

MODELACIÓN FÍSICA DEL FENÓMENO DE MIGRACIÓN DE FINOS EN MINERÍA DE CAVING

CRISTIAN ANTILAO NEIRA

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil de Minas

Resumen

La minería de *caving* requiere del control de múltiples variables, por lo que conocer la mayor cantidad de información de los parámetros que la afectan es esencial para una operación rentable económicamente y con altos estándares de seguridad. Un desafío durante la extracción de mineral está asociado a la migración de finos, que influye en el flujo de material, si es estéril, diluyendo el mineral y que frecuentemente se encuentra en presencia de humedad. Sin embargo, hay pocos estudios de flujo gravitacional en minería de *caving* que consideren el efecto de la humedad.

El objetivo de este trabajo es el estudio del fenómeno de migración preferencial de material fino a través de experimentos controlados que permitan simular el comportamiento del flujo del material fino y grueso, cuantificando el impacto generado por el material fino, en presencia de humedad.

Para lograr el objetivo se diseñó y construyó un modelo físico a escala 1:100 con dimensiones de 40 cm X 36 cm y una altura de columna de extracción de 100 cm. El set up experimental consideró un material grueso compuesto por grava con un d_{50} de 11.05 mm con porcentajes de humedad de 0%, 2% y 4%, y un material fino con un d_{50} de 0.96 mm dispuesto sobre el material grueso. Para cada experimento, se simuló una extracción a través de dos puntos de extracción. El análisis del comportamiento del flujo gravitacional se realizó con la ayuda de marcadores dispuestos en la columna de material y la cuantificación de la dilución del mineral a través del PED medido en los puntos de extracción.

Los resultados indican que el porcentaje de humedad del material grueso si influye en la migración preferencial del material fino, retrasando su aparición en los puntos de extracción, para el set-up utilizado, debido probablemente al aumento de la cohesión y la formación de arcos cohesivos que dificultan la percolación del fino en bajas cantidades. El porcentaje de entrada de dilución se estimó en 21%, 27% y 32% para los experimentos con 0%, 2% y 4% de humedad del material grueso respectivamente. Por lo que la presencia de humedad aumenta el PED y la geometría de la zona de extracción siendo un parámetro relevante en el flujo por gravedad.

Abstract

Caving mining requires the control of multiple variables, so understanding as much information as possible is essential for a profitable operation with high safety standards. One mine problem is related to the migration of fines, which influences the granular flow, if it is waste, diluting the mineral and that is frequently found in the presence of moisture. However, there are few studies of gravity flow in caving mining that consider the effect of moisture.

The objective of this work is to study the phenomenon of preferential migration of fine material through experiments that allow the fine and coarse material flow to be simulated, quantifying the impact generated by the fine material, in the presence of humidity.

A physical model was designed and built to achieve the objective, at a scale of 1:100 with dimensions of 40 cm X 36 cm and an extraction column height of 100 cm. The experimental set up considered a coarse material composed of gravel with a p_{50} of 11.05 mm with moisture contents of 0%, 2% and 4%, and a fine material with a p_{50} of 0.96 mm placed over the coarse material. Material was extracted through two drawpoints at the bottom. The analysis of the gravity flow behavior was performed with the help of markers arranged in the column of material and the quantification of the dilution of the mineral through the PED measured at the drawpoints.

The results indicate that the moisture content in the coarse material delayed the preferential migration of the fine material, at the drawpoints. This probably because increased cohesion and the formation of cohesive arcs that make it difficult to percolate the fine. The dilution entry percentage was estimated at 21%, 27% and 32% for the experiments with 0%, 2% and 4% moisture content of the coarse material, respectively. Therefore, the presence of humidity increases the PED and the geometry of the extraction zone, being a relevant parameter in the gravity flow.

Índice

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN.....	2
1.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3	OBJETIVO GENERAL	3
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2	ANTECEDENTES	4
2.1	MEDIO GRANULAR.....	4
2.2	FLUJO GRAVITACIONAL.....	6
2.3	TEORÍA DEL FLUJO DE MATERIAL GRANULAR EN MINERÍA DE CAVING	11
2.4	EL FENÓMENO DE MIGRACIÓN DE FINO EN MINERÍA DE CAVING	16
2.4.1	<i>Dilución del mineral</i>	19
2.4.2	<i>Presencia de humedad</i>	25
3	DESARROLLO EXPERIMENTAL	25
3.1	ANÁLISIS DE SIMILITUD PARA EL MATERIAL GRANULAR	25
3.1.1	<i>Escala del modelo físico</i>	27
3.1.2	<i>Diseño del modelo físico</i>	29
3.1.3	<i>Caracterización del material</i>	31
3.2	PLAN EXPERIMENTAL.....	34
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	38
4.1	GEOMETRÍA DE LA ZONA DE EXTRACCIÓN.....	44
4.2	DILUCIÓN PRODUCTO DE LA MIGRACIÓN PREFERENCIAL DE MATERIAL FINO.....	47
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5.1	RECOMENDACIONES.....	53
6	BIBLIOGRAFÍA	54
7	ANEXOS	58
7.1	ANEXO A: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MATERIAL GRUESO	58
7.2	ANEXO B: ENSAYOS DE CORTE DIRECTO DEL MATERIAL	59

7.3	ANEXO C: PROCEDIMIENTO DE CARGADO DEL MODELO	63
7.4	ANEXO D: CÁLCULO DEL ESFUERZO VERTICAL EN EL MODELO AL INICIO DE LA EXTRACCIÓN.....	64

Índice de Figuras

Figura 1. Tipos de movimiento de las partículas de material suelto, (a) movimiento primario, (b) movimiento secundario [8].	6
Figura 2. Flujo gravitacional de material granular, zona pasiva (P) y zona activa (A) [3].	7
Figura 3. Forma del elipsoide de movimiento en función del tamaño de la partícula [8].	7
Figura 4. Elipsoide de Movimiento (E_N) o Zona de Extracción Aislada (IEZ) y su Elipsoide Límite (E_G) o Zona de Movimiento Aislado (IMZ) [12].	8
Figura 5. Baja actividad en el flujo de partículas en el contenedor debido al espaciamiento ($p > c$) [8].	9
Figura 6. Alta actividad en el flujo de partículas en el contenedor debido al espaciamiento ($p < c$) [8].	10
Figura 7. Mecanismo de flujo granular. A la izquierda, rutas de flujo de material para un punto de extracción aislado. A la derecha, ruta de flujo de material en múltiples puntos de extracción [28].	11
Figura 8. Mecanismo de difusión de vacío. A la izquierda, formación de un canal preferencial que conduce a un agujero de rata para un punto de extracción aislado. A la derecha, superposición de múltiples cuerpos de extracción de "palma y dedo" en múltiples puntos de extracción simultáneos [28].	12
Figura 9. Representación del comportamiento del Flujo gravitacional según la estrategia de extracción descrito por Susaeta, donde v_{ta} es la tasa de flujo aislado y v_{ti} es la tasa de flujo interactivo [16].	14
Figura 10. Cuantificación de la migración de finos a través del HIZ [28].	20
Figura 11. Factor de control de tiraje (DCF) [28].	20
Figura 12. Los tres principales mecanismos de dilución en un <i>block caving</i> . (a) migración de finos, (b) extracción aislada y (c) <i>rilling</i> [22].	22
Figura 13. Secuencia de mecanismo de entrada de dilución vertical [39].	23
Figura 14. Secuencia de mecanismo de entrada de dilución lateral [39].	23
Figura 15. Secuencia mecanismo de entrada de dilución posterior a un evento de colgadura [39].	23
Figura 16. Diseño batea rectangular.	29
Figura 17. Diseño del modelo físico escala 1:100.	30

Figura 18. Pala de extracción de material que representa un LHD de 10m ³ (13 yd ³) escalado.....	30
Figura 19. Curva granulométrica del material fino y grueso utilizado para la modelación.....	31
Figura 20. Relación entre los esfuerzos de corte residuales y los esfuerzos normales para los materiales utilizados en la modelación.....	32
Figura 21. Disposición del material fino sobre el grueso, altura de interfaz.	34
Figura 22. Vista en perfil de la disposición de los marcadores en la columna de mineral. Líneas punteadas negras indican las capas de marcadores finos y líneas punteadas azules indican las capas de marcadores gruesos.	36
Figura 23. Vista en planta de la malla de la posición de los marcadores.	36
Figura 24. Condiciones iniciales de cada composición experimental al cargar el modelo. A: 0% humedad del material grueso. B: 2% humedad del material grueso. C: 4% humedad del material grueso.....	38
Figura 25. Experimentos 1, 2 y 3 resultados del material fino extraído desde los puntos de extracción en función de la masa total extraída.....	40
Figura 26. Replicación experimental (Experimentos 1 y 4).....	41
Figura 27. Replicación experimental (Experimentos 2 y 5).....	41
Figura 28. Replicación experimental (Experimentos 3 y 6).....	42
Figura 29. Curvas ajustadas del material fino extraído desde los puntos de extracción en función de la masa total extraída.....	42
Figura 30. Condiciones finales de cada composición experimental tras #100 extracciones, donde “a” corresponde al ancho y “h” a la profundidad del hundimiento en superficie. A: 0% humedad del material grueso. B: 2% humedad del material grueso. C: 4% humedad del material grueso.	44
Figura 31. Zona de extracción de dos planos verticales. A: Exp.1. B: Exp.2. C: Exp.3.....	46
Figura 32. Relación entre el PED Promedio y el porcentaje de humedad del material grueso.....	47
Figura 33. Condiciones finales en los puntos de extracción de cada composición experimental tras #100 extracciones. A: 0% humedad del material grueso. B: 2% humedad del material grueso. C: 4% humedad del material grueso.	48
Figura 34. Comparativa de la masa a escala mina de fino extraída desde los puntos de extracción en función de la masa total y las características del material utilizado.	49

Figura 35. Entrada de dilución experimental y estimada en mina según ecuación de Laubscher [28].	50
Figura 36. Curva granulométrica real de una operación minera de CODELCO Chuquicamata subterránea y curva granulométrica escalada 1:100 [50].	58
Figura 37. Máquina para ensayo de corte directo Shearlab de Matest.	59
Figura 38. Gráfico de esfuerzo de corte vs deformación para distintos esfuerzos normales para el material fino (arcilla).	59
Figura 39. Gráfico de esfuerzo de corte vs deformación para distintos esfuerzos normales para el material grueso (grava).	60
Figura 40. Gráfico de esfuerzo de corte vs deformación para distintos esfuerzos normales para el material grueso (grava) al 2% humedad.	61
Figura 41. Gráfico de esfuerzo de corte vs deformación para distintos esfuerzos normales con material grueso (grava) al 4% humedad.	62
Figura 42. Procedimiento de cargado del material grueso. A: cargado y posicionamiento de marcadores en la batea. B: cargado y posicionamiento de marcadores en la columna del modelo. C: vista general del cargado del material grueso.	63
Figura 43. Procedimiento de cargado del material fino. A: cargado y posicionamiento de marcadores en la columna del modelo. B: vista general del cargado del material.	63

Índice de Tablas

Tabla 1. Comparación de las características de extracción para flujo granular y difusión de vacío [28].	14
Tabla 2. Parámetros que controlan la razón de percolación [37]......	18
Tabla 3. Resumen de varios modelos físicos construidos para el estudio del flujo gravitacional.	28
Tabla 4. Dimensiones de batea rectangular a escala 1:100.....	29
Tabla 5. Resumen de algunos de los datos más importantes de la caracterización del material.	33
Tabla 6. Configuraciones experimentales.	35
Tabla 7. Principales parámetros obtenidos de los experimentos físicos.....	39
Tabla 8. Resumen frecuencia de colgaduras.....	43
Tabla 9. Geometría del hundimiento en superficie de la columna de material	45
Tabla 10. Resumen de características del material fino obtenidas del ensayo de corte directo.	60
Tabla 11. Resumen de características del material grueso obtenidas del ensayo de corte directo.	60
Tabla 12. Resumen de características del material grueso al 2% de humedad obtenidas del ensayo de corte directo.	61
Tabla 13. Resumen de características del material grueso al 4% de humedad obtenidas del ensayo de corte directo.	62

Nomenclatura

HIZ: Altura de Interacción

IEZ: Zona de Extracción Aislada

EZ: Zona de Extracción

IMZ: Zona de Movimiento Aislada

Dta: Diámetro de Extracción Aislado

RMR: Clasificación de Masa Rocosa

VD: Difusión de Vacío

SF: Factor de Esponjamiento

DCF: Factor de Control de Tiraje

RU: Tasa de Socavación

RC: Tasa de Hundimiento

RD: Tasa de Daño

PED: Porcentaje de entrada de dilución

1 Introducción

Debido a la profundización de las operaciones mineras por el agotamiento de las reservas superficiales, el paso de extracciones de mineral de cielo abierto a métodos de minería subterránea de gran escala como Block/Panel Caving se han vuelto más frecuentes y han adquirido mayor relevancia, ya que presentan menores costes operacionales por tonelada extraída y una alta productividad [1].

A pesar de que las operaciones de *caving* tienen un menor coste operacional que las operaciones a cielo abierto, esto trae consigo un aumento de los riesgos operativos (Ejemplo: estallidos de rocas y aire o avalanchas de lodo), por lo que se requiere de un mayor conocimiento y control de las múltiples variables de operaciones.

En los métodos de *caving*, la extracción del material fragmentado se produce principalmente por el hundimiento del material debido a su propio peso, en lo que se conoce como flujo gravitacional donde el material se mueve desde su posición inicial debido a la gravedad y posteriormente es recolectado en puntos de extracción [2]. El comportamiento del flujo gravitacional depende principalmente de variables como el contenido de humedad, el tamaño de las partículas, el espaciamiento de los puntos de extracción y la estrategia de extracción [3,4]. Parámetros que influyen en la forma de la zona de extracción y en la recuperación del mineral, así como en aspectos de seguridad de la operación.

En este sentido, el fenómeno de migración de material fino debido a la percolación de este a través del material grueso constituye uno de los grandes problemas en las operaciones, disminuyendo la ley y recuperación del mineral al diluir las reservas. Además, en presencia de humedad pueden existir riesgos de corrientes de lodo al acumularse fino sobre arcos cercanos a los puntos de extracción [5]. Por lo que la incidencia de material fino en la columna de extracción es importante y determinar las variables que afectan este fenómeno presentan un interés, para controlar sus efectos.

1.1 Motivación

El flujo gravitacional, a pesar de ser ampliamente estudiado en modelos físicos, aún requiere mayores validaciones para las condiciones de una mina específica, esto debido a que los estudios de los parámetros involucrados se estudian muchas veces de manera individual, despreciando variables, lo que no representa una situación ideal de las condiciones reales de una mina.

A pesar de esto, en operaciones mineras de *caving* la cantidad de información con la que se cuenta es fundamental para tener operaciones más eficientes, rentables y seguras, por lo que el estudio de fenómenos específicos a escala sigue siendo una buena herramienta, con estudios experimentales más sencillos, con menor coste y que requieren menos tiempo de ejecución.

En este sentido, el fenómeno de migración preferencial de material fino es una problemática de interés en minería de *caving*, ya que puede causar problemas de reservas disminuyendo su ley, además de problemas asociados a la seguridad de las operaciones y de la cual se requiere mayores conocimientos, realizando estudios que incluyan más variables o parámetros presentes en una operación de *caving* real, como lo puede ser la presencia de humedad.

1.2 Planteamiento del problema

Las operaciones mineras de *caving* presentan grandes desafíos con el aumento de las profundidades de extracción y los diferentes casos y parámetros presentes en las diferentes operaciones alrededor del mundo, lo que requiere del control de múltiples variables y estudios específicos para los problemas presentes, con el objetivo de contar con operaciones seguras y rentables.

Es por esto por lo que se plantea el estudio del problema de la percolación de material fino en presencia de humedad, y su impacto principalmente en la dilución del mineral, lo que disminuye reservas y ley del mineral.

1.3 Objetivo General

Analizar a través de un modelo físico a escala el fenómeno de migración preferencial de material fino en presencia de humedad durante el flujo gravitacional.

1.4 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica en base a la migración de finos en minería de *caving*.
- Diseñar y construir un modelo a escala de la extracción uniforme de mineral a través de dos puntos de extracción en minería de *caving* para el estudio de la migración preferencial de material fino.
- Definir los sets up experimentales que ayudaran a probar las hipótesis de trabajo.
- Identificar el flujo gravitacional con la ayuda de marcadores y la migración de finos debido a la extracción uniforme de mineral en un modelo físico.
- Cuantificar el PED en diferentes configuraciones experimentales.
- Determinar la geometría de las zonas de extracción.
- Analizar las diferencias de las distintas configuraciones experimentales.

2 Antecedentes

Para entender el efecto de la migración de partículas finas durante el flujo gravitacional se debe entender el medio granular que compone este flujo de material y los factores o mecanismos presentes y por el cual se produce el efecto de migración preferencial. En el siguiente capítulo se presenta un marco teórico que recopila los antecedentes esenciales que dan contexto y fundamento a la temática estudiada.

2.1 Medio granular

En términos generales, se define un medio granular como una colección de partículas macroscópicas rígidas, cuyo tamaño de partícula es típicamente mayor de 100 μm . La gravedad y las fuerzas de contacto sólido como la elasticidad y la fricción son las interacciones más importantes para los granos macroscópicos. Sin embargo, pueden existir otras interacciones como lo son las fuerzas electrostáticas. Para partículas más pequeñas, de diámetro entre 1 μm y 100 μm , denominados polvos (*powders*), otras interacciones como las fuerzas de Van der Waals, la capilaridad y la resistencia del aire adquieren relevancia [6].

Uno de los desafíos en los estudios de los medios granulares se encuentran en las dificultades que existen para su descripción, las que se deben principalmente a [6]:

- Cantidad elevada de partículas: Lo que hace complejo la simulación en computadores.
- Fluctuaciones de temperatura despreciables: Energía térmica despreciable en comparación a la energía gravitacional.
- Falta de una separación de escalas: Falta de una clara separación de escala entre la escala microscópica (tamaño de grano), y la escala macroscópica (tamaño del flujo).
- Compleja interacción entre los granos: A nivel de grano, las leyes del contacto sólido entre dos partículas involucran fenómenos no triviales y altamente no lineales como la fricción y los choques inelásticos.
- Los medios granulares pueden presentar diferentes estados de la materia: Dependiendo de la forma en que sea manipulado, un material granular puede comportarse como un sólido, un líquido o un gas.

El comportamiento de un material granular está directamente relacionado con la naturaleza de las interacciones entre los granos. Un primer tipo de interacción entre granos es el contacto sólido entre dos granos secos generalmente divididos en una fuerza normal y una fuerza tangencial [6,7]. Dentro de este tipo de interacción se encuentran:

- Contacto elástico: Deformación elástica al poner dos cuerpos en contacto.
- Fricción sólida: Fricción entre partículas.
- Colisiones inelásticas entre partículas: A diferencia de las dos anteriores en que las partículas están en permanente contacto, en el caso de flujos granulares, se deben considerar también las colisiones entre partículas.

Otros tipos de interacción entre granos son [6]:

- Fuerzas electrostáticas: Puede ocurrir si las partículas se cargan durante su manipulación, como suele ser el caso en una atmósfera seca.
- Fuerzas adhesivas: Incluso en ausencia de carga eléctrica, siempre existe una pequeña atracción entre dos cuerpos macroscópicos idénticos debido a las interacciones entre sus componentes moleculares, como las fuerzas de Van der Waals, las interacciones dipolares y los enlaces de hidrógeno.
- Cohesión capilar: En una atmósfera húmeda, la condensación de agua entre los granos puede inducir una cantidad significativa de cohesión debido a las fuerzas capilares y que, para partículas muy pequeñas, esta cohesión puede surgir de las fuerzas moleculares de Van der Waals.
- Puentes sólidos: Bajo ciertas condiciones se pueden formar puentes sólidos entre los granos, dando cohesión a la estructura granular.

2.2 Flujo gravitacional

El flujo por gravedad es el proceso mediante el cual un material granular se mueve desde su posición inicial debido a la gravedad [2]. Históricamente, los principales métodos de estudio de este fenómeno han sido las pruebas de modelos de laboratorio con arena, grava o roca triturada [1-4,8-19], modelos estocásticos [20,21], simulaciones computacionales [5,22] y los estudios de campo más difíciles y menos genéricos que utilizan marcadores in situ de varios tipos [23-25], lo que sentó las bases para las teorías del flujo de material granular en minería de *caving*.

