



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

DETERMINACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE EXTRACCIÓN EN UN
FLUJO GRAVITACIONAL DE MATERIAL GRANULAR FINO EN PRESENCIA DE
HUMEDAD

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

YADIRA VANESSA SANCHEZ VILLARREAL

PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ

PROFESOR CO – GUÍA:
SERGIO PALMA MOYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LUIS FELIPE ORELLANA ESPINOZA
KENJI BASAURE MATSUMOTO

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE: Magíster en Minería
POR: Yadira Vanessa Sánchez Villarreal
FECHA: Junio 2017
PROFESOR GUÍA: Raúl Castro Ruiz

DETERMINACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ZONAS DE EXTRACCIÓN EN UN FLUJO GRAVITACIONAL DE MATERIAL GRANULAR FINO EN PRESENCIA DE HUMEDAD

En los métodos de block /panel caving el flujo gravitacional es un factor importante que tiene gran influencia en la toma de decisiones para un óptimo diseño y planificación de la mina. Diversas investigaciones en el tema se han desarrollado desde los 60' utilizando modelamiento físico, numérico y ensayos a gran escala. Para el caso específico de los modelos físicos, el objetivo de estas investigaciones se ha basado en comprender el mecanismo involucrado en el flujo gravitacional de medios como arena y grava, para determinar su impacto en el diseño. Paralelamente con datos observados se han construido guías empíricas de diseño que han sido ampliamente utilizadas, sin embargo en las últimas décadas la explotación de este método subterráneo ha cambiado y en la actualidad es utilizado para una amplia gama de resistencia de macizos rocosos.

Con el objetivo de determinar variables que tengan mayor importancia en la caracterización del flujo gravitacional en material granular fino, este trabajo presenta el estudio experimental sobre un modelo físico no confinado (Escala 1:75). En él se llevaron a cabo diez ensayos considerando como variables: material fino, masa de extracción acumulada y porcentaje de humedad sin llegar a la saturación del medio.

Los resultados indican que las variables que afectan la geometría de las zonas de flujo son la humedad y la masa de extracción acumulada. Para el caso del material húmedo, el diámetro máximo alcanzado después de 14 [kg] de masa de extracción tiene pequeñas variaciones en su incremento, sin embargo la altura continua propagándose a lo largo de la columna de mineral. Cuando los porcentajes de humedad son igual a 6%, la altura de los elipsoides no llega a un valor similar (69.9 [cm]) que los ensayos restantes. Estos cambios en el comportamiento del flujo gravitacional se deben a la cantidad de agua añadida al material fino. De esta forma se producen fuerzas capilares que cambian las propiedades resistentes del material.

Por otro lado, los diámetros obtenidos fueron escalados al prototipo y proyectados sobre un layout de 34 x 17 [m], se verificó que los elipsoides se traslapan dentro de la batea, pero no entre estas. El resultado es tonelaje de material aislado que disminuye la recuperación de mineral.

Además, los resultados respecto a la frecuencia de colgaduras son cercanos a los datos de puntos de extracción relacionados con material fino y humedad de la mina Esmeralda. Esta aproximación entre datos reales y experimentales se debe a que el factor de flujo (carga vertical y resistencia del material) es similar en los dos casos (prototipo y modelo físico).

Finalmente, con los datos experimentales y el uso del análisis dimensional mediante la aplicación del teorema de Buckingham se proponen dos modelos matemáticos para predecir la geometría de los elipsoides (altura y diámetro).

AGRADECIMIENTOS

A Dios y mis padres, pilares fundamentales en mi vida y responsables de mis logros académicos y profesionales. A mi hermana, gracias por sus consejos y palabras justas.

Es preciso agradecer a mi profesor Raúl Castro y mi co-guía Sergio Palma por sus importantes aportes y participación activa, mediante sus comentarios, enseñanzas y revisiones en el desarrollo de esta tesis. También a los profesores miembros de la comisión: Luis Felipe Orellana y Kenji Basaure por su predisposición favorable y su tiempo invertido.

Al Laboratorio de Block Caving por haberme facilitado todas las herramientas para la elaboración del trabajo experimental y a todos los compañeros que trabajan en este espacio por su amistad durante este tiempo de aprendizaje.

