este parámetro y de sus implicancias a escala mina.

vi. Comparación de Fuerzas de arrastre del material (F)

Si se toman los resultados de Fuerza de arrastre desde la Tabla 13, Tabla 18, Tabla 22 y Tabla 26, y se resumen en una única tabla, entonces se puede construir la Tabla 37.

Tabla 37: "Fuerza de arrastre del material fino"

H _f [cm]	Parte II		Parte III		Parte III (*)		Parte IV		Parte V	
	Prom. F	D.E. F	Prom. F	D.E. F	Prom. F	D.E. F	Prom. F	D.E. F	Prom. F	D.E. F
3	0.037	0.078	0.000	0.000	0.304	0.359	0.118	0.047	0.110	0.073
5	0.919	0.516	0.000	0.000	3.349	2.086	0.783	0.127	0.703	0.207
10	1.646	1.228	0.202	0.078	3.293	0.550	2.127	0.185	2.100	0.383
15	3.477	2.506	0.463	0.318	5.401	1.553	3.239	0.114	3.310	0.214

*Grupo 3 considerando la Masa pasante (M_p).

Los resultados de la Tabla 37 indican que los eventos de *Inrush of fines* generan flujos de material con fuerzas de hasta 5 [N] a escala de laboratorio. A escala real estos valores deben ser amplificados según los factores de similitud dinámica expuestos en la Tabla 3. En este caso el factor es [λ^3], por ello estas fuerzas deben ser amplificadas por un factor de [50³].

Por ejemplo, para el caso del grupo 2 (Parte II) a H_f = 3 [cm] se tiene una F = 4.6 [kN] o para el caso del grupo 4 (Parte IV) a un H_f = 10 [cm] se tiene una F = 266 [kN]. Sólo en los casos de H_f = 3 y 5 [cm] del grupo 3, considerando la masa expulsada (M), se tienen valores nulos de la Fuerza y esto se debe a la baja precisión del instrumento para medir estas masas y también de las pequeñas masas colectadas.

De la Tabla 37 se puede desprender que la Fuerza de arrastre, en general, siempre crece con H_f independientemente de la configuración experimental implementada, y para que sea más fácil de visualizar se muestra la Figura 59.

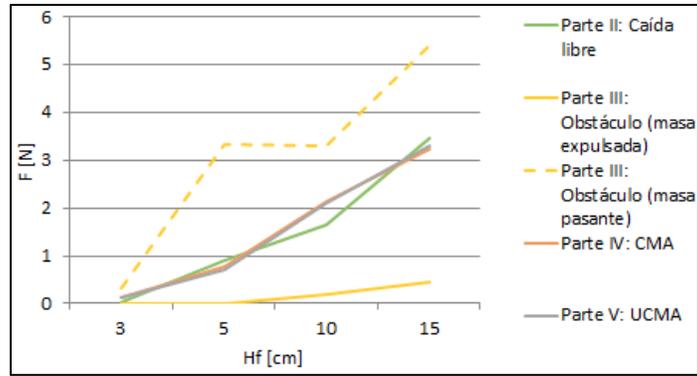


Figura 59: "Fuerza de arrastre del material fino en grupos 2 a 5"

Además de mostrar que F es casi monótonamente creciente con H_f en todos los grupos, la Figura 59 permite comparar estas fuerzas entre los grupos experimentales.

La observación más evidente de esta figura es que la Fuerza de arrastre es prácticamente igual para cada H_f entre los grupos 4 y 5. En base a las observaciones realizadas en páginas anteriores se notaron algunas diferencias entre estos dos grupos, sin embargo, en términos de peligrosidad son exactamente iguales. En otras palabras, independientemente de cómo esté bloqueado uno de los dos puntos de extracción, se debe esperar tener el **mismo efecto en términos de Fuerza de arrastre** en el punto habilitado.

En términos numéricos, las Fuerzas de arrastre más bajas entre los grupos 4 y 5 son de 14 [kN]. Si se considera a una persona de 90 [kg], su peso es de aproximadamente 0.9 [kN], por lo tanto, en el caso menos riesgoso de *Inrush of fines* con un punto bloqueado, el material tiene más de 15 veces la fuerza necesaria para mover a una persona. Si se considera un equipo LHD R1600H de 30 [ton] estando cargado con 10 [ton] de material, se tiene que su peso total es de 400 [kN], entonces en el caso de $H_f = 15$ [cm] el material, con una Fuerza de arrastre de 412 [kN], es capaz de desplazar al equipo incluso estando cargado.

Otra conclusión que se desprende de la Figura 59 es que al tener ambos puntos de extracción habilitados, la Fuerza de arrastre es más baja. Por lo tanto, se prefiere tener ambos puntos habilitados en vez de sólo uno de ellos. Esto debe tomarse con cautela, dado que antes de tomar cualquier decisión se deben evaluar las consecuencias de tener un *Inrush of fines* en un único punto con alta Fuerza de arrastre o bien tener un *Inrush of fines* en ambos puntos con menor fuerza.

Finalmente, a partir de la Figura 59 se puede notar una gran diferencia en F entre la masa expulsada y la masa retenida en la zanja del grupo experimental 3. Si bien es cierto que colocar pretiles **ayuda a disminuir la peligrosidad** del material fino en torno a un 90% si se compara con cualquier caso en que no se usen pretiles, esto es cierto sólo para la masa expulsada. Cuando se toma en cuenta la masa pasante, F aumenta en un 70% en contraste con los casos sin pretiles. Los más altos valores de F implican fuerzas suficientes para mover equipos LHD cargados de hasta 20 [ton] de capacidad, como el modelo R300H de 700 [kN].