Ensayos realizados en material granular suelto describieron el comportamiento de estos bajo un régimen de flujo gravitacional, donde los granos individuales pueden ejecutar un movimiento primario en la dirección de la gravedad y un movimiento secundario donde los granos son capaces de inclinarse y girar, como se muestra en la Figura 1.

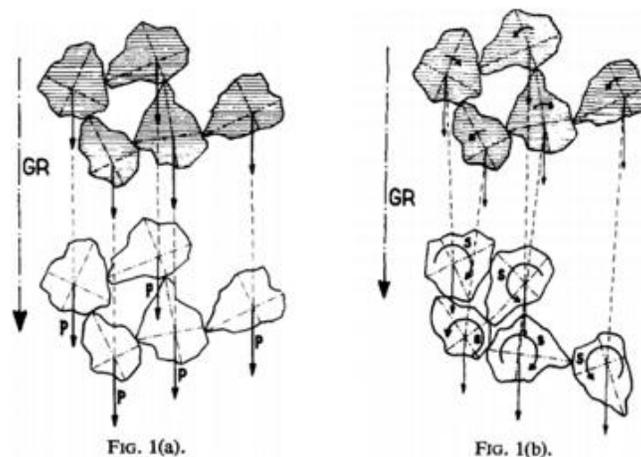


Figura 1. Tipos de movimiento de las partículas de material suelto, (a) movimiento primario, (b) movimiento secundario [8].

Estos movimientos de las partículas generan zonas de flujo gravitacional preferenciales que se separan en dos zonas principales, zona pasiva donde las partículas están prácticamente quietas y por lo tanto no hay movimiento y zona activa donde existe movimiento de las partículas por efecto de la extracción del material y que se caracteriza por tener forma de elipsoide (Figura 2). Para un modelo 3D este elipsoide tiene la forma de un elipsoide de revolución elongada, cuyos parámetros se pueden calcular en función del volumen de material que se extrae para formar dicho elipsoide [3].

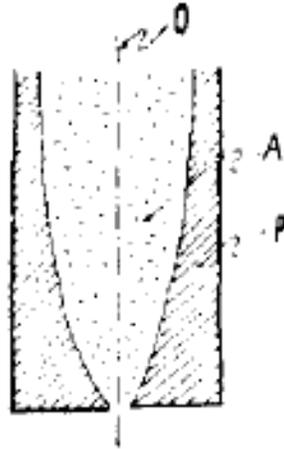


Figura 2. Flujo gravitacional de material granular, zona pasiva (P) y zona activa (A) [3].

Resultados experimentales sugieren que las dimensiones, el diámetro, y la altura de la zona de extracción o zona de flujo gravitacional en forma de elipsoide, depende de tres variables: Contenido de humedad, el tamaño de las partículas y la masa de extracción acumulada [4]. Otros le otorgan la forma de este elipsoide solo a parámetros como su excentricidad no constante y al tamaño de la partícula, donde partículas más pequeñas generan un elipsoide de movimiento más angosto y una mayor excentricidad y en contraposición partículas más grandes extienden el ancho del elipsoide, disminuyendo la excentricidad (Figura 3), existiendo una tendencia de las partículas de mayor tamaño a fluir con mayor dificultad [3,12].

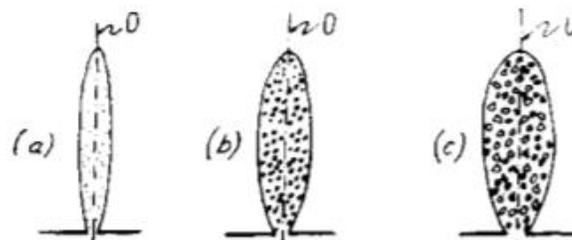


Figura 3. Forma del elipsoide de movimiento en función del tamaño de la partícula [8].

En la investigación del flujo gravitacional de roca tronada en minería de *caving*, hay dos conceptos principales que describen la forma del material que se mueve dentro en el flujo. Varios autores se han referido a estas formas de diferentes maneras.

El primero de ellos se refiere al contorno que rodea la ubicación original del material que se ha extraído desde los puntos de extracción en un momento dado. Esto se ha definido como Elipsoide de Movimiento (E_N), Elipsoide de Extracción, o como Zona de Extracción Aislada (*Isolated Extraction Zone*, IEZ).

El segundo concepto hace referencia al contorno que rodea la ubicación original del material que se ha movido de su ubicación original (pero no necesariamente se ha eliminado en el punto de extracción) en un momento dado. Este elipsoide de movimiento crece hasta un límite. Fuera de este límite que está formado por los contornos exteriores de este elipsoide, el material granular permanece estacionario por lo que no existe movimiento. A esto se le ha llamado, entre otras cosas, Elipsoide Límite de Movimiento (E_G), o como Zona de Movimiento Aislado (*Isolated Movement Zone*, IMZ) [12,26]. Conceptos que se muestran en la Figura 4.

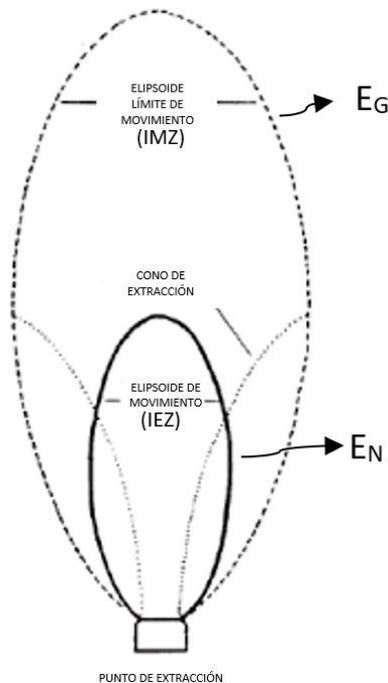


Figura 4. Elipsoide de Movimiento (E_N) o Zona de Extracción Aislada (IEZ) y su Elipsoide Límite (E_G) o Zona de Movimiento Aislado (IMZ) [12].

Como este flujo gravitacional corresponde al elipsoide límite se puede decir que el flujo gravitacional es función de la excentricidad del elipsoide límite, por lo tanto, se describe la razón e/d , con “e” tamaño de la abertura de descarga y “d” ancho del flujo [3]:

$$e/d = f(K,h,c,v) \quad (1)$$

Donde el factor K corresponde a las propiedades del material resumida en el tamaño de las partículas (partículas más pequeñas generan flujos gravitacionales más angostos y paralelos con $e/d = 1$). De igual manera, la altura “ h ”, el ancho de extracción “ c ” y la velocidad de extracción genera flujos más angostos y paralelos a medida que aumentan [3].

Cuando se trabaja con mayor cantidad de puntos de extracción al mismo tiempo en un material similar, las características de extracción pueden cambiar drásticamente. De los experimentos con *Hoppers* y *bins* con múltiples descargas [8,9], se describió como se muestra en la Figura 5 una baja actividad de movimiento cuando el espaciamiento “ p ” entre los puntos de descarga es mayor al ancho del elipsoide de movimiento “ c ” [3]. Por lo que existe una relación entre el espaciado de los puntos de extracción y la interacción entre las zonas de movimiento que se forman por encima del punto de extracción. Los puntos de extracción muy espaciados desarrollan zonas de extracción aisladas, donde el patrón de masa ordenada y hundimiento uniforme se pierde mediante la formación de chimeneas, tuberías o embudos en el flujo del material y que cuyo diámetro está definido por los tamaños de fragmentación [13,27]. Para prevenir esto se sugirió que la distancia entre los puntos de extracción debe ser menor al ancho del elipsoide de movimiento ($p < c$) [3], como se aprecia en la Figura 6.

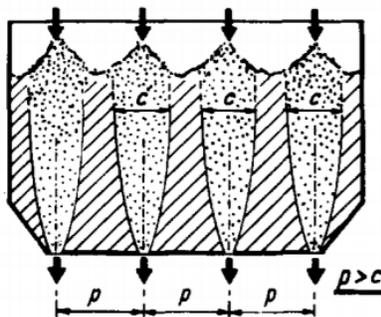


Figura 5. Baja actividad en el flujo de partículas en el contenedor debido al espaciamiento ($p > c$) [8].

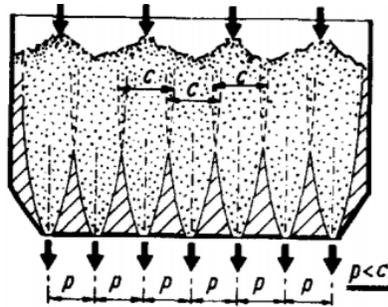


Figura 6. Alta actividad en el flujo de partículas en el contenedor debido al espaciamiento ($p < c$) [8].

Se ha cuantificado a través de los modelos de arena y la interpretación de las tensiones alrededor de las excavaciones subterráneas que cuando los puntos de extracción están espaciados menos de 1,5 veces el diámetro de la zona de extracción aislada, se produce la interacción de las zonas de flujo. La interacción mejora a medida que disminuye el espaciamiento del punto de extracción sin embargo si los puntos de extracción están muy juntos, resultará en un flujo preferencial de material fino [10,13,28].

Para el material grueso (> 20 cm) el flujo de material depende de otras variables, donde partículas gruesas esféricas y con tamaños similares tienen una mejor movilidad que partículas gruesas con trozos grandes irregulares mezclados con grava, arena o arcillas y que a su vez causan más problemas reduciendo por ejemplo la capacidad de los chancadores [9,12].

La Velocidad de viaje de las partículas en un flujo gravitacional no es uniforme y se distribuyen según su posición con respecto al punto de extracción. La velocidad de las partículas que están más cerca del punto de descarga y de la línea central del flujo es mayor y va disminuyendo a medida que se alejan, además fuera del contorno del elipsoide límite, no hay movimiento [3,8]. Este fenómeno se apreció en los experimentos con fotografías de alta exposición realizados por Janelid y Kvapil [3].

2.3 Teoría del flujo de material granular en minería de *caving*

Múltiples autores han estudiado este fenómeno a través de modelos físicos [1-4,8-19] que simulan el flujo de material en una operación minera de *caving*, a una escala más pequeña, de manera práctica, visual y a un coste menor, lo que nos permite entender de mejor manera este fenómeno. Dentro de estos estudios se ha definido el flujo del material granular en minería de *caving* en los siguientes mecanismos principales:

El primero de estos mecanismos de flujo, denominado teoría de flujo interactivo propuesto por Laubscher [28] se investigó ampliamente en los primeros experimentos con modelos físicos en pequeños cajones de arena con frente de vidrio [3,8,9,16] donde se interpretaron los principios del flujo gravitacional a través de un único punto de extracción en experimentos en modelos 2D, donde las partículas del material granular fluyen bajo la presión de los materiales superpuestos y laterales y, en menor medida bajo su propio peso. Producto de estos estudios se identificó el característico elipsoide de extracción, elipsoide límite de movimiento y las trayectorias de flujo de partículas (Figura 7).

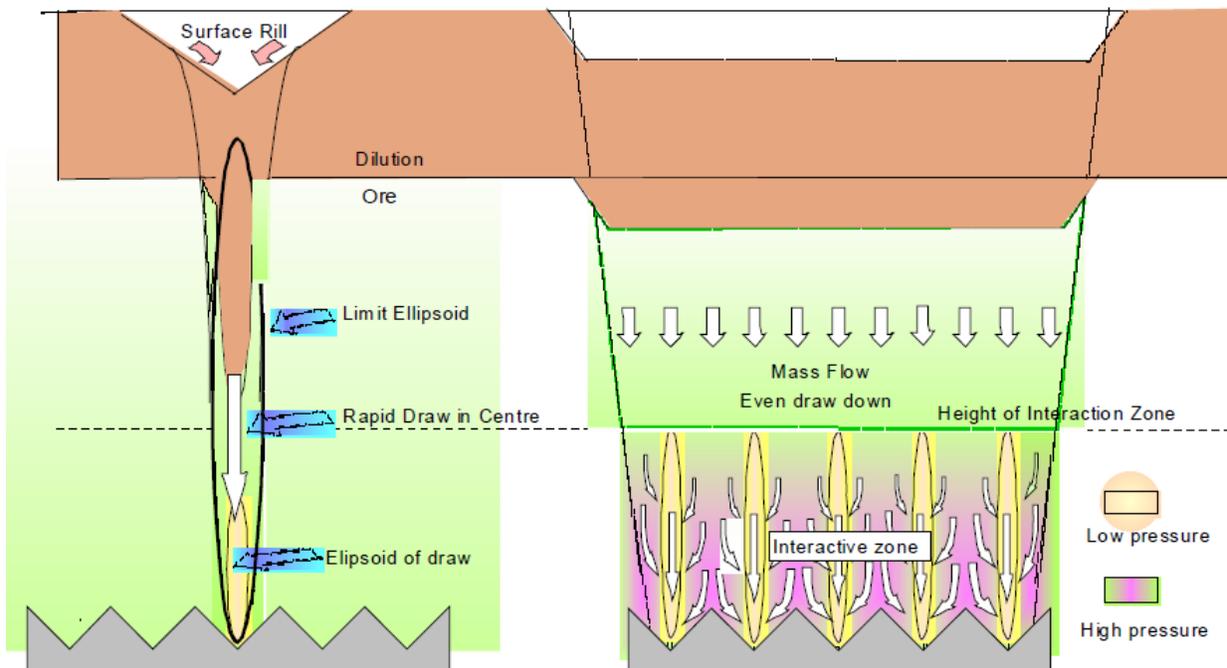


Figura 7. Mecanismo de flujo granular. A la izquierda, rutas de flujo de material para un punto de extracción aislado. A la derecha, ruta de flujo de material en múltiples puntos de extracción [28].

El segundo de estos mecanismos de flujo (Figura 8) se conoce como flujo probabilístico o difusión del vacío (*void diffusion, VD*), y se caracteriza por ocurrir en materiales de grano más grueso donde se forman vacíos transitorios o atascos, producto de arcos estables. Estos vacíos se difunden a través del material permitiendo que el material más fino se filtre desde arriba o los lados antes de que se derrumbe el arco que forma el vacío, para luego reformarse en elevaciones sucesivamente más altas. El mecanismo ha sido investigado y modelado por computadora como un proceso estocástico y en modelos físicos en cajas con frente de vidrio para investigar los efectos de partículas angulares más grandes en el comportamiento de la extracción [28]. Pese a observarse un comportamiento estocástico en el flujo siguen ciertos patrones que permiten su modelamiento.

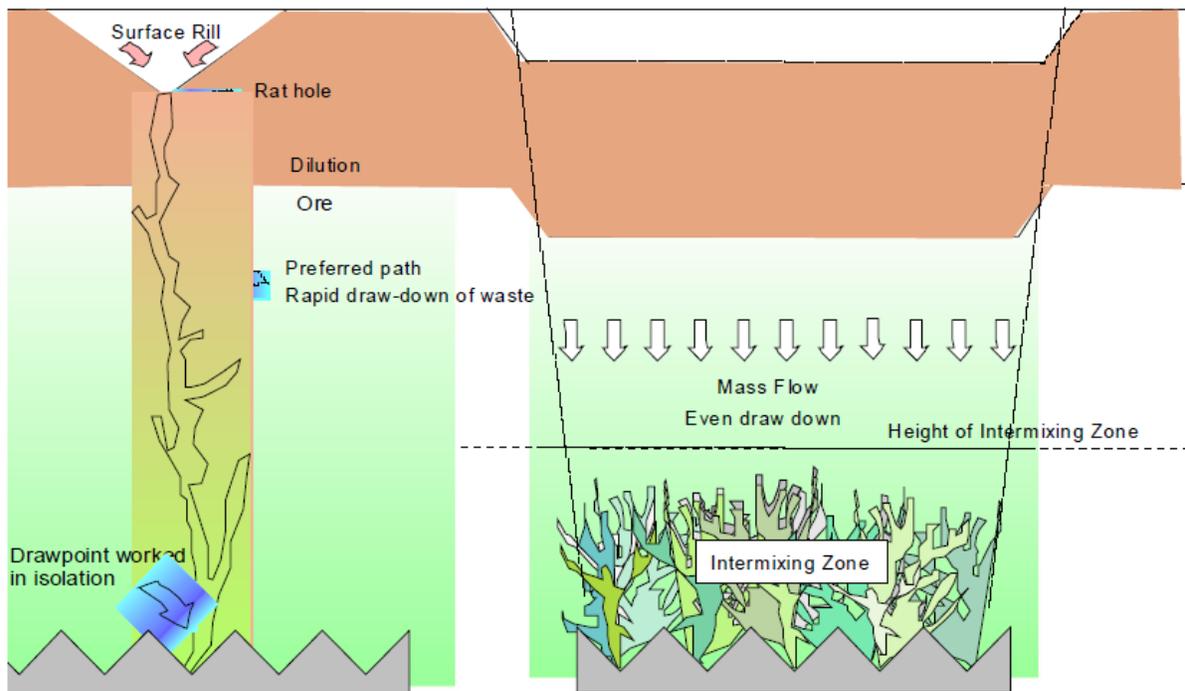


Figura 8. Mecanismo de difusión de vacío. A la izquierda, formación de un canal preferencial que conduce a un agujero de rata para un punto de extracción aislado. A la derecha, superposición de múltiples cuerpos de extracción de "palma y dedo" en múltiples puntos de extracción simultáneos [28].

Por otro lado, Susaeta en [16] propone un modelo de flujo gravitacional introduciendo un nuevo concepto del ya descrito modelo de flujo de gravedad interactivo propuesto por Laubscher, describiendo el flujo aislado y el flujo interactivo aislado, desarrollados a través de los resultados de experimentos con modelos de arena y análisis conceptual y validados con observaciones empíricas en operaciones mineras de *caving* de CODELCO.

Este modelo se ocupa principalmente del flujo por gravedad generado por la extracción en un *panel/block caving*, donde el cambio de un tipo de comportamiento a otro dependerá de la estrategia de extracción, que variará principalmente debido a la uniformidad con la que se extraigan los diferentes puntos de extracción.

El modelo de flujo interactivo e interactivo aislado presentado en a) y b) respectivamente en la Figura 9, son afectados si los puntos de extracción están cerrados o abiertos y se diferencian en que, en el flujo interactivo, el material de la parte superior del *caving* desciende uniformemente y en el flujo interactivo aislado existe una diferencia entre la tasa de flujo sobre el punto de extracción y sobre el pilar entre estos, formando pequeños cráteres.

El modelo de flujo aislado presentado en c) en la figura 9, describe un punto de extracción que es extraído aisladamente lo que genera una “chimenea de movimiento vertical” con un diámetro aproximadamente constante en toda su altura, definido como diámetro de extracción aislado (D_{ta}). Aunque sea una extracción aislada, cuando los puntos de extracción se cierran y se da suficiente tiempo, el material hundido “se asienta uniformemente” debido al lento movimiento de propagación lateral hacia las columnas de extracción.

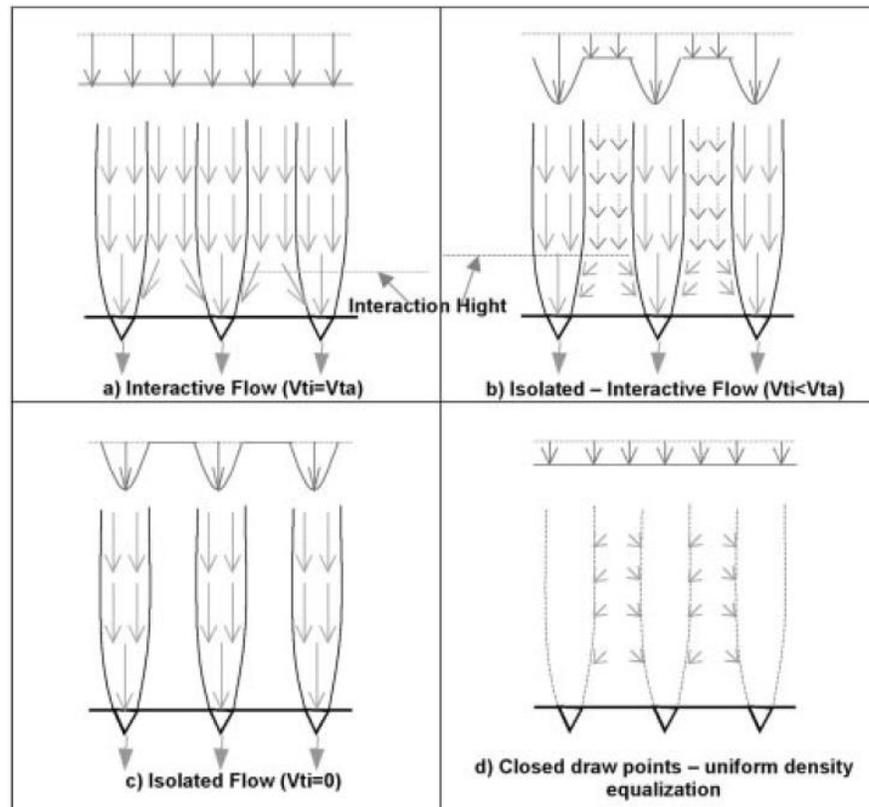


Figura 9. Representación del comportamiento del Flujo gravitacional según la estrategia de extracción descrito por Susaeta, donde v_{ta} es la tasa de flujo aislado y v_{ti} es la tasa de flujo interactivo [16].