A todas las personas que conocí en esta universidad, gracias por haber hecho más llevadero el camino. A esas personas incondicionales que llegaron en diferentes tiempos pero que con sus consejos me ayudaron a culminar este trabajo, gracias por todos los momentos compartidos.

Finalmente, pero no menos importante agradezco el financiamiento otorgado por el concurso de tesis disruptivas en minería PIENSA COBRE auspiciado por el Centro de Modelamiento Matemático (CMM) y la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO).

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I	1
1.Introducción.....	1
1.2. Contenido de la tesis.....	2
1.3. Objetivos de la investigación.....	3
1.3.1.Objetivo General.....	3
1.3.2.Objetivos específicos.....	3
1.4. Alcance de la investigación.....	4
1.5. Metodología de investigación.....	4
CAPÍTULO II	6
Revisión experimental del comportamiento de material granular fino en minería de caving	6
Resumen.....	6
2.1. Introducción.....	6
2.2. Equipo de laboratorio para el estudio de un flujo gravitacional no confinado.....	8
2.2.1. Definición del material.....	9
2.2.2. Metodología experimental.....	10
2.3. Análisis de similitud.....	10
2.4. Resultados experimentales.....	11
2.4.1. Geometría de la zona de extracción.....	12
2.4.2. Implicación en el diseño minero.....	13
2.5. Conclusiones.....	14
Bibliografía.....	15
CAPÍTULO III	16
Gravity Flow Characterization of Fine Granular Material in Presence of Moisture for Block Caving Mining.....	16
3.1. Introduction.....	16
3.2. Analysis of similitude for fine granular flow.....	17
3.2.1. Model media.....	17
3.2.1.1. Size distribution.....	17
3.2.1.2. Shear strength characterization.....	18
3.2.1.3. Analysis of forces.....	19
3.2.2. Geometry of the physical model.....	21
3.2.3. Boundary conditions.....	22
3.3 Experimental Methodology.....	23
3.4. Experimental results analysis.....	24
3.4.1. One drawpoint - Isolated draw.....	25
3.4.2. Two drawpoints – Interaction drawn.....	28
3.4.3. Interferences during the flow.....	29
3.5. Conclusions.....	31
Bibliography.....	33

Appendix A.....	35
Interparticle forces effect on the model media	35
CAPÍTULO IV.....	36
4.1 Dimensional Analysis	36
4.1.1 Mathematic model for isolated extraction - IEZ	38
4.1.2 Mathematic model for extraction from two drawpoints - EZ	41
4.2 Conclusions	42
Bibliography	43
CAPÍTULO V	36
5.1 Conclusiones.....	36
5.2 Trabajo Futuro	46
BIBLIOGRAFÍA	47

Índice de Tablas

Capítulo II

Tabla. 2.1: Resumen de los parámetros obtenidos en los experimentos	11
---	----

Capítulo III

Table. 3.1: Flow factor between prototype and physical model.....	23
Table. 3.2: Summary of data obtained during experimental	24
Table. 3.3: Ratio between drawpoint width and flow zone width, considering Laubscher data and experimental data.....	26
Table. 3.4: Summary of hang- up frequency obtained during experiments	30

Capítulo IV

Table. 4.1: Variables used for dimensional analysis	37
---	----

Índice de Ilustraciones

Capítulo I

Fig. 1.1: Metodología de investigación	5
--	---

Capítulo II

Fig. 2.1: Guía de diseño – Laubscher 1994	7
Fig. 2.2: Modelo físico no confinado – Escala 1:75.....	9
Fig. 2.3: Distribución granulométrica de la muestra a ensayar	9
Fig. 2.4: Geometría de IEZ en función de la humedad para distintas masas acumuladas extraídas. a) Diámetro b) Altura.....	12
Fig. 2.5: Corte longitudinal del elipsoide a distintas humedades con una masa de extracción acumulada de 21.4 kg. Las dimensiones se encuentran en cm.....	13
Fig. 2.6: Proyección de los diámetros de IEZ con humedades de 0, 2,4 y 6% en la malla de tiraje de Esmeralda. Las dimensiones se encuentran en metros.	14