Por esta razón, se debe realizar una **profunda evaluación** acerca del uso de pretiles con el fin de **frenar** el material, puesto que una mala decisión podría provocar incluso más daños a las personas, equipos y la infraestructura minera que en un escenario donde no se usen estos obstáculos.

VII. Corroboración de hipótesis de trabajo

i. Corroboración de hipótesis del grupo 1

De acuerdo con los resultados y análisis **la hipótesis de este grupo se descarta** y se deduce que el contacto de finos y gruesos impide la generación de eventos de *Inrush of fines*, básicamente por la no formación de un **canal de flujo adecuado**.

ii. Corroboración de hipótesis del grupo 2

De acuerdo con los resultados y análisis **la hipótesis de este grupo se corrobora completamente**. Un *Inrush of fines* es 100% probable en todos los casos.

iii. Corroboración de hipótesis del grupo 3

De acuerdo con los resultados y análisis **la hipótesis de este grupo se corrobora parcialmente**, ya que sólo para los casos con menor H_f el pretil puede detener el flujo del material. Por ello se recomienda probar otras geometrías y ubicaciones del obstáculo.

iv. Corroboración de hipótesis del grupo 4

De acuerdo con los resultados y análisis **la hipótesis de este grupo se corrobora completamente** desde los tres puntos de vista más importantes usados para comparar (velocidad empírica, momentum y fuerza).

v. Corroboración de hipótesis del grupo 5

De acuerdo con los resultados y análisis **la hipótesis de este grupo se corrobora parcialmente**. Desde el punto de vista de la velocidad empírica sí es cierto que las condiciones del grupo 5 lo vuelven más peligroso que el grupo 4 y esto se refuerza con la presencia de rocas desplazadas, mas desde el punto de vista del momentum y la fuerza, los grupos 4 y 5 son prácticamente idénticos.

CAPÍTULO 7:

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

I. Conclusiones

En función de los resultados y los análisis entregados en páginas anteriores, se obtienen las siguientes conclusiones.

- **La interacción de materiales gruesos y finos, sin uso de energía potencial, no permite una generación de *Inrush of fines*.** Esta conclusión proviene del grupo experimental 1, en el cual se desarrollan tres diferentes setups experimentales y en ninguno de ellos se logra registrar un evento. Si bien en el tercero de los setups se logra registrar una *Entrada abrupta de finos* a la extracción número 50, éste no significa un *Inrush of fines*, pero permite notar que el material fino sí tiene potencial de generar un evento peligroso, a bajas velocidades y con la posibilidad de llegar a la calle de producción.
- **Con menos material grueso, es más probable un *Inrush of fines*.** Tal como se desprende de los setups del grupo 1 y del número de la extracción a la cual aparece por primera vez el material fino, colocar menos material grueso en contacto con fino aumenta la probabilidad de tener un evento extraordinario. Por esta razón, en los siguientes grupos experimentales se utiliza sólo material fino y se adiciona energía potencial al sistema de modo de observar el comportamiento de este material.
- Si existe una colgadura a más de 30 [m] sobre el UCL (60 [cm] a escala de laboratorio) formada por alguno de los mecanismos exhibidos o descritos en el capítulo de Revisión bibliográfica, y que además se encuentra asociada a materiales finos, **entonces es ciento por ciento probable tener un evento de *Inrush of fines*.** Esta conclusión es una observación general de todos los grupos experimentales.

- **La utilización de un obstáculo al interior de la zanja, de modo de contener el material fino asociado a un evento de *Inrush of fines*, es totalmente recomendado, pero con una profunda evaluación técnica.** Esta conclusión proviene del grupo experimental 3, en el cual se observa que la presencia de pretiles provoca la disminución de la masa que se puede esperar en el punto contrario al punto afectado, además garantiza tener menores velocidades de movimiento al interior de la zanja y también induce que el material alcance menores distancias dentro de la galería. Sin embargo, la masa que no es expulsada puede llegar a ser incluso más dañina que la masa expulsada en términos de momentum lineal y fuerza de arrastre. Por esta razón se recomienda usar pretiles, pero con un estudio detrás que justifique la composición del obstáculo (ya que en este caso se usa una superficie rígida e inamovible), la inclinación, la altura y, especialmente, su ubicación.
- **Tener uno de los dos puntos bloqueados, independientemente de cómo, genera peores consecuencias en términos de velocidad del material y momentum lineal, en comparación a tener los dos puntos habilitados.** Esta conclusión proviene del subcapítulo [Comparación de parámetros comunes en grupos 2 a 5](#), en donde se nota que ambos parámetros (momentum y velocidad) alcanzan valores más altos en el caso de un punto habilitado y otro bloqueado, en vez de dos puntos habilitados. Según esto, y a pesar de las pérdidas de energía adicionales que significan los artefactos CMA y UCMA, la canalización del flujo tiene un papel más preponderante y logra contra restar las pérdidas energéticas.
- **No se tiene el mismo efecto al tener un punto bloqueado con material consolidado que tener un punto bloqueado con material no consolidado.** Esta conclusión, proveniente del análisis entre los grupos 4 y 5, tiene directa relación con la velocidad del material, su momentum y las rocas que éste es capaz de desplazar. En el grupo 5 se obtienen altas magnitudes de velocidad y momentum, lo que sumado al hecho de que en el mismo grupo se tienen desplazamientos de rocas de hasta 1.6 [m] de diámetro, transforman a este grupo, más bien a esta configuración operacional, como la peor de todas las evaluadas en este trabajo de título.