De los experimentos realizados en el material granular se obtuvo la siguiente tabla de los principales mecanismos de flujo:

Tabla 1. Comparación de las características de extracción para flujo granular y difusión de vacío [28].

Condición	Flujo granular e interactivo (Gama pequeña de tamaños de material bien graduado, bloques multifacéticos)	Difusión de Vacío (Amplia gama de tamaños de material y bloques angulares entrelazados)
Punto de extracción aislado	Elipsoide de extracción de forma regular; todo el material se extrae secuencialmente, con las tasas más altas de hundimiento en el núcleo de la columna de extracción	Los huecos se difunden hacia arriba y hacia afuera según una función probabilística que favorece las áreas menos densas y los materiales finos. Con el tiempo, se forman "ratoneras"

	disminuyendo hacia afuera hasta el elipsoide límite.	como canales preferenciales para ingresar los desechos móviles finos hacia el mineral.
Extracción simultánea de puntos de extracción adyacentes	Extracción produce zonas de baja presión por encima de un punto de extracción y altas presiones en zonas circundantes. Cuando se trabajan muchos puntos de extracción al mismo tiempo, las tensiones sobre cada punto de extracción interactúan. Las diferencias de presión producen una migración lateral en forma de deformación plástica desde las zonas de alta presión a las columnas de extracción activas de baja presión, ampliando efectivamente la extracción desde cada punto de extracción.	Los huecos formados se difunden hacia arriba y hacia afuera, en el material entre los puntos de extracción. Trabajar puntos de extracción adyacentes al mismo tiempo aumenta el número de vacíos entre puntos de extracción y los desestabiliza ampliando efectivamente la extracción de cada punto de extracción. A medida que los vacíos se difunden hacia arriba, tienden a dividirse, se vuelven más pequeños y numerosos y es más probable que perturben la estabilidad de otros vacíos, favoreciendo el flujo vertical y limitando el ingreso de material fino a las cavidades.

2.4 El fenómeno de migración de fino en minería de *caving*

Estudios del fenómeno de migración de finos en minería de *caving* se han realizado en modelos físicos a escala [29,30], principalmente a través del impacto que generan en la dilución del material y los parámetros que la afectan. Sin embargo, los problemas asociados a la migración preferente de material fino no solo impactan en la dilución del material y en consecuencia cerrando tempranamente puntos de extracción [28]. También pueden generar problemas en presencia de humedad constituyendo riesgos de seguridad en la operación [31].

Según Bridgewater [32,33] la migración de fino se explica a través de lo que se conoce como percolación, que se define como el drenaje de las partículas más pequeñas de una mezcla a través de las más grandes, normalmente bajo la influencia de la gravedad y la tensión, en regiones de alta tasa de deformación. Por lo que está determinada por la fuerza gravitacional sobre las partículas.

La percolación entre partículas puede ser de dos tipos: espontánea o inducida por cizallamiento. La percolación espontánea se produce cuando una especie de partícula es lo suficientemente pequeña como para moverse bajo la acción de la gravedad a través de los vacíos ubicados entre las especies estacionarias más grandes [34]. Durante el cizallamiento, las partículas finas están expuestas a estructura vacía de la matriz gruesa, lo que permite a estas encontrar y caer a través de los vacíos adecuados en la capa de partículas gruesas [35].

La percolación a su vez puede generar segregación del material que se define como la desmezcla no intencional de uno o más componentes en una mezcla de partículas. Esta suele ser indeseable y generalmente aparece durante la manipulación de partículas que fluyen libremente cuando los componentes tienen propiedades variables, especialmente diferencias de tamaño. Por lo tanto, se invierte un esfuerzo en minería en intentar estimarla y controlarla [34].

Múltiples ensayos se han desarrollado en celdas de corte simple [7,32,33,35,36] y simulación computacional de celdas de corte [34] para estudiar la percolación entre partículas inducida por deformación en condiciones estrictamente controladas. De los estudios se definió como parámetro principal, el tamaño relativo de las partículas grandes y pequeñas, expresada por la razón d/D , donde

la razón de percolación decrece rápidamente cuando d/D aumenta. Cuando el tamaño de las partículas no es muy diferente, la percolación sólo puede ocurrir si el sistema está sujeto a tensión. A altas tasas de deformación se observó una reducción de la percolación, lo que sugiere que la partícula que se filtra no tiene tiempo suficiente para moverse al espacio abierto creado temporalmente debajo de ella o porque el movimiento de la partícula en masa ha cambiado.

Un análisis dimensional de la velocidad de percolación, u , para una esfera pequeña percolando a través esferas más grandes se puede escribir como la siguiente ecuación [37]:

$$\frac{u}{\dot{\gamma}d_b} = f \left\{ \frac{d_p}{d_b}, \frac{\sigma_\gamma}{E_b}, \frac{E_p}{E_b}, \frac{d_b\rho_b g}{E_b}, \frac{d_b\dot{\gamma}^2}{g}, \frac{\rho_p}{\rho_b} \right\} \quad (2)$$

Donde:

u = velocidad descendiente de la partícula que se filtra (m/s)

$\dot{\gamma}$ = tasa de deformación (s^{-1})

d_p y d_b = el diámetro de las partículas de filtración y gruesa respectivamente (m)

E_p y E_b = Módulo de Young de la partícula de filtración y gruesa respectivamente (N/m^2)

σ_γ = esfuerzo normal en la superficie superior de la celda (kg/ms^2)

g = aceleración de gravedad (m/s^2)

ρ_p y ρ_b = densidad de la partícula de filtración y gruesa respectivamente (kg/m^3)

Basado en la Ecuación 2, se desprende que la velocidad de percolación es controlada principalmente por la razón de tamaños ($\frac{d_p}{d_b}$), mientras que $\frac{\sigma_\gamma}{E_b}$ es una medida de la deformación de la partícula debido al esfuerzo normal aplicado. La influencia de la razón de deformación entre partículas a filtrar y gruesa, $\frac{E_p}{E_b}$ es pequeña. $\frac{d_b\dot{\gamma}^2}{g}$ es una medida del tiempo que le toma a una partícula en caer a través de un espacio hasta la vida útil del espacio, mientras que $\frac{d_b\rho_b g}{E_b}$ puede ser despreciable, ya que es una medida de la deformación de la partícula gruesa bajo su propio peso. El factor adimensional $\frac{u}{\dot{\gamma}d_b}$ decrece a medida que el esfuerzo normal aumenta y se encontró que aumentaba a bajos esfuerzos normales [37].

La Tabla 2 muestra un resumen de una serie de parámetros de control sobre la tasa de percolación destacados en [7,32,33,36], donde la relación de diámetro de partícula y la tasa de deformación tienen el mayor efecto sobre la tasa de percolación y el aumento de la tasa de deformación ($\dot{\gamma}$) por encima de $0,4 \text{ s}^{-1}$ no afecta la velocidad de percolación, pero aumenta el valor de la intersección en las partículas.

Tabla 2. Parámetros que controlan la razón de percolación [37].

Descripción	Comentario
Relación de diámetro de la partícula	Mayor efecto en comparación con otros parámetros de control
Tasa de deformación por corte	La tasa de percolación es más rápida por debajo de 0.4 s^{-1}
Esfuerzo normal	Un incremento en el esfuerzo normal reduce la velocidad de percolación
Densidad de la partícula	Partículas con mayor densidad percolan más rápido que partículas con menor densidad
Propiedades del material	Partículas con menor módulo elástico percolan más rápido que módulos elásticos más altos
Propiedades superficiales	Superficies lisas percolan más rápido que las superficies rugosas
Propiedades de forma	Formas redondeadas percolan más rápido que formas angulares
Efectos de la pared	Partículas más pequeñas percolan más rápidamente en la pared que en el volumen

Además, en general, los materiales con mayor densidad y menor módulo elástico presentan mayores tasas de percolación. También es notable que para materiales no esféricos es necesario considerar el factor de forma, ya que este factor puede tener una influencia significativa en la tasa de percolación [33,37].

2.4.1 Dilución del mineral

La dilución del mineral producto de la migración de fino es una parte integral de las operaciones de minería de *caving* y el objetivo, cuando está presente, es mantenerla en bajos porcentajes. Cuanto mayor sea la relación entre el volumen de mineral y el área de la superficie de la interfaz mineral / estéril (*waste*), menor será el porcentaje de dilución total [28].

Según Halim [38] la dilución en minería tiene un impacto debido al espaciamiento entre los puntos de extracción y la estrategia de extracción. Un espaciamiento pequeño de los puntos de extracción producirá una alta recuperación de mineral y baja dilución, pero incurrirá en un alto costo capital. Por otro lado, un espaciamiento grande reducirá el costo de capital, pero producirá una menor recuperación de mineral o una mayor dilución si se requiere una alta recuperación, por lo que el espaciamiento óptimo de los puntos de extracción para un control de la dilución en minería de *caving* está basado entre otros parámetros, en una decisión económica.

Una forma de cuantificar este fenómeno es a través del porcentaje de entrada de dilución descrito por Laubscher [28], que corresponde a el porcentaje de la columna de mineral que se ha extraído cuando aparece dilución en el punto de extracción (Ecuación 3) y es una función de la cantidad de mezcla que se produce en la columna de extracción. Mezcla que a su vez es función de:

- Altura de la columna de extracción
- Rango de fragmentación
- Espaciado entre zonas de extracción
- Rango de tonelajes extraídos de los puntos de extracción de trabajo
- El rango de tonelajes y el espaciado máximo de la zona de extracción darán la altura de la zona de interacción

$$PED(\%) = \left(\frac{H_cSF - HIZ}{H_cSF} DCF \right) 100 \quad (3)$$

Donde:

H_c : Altura desde el punto de extracción hasta la interfaz mineral/material diluyente.

SF: Factor de esponjamiento. 1.16 para fragmentación fina, 1.12 para fragmentación media y 1.08 para fragmentación gruesa.

HIZ: Altura de interacción. Corresponde a la altura a la cual se produce interacción entre los elipsoides de movimiento. Según Laubscher [28] la migración de finos está relacionada con la diferencia que existe entre la clasificación de masa rocosa RMR de las rocas. En general, una columna in situ con una gran diferencia de RMR entre el mineral y la dilución, tiene una altura de interacción más alta que una columna in situ con una pequeña diferencia de RMR. (Figura 10).

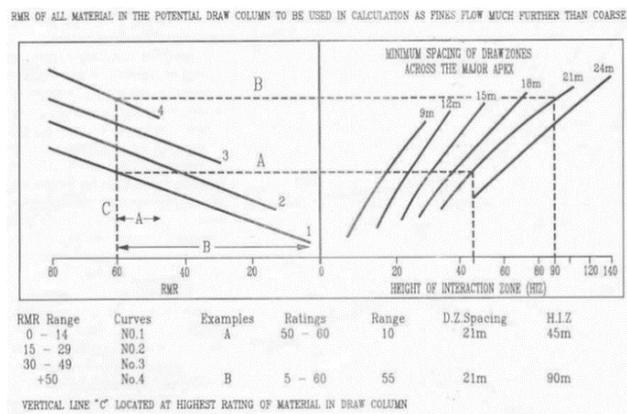


Figura 10. Cuantificación de la migración de finos a través del HIZ [28].

DCF: Factor de control de tiraje. Factor que se obtiene del gráfico de la Figura 11, con la desviación estándar de los tonelajes extraídos entre un punto y sus vecinos a una escala de extracción mensual.

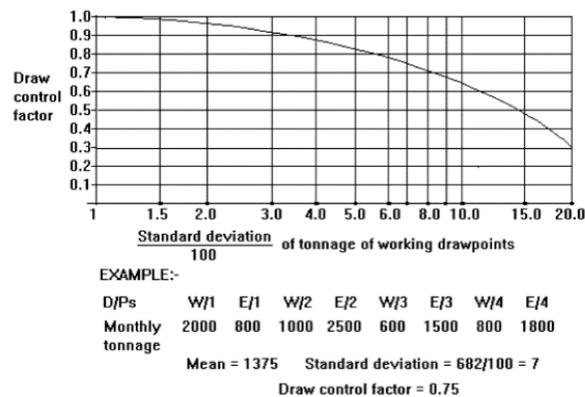


Figura 11. Factor de control de tiraje (DCF) [28].

Modelos físicos y computacionales [22,29,39] se han desarrollado con el objetivo de simular la dilución y sus mecanismos en minería de *caving* y así desarrollar técnicas de extracción con el objetivo de controlar la pérdida y dilución de mineral, retrasando o evitando el contacto directo entre el mineral tronado y la roca estéril en etapas tempranas del *caving* [18].

Dentro de los principales mecanismos de dilución en minería de *caving*, se encuentran la extracción aislada, *rilling* y migración de finos [22]. Por otro lado, del análisis de los datos de dilución de El Salvador y Andina realizados por Paredes [39] se plantean como hipótesis 3 mecanismos de dilución en block/panel *caving*. La entrada de dilución debida a desplazamiento vertical, desplazamiento lateral y posterior a un evento de colgadura del *cave back*. Mecanismos que se describen a continuación:

- Extracción aislada: Marcado en (b) en la Figura 12, la extracción aislada ocurre cuando una zona estrecha del cuerpo mineral fragmentado se mueve hacia el punto de extracción sin interactuar con el material circundante, creando un flujo preferencial de material estéril hacia el punto de extracción. Este fenómeno depende del espaciado del punto de extracción y del rango de tamaño de fragmentación.
- *Rilling*: Marcado en (c) en la Figura 12, ocurre cuando la posición de la interfaz yacimiento-desechos (estéril) se desvía de la vertical, creando la oportunidad de que los desechos viajen a lo largo de la superficie libre presentándose en los puntos de extracción.
- Migración de finos: Corresponde a la filtración de material particulado pequeño a través de los bloques grandes, como se marca en (a) en la Figura 12. Generalmente las partículas finas corresponden a lo que se conoce como estéril (*waste*) o material que no tiene interés económico en la operación.
- Entrada de dilución debida a desplazamiento vertical: Cuando la fuente de dilución se ubica sobre el panel a explotar y existe una propagación regular del *cave back* hacia ella, la dilución ingresa a los puntos de extracción descendiendo de manera vertical (Figura 13).

- Entrada de dilución debida a desplazamiento lateral: Ocurre cuando el panel en cuestión se ubica al costado de un sector previamente explotado y se genera un espacio de aire suficientemente grande que permite el ingreso de material quebrado a través del flujo lateral de material en los puntos de extracción más alejados de la interfaz con el material quebrado (Figura 14).
- Entrada de dilución posterior a un evento de colgadura del cave back: Si el radio hidráulico del área inicial abierta no es suficiente para propagar el *caving*, ocurrirá una colgadura del *cave back*. Al continuar la extracción del área abierta sin incorporar más área, se genera un bolsón de aire que favorecerá la entrada repentina de material en los puntos de extracción, una vez se incorpore área nueva a la extracción (Figura 15).

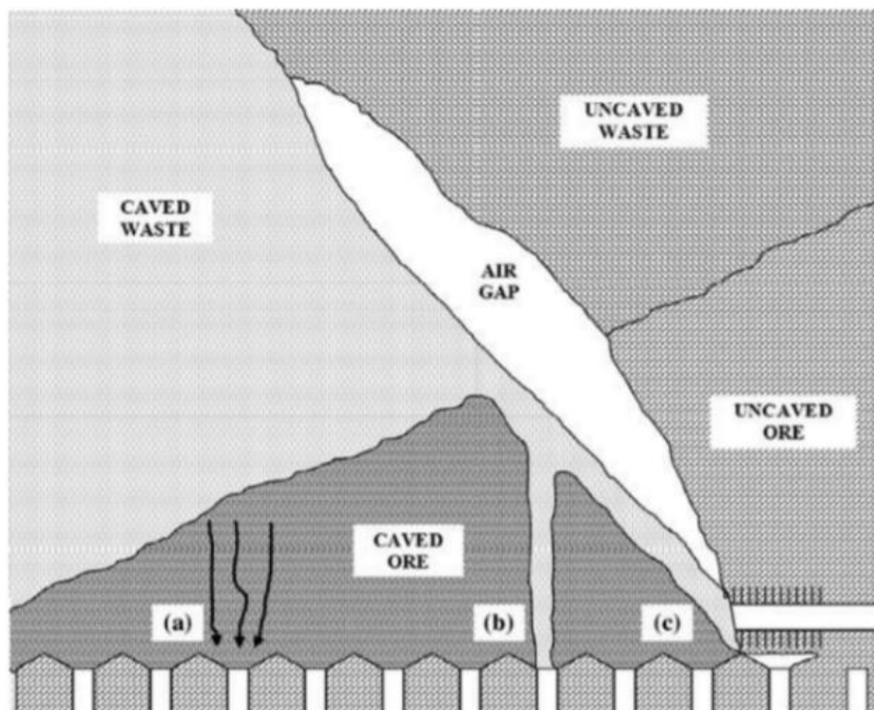


Figura 12. Los tres principales mecanismos de dilución en un *block caving*. (a) migración de finos, (b) extracción aislada y (c) *rilling* [22].

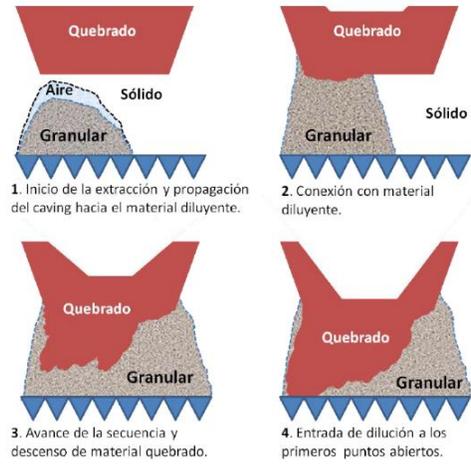


Figura 13. Secuencia de mecanismo de entrada de dilución vertical [39].

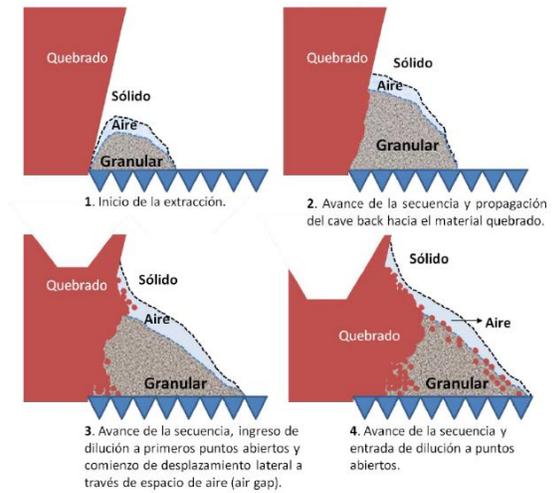


Figura 14. Secuencia de mecanismo de entrada de dilución lateral [39].

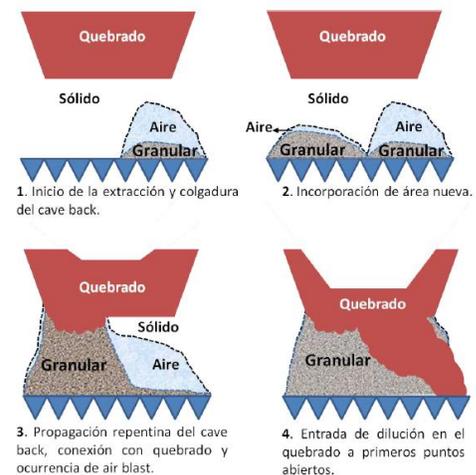


Figura 15. Secuencia mecanismo de entrada de dilución posterior a un evento de colgadura [39].

Es por esto por lo que el control de la extracción juega un papel fundamental, controlando los tonelajes extraídos desde punto de extracción individuales con el objetivo de [28]:

- Minimizar la dilución general y mantener la ley del mineral planificada para enviar a planta
- Asegurar la máxima recuperación
- Evitar concentraciones de carga dañinas en el horizonte de extracción.
- Evitar la creación de condiciones que puedan dar lugar a estallidos de barro, aire, etc.