Capítulo III

Fig. 3.1: Size distribution of fine cave rock at Esmeralda Mine	18
Fig. 3.2: Maximum shear strength for the media tested.....	18
Fig. 3.3: Unconfined compression for three samples at Diablo Regimiento mine. (Castro et al., (2017))	19
Fig. 3.4: Relation between gravity force (F_G) and capillary forces (F_C) as a function of fragment size, for four humidity values.	20
Fig. 3.5: Interparticle forces effect as a function of material fragment size.....	21
FC: Capillary forces; FG: Gravity force.....	21
Fig. 3.6: Experimental set-up – Scale 1:75 - Physic model, distribution of markers in ore column and drawbell dimensions	22
Fig. 3.7: Vertical load expected at the mine as a function of depth and draw-zone diameters	23
Fig. 3.8: Evolution of a "No Flow" condition - Cross-sectional view of the drawbell	24
Fig. 3.9: Evolution of the ellipse to different accumulated extraction mass with 4% moisture - Isolated draw - Longitudinal view to the drawbell	25
Fig. 3.10: Height of the extraction zone as a function of accumulated extraction mass with 4% moisture - Tests with draw from two drawpoints - Longitudinal view to the drawbell.....	25
Fig. 3.11: a) IEZ height and b) IEZ width as function of accumulated masses, for different humidities. Inside: Ellipsoid geometry (HIEZ and WIEZ) as a function of humidity.	27
Fig. 3.12: a) EZ height and b) EZ width as function of accumulated masses, for different humidities. Inside: Ellipsoid geometry (HEZ and WEZ) as a function of humidity.....	29
Fig. 3.13: Hang up frequency in one drawpoint at the Esmeralda Sector at El Teniente mine	31

Capítulo IV

Fig. 4.1: Data fit for Π as a function of the dimensionless group $\Psi = \Psi\Lambda_1, \Lambda_2$ Isolated case. The solid black line represents a polynomial function of degree 2.	40
Inside: Experimental Π as a function of Theoretical Π , where the solid black line indicates the identity. a) Width, b) Height.....	40
Fig. 4.2: Data fit for Π as a function of the dimensionless group $\Psi = \Psi\Lambda_1, \Lambda_2$ Alternate case. The solid black line represents a polynomial function of degree 2.	42
Inside: Experimental Π as a function of Theoretical Π , where the solid black line indicates the identity. a) Width, b) Height.....	42

CAPÍTULO I

1. Introducción

La dinámica de la minería de block/panel caving se basa en la acción de la gravedad para el transporte del mineral hundido (Laubscher, 1994). Por ello, el flujo gravitacional es uno de los factores que tienen gran influencia en la toma de decisiones que definen tanto el diseño como la planificación minera (Chitombo, 2010). Por ello su comportamiento se encuentra relacionado estrechamente con la recuperación de mineral, repercutiendo finalmente en el valor final del proyecto.

En busca de abordar los desafíos de estudiar el complejo comportamiento del flujo gravitacional y su impacto en el diseño, varias investigaciones se han realizado mediante el uso de modelos numéricos, físicos y ensayos a escala mina. Así, durante los 60' Mc.Cormick (1968) estableció que la zona de movimiento aislado (IMZ) seguía la forma de un cilindro que alcanzada un valor de diámetro constante con la extracción. Además concluyó que el efecto del tamaño de partícula y ancho del punto de extracción era mínimo en el ancho máximo de IMZ. En 1984 Peters mediante experimentos evaluó la zona de extracción aislada (IEZ) utilizando grava como material equivalente al mineral. Sus resultados fueron que el tamaño de partícula no afecta la geometría de la zona de flujo, mientras que el ancho del punto de extracción sí tenía influencia. Por otro lado, mediante el uso de modelos físicos 3D y usando grava como medio, Power (2004) encontró que el tamaño de partícula tenía gran efecto en la geometría de IEZ. Adicionalmente, Castro (2007) determinó que la geometría en IMZ e IEZ está en función de la masa de extracción y de la altura de la columna de mineral. A forma de resumen, estas investigaciones han tenido como principal objetivo entender mediante las variables descritas el mecanismo envuelto en el flujo. Sin embargo algunas conclusiones no coinciden y por lo tanto no existe la respuesta definitiva respecto a las dimensiones de las zonas de flujo, debido a la complejidad de incluir todas las variables que afectan el flujo gravitacional.