- **La fuerza de arrastre más baja y no nula observada en cualquiera de los grupos experimentales tiene 15 veces el valor necesario para mover a una persona.** Esta observación es, a juicio del autor, la más importante que se puede desprender de este estudio. Hoy en día, y como siempre debió serlo, la seguridad es el requisito número 1 en cualquier empresa, por lo tanto saber anticipar y enfrentar fenómenos como éstos es crucial de modo de evitar consecuencias fatales para el personal.
- **La fuerza de arrastre observada en algunos grupos experimentales es tan potente que es capaz de mover equipos LHD de capacidad de 20 [ton], incluso estando cargados.** Por esta razón, y después de conocer el eventual daño que podría originar sobre un ser humano, resulta fundamental saber anticipar y enfrentar un fenómeno de éstos, de modo de minimizar retrasos en la producción, posibles daños a las instalaciones, posibles daños a equipos y campañas de rescate de los mismos.
- Si bien en el grupo experimental 3, dadas las condiciones impuestas, se tienen los valores más altos de velocidad y momentum, dichas situaciones **pueden ser manejadas** con un adecuado estudio acerca de las características del pretil a utilizar.

II. Recomendaciones

i. Recomendaciones particulares

Las recomendaciones particulares entregadas a lo largo de este trabajo son las siguientes:

- Al utilizar materiales granulares en modelos a escala, se debe descartar la fracción más fina, especialmente aquella bajo #50 ASTM (Pineda, 2012).
- Al utilizar un modelo similar al de este estudio, con el mismo sistema de suspensión de masa, se deben realizar ensayos según H_f consecutivos (3, 5, 10 y luego 15 [cm]) y evitar en lo posible realizar dos ensayos consecutivos con la máxima cantidad de masa (en este caso, alrededor de 70 [kg] para $H_f = 15$ [cm]).

- Dos ensayos son comparables si todas las variables que se quieren modificar son modificadas y todas las variables que se pretende sean fijas, lo sean. Esto se aplica para todos los grupos experimentales, de modo de tener cuidado con los materiales que se utilizan en los ensayos, especialmente si hay mezclas.
- Se debe contar con un equipo de medición de masa adecuado en función de la cantidad que se quiere medir, en este caso a escala de **gramos**. Por lo tanto, se recomienda tener un equipo de medición de 1 gramo de precisión, al menos.
- De acuerdo a las observaciones y resultados del grupo experimental 3, el uso del pretil supone grandes ventajas desde el punto de vista de la masa expulsada, pero altos riesgos desde el punto de vista de la masa pasante. Por lo tanto, se recomienda realizar más ensayos probando otras configuraciones (geometrías y ubicaciones del pretil) de modo de encontrar la configuración menos invasiva al interior de la mina y que garantice que el material sea detenido para la mayoría de los casos.

ii. Recomendaciones generales

Como recomendaciones generales de este trabajo de título se enumeran las siguientes:

- En los resultados exclusivos del grupo 1, se finaliza el subcapítulo con el planteamiento de que se desconoce si el material fino en el punto de extracción y con un protocolo adecuado propicia un *Inrush of fines*. Por ello, se recomienda realizar un **grupo experimental nuevo** que materialice esta situación, con variables como: la velocidad de extracción, la entrada de la pala, el modo de carga de la pala, etc. Todo esto con el fin de estudiar la ocurrencia de estos fenómenos.
- Desde el grupo 2 al grupo 5 algunas variables están fijas, como por ejemplo: la geometría de la batea, la geometría de la zanja, la distancia desde un punto hasta el punto contrario (L_{pp}) y la altura a la cual el material fino está suspendido (H_{hu}). De estas variables fijas, H_{hu} tiene un **gran potencial de modificación** con el objeto de evaluar la factibilidad de tener eventos de *Inrush of fines* a otras alturas. En particular, se recomienda disminuir H_{hu} y llevar el material fino (FMS) a un punto más cercano de la batea.

III. Bibliografía

(Castro, 2006)

R. Castro, "Study of the mechanism of gravity flow for block caving", PhD Tesis, 2006, University of Queensland, Australia.

(Hadjigeorgiou y Lessard, 2007)

J. Hadjigeorgiou y J. F. Lessard, "Numerical investigations of ore pass hang-up phenomena", Artículo, 2007, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.

(Troncoso, 2006)

S. Troncoso, "Simulación del impacto de interferencias operacionales para la planificación de producción", Tesis, 2006, Universidad de Chile, Chile.

(Szwedzicki, 2007)

T. Szwedzicki, "Formation and removal of hang-ups in ore passes", Artículo, 2007, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, Canadá.

(Aytaman, 1960)

V. Aytaman, "Causes of hanging in ore chutes and its solution", Artículo, 1960, Canadian Mining Journal, Canadá.

(Engineers International, 1983)

Engineers International Inc., "Guidelines for open-pit ore pass design (Volumes I and II)", Reporte, 1983, U.S. Bureau of Mines (actualmente en U.S. Department of Commerce), Estados Unidos.