La estrategia de extracción tiene influencia sobre la dilución del material y la migración de material fino ubicado sobre la columna de mineral, donde en general para una estrategia de extracción pareja de todos los puntos de extracción se obtiene una entrada de dilución más tardía que en operaciones con extracciones aisladas [10,17]. Una consideración importante en el control de extracción es la altura de la zona de interacción (HIZ), que depende del rango de tamaños del material presente y del espaciado máximo del punto de extracción. En general, cuanto más alta sea la zona de interacción, más temprano aparecerá la dilución y más dilución se extraerá eventualmente [27].

Un *caving* rápido y descontrolado puede resultar en una afluencia temprana de dilución de estéril, por lo que la razón de *caving* es un factor importante que considerar. Altas tasas de extracción concentradas en áreas pequeñas producirían un canal en la columna de mineral quebrado, favoreciendo a través de él, el flujo descendiente de dilución contribuyendo a la mezcla temprana entre mineral-estéril y la consecuente pérdida de reservas [17,28].

2.4.2 Presencia de humedad

La humedad es un parámetro de interés en el flujo del material, ya que actúa cambiando las propiedades mecánicas del material hundido, dándole cohesión [16]. El material fino al migrar preferentemente se puede acumular sobre arcos cercanos a los puntos de extracción constituyendo riesgos de licuefacción en la operación, generando problemas de entrada repentina de material fino (*in-rush of fines*) o “corrientes de lodo” (*mud-rush*) en presencia de humedad, que constituyen uno de los grandes riesgos en minería de *caving* [16,21,31,40].

Por lo que la presencia de material fino y humedad en operaciones mineras de *caving*, puede causar problemas de dilución [4], influenciar la capacidad de un material granular a fluir (*flowability*) [11,42], retrasos en la producción, daños a equipos, así como lesiones y muertes [31,40,41].

3 Desarrollo Experimental

Para estudiar el fenómeno de migración preferencial de material fino se debe contar con un modelo físico y set ups experimentales que permitan visualizar el comportamiento del flujo del material fino y grueso, y cuantificar el impacto generado por el material fino, en presencia de humedad en la dilución del mineral. En el siguiente capítulo se presenta el desarrollo experimental realizado para la utilización de modelamiento físico para el estudio del fenómeno de migración de fino para un caso donde exista una diferencia de humedad entre material grueso y fino.

3.1 Análisis de similitud para el material granular

Los modelos físicos se construyen con el objetivo de alcanzar dos tipos de funciones [2]:

- a) Modelar una situación específica en la mina
- b) Investigar reglas genéricas que gobiernan un fenómeno en específico

Debido a esto y para su simulación se define el concepto de similitud, que considera dos sistemas: el prototipo y el modelo. La teoría indica que un sistema a escala y un sistema real son similares si se satisfacen tres similitudes: geométrica, cinemática y dinámica [43]. Sin embargo, la similitud geométrica corresponde a aquella más fácil de alcanzar siendo la Similitud dinámica aquella

que resulta más compleja replicar en los modelos físicos a baja escala de laboratorio [12]. Donde dos sistemas son geoméricamente similares cuando la distancia entre puntos homólogos es dada por un factor de escala de longitud constante λL [2].

Según Castro [2], el flujo de material granular grueso, como prototipo a simular, está sujeto a básicamente dos tipos de fuerzas principales: gravedad y fricción. La fuerza de la gravedad es un fenómeno natural por el cual los cuerpos físicos se atraen con una fuerza proporcional a su masa. En cambio, la fricción es la fuerza ejercida por los granos entre ellos, ya sea de forma puntual o por contactos superficiales. En el modelo físico, sin embargo, y debido a la escala del tamaño de las partículas, el material es varias veces más pequeño y esto puede generar otro tipo de fuerzas que afecten al flujo granular, principalmente:

- Fuerzas de Van der Waals
- Fuerzas capilares
- Efectos de frontera
- Fuerzas cohesivas
- Fuerzas electrostáticas
- Fuerzas magnéticas

Todas las fuerzas mencionadas anteriormente tendrán un nivel diferente de efecto de preponderancia en el flujo de gravedad para el modelo físico generando posibles distorsiones, por lo que el tamaño de partícula del material a utilizar, donde estas fuerzas no son las principales (mayor a 0.1 mm) y las dimensiones del modelo deben ser estudiadas.

3.1.1 Escala del modelo físico

El Escalamiento de un modelo tiene por objetivo principal representar un fenómeno para poder estudiarlo. Los métodos de simulación física de laboratorio tienen las ventajas de bajo costo, fácil operación, repetibilidad y observación directa de fenómenos experimentales [18].

Estudios recientes [13,14,17] indican que se pueden obtener resultados satisfactorios utilizando un factor de escala de 1:100 y 1:200, escala a la cual las partículas de los materiales siguen siendo afectadas sólo por la gravedad (material no cohesivo), no existiendo otras fuerzas preponderantes que darán cohesión al sistema, tales como: capilaridad, fuerzas de Van der Waals y fuerzas electrostáticas.

En la Tabla 3 se resumen algunos de los modelos físicos construidos para el estudio del flujo gravitacional, donde los modelos de Janelid (1972), Irribarra (2014), Vergara (2016), Tao et al. (2019) y Arancibia (2019) utilizaron mezclas de tamaños de partículas (Fino/Grueso) para el estudio de algún fenómeno minero. De estos se puede observar que a escalas más grandes (1:20-1:50), los modelos físicos para simular un fenómeno minero requirieron grandes dimensiones, un sistema de extracción de mineral de mayor tamaño y se utilizaron para evaluar pocos puntos de extracción. Para modelos a escalas más pequeñas (1:200), las dimensiones son más acotadas con sistemas de extracción más pequeños lo que permite la simulación de múltiples puntos de extracción. Además, se observa en todos los modelos un tamaño medio de partículas para el fino y grueso mayor a 100 μm (0.1mm) lo que según la teoría y estudios disminuye la aparición de fuerzas inter-partículas.

Por lo tanto, una escala adecuada para el estudio de migración de finos se encuentra entre 1:75 y 1:200, por lo que se opta por una escala 1:100 para el modelo lo que permite un buen tamaño de visualización del fenómeno y la posibilidad de utilizar una granulometría adecuada para el material fino (> 0.1mm).

Tabla 3. Resumen de varios modelos físicos construidos para el estudio del flujo gravitacional.

Escala	Autor(es)	Dimensiones (Altura x Ancho x Largo)	Tamaño de partículas		Puntos de extracción
			Fino	Grueso	
1:20	Janelid (1972) [3]	450 cm x 360 cm x 50 cm	d ₅₀ 6.35mm 19.05mm 31.75mm	d ₅₀ 19.05mm 31.75mm 44.45mm	1 y múltiples
1:25	Zhang et al. (2018) [15]	160 cm x 10 cm x 188cm	-	d ₈₀ 10mm	Múltiples
1:30	Power (2004) [12]	330 cm x 220 cm x 210 cm	-	d ₅₀ 5mm 7mm 14mm 20mm	1
1:50	Tao et al. (2019) [18]	70 cm x 28 cm x 105 cm	d ₅₀ 3.87mm	d ₅₀ 8.08mm	2
1:50	Arancibia (2019) [29]	100 cm x 74 cm x 40 cm	d ₅₀ 2mm	d ₅₀ 22mm	2
1:75	Sánchez (2019) [4]	66.7 cm x 52.1 cm x 33.3 cm	-	d ₅₀ 3.1mm d ₈₀ 13mm	2
1:75	Castro (2016) [11]	70 cm x 34 cm	-	d ₅₀ 8.6mm 10.8mm	2
1:80	Halim (2004) [12]	240 cm x 76 cm x 76 cm	-	d ₅₀ 0.7mm	50
1:200	Vergara (2016) [17]	250 cm x 70 cm x 22.3 cm y 250 cm x 163 cm x 22.3 cm	d ₈₀ 0.65mm	d ₈₀ 3.3mm	20 y 44
1:200	Irribarra (2014) [30]	250 cm x 70 cm x 22.3 cm	d ₅₀ 0.14mm	d ₅₀ 4.45mm	36

3.1.2 Diseño del modelo físico

Una vez definida la escala del modelo de 1:100. Se diseñó el modelo físico a partir de una batea rectangular simple con dos puntos de extracción (Figura 16), basado en las recomendaciones entregadas en [44] para una malla teniendo 17x20m, cuyas dimensiones se expresan en la tabla 4.

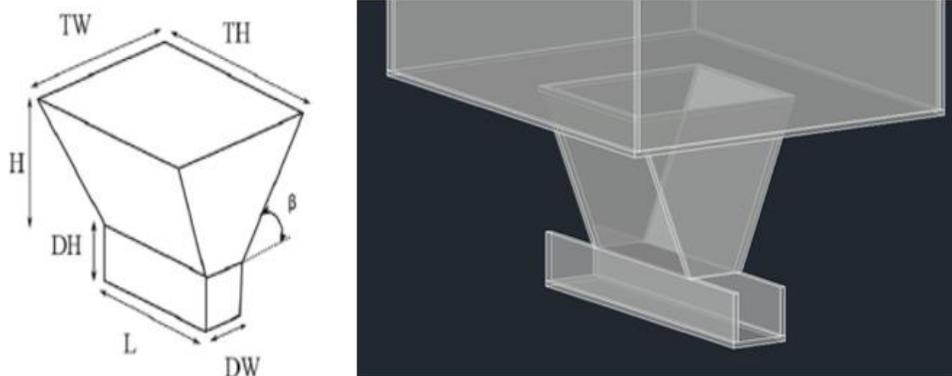


Figura 16. Diseño batea rectangular.

Tabla 4. Dimensiones de batea rectangular a escala 1:100.

Componente	Dimensiones
TH	15 cm
TW	16 cm
DW	4.5 cm
DH	4.5 cm
H	15.5 cm
L	15 cm
β	70°

Las dimensiones de las paredes del modelo físico (Figura 17) consideran la influencia de la columna de material sobre una batea de extracción, representando el espaciamiento entre calles de producción y zanja simplificadas. Además de una altura máxima de columna de 100 m. El modelo físico se construyó en acrílico transparente de 10mm para poder apreciar de manera visual el fenómeno estudiado y con una estructura de fierro para darle estabilidad y elevarlo del piso para un mejor manejo de la descarga del material.

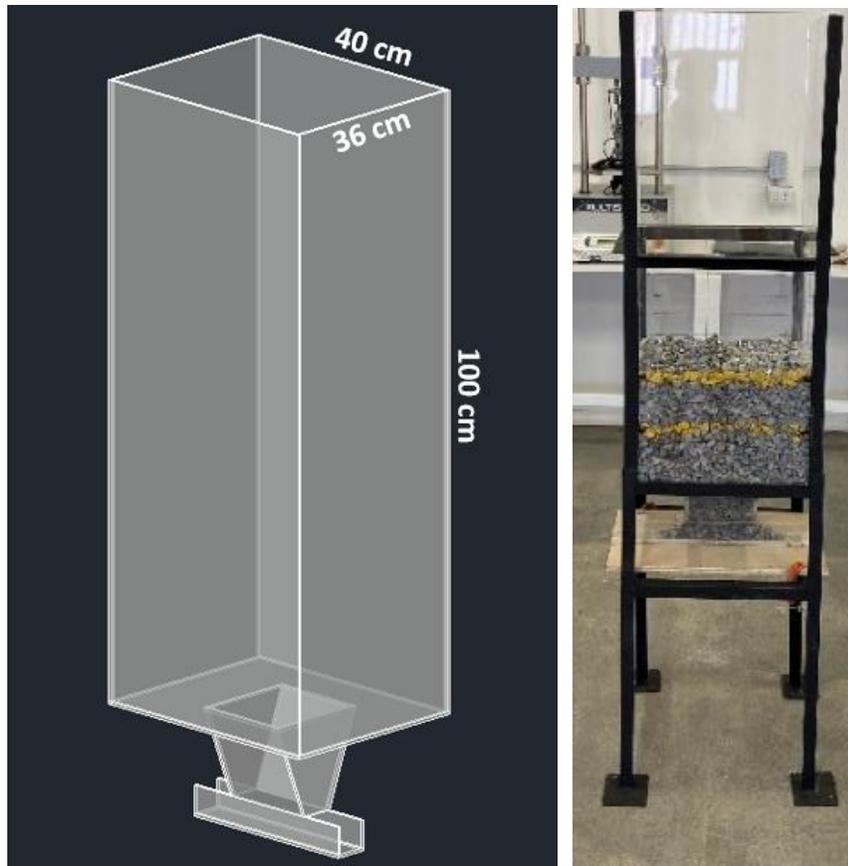


Figura 17. Diseño del modelo físico escala 1:100.

Para el sistema de extracción y siguiendo con las dimensiones recomendadas se utilizó un sistema de extracción por un LHD de 10 m^3 (13 yd^3), implementado en el modelo físico a través de una pala manual escalada, con un ancho de 3.1 cm construida en acero laminado (Figura 18)



Figura 18. Pala de extracción de material que representa un LHD de 10 m^3 (13 yd^3) escalado.

3.1.3 Caracterización del material

Múltiples ensayos de laboratorio utilizando las normas ASTM [45-48] se realizaron para la caracterización del material utilizado en la experimentación. El tamaño del material granular grueso utilizado para las distintas configuraciones experimentales corresponde a grava con un d_{50} de 11.05 mm y un tamaño máximo de 19.05 mm obtenido a través de un análisis granulométrico efectuado al material (Figura 19), y lo que representa el tamaño de material escalado de una operación minera de CODELCO (Anexo A). Este material tiene una densidad aparente de 1484 kg/m^3 y se dispuso en configuraciones con porcentajes de humedad del 0, 2 y 4%.

En cuanto al tamaño del material granular fino, se utilizó arcilla con un d_{50} de 0.96 mm (Figura 19) y una densidad aparente de 1150 kg/m^3 para lograr una relación de tamaño cercana al 12:1 entre el d_{50} del material grueso y fino para las distintas configuraciones experimentales. Según [6] la fuerza preponderante corresponderá a la fuerza de gravedad sobre las partículas, por lo que otras fuerzas tienen una menor influencia. Sin embargo, si bien al material fino no se le adicionó humedad, durante la extracción la humedad del grueso afectaba al fino aumentando su cohesión.

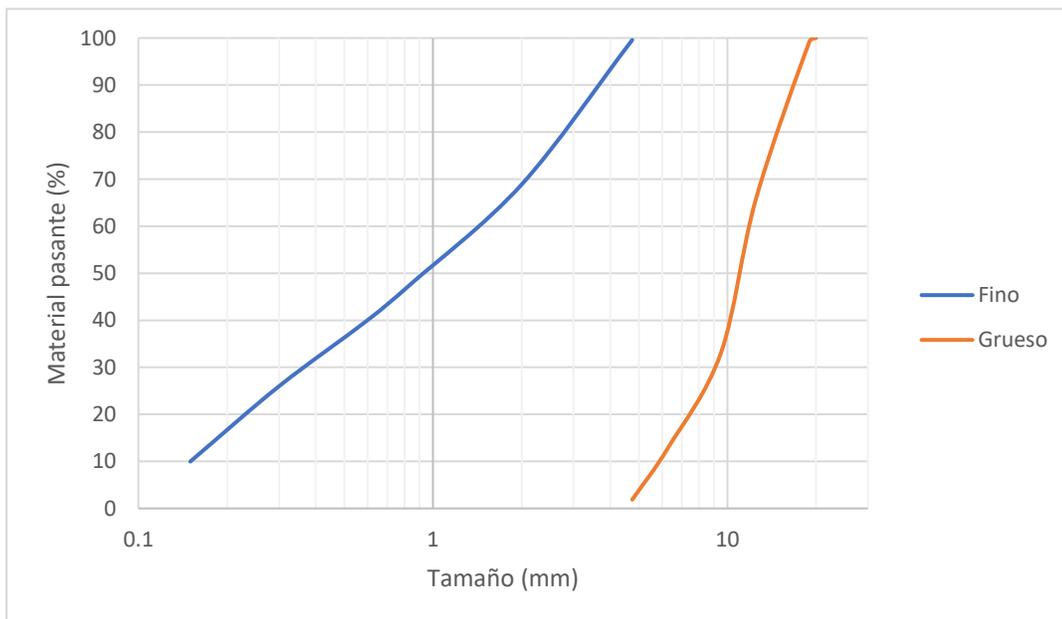


Figura 19. Curva granulométrica del material fino y grueso utilizado para la modelación.

Para obtener la resistencia al cizallamiento del material, se realizaron ensayos de corte con un rango de esfuerzo normal aplicada de entre 9.6 a 221 kPa (Anexo B). Para el material grueso correspondiente a grava, se ensayó la parte más fina del material (por las restricciones geométricas de la caja de corte), obteniéndose una cohesión de 1.5 kPa y un ángulo de fricción interna de 46° , valores que se asemejan a los de un material no cohesivo [49]. Adicionalmente, se ensayó el material grueso para humedades del 2% y 4% obteniéndose ángulos de fricción interna de 43° y 41° y cohesiones de 6.1 kPa y 4.8 kPa respectivamente, notándose una disminución del ángulo de fricción interna al aumentar la humedad del material (Figura 20).

Por otro lado, para el material fino correspondiente a la arcilla se obtuvo una cohesión de 19.9 kPa y un ángulo de fricción de 39° , cohesión y ángulo característico de un material cohesivo [49] (Figura 20).

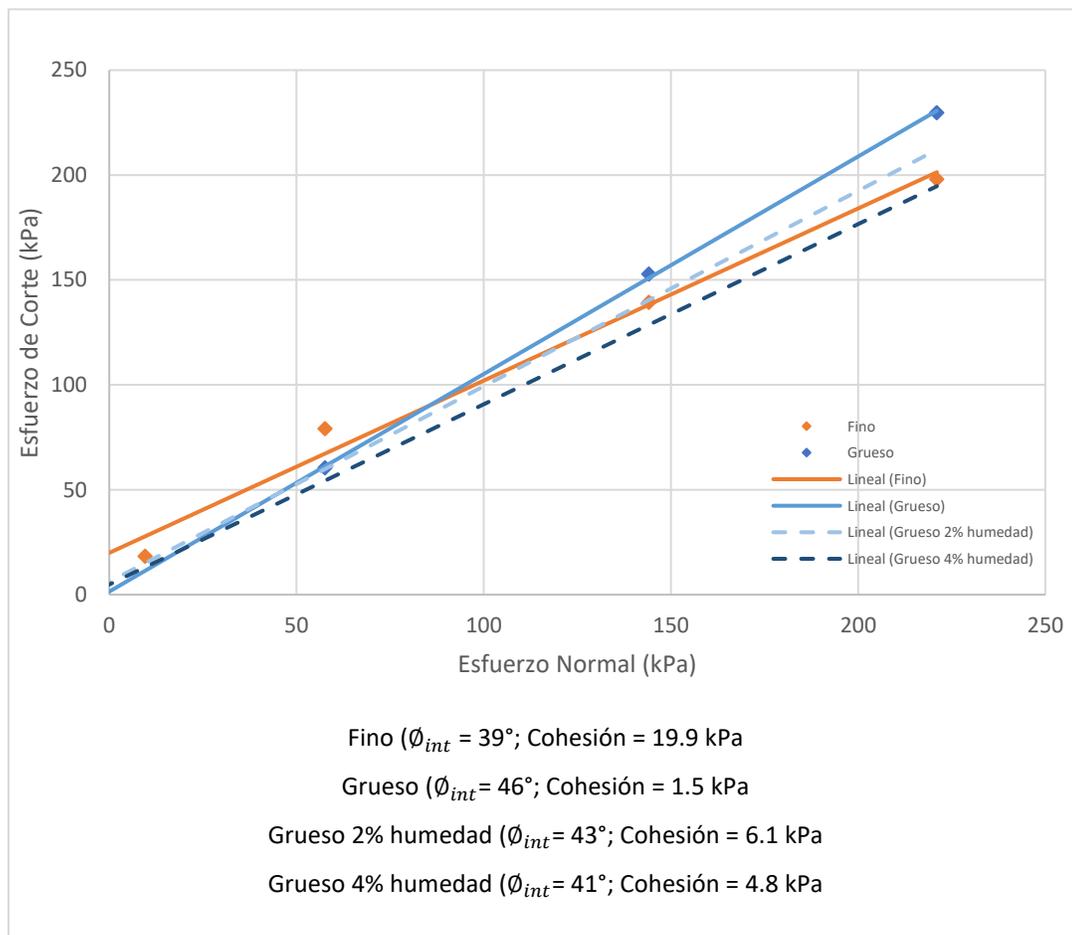


Figura 20. Relación entre los esfuerzos de corte residuales y los esfuerzos normales para los materiales utilizados en la modelación.