Por otro lado, en base al diseño de minas de caving, existen guías y directrices que han sido configuradas hace algunos años atrás y hasta el día de hoy, son ampliamente usadas para definir el espaciamiento entre puntos de extracción. La guía empírica diseñada por Laubscher (1994, 2000) considera información geotécnica, ancho del punto de extracción y fragmentación esperada. De ella, por ejemplo se desprende que para material fino en donde el 100% se encuentre bajo tamaños de 0.3 [m], el diámetro del elipsoide será de 6 – 6.5 [m]. Sin embargo, los métodos de block / panel caving han cambiado, y en la actualidad son aplicados a distintas resistencias de macizo rocoso. La resistencia condiciona la fragmentación del material a fluir, así la extracción de material fino se producirá a medida que el porcentaje de extracción de la columna aumenta.

En el mismo sentido, Flores y Karzulovic (2002) exponen que en función a la calidad del macizo rocoso, el promedio entre la distancia de los puntos de extracción ha ido incrementando. Antes de 1970, el método se aplicaba exclusivamente en rocas de baja resistencia que usaban parrillas en donde la distancia de los puntos de extracción no superaba

de 8 [m]. Desde los 70' hasta los 90', esta aumentó a 12 [m], para luego incrementarse hasta 16 [m] como es de los sectores de producción de la mina El Teniente. Estos amplios diseños podrían presentar complicaciones, como reducir la recuperación y aumentar la dilución (As and Hout, 2008). Por consiguiente, a pesar de la importancia en todas las investigaciones mencionadas que han intentado evaluar las características del flujo y su efecto en la recuperación y diseño de minas, todavía quedan algunos cuestionamientos por resolver (Whiteman, 2010).

En busca de abordar otras variables, Olivares et al., (2015) estudió la influencia de material fino mediante el modelamiento físico de flujo gravitacional confinado en condiciones de humedad. Los experimentos usaron una distribución granulométrica diferente a las mencionadas, esta consistió en una mezcla de grava y distintos porcentajes de material fino. Los resultados muestran índices de frecuencia de colgaduras que se asocian al contenido de material fino, humedad y cargas aplicadas. La conclusión final define que la variable con mayor efecto sobre el incremento de colgaduras es el porcentaje de finos añadido.

En contraste a lo descrito, esta investigación tiene por objetivo determinar la influencia de la humedad en el flujo gravitacional de material granular fino y la frecuencia de colgaduras. Para este propósito se realizó un análisis de similitud con el objetivo de definir las condiciones de borde en la experimentación. El set experimental se basó en un modelo físico no confinado escala 1:75, así se simulan dos casos de extracción: aislada y alternada. La hipótesis con la que parte el presente trabajo es que la geometría de las zonas de flujo cambia si se añade humedad al medio y consecuentemente los índices de frecuencia de colgaduras se incrementarán.

Finalmente, mediante el análisis dimensional con la aplicación del teorema de Buckingham y el ajuste de los datos experimentales se presentan dos modelos matemáticos para predecir la geometría de los elipsoides generados por material granular fino bajo distinto porcentaje de humedad.

1.2. Contenido de la tesis

Esta Tesis está basada en papers y se organiza en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Corresponde a la introducción mediante un resumen de las principales conclusiones a las que han llegado varios estudios en relación a flujo gravitacional. Además, se detallan los objetivos planteados y la metodología de investigación.

Capítulo 2: Contiene el primer artículo denominado “Revisión experimental del comportamiento de material granular fino en minería de caving”. Sánchez, V., Palma, S., y Castro, R. en UMining 2016. Santiago, Chile, pp 90 – 98. El documento muestra la metodología experimental aplicada, resultados parciales obtenidos mediante la extracción aislada de material fino bajo distintos porcentajes de humedad y su implicancia en el diseño de mallas de extracción usadas en la actualidad.