(Hambley, 1987)

D.F. Hambley, "Design of ore pass systems for underground mines", Artículo, 1987, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Canadá.

(Moss, Russell y Jones, 2004)

A. Moss, F. Russell y C. Jones, "Caving and fragmentation at Palabora: prediction to production", Proceeding, 2004, 4th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Chile.

(Kurniawan y Setyoko, 2008)

C. Kurniawan y T.B. Setyoko, "Impact of rock tyoe variability on production rates and scheduling at the DOZ – ESZ block cave mine", Proceeding, 2008, 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Suecia.

(Lett y Brunton, 2016)

J.L. Lett y I. Brunton, "Undercutting to Surface Breakthrough – Cadia East Panel Cave (Stage 1)", Proceeding, 2016, 7th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Australia.

(Esterhuizen, 1994)

G.S. Esterhuizen, "A Program to Predict Block Cave Fragmentation", Reporte técnico y guía de usuario N°12 Versión 2.1, 1994, FracMan Technology Group, Estados Unidos.

(Pierce, 2010)

M. Pierce, "A hybrid methodology for secondary fragmentation prediction in cave mines", Proceeding, 2010, 2nd International Symposium on Block and Sublevel Caving, Australia.

(Castro y Gómez, 2014)

R. Castro y R. Gómez, "Use of experiments to quantify the flow – ability of caved rock for block caving", Proceeding, 2014, 3nd International Symposium on Block and Sublevel Caving, Chile.

(Soto, 2010)

M.C. Soto, "Hidrogeología e Hidroquímica de Aguas Subterráneas en el distrito Inca de Oro, Región de Atacama: Procesos de Interacción Agua – Roca y Dispersión Geoquímica", Tesis, 2010, Universidad de Chile, Chile.

(Pineda, 2012)

M. Pineda, "Study of the Gravity Flow Mechanisms at Goldex by means of a Physical Model", Tesis, 2012, Universidad de Chile, Chile.

(Castro, Trueman y Halim, 2007)

R. Castro, R. Trueman y A. Halim, "A study of isolated draw zones in block caving mines by means of large 3D physical model", Artículo, 2007, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.

(Sánchez, 2017)

Y. Sánchez, “Determinación y Caracterización de las Zonas de Extracción en un Flujo Gravitacional de Material Granular Fino en presencia de Humedad”, Tesis, 2017, Universidad de Chile, Chile.

(Castro, Gómez y Hekmat, 2016)

R. Castro, R. Gómez y A. Hekmat, “Experimental quantification of hang- up for block caving applications”, Artículo, 2016, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.

(Pérez, 2017)

A. Pérez, “Cuantificación del Riesgo de Ingreso de Agua – Barro en El Teniente”, Tesis, 2017, Universidad de Chile, Chile.

(Irribarra, 2014)

S. Irribarra, “Estudio experimental de Migración de Finos en Minería de Caving”, Tesis, 2014, Universidad de Chile, Chile.

(SRK, 2015)

SRK Consulting Inc. e Itasca International Inc., “Chuquicamata Underground Project, Detailed Engineering Stage 2015. Fragmentation Assessment”, Reporte técnico, 2015, Chile – Canadá.

(Sotomayor, 2016)

G. Sotomayor, “Recomendación de Malla de Extracción para el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea”, Tesis, 2016, Universidad de Chile, Chile.

(BB, 2012)

Department of Natural Resources and Mines, “Serious accidents and high potential incidents. Mining and Quarrying. April 2012”, Reporte, 2012, Business bulletin, Australia.

(BB, 2018)

Department of Natural Resources, Mines and Energy, “Serious accidents and high potential incidents. Mining and Quarrying. February 2018”, Reporte, 2018, Business bulletin, Australia.

(BB, 2017)

Department of Natural Resources and Mines, “Serious accidents and high potential incidents. Mining and Quarrying. September 2017”, Reporte, 2017, Business bulletin, Australia.

(Power, 2004)

G. Power, "Modelling granular flow in caving miners: Large scale physical models and full experiments", PhD Tesis, 2004, University of Queensland, Australia.

(Castro, Álvarez y Lett, 2020)

R. Castro, P. Álvarez y J.L. Lett, "BCRisk applications for SRF hazard analysis in PC1 Case study at Cadia East Operations", Proceeding, 2020 (para ser publicado), 8th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Chile.

(Arancibia, 2020)

L. Arancibia, "Modelamiento experimental y empírico de la dilución en Block Caving", MSc Tesis, 2020 (para ser publicado), Universidad de Chile, Chile.

(Susaeta, 2004)

A. Susaeta, "Theory of gravity flow. Part I and Part II", Proceeding, 2004, 4th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Chile.

CAPÍTULO 8:

ANEXOS

ANEXO A: Propiedades del material

De acuerdo con la caracterización realizada por Sotomayor (Sotomayor, 2016), la información suministrada por SRK (SRK, 2015) y pruebas realizadas en este estudio, las principales características del material grueso y fino se muestran en las Tabla 38 y 39, respectivamente.