Otros ensayos fueron realizados para la caracterización del material utilizado para la modelación física, los cuales se presenta la siguiente tabla resumen con los algunos de los datos más importantes:

Tabla 5. Resumen de algunos de los datos más importantes de la caracterización del material.

Parámetro	Grueso (Grava)	Fino (Arcilla)
Densidad aparente [kg/m ³]	1484	1150
Ángulo de fricción interna [°]	46	39
Cohesión [MPa]	1.5	19.9
Ángulo de reposo [°]	31	25
Índice de resistencia de la carga puntual, (Ia(50)) [MPa]	11.24±2.85	0.26±0.04
d ₈₀ [mm]	15.25	2.99
d ₆₀ [mm]	11.97	1.51
d ₅₀ [mm]	11.05	0.96
d ₃₀ [mm]	9.02	0.39
d ₁₀ [mm]	5.89	0.15
Coficiente de uniformidad (Cu)	2.03	10.07
Coficiente de curvatura (Cc)	1.15	0.67
Porosidad [%]	43.07	55.34
Esfericidad	0.5	0.6
Redondez	0.7	0.21

3.2 Plan experimental

Los sets experimentales consideraron la disposición del material fino sobre el mineral (material grueso) en una relación de tamaño cercana al 12:1 entre el d_{50} del material grueso y fino para las distintas configuraciones experimentales, con un espesor de 25 cm como se indica en la Figura 21. El procedimiento de cargado del modelo se detalla en el Anexo C.

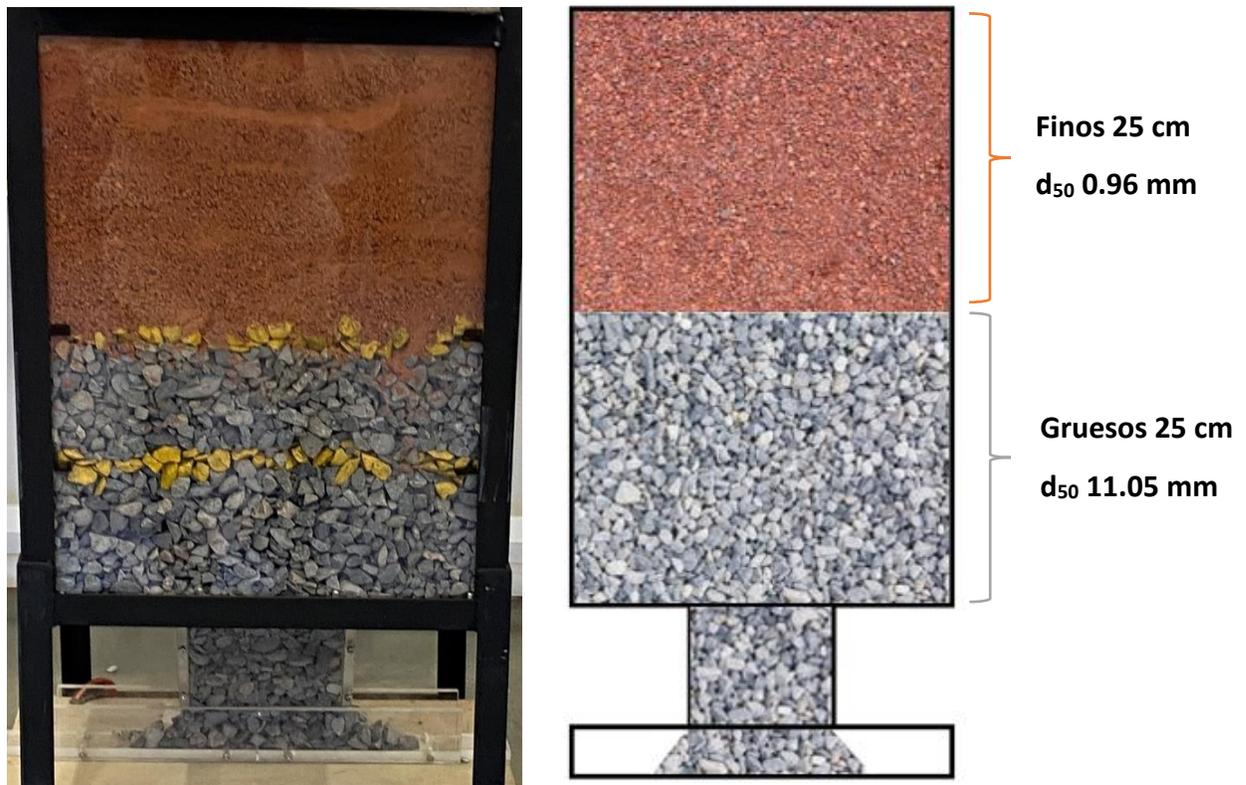


Figura 21. Disposición del material fino sobre el grueso, altura de interfaz.

La extracción del material se realizó con un tiraje uniforme por medio de dos puntos de extracción alternadamente, a través del sistema de extracción manual. Los experimentos se realizaron sin relleno, variando la humedad del material grueso utilizando porcentajes de humedad del 0%, 2% y 4% y los cuales se replicaron con el objetivo de validar los datos y obtener variabilidad experimental. Configuraciones que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 6. Configuraciones experimentales.

Experimento	Variables
1	Relación de tamaño 12:1 grueso/fino, sin relleno de la columna, tiraje uniforme, humedad material grueso 0%
2	Relación de tamaño 12:1 grueso/fino, sin relleno de la columna, tiraje uniforme, humedad material grueso 2%
3	Relación de tamaño 12:1 grueso/fino, sin relleno de la columna, tiraje uniforme, humedad material grueso 4%
4	Repetición sin marcadores del experimento 1
5	Repetición sin marcadores del experimento 2
6	Repetición sin marcadores del experimento 3

Para el análisis de flujo de material se utilizaron 327 marcadores, 187 con un tamaño similar al d_{50} para el material grueso y 140 con un tamaño similar al tamaño máximo del material fino (4.75 mm), tamaños seleccionados para no alterar el flujo gravitacional. Estos marcadores fueron dispuestos en la columna de material espaciados cada 5 cm (Figura 22) con una malla de 5 cm X 6 cm en planta (Figura 23). Cada marcador llevó asociado unas coordenadas iniciales que se registraron cuando aparecían en los puntos de extracción a una cierta cantidad de material extraído.

Con ayuda de estos se obtuvo el comportamiento del flujo gravitacional interpolando el movimiento de los marcadores. Adicional a esto se tomaron fotografías del flujo gravitacional al comienzo y luego de 100 extracciones por punto de extracción, criterio que se definió como punto de comparación de los distintos sets up experimentales. Con la información obtenida se estimó el punto de entrada de dilución para los diferentes experimentos y se buscó probar si la presencia de humedad en el material grueso (mineral) afecta en la migración preferencial del material fino (estéril) situado sobre el mineral, disminuyendo su capacidad de percolar y por lo tanto retrasando su aparición en los puntos de extracción.

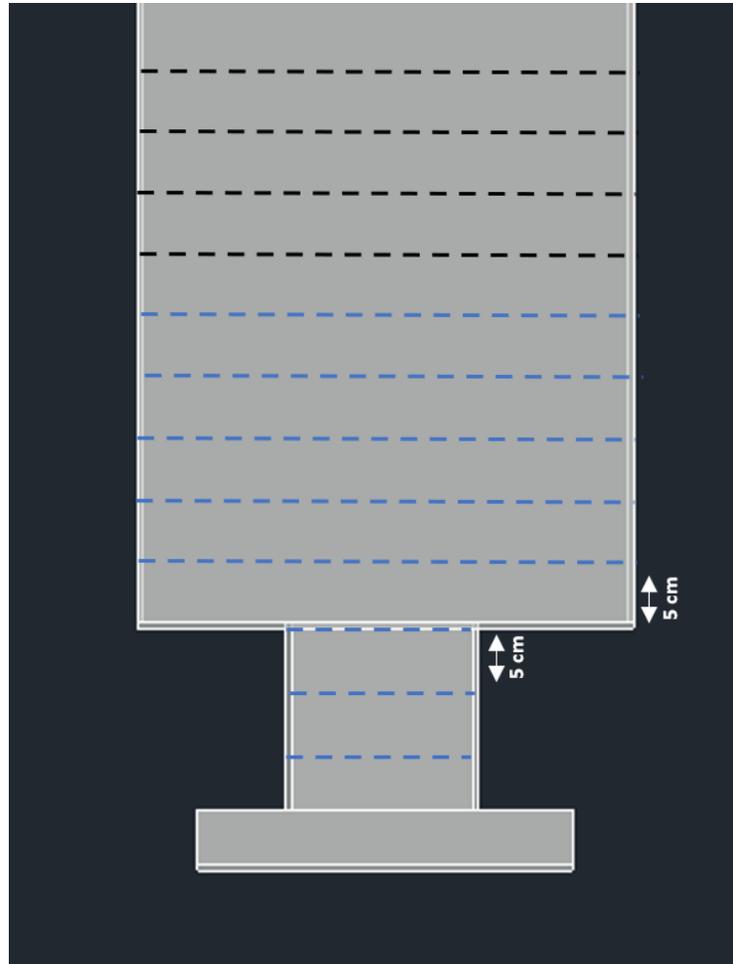


Figura 22. Vista en perfil de la disposición de los marcadores en la columna de mineral. Líneas punteadas negras indican las capas de marcadores finos y líneas punteadas azules indican las capas de marcadores gruesos.



Figura 23. Vista en planta de la malla de la posición de los marcadores.

El modelo experimental no consideró recarga y confinamiento del material por lo que los esfuerzos en el modelo corresponden a la carga vertical producida por el propio peso del material. Para estimar la carga vertical que se produce en la zona de la batea al inicio de la extracción se utilizó la ecuación de Janssen (Ecuación 4), donde ρ_b es la densidad del material, g es la fuerza de gravedad, R_h es el radio hidráulico, ϕ_w es el ángulo de fricción interna de la pared que corresponde a la del acrílico (0.31), k corresponde a la razón de esfuerzos horizontal y vertical (0.5) y por último z que corresponde a la altura de la columna de material (0.5 m). Finalmente se obtiene una carga inicial en el modelo de 6.4 kPa (Anexo D).

$$\bar{\sigma}_z = \frac{R_h \cdot \rho_b \cdot g}{\tan \phi_w \cdot k} \left(1 - \exp \frac{-k \cdot \tan(\phi_w) \cdot z}{R_h} \right) \quad (4)$$

4 Resultados y análisis

En este apartado se presentan los resultados y análisis de los experimentos realizados en el laboratorio para medir el efecto de la humedad en la dilución del material en los puntos de extracción debido a la migración preferencial de finos en una extracción uniforme y en la geometría de la zona de extracción.

En la Figura 24 se muestran las condiciones iniciales de cada una de las composiciones experimentales al cargar el modelo físico. Inicialmente se produce una percolación espontánea producto de la acción de la gravedad al moverse las partículas más finas a través de los vacíos entre las partículas estacionarias más gruesas [34] y que se visualiza principalmente en las paredes del modelo, debido al bajo ángulo de fricción de las paredes (acrílico), haciéndose mayormente notorio cuando ambos materiales no presentan humedad (Figura 24, A).

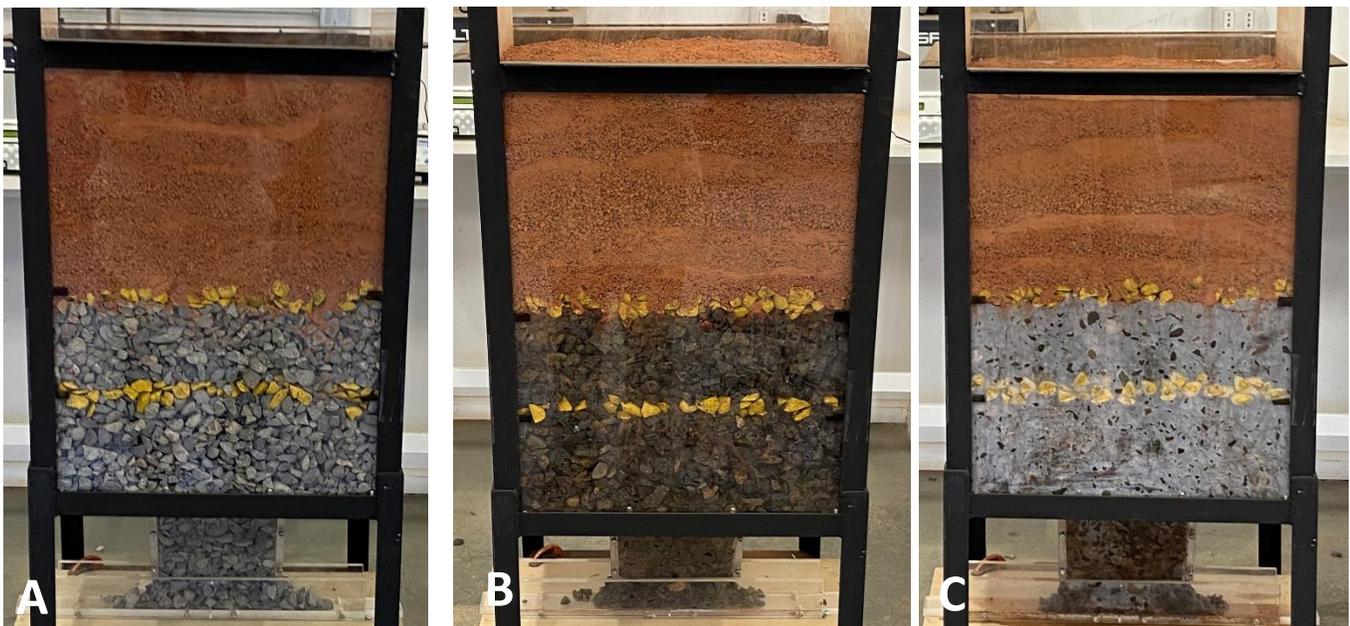


Figura 24. Condiciones iniciales de cada composición experimental al cargar el modelo. A: 0% humedad del material grueso. B: 2% humedad del material grueso. C: 4% humedad del material grueso.

Para cada una de las configuraciones experimentales se realizaron 100 extracciones por punto de extracción como criterio de comparación del PED, información que se resume en la siguiente tabla:

Tabla 7. Principales parámetros obtenidos de los experimentos físicos.

Parámetro	Porcentaje de humedad del material grueso		
	0%	2%	4%
Masa material grueso en el modelo [kg]	51.42	51.87	52.61
Masa material fino en el modelo [kg]	40.00	40.00	40.00
Masa total extraída tras 100 extracciones	10.46	9.47	12.35
Masa extraída al primer marcador fino [kg]	12.47	9.94	12.09
Masa extraída al segundo marcador fino [kg]	13.04	12.39	13.52

En el gráfico de la Figura 25 se muestran los resultados experimentales del material fino acumulado en función del material total extraído. En los experimentos con humedad (Exp.2 y Exp.3) se nota un retraso en la aparición de material fino en los puntos de extracción en comparación al caso sin humedad del material (Exp.1). Además, analizando las pendientes del gráfico, se nota en los experimentos con porcentajes de humedad una mayor pendiente, lo que podría indicar, a pesar del retraso en su aparición, un mayor ingreso de material fino en los puntos de extracción una vez que esta ha aparecido. Esto se podría explicar principalmente debido a que, en una atmósfera húmeda, la condensación de agua entre los granos puede inducir una cantidad significativa de cohesión debido a las fuerzas capilares lo que da lugar a la formación de arcos cohesivos o puentes sólidos entre granos [6] que funcionarían como una barrera para la percolación del fino, lo que mantiene el material fino segregado con el transcurso de la extracción del material desde los puntos de extracción. Esto produciría que el fino no se mezcle en gran medida con el grueso y que, a pesar de retrasar su aparición por la baja percolación del fino, aparezca en mayor cantidad en los puntos de extracción en etapas posteriores.

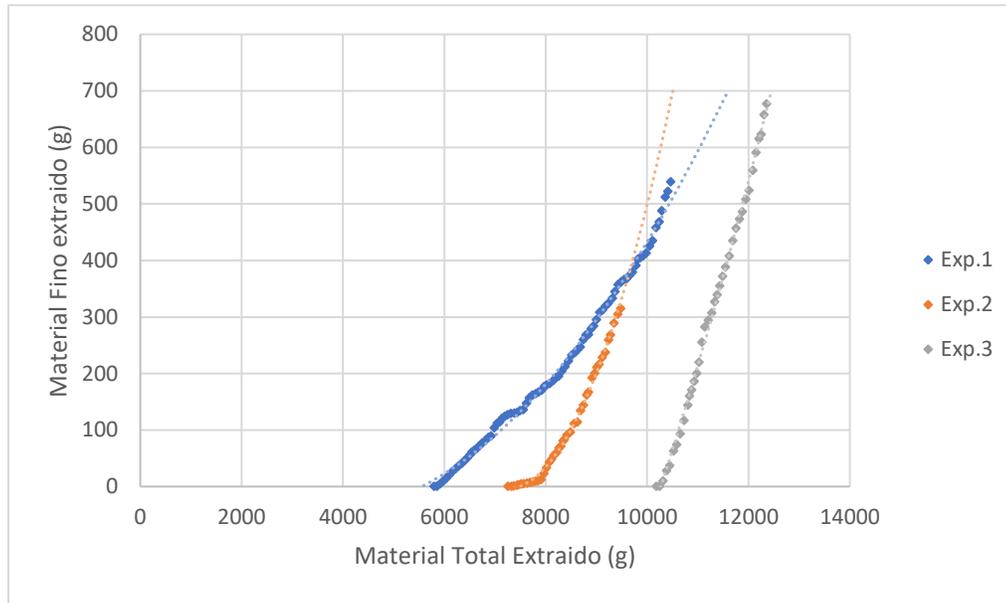


Figura 25. Experimentos 1, 2 y 3 resultados del material fino extraído desde los puntos de extracción en función de la masa total extraída.

Con el objetivo de validar la información experimental y ajustar las curvas se replicaron los tres sets up en los experimentos 4, 5 y 6 sin el uso de marcadores, para así comparar la cantidad de material fino extraído en función del material total extraído en los puntos de extracción. La primera aparición de fino para el experimento 1 ocurrió a los 5914 g de masa total extraída y para su réplica, el experimento 4, a los 5255 g lo que resulta en una variación en masa del 12.5% (Figura 26). Para el caso del experimento 2 esto ocurrió a los 7560 g y para su réplica, el experimento 5, a los 8361 g resultando en una variación en masa del 10.6% (Figura 27). Finalmente, para el experimento 3 la aparición del material fino en los puntos de extracción ocurrió a los 10309 g y para su réplica, el experimento 6, a los 10564 g con una variación en masa del 2.5% (Figura 28), siendo los experimentos con menor variabilidad experimental.

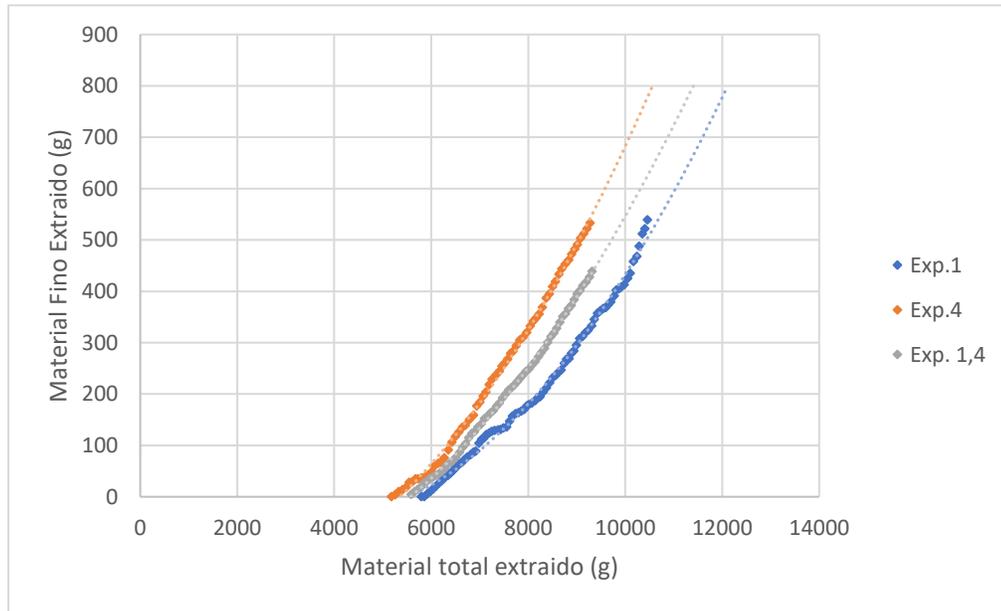


Figura 26. Replicación experimental (Experimentos 1 y 4).