Tabla 38: "Propiedades del material grueso"

Propiedad	Valor	Unidad de medida
Densidad aparente	1.56	g/cm ³
Densidad real	2.6	g/cm ³
D ₁₀	1	mm
D ₃₀	4	mm
D ₆₀	7	mm
Coefficiente de uniformidad	7	-
Coefficiente de curvatura	2.3	-
Esfericidad	0.7	-
Ángulo de fricción/reposo	40	°
Redondez	0.2	-
Carga puntual	1.7	Mpa
Composición	Cuarzo = Sericita	

Tabla 39: "Propiedades del material fino"

Propiedad	Valor	Unidad de medida
Densidad aparente	1.56	g/cm ³
Densidad real	2.6	g/cm ³
D ₁₀	0.4	mm
D ₃₀	0.6	mm
D ₆₀	1	mm
Coefficiente de uniformidad	2.5	-
Coefficiente de curvatura	1	-
Esfericidad	0.7	-
Ángulo de fricción/reposo	36	°
Redondez	0.2	-
Carga puntual	1.7	Mpa
Composición	Cuarzo = Sericita	

Los tamaños característicos D₁₀, D₃₀ y D₆₀ y los coeficientes de uniformidad y curvatura, están dados por las distribuciones granulométricas de las Tablas 40 y 42.

ANEXO B: Procedimiento experimental detallado

i. Procedimiento experimental detallado del grupo 1

El detalle de las etapas del Procedimiento experimental del grupo 1 se define a continuación:

- **Limpieza del modelo**

Previamente a realizar extracciones, se debe limpiar el modelo de las impurezas que haya sobre éste. Además se debe pulir y limpiar las paredes, especialmente de la batea, para lograr imágenes de mejor calidad.

- **Colocación de material grueso** hasta una altura determinada por sobre la batea.

Esta acción se realiza para las tres alturas del material grueso por sobre la batea, cada una correspondiente a un setup experimental: 25 [cm] para los setups 1 y 2, y 5 [cm] para el setup 3.

- **Colocación de material fino** por sobre el material grueso hasta una altura específica.

Esta acción se realiza para los tres setups: 10 [cm] para los setups 1 y 2, y 17 [cm] para el setup 3.

- Sólo si corresponde, **colocación de material grueso por sobre el fino.**

Esta acción se realiza para los setups 2 y 3, con alturas de 20 [cm] y 3 [cm], respectivamente.

- **Realización de extracciones** por un único punto hasta un determinado número de extracciones.

Para ello se utilizan las palas LHD a escala de laboratorio.

- **Anotación de masas extraídas en la planilla de registro** (ver ejemplo en el capítulo de Anexos, subcapítulo de ANEXO E: Extracto de planilla de registro en grupo 1).

En cada extracción mencionada en el punto anterior, se colecta la masa extraída en un recipiente. Dicha masa se pesa en una balanza digital de 5 gramos de precisión, descontando el peso del recipiente.

- **Anotación y registro fotográfico** de cualquier evento extraordinario.

ii. Procedimiento experimental detallado en grupos 2 a 5

Como el lector puede desprender, algunas de las actividades unitarias de los grupos experimentales 2 a 5 se repiten, y por esta razón se decide entregar sólo una definición para cada una de ellas.

- **Acondicionamiento del modelo**

El acondicionamiento del modelo se realiza posterior a la limpieza o bien a la remoción de todos los elementos usados en el ensayo anterior. En este estado la primera compuerta se encuentra suspendida, la segunda compuerta no está suspendida y los sistemas de giro (bisagras) están limpios y libres de material fino. El procedimiento a realizar es:

1. Levantar la segunda compuerta utilizando para ello su línea de soporte. Acomodar esta compuerta con la primera utilizando las manos de ser necesario.
2. Sujetar la línea de soporte de la compuerta 2 a la soga de sacrificio.
3. Ajustar la alineación de las dos compuertas. De ser necesario acortar o alargar las líneas de soporte para agregar o disminuir tensión, respectivamente.
4. Colocar las paredes de acrílico que fueron removidas en la etapa de limpieza.
5. Verificar la posición de los elementos anti filtro en los bordes de las compuertas.
6. Colocar en la posición y altura adecuada a los recipientes que recibirán el material expulsado por los extremos de la zanja.

- **Carga del modelo**

Antes de cargar el modelo se debe inspeccionar el estado de las líneas de soporte, el sistema anti filtro y la alineación de las compuertas. La carga del modelo se realiza lentamente al principio, de modo de incrementar la carga en forma gradual y facilitar el funcionamiento del sistema anti filtro. El procedimiento a realizar es:

1. Tener a disposición un recipiente con aproximadamente 5 Kg de material fino (equivalente a 1/5 parte de este recipiente).
2. Colocar el recipiente en el soporte de la escalera tipo tijera (de ahora en más, la escalera) de modo de evitar subir por la escalera cargando el recipiente.
3. Subir por la escalera hasta una posición adecuada respecto del modelo.
4. Tomar el recipiente y verter su contenido (5 kg) sobre una compuerta, evitando en lo posible que el material llegue a la conexión entre las compuertas.