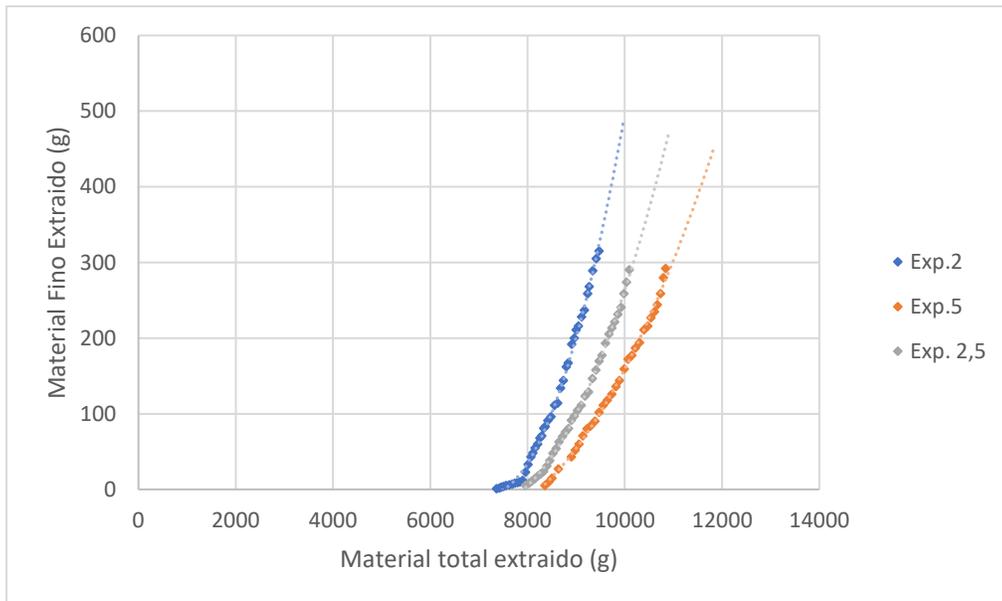


Figura 27. Replicación experimental (Experimentos 2 y 5).

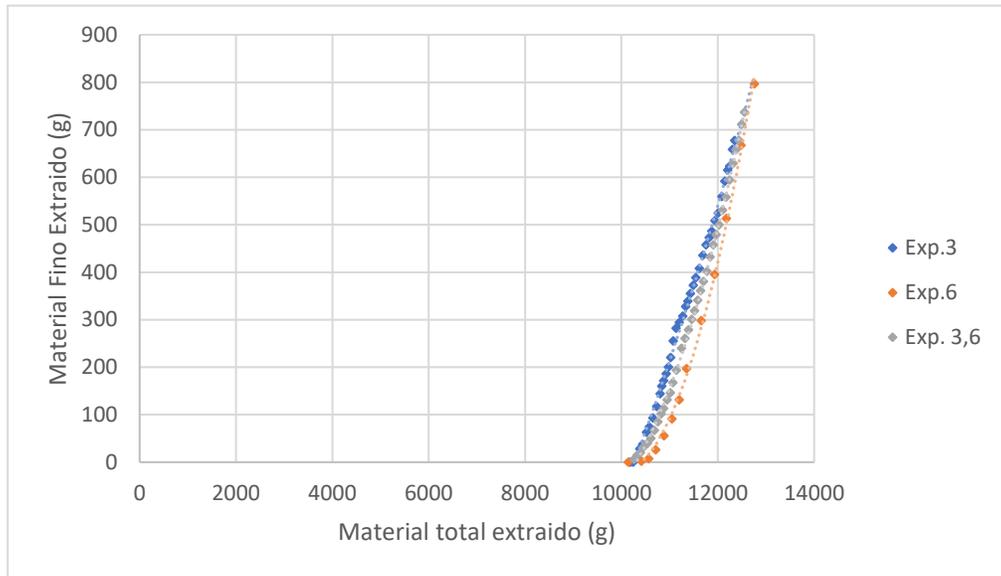


Figura 28. Replicación experimental (Experimentos 3 y 6).

Con los datos obtenidos de las réplicas de los experimentos se ajustaron las curvas del material fino en función del material total extraído (Figura 29), resultando para los experimentos con contenido de humedad del grueso de 0% y 2% (Exp. 1,4 y Exp. 2,5 respectivamente) en pendientes similares a diferencia de los experimentos con 4% de humedad del grueso (Exp. 3,6) donde la gráfica muestra una pendiente levemente mayor del ingreso de material fino.

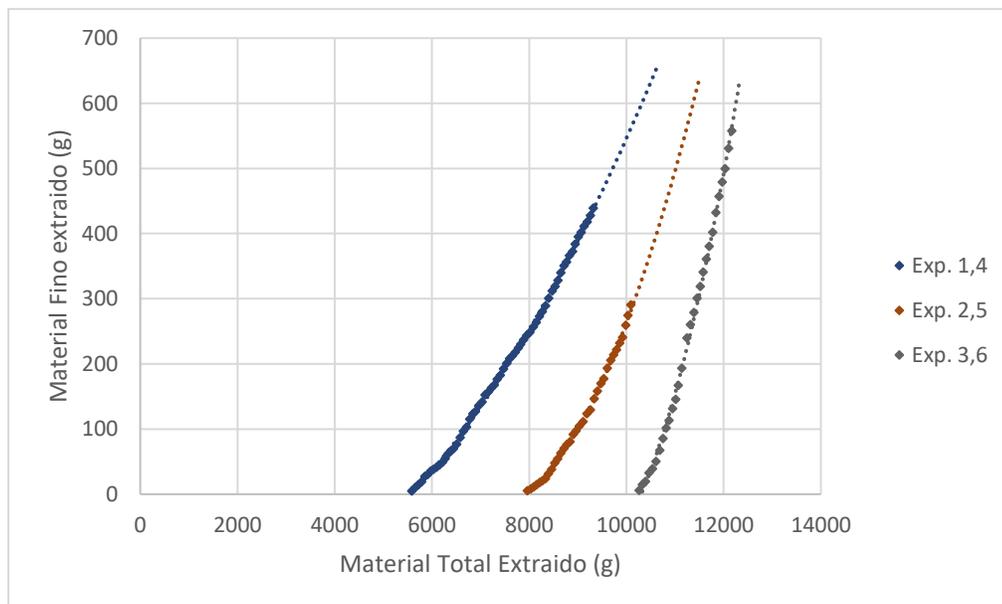


Figura 29. Curvas ajustadas del material fino extraído desde los puntos de extracción en función de la masa total extraída.

Un resultado secundario para los objetivos planteados en esta memoria incluye los resultados obtenidos de la frecuencia de colgadura, que complementan los datos obtenidos de la experimentación. Según [4,11] para una curva granulométrica de material, la frecuencia de colgadura es menor en condiciones húmedas debido a una mayor cohesión. Sin embargo, los datos obtenidos de la experimentación realizada en una extracción uniforme desde dos puntos de extracción (Tabla 8) muestran una disminución de la frecuencia de colgadura sólo entre el material con 0% y 2% humedad, pero un aumento con respecto al material con 4% humedad, lo que podría deberse a la presencia de humedad en la mezcla de material grueso/fino, por lo que una mayor variabilidad experimental es requerida.

Tabla 8. Resumen frecuencia de colgaduras.

Experimento	Frecuencia de colgadura [g/colgaduras]	Registro fotográfico
1	620	
2	509	
3	730	

4.1 Geometría de la zona de extracción

En la Figura 30 se muestran las condiciones finales tras las 100 extracciones de las distintas configuraciones experimentales. Dado las condiciones de borde del modelo, no es posible apreciar el flujo del material a lo largo de la columna debido a que el ancho del elipsoide de movimiento no alcanza a tocar las paredes del modelo bajo el material fino (las dos filas de material amarillo posicionado en la columna no sufren cambio). Esto representa unas condiciones de borde tal que el flujo de material se produce dentro de este, existiendo un efecto de las condiciones de fricción material/acrílico (paredes del modelo) sólo en superficie.

Sin embargo, si es posible visualizar las diferentes formas del hundimiento producido en la superficie de la columna de material, debido a la extracción de este, geometrías que se resumen en la Tabla 9 y que muestran un aumento en el ancho y profundidad del hundimiento en superficie a medida que se aumenta la humedad del material grueso.

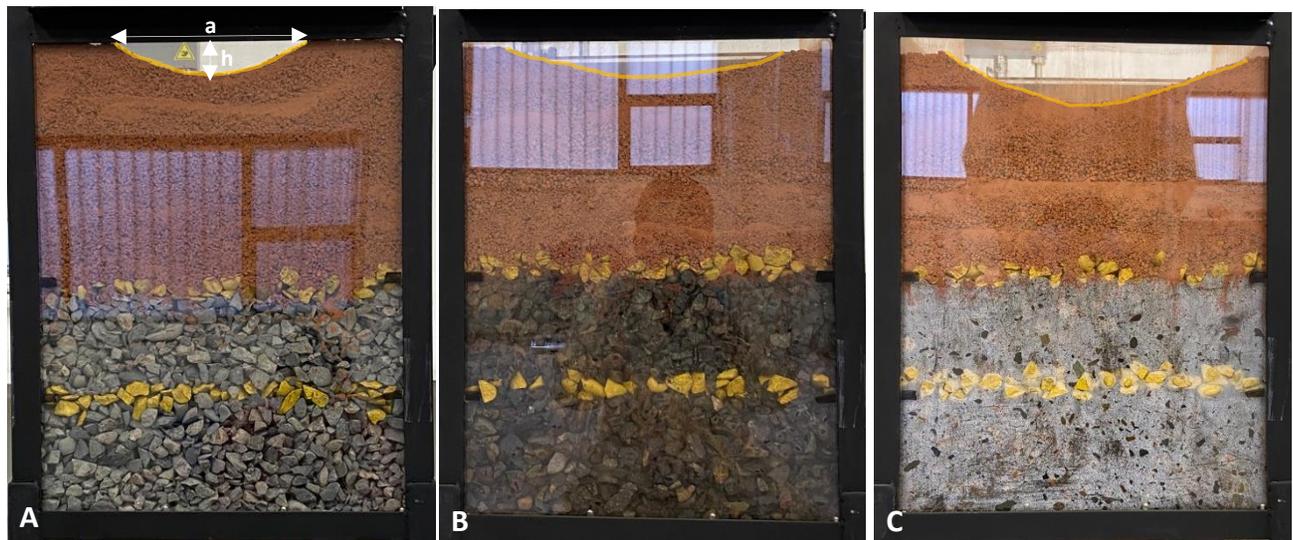


Figura 30. Condiciones finales de cada composición experimental tras #100 extracciones, donde “a” corresponde al ancho y “h” a la profundidad del hundimiento en superficie. A: 0% humedad del material grueso. B: 2% humedad del material grueso. C: 4% humedad del material grueso.

Tabla 9. Geometría del hundimiento en superficie de la columna de material

Parámetro	Porcentaje de humedad del material grueso		
	0%	2%	4%
Profundidad (h)	2.86 cm	2.29 cm	4.57 cm
Ancho (a)	17.14 cm	22.86 cm	28.57 cm

Por otro lado, del análisis de los marcadores recuperados de la extracción, se obtuvieron las imágenes de la Figura 31, donde es posible visualizar el flujo dentro de la columna de material y relacionarlos con los registros fotográficos obtenidos. El tipo de flujo del material se asemeja a una difusión de vacío caracterizada por ocurrir en materiales de granos más gruesos donde se forman vacíos producto de arcos estables, por los cuales se filtra el material más fino [28].

El ancho de las zonas de extracción (EZ) y las alturas de interacción (HIZ) para los experimentos 1, 2 y 3 se midieron directamente de los planos XZ de la Figura 31, con EZ's de 17 cm, 20 cm y 19 cm y HIZ's de 15.5 cm, 17 cm y 20 cm respectivamente, donde los experimentos con mayor contenido de humedad del grueso (Figura 31, B y C) presentan zonas de extracción con un ancho mayor y más constante a lo largo de la columna de mineral a diferencia del experimento sin humedad (Figura 31, A) donde el ancho de la zona de extracción se vuelve más angosto cercano a la batea, además de presentar alturas de interacción mayores. Lo que se complementa con los resultados de Sánchez [4] donde en presencia de humedad, el diámetro de extracción tendía a estabilizarse en el tiempo y se producían mayores alturas en la zona de extracción y con muestra seca el ancho de extracción continuó aumentando con la masa extraída.

Lo anterior además se puede relacionar con la geometría del hundimiento producido en superficie, donde una mayor humedad del material grueso resultó en EZ's, HIZ's y hundimientos de la columna de mineral en superficie más grandes.

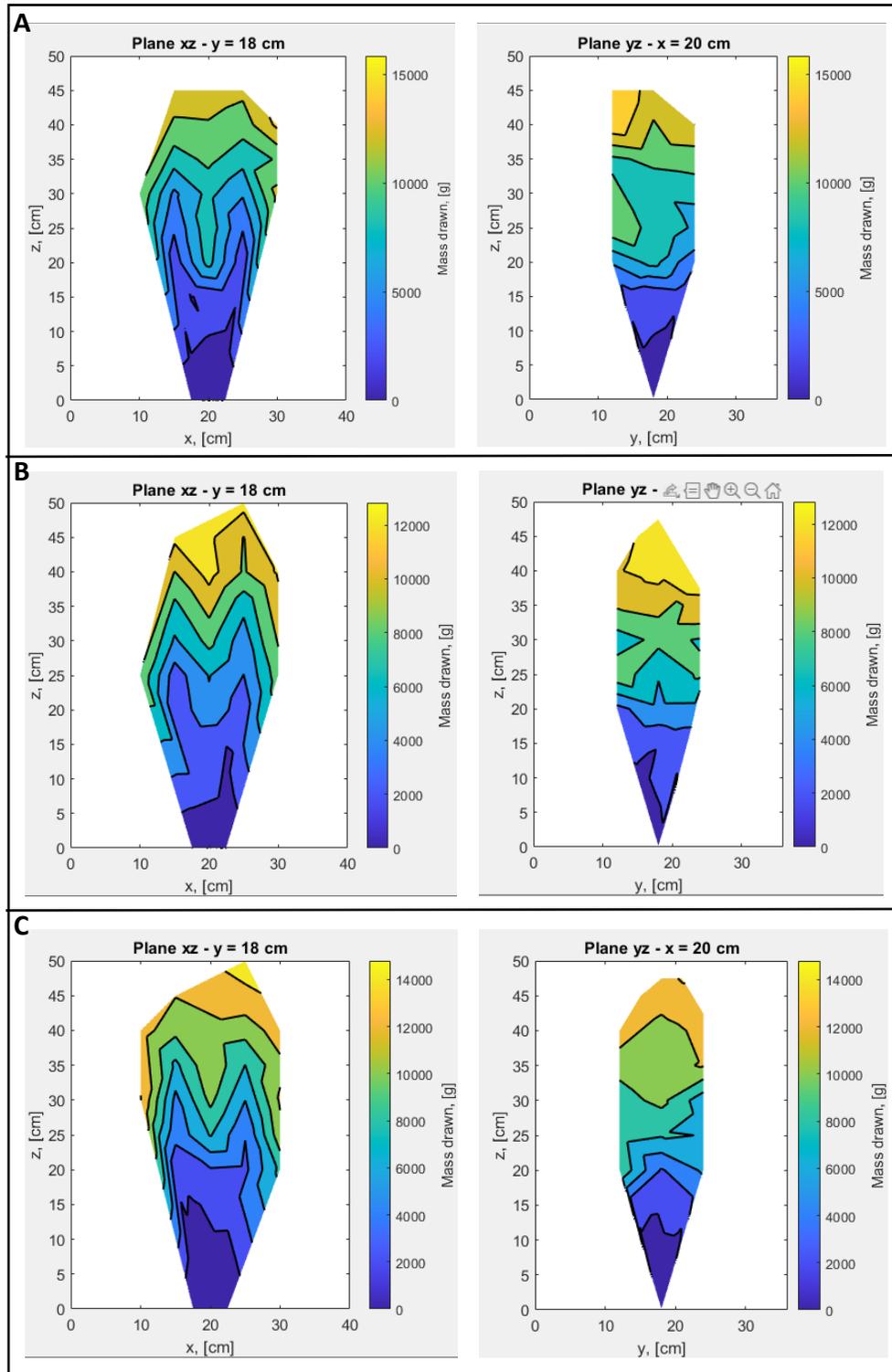


Figura 31. Zona de extracción de dos planos verticales. A: Exp.1. B: Exp.2. C: Exp.3.

4.2 Dilución producto de la migración preferencial de material fino

Se definió como criterio para la medición del PED el propuesto por Paredes [39], que considera el ingreso de dilución en una mina cuando se ha extraído el 3% de dilución respecto al tonelaje acumulado. En el modelo físico no se modeló el proceso de *caving*, por lo que toda la columna de mineral comienza a derrumbarse sobre la batea, además, se consideró la altura de columna y cantidad de material total a extraer bajo la batea para el cálculo del porcentaje de ingreso de dilución en un punto de extracción. Con esto se estimaron los PED en los puntos de extracción para los datos ajustados obtenidos de la experimentación, donde el menor PED corresponde al experimento sin presencia de humedad con un PED de 21% y un mayor PED en los casos que si existía humedad del 2% y 4% con PED's de 27% y 32% respectivamente. En la Figura 32 se muestra la relación lineal entre el PED promedio y la humedad del material grueso para porcentajes bajos de humedad.

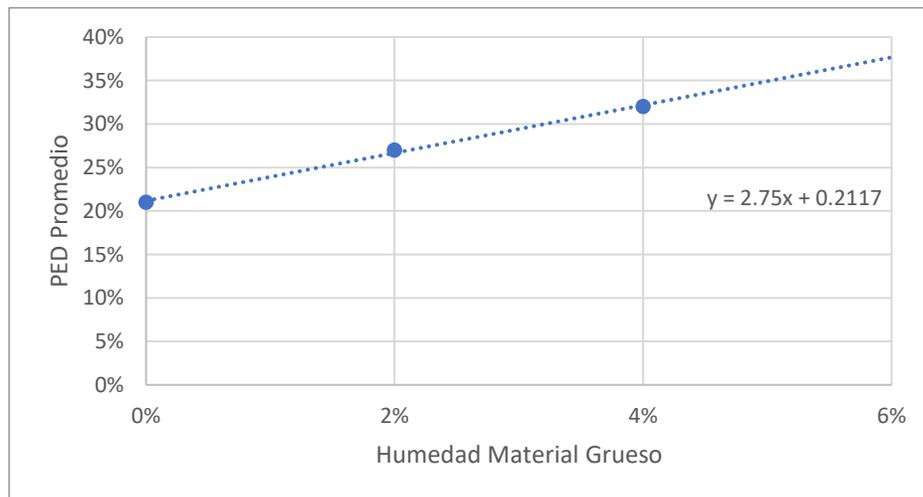


Figura 32. Relación entre el PED Promedio y el porcentaje de humedad del material grueso.

Un resultado interesante de la experimentación corresponde a la forma en que se presentó el material fino en los puntos de extracción (Figura 33), donde en el caso sin humedad (Figura 33, A) el material fino pareciera percolar en mayor medida a través del material grueso y en los casos con mayor humedad a través de la formación de canales en los costados de la batea, lo que se evidencia en un mayor ingreso de material fino expresado anteriormente por la formación de arcos cohesivos y segregación del material. Este fenómeno podría estar relacionado al problema de flujo de barro en las operaciones mineras, donde el efecto de la humedad del material grueso en el material fino podría provocar un estallido de barro para ciertos porcentajes de humedad.



Figura 33. Condiciones finales en los puntos de extracción de cada composición experimental tras #100 extracciones. A: 0% humedad del material grueso. B: 2% humedad del material grueso. C: 4% humedad del material grueso.

4.3 Análisis de resultados

Se compararon los resultados a escala mina de los experimentos sin humedad del material (Exp. 1,4) con los obtenidos por Arancibia en sus Experimentos 5 y 6 [29], donde la aparición de fino resultó en una variación en masa del 33%, diferencia mostrada en los gráficos de la Figura 34. En ambos planes experimentales se consideraba una extracción uniforme desde dos puntos de extracción y una altura igual de interfaz grueso/fino a escala mina, sin embargo, se encuentran diferencias en la geometría de la batea de extracción y principalmente en las características del material fino y grueso utilizados, donde a pesar de tener una relación de tamaño entre el d_{50} del material grueso y fino parecida, se tienen densidades aparentes y ángulos de fricción distintos, entre otras características del material al ser el grueso y fino materiales distintos y no curvas granulométricas de un mismo material (Figura 34), por lo que también son parámetros que influyen en el ingreso de fino, en este caso, retrasándolo.

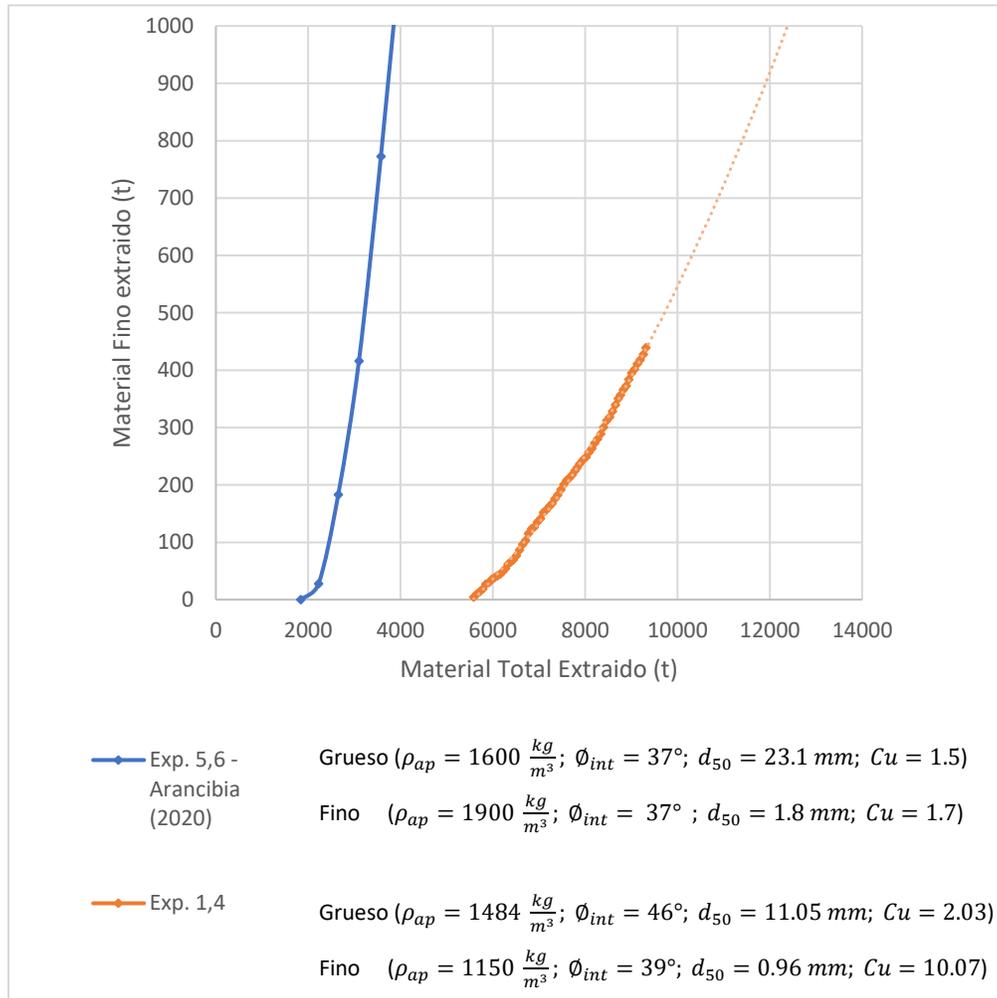


Figura 34. Comparativa de la masa a escala mina de fino extraída desde los puntos de extracción en función de la masa total y las características del material utilizado.

En la Figura 35 se comparan los resultados de PED obtenidos experimentalmente y cuantificados a través de lo propuesto por paredes [39] con los PED estimados en mina usando la Ecuación (3) propuesta por Laubscher [28], asumiendo un DCF igual a 1 para todos los casos (Baja desviación del material extraído entre puntos de extracción).

La dilución obtenida experimentalmente es mucho más baja comparada a la estimada en mina, debido a la sobrestimación de la columna de material que le corresponde a cada punto de extracción por el efecto de otros puntos de extracción. Se obtuvo una altura de interacción más alta en los experimentos en presencia de humedad resultó en un PED más bajo, lo que indica un ingreso

anticipado del material fino, caso contrario a lo obtenido experimentalmente, donde el aumento del contenido de humedad resultó en PED's más grandes lo que indica un retraso del ingreso de material fino. Esto se debe principalmente a la estimación de las alturas de interacción y al uso de supuestos para el DCF, SF y la falta de un parámetro de ajuste modelo/mina que considere la humedad del material y el efecto que esto tiene sobre la fricción del medio granular.

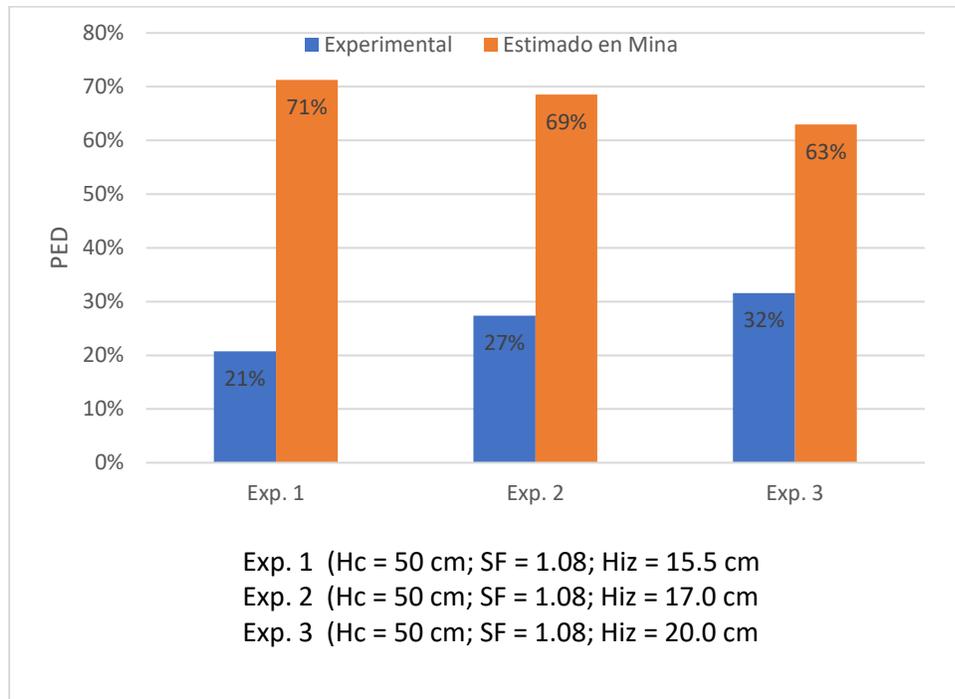


Figura 35. Entrada de dilución experimental y estimada en mina según ecuación de Laubscher [28].

5 Conclusiones y recomendaciones

El modelo físico a escala diseñado y las diferentes configuraciones experimentales planteadas de la extracción uniforme desde dos puntos de extracción permitió, haciéndose presente en todos los casos, el estudio del fenómeno de migración preferencial de fino obteniéndose las siguientes conclusiones:

- Al cargar el modelo ocurrió percolación espontánea visible en las paredes de este, debido al ángulo de fricción entre el material y las paredes de acrílico y principalmente en los casos sin humedad del material grueso, disminuyendo su visualización en los experimentos en presencia de humedad.
- El aumento del porcentaje de humedad del material grueso (mineral) ubicado bajo el material fino (estéril) si influyó en la migración de material fino retrasando su aparición en los puntos de extracción. Los porcentajes de entrada de dilución obtenidos fueron de 21%, 27% y 32% para los experimentos con 0%, 2% y 4% de humedad del material grueso respectivamente, considerando el efecto de la columna de material sobre una batea, por lo que un aumento en la humedad del material grueso también genera un aumento en el PED al menos para los casos de bajos porcentajes de humedad. Fenómeno que se explica debido al aumento de la cohesión del material y la formación de arcos cohesivos que actúan como barrera para la percolación de fino retrasando su aparición en los puntos de extracción. Por otro lado, los PED's estimados en mina fueron de 71%, 69% y 63% para los experimentos 1, 2 y 3 respectivamente resultando en una entrada de dilución más alta que en el modelo experimental. La tendencia mostró PED's más bajos al aumentar el contenido de humedad, caso contrario a lo obtenido en el modelo experimental, lo que se debe a los supuestos usados y la falta de un parámetro de ajuste modelo/mina para el contenido de humedad del material.

- El análisis realizado de la aparición de los marcadores finos en los puntos de extracción no mostraba una relación clara entre los diferentes experimentos, siendo la estimación del PED el principal resultado de medición de la migración del material fino y su influencia en la dilución.
- De forma visual, la forma en que el material fino migraba y aparecía en los puntos de extracción tenía una diferencia en los casos con humedad del material grueso, donde parecían formarse canales preferenciales a los costados de la batea, a diferencia del caso sin humedad donde en mayor medida el material fino parecía percolar a través del material grueso. Esto se debe a la dificultad de percolar del material fino en presencia de humedad antes vista, donde el material fino se mantiene en mayor medida segregado del grueso apareciendo de manera repentina en etapas posteriores de la extracción. Este fenómeno podría estar relacionado al problema de flujo de barro en las operaciones mineras donde la mezcla de fino y humedad generan impacto en la seguridad de las operaciones por lo que los resultados nos ayudan a tener un mayor entendimiento de lo que sucede en este fenómeno minero.
- Con respecto a la geometría de la zona de extracción, no se visualizaba directamente el flujo al interior de la columna ya que el ancho del elipsoide no llegaba a tocar las paredes de acrílico en la parte baja de la columna. El hundimiento en superficie si fue posible visualizarlo obteniéndose geometría más anchas y profundas para los experimentos con presencia de humedad, asociado probablemente a la menor fricción del material grueso. El análisis de los marcadores recuperados permitió representar el flujo del material al interior de la columna para así analizar su geometría, donde los experimentos con presencia de humedad mostraron un ancho de la zona de extracción más grande y constante a lo largo de la columna de material, así como alturas de interacción más altas al aumentar el contenido de humedad del material grueso.

Por lo que, del análisis de la hipótesis planteada, la presencia de humedad del material grueso si genera un impacto en la migración de finos cuantificada a través del PED, aumentándolo, y reflejado en la geometría de las zonas de extracción aumentando el ancho y la altura de interacción al incrementar el porcentaje de humedad lo que retrasa su aparición en los puntos de extracción. Esto producto de la formación de arcos cohesivos que dificultan la percolación y favorecen la segregación del material fino. Los resultados observados nos ayudan a entender la importancia de la humedad en las operaciones mineras y la necesidad de la incorporación de esta variable en la calibración de modelos numéricos de flujo gravitacional y en las estrategias de extracción para así por ejemplo evitar la creación de condiciones que puedan dar lugar a estallidos de barro.

5.1 Recomendaciones

Los experimentos realizados consideraron un único tipo de material para el grueso, por lo que materiales gruesos con diferentes propiedades son requeridos para revisar la correlación con respecto a la migración de fino. El material fino utilizado no correspondía a una curva granulométrica más fina del mismo material, sino que era un material distinto por lo que se podría utilizar un mismo material para las curvas de fino y grueso. Además, variables como la relación de tamaño en el material grueso/fino se podrían revisar para distintas alturas de interfaz en la columna de material.

Se utilizaron humedades de material grueso de hasta el 4% debido a que porcentajes mayores no se retenían en el material comenzando a filtrar agua, por lo que el cambiar el tipo de material podría permitir probar set ups con mayores contenidos de humedad. Además, un caso más cercano a lo que sucede en mina sería humedecer el material fino sobre el material grueso, ya que es de donde proviene en mayor medida la humedad.

Finalmente se recomienda realizar una mayor cantidad de extracciones por punto de extracción para así contar con más información de la tendencia de la curva fino acumulado/material extraído y para revisar que pasa después del ingreso de fino en los puntos de extracción y la forma en la que se presenta en estos.

6 Bibliografía

- [1] R. Castro, M. Fuenzalida, and F. Lund, "Experimental study of gravity flow under confined conditions," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 67, pp. 164–169, 2014.
- [2] M. Pineda, "Study of the gravity flow mechanisms at goldex by means of a physical model," Tesis de magíster en minería, Universidad de Chile, Santiago, 2012.
- [3] I. Janelid, and R. Kvapil, "Sublevel caving," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 3, pp. 129-153, 1966.
- [4] S. Vanessa, R. Castro, and S. Palma, "Gravity flow characterization of fine granular material for Block Caving," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 114, pp. 24–32, 2019.
- [5] M. Pierce, "A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines," PhD tesis, University of Queensland, Brisbane, 2010.
- [6] B. Andreotti, Y. Forterre, and O. Pouliquen, "Granular Media Between Fluid and Solid," New York: Cambridge University Press, 2013. ISBN 9781107034792.
- [7] J. Bridgwater, "Fundamental Powder Mixing Mechanisms," *Powder Technology*, Vol. 15, pp. 225-236, 1976.
- [8] R. Kvapil, "Gravity flow of granular material o hoppers and bins," *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, Vol. 2, pp. 35-41, 1965.
- [9] R. Kvapil, "Gravity flow of granular material coarse material," *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, Vol. 2, pp. 277-304, 1965.
- [10] R. McNearny, and J. Abel, "Large-scale two-dimensional block caving model," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, Vol. 30, pp. 93–109, 1993.
- [11] R. Castro, R. Gómez, and A. Hekmat, "Experimental quantification of hang-ups for block caving applications". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 85, pp. 1–9, 2016.
- [12] A. Halim, "*3D large scale physical modelling for studying interactive drawing and drawpoint spacing in Block Caving Mines*," Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, 2004.

- [13] R. Castro, R. Trueman, and A. Halim, "Study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model," *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 44, pp. 860–870, 2007.
- [14] R. Castro, and M. Pineda, "The role of gravity flow in the design and planning of large sublevel stopes," *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 115, pp. 113-118, 2015.
- [15] X. Zhang, G. Tao, and Z. Zhu, "Laboratory study of the influence of dip and ore width on gravity Flow during longitudinal sublevel caving" *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 103, pp. 179–185, 2018.
- [16] A. Susaeta, "Theory of gravity Flow (Part 1, 2)," *Proceedings MassMin Instituto de Ingenieros de Chile*, Santiago, 2004.
- [17] P. Vergara, "*Estudio Experimental de Flujo Gravitacional en minería de Panel Caving*," Memoria de título, Universidad de Chile, Santiago, 2016.
- [18] Tao et al., "A new diversion drawing technique for controlling ore loss and dilution during longitudinal sublevel caving," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 113, pp. 163–171, 2019.
- [19] P. Gustafsson, "Waste rock content variations during gravity flow in sublevel caving: Analysis of full scale experiments and numerical simulations," PhD thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 1998.
- [20] W. Mullins, "Stochastic Theory of Particle Flow under Gravity," *Journal of Applied Physics*, Vol. 43, pp. 665-678, 1972.
- [21] W. Gibson, "Stochastic models for gravity Flow: numerical considerations," *Caving 2014, International Symposium on block and Sublevel Caving*, pp. 337-347, 2014.
- [22] C. Leonardi, D. Owen, and Y. Feng, "Simulation of fines migration using a non-Newtonian lattice Boltzmann-discrete element model," *Engineering Computations: International Journal for Computer-Aided Engineering and Software*, Vol. 29, pp. 366-391, 2012.
- [23] S. Steffen, and P. Kuiper, "Case Study: Improving SLC recovery by measuring ore flow with electronic markers," *Caving 2014, International Symposium on block and Sublevel Caving*, pp. 328-336, 2014.

- [24] E. Viera, M. Montecino, and M. Meléndez, "First steps in monitoring gravity flow at El Teniente Mine: installation stage in Block-2, Esmeralda Mine," *Caving 2014, International Symposium on block and Sublevel Caving*, pp. 348-355, 2014.
- [25] A. Nordqvist, M. Wimmer, and M. Grynienko, "Gravity flow research at the Kiruna sublevel caving mine during the last decade and an outlook into the future," *MASSMIN 2020, Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining*, pp. 505-518, 2020.
- [26] M. Pierce, D. Weatherley, and T. Kojovic, "A hybrid methodology for secondary fragmentation prediction in cave mines," *Caving 2010, Second International Symposium on Block and Sublevel Caving*, pp. 567–582, 2010.
- [27] E.T. Brown, "Block caving geomechanics," Brisbane: Julius Kruttschnitt Minerals Research Center, University of Queensland, 2002. ISBN 1-74112-000-4.
- [28] D. Laubscher, "A practical Manual on Block Caving. Report for the international caving study," Brisbane: JKMRC and Itasca Consulting Group, 2000.
- [29] L. Arancibia, R. Castro, and R. Gómez, "Quantifying fines migration in block caving through 3D experiments," Universidad de Chile, Santiago, 2019.
- [30] S. Irribarra, "Estudio Experimental de Migración de Finos en minería de Caving," Memoria de título, Universidad de Chile, Santiago, 2014.
- [31] R. Butcher, T.R. Stacey, W.C. Joughin, "Mud rushes and methods of combating them," *The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 105, pp. 817-824, 2005.
- [32] A. Scott, and J. Bridgwater, "Interparticle percolation: a fundamental solids mixing mechanism," *Ind. Eng. Chem., Fundam.*, Vol. 14, pp. 22-27, 1975.
- [33] M. Cooke, J. Bridgwater, and A. Scott, "Interparticle Percolation: Lateral and Axial Diffusion Coefficients," *Powder Technology*, Vol. 21, pp. 183-193, 1978.
- [34] N. Khola, C. Wassgren, "Correlations for shear-induced percolation segregation in granular shear flows," *Powder Technology*, Vol. 288, pp. 441–452, 2016.
- [35] Johanson et al., "Quantitative measurement of particle segregation mechanisms," *Powder Technology*, Vol. 159, pp. 1–12, 2005.
- [36] Bridgwater et al., "Geometric and Dynamic Similarity in Particle Mixing," *Powder Technology*, Vol. 2, pp. 198-206, 1969.

- [37] M. Hashim, G. Sharrock, and S. Saydam, "A Review of Particle Percolation in Mining," SHIRMS 2008, Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium, 2008.
- [38] A. Halim, "Study of the influence of the interactive draw upon drawpoint spacing in block and sublevel caving mines," PhD tesis, University of Queensland, Brisbane, 2006.
- [39] P. Paredes, "*Mecanismos de entrada de dilución en minas de block/panel caving,*" Memoria de título, Tesis de magister, Universidad de Chile, Santiago, 2012.
- [40] Vallejos et al., "Methodology for Evaluation of Mud Rush Risk in Block Caving Mining," The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 117, pp. 491-497, 2017.
- [41] K. Sánchez, S. Palma, R. Castro, "Numerical Modelling of Water Flow Through Granular Material for Isolated and Simultaneous Extractions in Block Caving," Springer-Verlag GmbH Austria, part of Springer Nature 2018.
- [42] D. Olivares, "*Experimental Characterization of the Flowability of Material in Block/Panel Caving,*" Tesis de magister, Universidad de Chile, Santiago, 2016.
- [43] G. Barenblatt, "Scaling, Self-Similarity, and Intermediate Asymptotics," Cambridge: Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521-43522-6.
- [44] P. Cavieres, E. Contreras, J.C. Arce, "*Dimensionamiento de Malla de Extracción, Bateas Recolectoras y Pilar Corona para Método Panel Caving en Roca Primaria,*" Mina El Teniente. 2004.
- [45] ASTM, "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions," D3080/D3080M. 2018.
- [46] ASTM D2216 – 10, "Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass," 2015.
- [47] ASTM D854 – 00, "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer," 2000.
- [48] ASTM D422 – 63, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils," 1998.
- [49] W. Lambe, R. Whitman, "Soil Mechanics," Massachusetts Institute of Technology. 1969.
- [50] D. Olivares, "*Influencia de Fino y Humedad en Flujo Gravitacional Confinado,*" Memoria de Título, Universidad de Chile, Santiago, 2014.