5. Repetir los pasos 1, 2, 3 y 4 con un nuevo recipiente y verter su contenido sobre la otra compuerta.
6. Repetir los pasos 1, 2 y 3 y vaciar el material (5 kg) desde la compuerta 1 hacia la 2, de modo de rellenar el centro del modelo.
7. Usando guantes de seguridad, distribuir el material en forma plana.
8. En caso de filtración descontrolada se tienen tres opciones:
 - Usando los guantes, arrastrar el material y alejarlo del lugar de la filtración. Luego, cuando el sistema anti filtro esté al alcance de la vista, verificar su posición y de ser incorrecta, acomodar.
 - Colocar alguna especie de “tapón” hecho de papel normal. Esta opción sólo está disponible en el borde de las compuertas y se prohíbe usarlo en el centro.
 - Abortar el experimento, accionando el sistema y proceder directamente a la limpieza.
9. Realizar los pasos 1, 2 y 3 con recipientes que contengan a lo más 10 kg de material (2/5 partes del recipiente). Verter el contenido de forma pareja y acomodar el material en base al paso 7.
10. Repetir el paso 9 hasta conseguir la altura requerida de material fino (H_f).

- **Colocación de obstáculo**

Esta actividad unitaria se realiza sólo para el grupo experimental 3, y sólo una vez al comienzo de este grupo. El procedimiento es breve y consiste en:

1. Situar el pretil a una distancia específica desde el bullnose (L_0), medida desde su centro.
2. Fijar el obstáculo a la galería. Esto puede lograrse inmediatamente en el punto 1 si éste se coloca la presión, o en caso contrario utilizar cinta adhesiva.

- **Colocación de CMA**

Esta actividad unitaria se realiza sólo para el grupo experimental 4 y se debe ejecutar ensayo tras ensayo. El procedimiento a realizar es:

1. Se arma el CMA con sus estructuras de soporte (pilares).
2. Se coloca el CMA armado dentro de la batea.
3. Se ajusta el CMA al borde contrario de la batea de modo que no haya espacios para la entrada de material al punto que se pretende bloquear.

- **Colocación de UCMA y Colocación de material no consolidado sobre el UCMA**

Estas actividades unitarias se realizan sólo para el grupo experimental 5 y se deben ejecutar ensayo tras ensayo. El procedimiento a realizar es:

1. Se arma el UCMA con sus estructuras de soporte (pilares).
2. Se coloca el UCMA armado dentro de la batea.
3. Se ajusta el UCMA al borde contrario de la batea de modo que no haya espacios para la entrada de material al punto que se pretende bloquear.
4. Se vierte una determinada cantidad de material grueso sobre el UCMA, de modo de alcanzar la altura de diseño (H_{ucm}), la cual corresponde a 3.6 [cm] medidos en el eje vertical. La masa de material grueso necesaria es aproximadamente 1.5 [Kg].

- **Lanzamiento del material**

Previo al lanzamiento, se debe alejar a cualquier persona o parte del cuerpo de la trayectoria que realizan las líneas de soporte cuando son liberadas, de modo de evitar cualquier accidente. También se debe alejar la escalera y situarla en una ubicación que no dificulte dicha trayectoria.

Para el lanzamiento, se debe cortar la **soga de sacrificio** con una tijera.

- **Medición de parámetros**

Esta actividad consiste en la medición de los parámetros declarados en el subcapítulo [Variables fijas, variables móviles y parámetros a observar](#).

- **Limpieza del modelo**

El procedimiento a realizar es:

1. Colocar una nueva soga de sacrificio en el exterior del modelo.
2. Sacudir la primera compuerta (para remover el material fino atrapado en su sistema de giro, esto es, las bisagras), levantarla y sujetarla a la soga de sacrificio usando su línea de soporte.
3. Remover las paredes de acrílico del modelo (las que sean necesarias) de modo de tener acceso al material depositado.
4. Sacudir la segunda compuerta con el fin de hacer caer el material atrapado dentro.
5. Mover el material manualmente por la zanja de modo de vaciar la batea. Recolectar el material en recipientes adecuados y limpios.

Nota: en el caso del grupo experimental 5, esta remoción debe realizarse con cuidado, de modo de evitar (en lo posible) la mezcla de materiales finos y gruesos.

6. Cuando se desocupe el volumen interior de la batea, mover el material yacido dentro del modelo hacia la batea, rellenando su volumen.
7. Repetir el paso 2 si el material dentro del modelo es abundante (10 y 15 cm).
8. Repetir el paso 1 de modo de desocupar finalmente la batea.
9. En el caso del grupo experimental 4, pasar a la actividad de Remoción de CMA.
En el caso del grupo experimental 5, pasar a las actividades de Remoción de material no consolidado y Remoción de UCMA.
10. Luego de completar los pasos anteriores, se debe limpiar la zanja de modo de no dejar material fino remanente.

- **Remoción de CMA**

El procedimiento a realizar es:

1. Remover el artefacto de modo de alejarlo de las paredes de la batea.
2. Sacudir el artefacto dentro de la batea.
3. Colocar el artefacto dentro del modelo y a un costado de la batea, de modo de proseguir con el paso 10 de la actividad de Limpieza.

- **Remoción de material no consolidado**

El procedimiento a realizar es:

1. Remover el material no consolidado parcialmente mezclado con el material fino liberado y vaciarlo a un recipiente.

Nota: este material mezclado no puede utilizarse directamente en el siguiente ensayo, y esto se debe a que no se cumple la distribución granulométrica del material grueso puesto que éste tiene una masa de material fino más grande que la que le corresponde en su condición inicial.

2. Utilizar tamiz de malla 8 (#8 ASTM) para separar el material grueso del fino. De esta forma el material grueso pierde la fracción más fina de su distribución granulométrica.
3. Utilizar una masa específica de material fino para completar la granulometría del material grueso, equivalente a 40 [g]. De esta forma, entre dos ensayos con iguales o diferentes H_r , se tiene la misma condición inicial de material grueso no consolidado.