7 Anexos

7.1 Anexo A: Análisis granulométrico material grueso

Para generar la curva granulométrica utilizada en los experimentos se utilizó una curva granulométrica de una operación de CODELCO Chuquicamata, se escaló a la escala seleccionada para la experimentación, 1:100 (Figura 36) y luego esta curva se utilizó como referencia para replicar en el laboratorio con el material grueso (grava) y las mallas $\frac{3}{4}$ " $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{4}$ " y N°4, obteniéndose la curva granulométrica del material grueso (Figura 19).

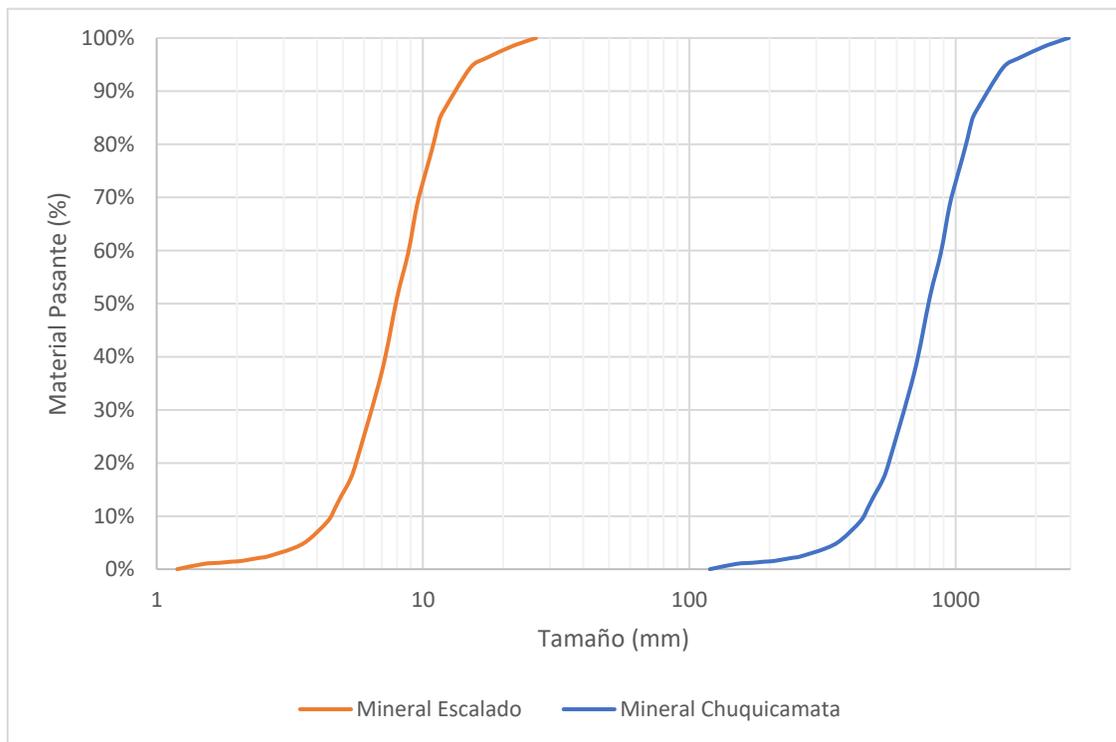


Figura 36. Curva granulométrica real de una operación minera de CODELCO Chuquicamata subterránea y curva granulométrica escalada 1:100 [50].

7.2 Anexo B: Ensayos de corte directo del material

Para los ensayos de corte directo se utilizó una máquina Shearlab Matest (Figura 37), con la que se ensayaron composiciones de esfuerzos normales de entre 9.6 y 221.1 kPa para el material grueso y fino.



Figura 37. Máquina para ensayo de corte directo Shearlab de Matest.

Para el material fino, correspondiente a la arcilla, se realizaron un total de 4 ensayos de corte con una velocidad de 0.2 mm/min en una celda de 10x10 cm² (Figura 38), obteniéndose una cohesión del material de 19.9 kPa y un ángulo de fricción interna de 39°, considerando los esfuerzos de corte residuales (Tabla 10).

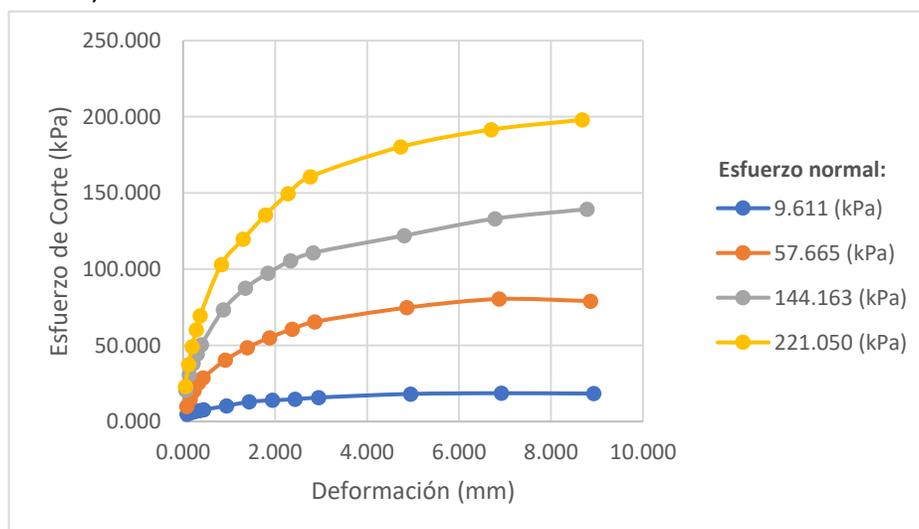


Figura 38. Gráfico de esfuerzo de corte vs deformación para distintos esfuerzos normales para el material fino (arcilla).

Tabla 10. Resumen de características del material fino obtenidas del ensayo de corte directo.

	Esfuerzo de corte máx.	Esfuerzo de corte residual
Cohesión [kPa]	20.7028	19.9480
Pendiente [m]	0.8172	0.8206
Φ_{int} [rad]	0.6852	0.6872
Φ_{int} [°]	39.2573	39.3731

Para el caso del material grueso, se consideró la granulometría más fina del material y se realizaron un total de 3 ensayos de corte con una velocidad de 0.2 mm/min en una celda de 10x10 cm² (Figura 39), obteniéndose una cohesión del material de 1.5 kPa y un ángulo de fricción interna de 46°, considerando los esfuerzos de corte residuales (Tabla 11).

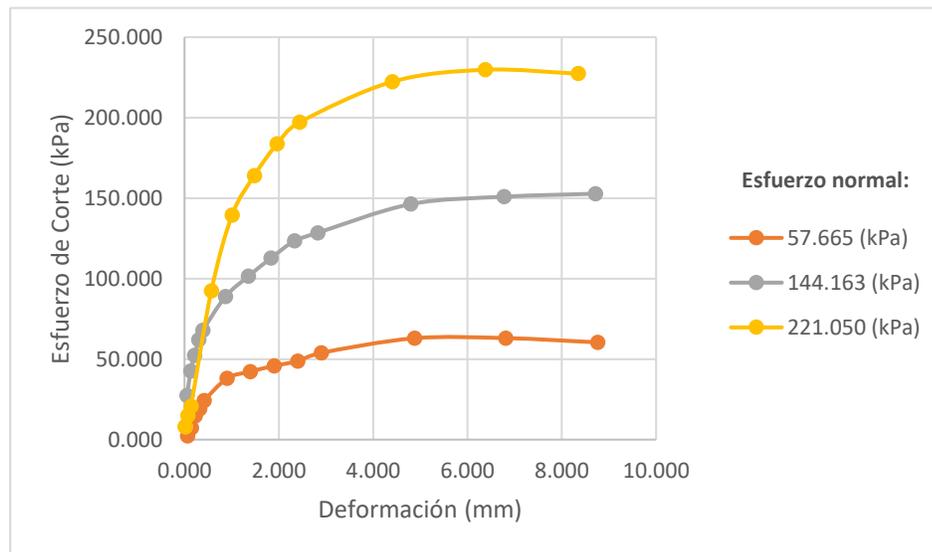


Figura 39. Gráfico de esfuerzo de corte vs deformación para distintos esfuerzos normales para el material grueso (grava).

Tabla 11. Resumen de características del material grueso obtenidas del ensayo de corte directo.

	Esfuerzo de corte máx.	Esfuerzo de corte residual
Cohesión [kPa]	4.6591	1.4583
Pendiente [m]	1.0204	1.0369
Φ_{int} [rad]	0.7955	0.8035
Φ_{int} [°]	45.5793	46.0376

Adicional a esto, se realizaron ensayos de corte directo a la parte fina del material grueso para humedades del 2% y 4%, obteniéndose ángulos de fricción interna de 43° y 41° y cohesiones de 6.1 kPa y 4.8 kPa respectivamente, como se muestra en los siguientes gráficos:

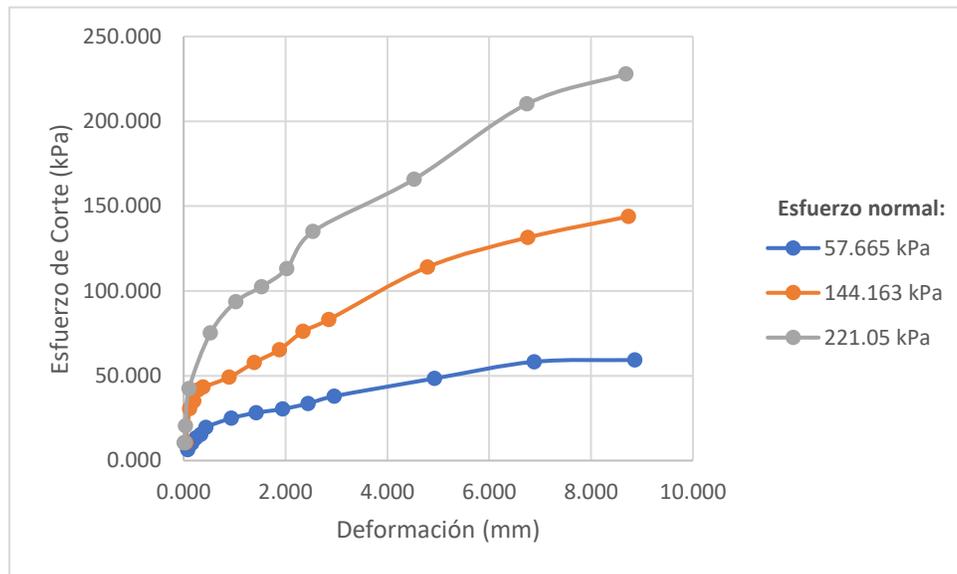


Figura 40. Gráfico de esfuerzo de corte vs deformación para distintos esfuerzos normales para el material grueso (grava) al 2% humedad.

Tabla 12. Resumen de características del material grueso al 2% de humedad obtenidas del ensayo de corte directo.

	Esfuerzo de corte máx.	Esfuerzo de corte residual
Cohesión [kPa]	1.0040	6.1335
Pendiente [m]	1.0331	0.9317
Φ_{int} [rad]	0.8017	0.7500
Φ_{int} [°]	45.9315	42.9737

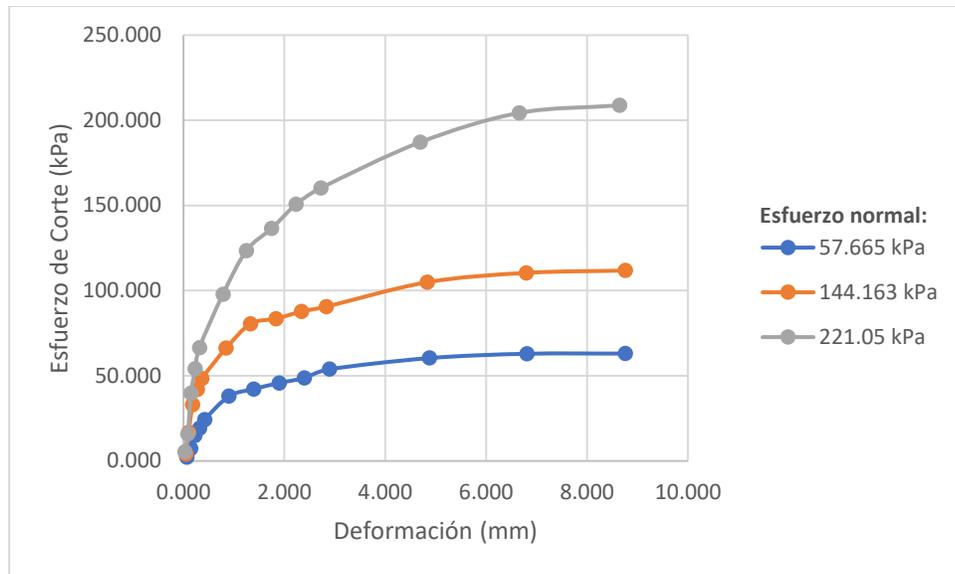


Figura 41. Gráfico de esfuerzo de corte vs deformación para distintos esfuerzos normales con material grueso (grava) al 4% humedad.

Tabla 13. Resumen de características del material grueso al 4% de humedad obtenidas del ensayo de corte directo.

	Esfuerzo de corte máx.	Esfuerzo de corte residual
Cohesión [kPa]	3.1127	4.8453
Pendiente [m]	0.8851	0.8589
Φ_{int} [rad]	0.7245	0.7096
Φ_{int} [°]	41.5120	40.6577

7.3 Anexo C: Procedimiento de cargado del modelo

Se comenzó cargando la batea con sus respectivos marcadores gruesos (Figura 42, A), luego se continuó cargando el modelo con material grueso posicionando los marcadores cada 5 cm de altura (Figura 42, B). Adicional a esto se agregaron dos capas con material amarillo cada 25cm, con el objetivo de visualizar las condiciones de borde del modelo (Figura 42, B y C)

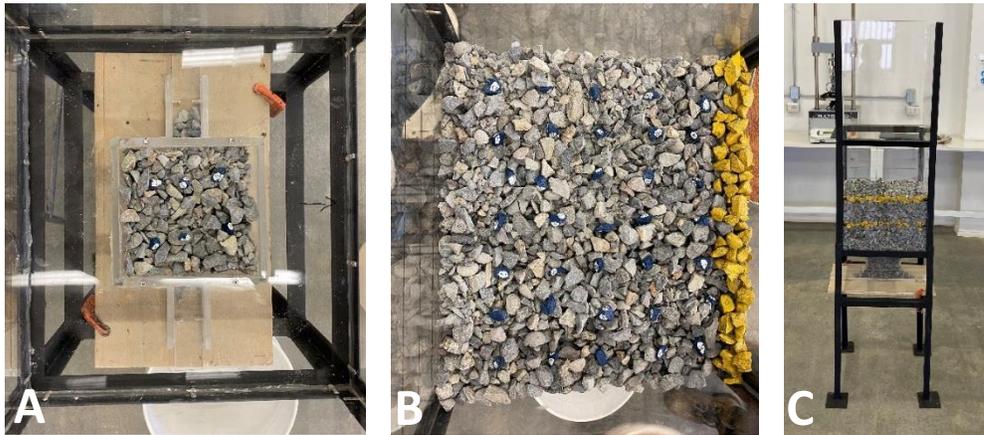


Figura 42. Procedimiento de cargado del material grueso. A: cargado y posicionamiento de marcadores en la batea. B: cargado y posicionamiento de marcadores en la columna del modelo. C: vista general del cargado del material grueso.

Luego de cargar la columna con 25 cm de material grueso, se comenzó a cargar el material fino con sus respectivos marcadores finos cada 5 cm (Figura 43, A). Esto hasta completar los 50 cm de columna (Figura 43, B). Con esto se procedió a extraer el material de ambos puntos de extracción de manera uniforme hasta completar las 100 extracciones por punto de extracción.

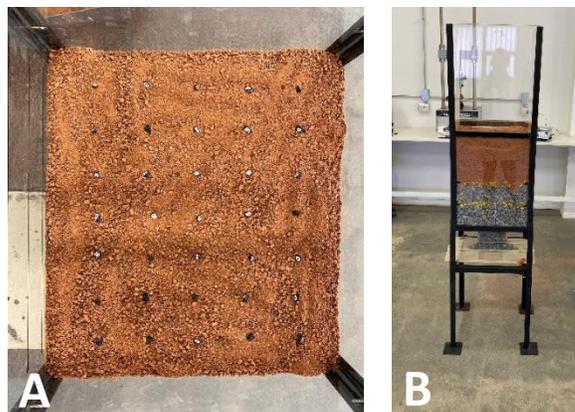


Figura 43. Procedimiento de cargado del material fino. A: cargado y posicionamiento de marcadores en la columna del modelo. B: vista general del cargado del material.

7.4 Anexo D: Cálculo del esfuerzo vertical en el modelo al inicio de la extracción

Dado que el modelo físico contiene una capa de 25 cm de material grueso y sobre ésta una capa de 25cm de material fino, se obtuvo la carga vertical inicial mediante la ecuación de Janssen (Ec. 4) y en específico mediante su versión extendida. Se tiene:

$$\bar{\sigma}_Z = \frac{Rh \cdot \rho_b \cdot g}{\tan \phi_w \cdot k} \left(1 - \exp \frac{-k \cdot \tan(\phi_w) \cdot z}{Rh} \right) \quad (4)$$

Donde:

$$\rho_{grueso} = 1484 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{fino} = 1150 \frac{kg}{m^3}$$

$$g = 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$Rh = 0.0947 \text{ m}$$

$$\phi_{pared} = 0.31^\circ$$

$$k = 0.5$$

$$z_{grueso} = 0.25 \text{ m}$$

$$z_{fino} = 0.25 \text{ m}$$

Con la ecuación x:

-Material grueso

$$\bar{\sigma}_a = \frac{0.0947 \cdot 1484 \cdot 9.8}{\tan 0.31 \cdot 0.5} \left(1 - \exp \frac{-\tan 0.31 \cdot 0.5 \cdot 0.25}{0.0947} \right) = 3623 \text{ Pa}$$

-Material fino

$$\bar{\sigma}_b = \frac{0.0947 \cdot 1150 \cdot 9.8}{\tan 0.31 \cdot 0.5} \left(1 - \exp \frac{-\tan 0.31 \cdot 0.5 \cdot 0.25}{0.0947} \right) = 2807 \text{ Pa}$$

Utilizando Janssen extendido:

$$\bar{\sigma}_Z = 3623 \text{ Pa} + 2807 \text{ Pa} * \left(\exp \frac{-\tan 0.31 \cdot 0.5 \cdot 0.25}{0.0947} \right) = 6410 \text{ Pa} = 6.4 \text{ kPa}$$

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Modelación física del fenómeno de migración de finos en minería de caving.		
Nombre Memorista: Cristian Javier Antilao Neira		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	Muy bueno	 Prof. René Gómez Puigpinos
Calificación	6.6	
Fecha	14.09.2021	
 Prof. FERNANDO PARADA		Ingeniero Supervisor:
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
Ing. Lenin Arancibia Guevara		Prof. Gonzalo Nelis S.
Resumen		
<p>El objetivo de este trabajo es el estudio del fenómeno de migración preferencial de material fino a través de experimentos controlados que permitan simular el comportamiento del flujo del material fino y grueso, cuantificando el impacto generado por el material fino, en presencia de humedad.</p> <p>Para lograr el objetivo se diseñó y construyó un modelo físico a escala 1:100 con dimensiones de 40 cm X 36 cm y una altura de columna de extracción de 100 cm. El set up experimental consideró un material grueso compuesto por grava con un d50 de 11.05 mm con porcentajes de humedad de 0%, 2% y 4%, y un material fino con un d50 de 0.96 mm dispuesto sobre el material grueso. Para cada experimento, se simuló una extracción a través de dos puntos de extracción. El análisis del comportamiento del flujo gravitacional se realizó con la ayuda de marcadores dispuestos en la columna de material y la cuantificación de la dilución del mineral a través del PED medido en los puntos de extracción.</p> <p>Los resultados indican que el porcentaje de humedad del material grueso si influye en la migración preferencial del material fino, retrasando su aparición en los puntos de extracción, para el set-up utilizado, debido probablemente al aumento de la cohesión y la formación de arcos cohesivos que dificultan la percolación del fino en bajas cantidades. El porcentaje de entrada de dilución promedio se estimó en 21%, 27% y 32% para los experimentos con 0%, 2% y 4% de humedad del material grueso respectivamente. Por lo que La presencia de humedad aumenta el PED y la geometría de la zona de extracción siendo un parámetro relevante en el flujo por gravedad.</p>		