4. Después del paso anterior, se debe proseguir con la Remoción de UCMA, y de esta forma terminar con la actividad de Limpieza del modelo.

- **Remoción de UCMA**

Esta actividad unitaria es la última sub actividad dentro de la actividad de Limpieza del modelo en el caso del grupo experimental 5. El procedimiento a realizar es:

1. Remover el artefacto de modo de alejarlo de las paredes de la batea.
2. Sacudir el artefacto dentro de la batea.
3. Colocar el artefacto dentro del modelo y a un costado de la batea, de modo de proseguir con el paso 10 de la actividad de Limpieza.

ANEXO C: Preparación de material grueso en forma detallada

En el caso del grupo 1, se usa la distribución granulométrica de la Tabla 40. La Tabla 41, por su parte, muestra la distribución para los grupos 4 y 5.

Tabla 40: Preparación de material grueso en grupo experimental 1"

Tamaño superior [" ASTM]	Tamaño [cm] escala mina	Porcentaje retenido [%]	Masa en Setup 1 [Kg]	Masa en Setup 2 [Kg]	Masa en Setup 3 [Kg]
1" 1/8	145	0	0	0	0
1"	125	6	12	19.5	10.5
3/4"	95	5	10	16.3	8.8
1/2"	63	35	70	113.7	61.2
1/4"	32	43	86	139.7	75.2
#8	12	9	18	29.3	15.8
#30	3	2	4	6.5	3.5
Total	-	100	200	325	175

Tabla 41: Preparación de material grueso en grupos 4 y 5"

Tamaño superior [" ASTM]	Tamaño [cm] escala mina	Porcentaje retenido [%]	Masa en grupo 4 [Kg]	Masa en grupo 5 [Kg]
1" 1/8	145	0	0	0
1"	125	6	0.4	0.4
3/4"	95	5	0.3	0.3
1/2"	63	35	2.1	2.1
1/4"	32	43	2.6	2.6
#8	12	9	0.5	0.5
#30	3	2	0.1	0.1
Total	-	100	6	6

Los equipos de laboratorio utilizados se muestran en las siguientes figuras.



Figura 60: "Cajones de clasificación"



Figura 61: "Harnero eléctrico con mallas ASTM"



Figura 62: "Tamices ASTM"

Finalmente, para el caso del material grueso se tiene el siguiente protocolo de obtención:

1. Pasar el material por la malla de 1 pulgada (1" ASTM) del harnero eléctrico.
2. El sobre tamaño del paso 1 se pasa por el cajón de clasificación de malla 1 pulgada y 1/8 (1" 1/8 ASTM).
3. El material fino del paso 2 queda como material retenido en la malla 1" y pasante en 1" 1/8. El material no pasante del paso 2 queda descartado del sistema.
4. Repetir los pasos 1, 2 y 3 hasta obtener la masa retenida en el intervalo 1" – 1" 1/8.
5. Teniendo la masa, se utiliza la siguiente malla del harnero eléctrico, correspondiente a 3/4" y se repite el paso 1. La masa retenida en esta malla queda como masa retenida a 3/4", mientras que el fino se utiliza para los tamaños siguientes.
6. Repetir el paso 5 con las mallas 1/2" y 1/4" (ASTM) obteniendo la masa requerida en forma retenida en los intervalos correspondientes.
7. El material pasante de 1/4" se manipulará con tamices.
8. Se repite el paso 1, pero no utilizando el harnero eléctrico, sino dos mallas de tamices: #8 y #30 (ASTM), hasta alcanzar la masa retenida en los intervalos correspondientes.

ANEXO D: Preparación de material fino en forma detallada

En este caso, se requiere la distribución granulométrica que se muestran en las Tablas 42 y 43. La Tabla 42 es respecto al grupo experimental 1 y la Tabla 43 a los demás grupos.

Tabla 42: Preparación de material fino en grupo experimental 1"

Tamaño superior [" ASTM]	Tamaño [cm] escala mina	Porcentaje retenido [%]	Masa en Setup 1 [Kg]	Masa en Setup 2 [Kg]	Masa en Setup 3 [Kg]
#8	12	0	0	0	0
#12	8.5	37	16.9	16.9	29
#16	6	33	15.2	15.2	26
#30	3	30	13.9	13.9	24
Total	-	100	46	46	79

Tabla 43: "Preparación de material fino para los grupos experimentales 2 a 5"

Tamaño superior [" ASTM]	Tamaño esc. mina [cm]	Porcentaje retenido [%]	Masa para $H_f = 3$ [cm] [Kg]	Masa para $H_f = 5$ [cm] [Kg]	Masa para $H_f = 10$ [cm] [Kg]	Masa para $H_f = 15$ [cm] [Kg]
#8	12	0	0	0	0	0
#12	8.5	37	5.2	8.5	16.9	25.8
#16	6	33	4.6	7.5	15.2	23
#30	3	30	4.2	7	13.9	21.2
Total	-	100	14	23	46	70

El procedimiento a realizar para la obtención de este material consiste en:

1. Pasar el material por la malla 8 (#8 ASTM) de la serie de tamices.
2. Toda partícula superior a la #8 debe ser eliminada del sistema.
3. Utilizar la malla 10 (#10 ASTM) y pasar el material de bajo tamaño del paso 1.
4. El sobre tamaño de la #10 se utiliza como masa retenida del intervalo #10 - #8. El material de bajo tamaño se utiliza para la siguiente malla.
5. Repetir los pasos 3 y 4 con el material remanente hasta alcanzar la masa retenida en el intervalo #16 - #10.
6. Repetir los pasos 3 y 4 con el material remanente hasta alcanzar la masa retenida en el intervalo #30 - #16.

ANEXO E: Extracto de planilla de registro en grupo 1

En la Tabla 44 se muestra un extracto de la planilla de registro para las extracciones en setup 1.

Tabla 44: "Extracto planilla de registro grupo 1, setup 1"

Extracción	Masa [g]	Comentarios
87	125	
88	110	
89	70	
90	30	
91	40	Formación de colgadura
92	130	
93	135	
94	120	

En la Tabla 45 se muestra un extracto de la planilla de registro para las extracciones en setup 2.

Tabla 45: "Extracto planilla de registro grupo 1, setup 2"

Extracción	Masa [g]	Comentarios
1	115	
2	115	
3	105	
4	120	
...
447	100	
448	120	
449	110	
450	125	

Nota: el símbolo "..." indica continuidad en el número de extracciones.

En la Tabla 46 se muestra un extracto de la planilla de registro para las extracciones en setup 3.

Tabla 46: "Extracto planilla de registro grupo 1, setup 3"

Extracción	Masa [g]	Comentarios
29	70	
30	50	
31	40	Formación de colgaduras
32	105	
...	...	
49	60	
50	50	
51	40	Formación de colgaduras
52	130	

Nota: el símbolo "..." indica continuidad en el número de extracciones.

ANEXO F: Otros resultados del grupo 2 (condiciones finales)

En las siguientes figuras se muestran fotografías de las condiciones finales de deposición del material en el grupo experimental 2 y en función de cada H_f .



Figura 63: "Vista lateral de batea en grupo 2 para $H_f = 3$ [cm]"



Figura 64: "Vista lateral de batea en grupo 2 para $H_f = 5$ [cm]"



Figura 65: "Vista lateral de batea en grupo 2 para $H_f = 10$ [cm]"



Figura 66: "Vista lateral de batea en grupo 2 para $H_f = 15$ [cm]"

ANEXO G: Otros resultados del grupo 3 (condiciones finales)

En las siguientes figuras se muestran fotografías de las condiciones finales de deposición del material en el grupo experimental 3 y en función de cada H_f .



Figura 67: "Vista frontal de zanja en grupo 3 para $H_f = 3$ [cm]"



Figura 68: "Vista lateral de batea en grupo 3 para $H_f = 3$ [cm]"



Figura 69: "Vista frontal de zanja en grupo 3 para $H_f = 5$ [cm]"



Figura 70: "Vista lateral de batea en grupo 3 para $H_f = 5$ [cm]"



Figura 71: "Vista frontal de zanja en grupo 3 para $H_f = 10$ [cm]"



Figura 72: "Vista lateral de batea en grupo 3 para $H_f = 10$ [cm]"



Figura 73: "Vista frontal de zanja en grupo 3 para $H_f = 15$ [cm]"



Figura 74: "Vista lateral de batea en grupo 3 para $H_f = 15$ [cm]"

ANEXO H: Otros resultados del grupo 4 (condiciones finales)

En las siguientes figuras se muestran fotografías de las condiciones finales de deposición del material en el grupo experimental 4 y en función de cada H_f .



Figura 75: "Vista frontal de zanja en grupo 4 para $H_f = 3$ [cm]"



Figura 76: "Vista lateral de batea en grupo 3 para $H_f = 3$ [cm]"



Figura 77: "Vista frontal de zanja en grupo 4 para $H_f = 5$ [cm]"



Figura 78: "Vista lateral de batea en grupo 3 para $H_f = 5$ [cm]"



Figura 79: "Vista frontal de zanja en grupo 4 para $H_f = 10$ [cm]"



Figura 80: "Vista lateral de batea en grupo 4 para $H_f = 10$ [cm]"



Figura 81: "Vista frontal de zanja en grupo 4 para $H_f = 15$ [cm]"



Figura 82: "Vista lateral de batea en grupo 4 para $H_f = 15$ [cm]"

ANEXO I: Otros resultados del grupo 5 (condiciones finales)

En las siguientes figuras se muestran fotografías de las condiciones finales de deposición del material en el grupo experimental 5 y en función de cada H_f .



Figura 83: "Vista frontal de zanja en grupo 5 para $H_f = 3$ [cm]"



Figura 84: "Vista lateral de batea en grupo 5 para $H_f = 3$ [cm]"



Figura 85: "Vista frontal de zanja en grupo 5 para $H_f = 5$ [cm]"



Figura 86: "Vista lateral de batea en grupo 5 para $H_f = 5$ [cm]"



Figura 87: "Vista frontal de zanja en grupo 5 para $H_f = 10$ [cm]"



Figura 88: "Vista lateral de batea en grupo 5 para $H_f = 10$ [cm]"



Figura 89: "Vista frontal de zanja en grupo 5 para $H_f = 15$ [cm]"



Figura 90: "Vista lateral de batea en grupo 5 para $H_f = 15$ [cm]"