Capítulo 3: Presenta un segundo artículo el que muestra los resultados totales del plan experimental complementando la información del paper anterior. Adicionalmente se detalla el análisis de similitud y las condiciones de borde del set up experimental. Los resultados muestran las tendencias del incremento de las dimensiones que definen la geometría de la zona de flujo para una extracción desde uno y dos puntos; además se cuantifican las interferencias ocurridas durante el flujo en términos de índices de frecuencia de colgaduras y son validados con datos reales de mina Esmeralda. El título del artículo es “Gravity flow characterization of fine granular in presence of moisture for Block Caving Mining” y está en preparación para International Journal Rock Mechanics and Rock Engineering.

Capítulo 4: Muestra dos modelos matemáticos predictivos de la geometría de los elipsoides, definida por su altura y ancho, considerando diferente contenido de humedad en el medio granular. Estas ecuaciones se obtuvieron a partir del análisis dimensional de las variables involucradas en el modelamiento físico del flujo y el ajuste de los datos experimentales.

Capítulo 5: Finalmente, se describen las principales conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos.

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo General

Caracterizar el flujo de mineral granular fino en condiciones de humedad a través de ensayos controlados de laboratorio para el diseño de minas explotadas por block/panel caving.

1.3.2. Objetivos específicos

- Conocer y analizar las investigaciones realizadas mediante modelamiento físico enfocadas en el estudio de flujo gravitacional relacionadas a material fino granular y condiciones de humedad.
- Realizar un análisis de similitud para asegurar la representatividad de los resultados, definiendo condiciones de borde y limitaciones de la investigación.
- Determinar la preponderancia de las fuerzas de gravedad versus las fuerzas interparticulares como función de la humedad y tamaño promedio de partícula del material.
- Diseñar y construir el set – experimental sin confinamiento para realizar el conjunto de ensayos planificados.
- Definir una metodología experimental para realizar los ensayos planificados.
- Obtener las dimensiones que definen la geometría de los elipsoides generados con distintos contenidos de humedad y masa de extracción acumulada para los dos casos de extracción.
- Estudiar el efecto de la humedad y material fino sobre la frecuencia de colgaduras en los dos casos de extracción: aislada y alternada.
- Escalar y proyectar los resultados obtenidos sobre mallas de extracción usadas en la actualidad por minas block/panel caving y determinar su efecto.

- Analizar y proponer dos modelos matemáticos entre las variables involucradas en modelamiento físico del flujo gravitacional que permitan predecir la geometría de las zonas de flujo para los casos de extracción experimentados.

1.4. Alcance de la investigación

El alcance de esta investigación fue el siguiente:

- Los experimentos se realizaron en un modelo físico de flujo gravitacional no confinado a escala reducida (1:75).
- La extracción del material fue a través de uno y dos puntos, según el experimento.
- El material se extrajo hasta alcanzar una masa de extracción acumulada de 22 [kg] por cada punto, consiguiéndolo con 500 ciclos aproximadamente.
- Se definió un plan experimental con una combinación de 15 experimentos: 5 bajo un punto de extracción, 5 con dos puntos de extracción y 5 réplicas para definir el error experimental asociado a la investigación.
- Los resultados obtenidos fueron los siguientes:
Geometría de las zonas de flujo para distintos porcentajes de humedad y extracción mediante uno y dos puntos.
Índice de frecuencia de colgaduras en función al contenido de humedad en el material.
Modelos matemáticos predictivos de la altura y ancho de las zonas de flujo.

1.5. Metodología de investigación

El propósito de la metodología de investigación es plantear pasos para lograr los objetivos, general y específicos. La Fig. 1.1 muestra las etapas propuestas.

- *Revisión Bibliográfica:*
Estado del arte en referencia al flujo gravitacional en material fino y humedad.
Revisión bibliográfica de las investigaciones realizadas mediante modelamiento físico y sus principales conclusiones.
- *Definición del problema:*
Determinar el problema que conlleva el flujo de material fino bajo condiciones de humedad en las actuales mallas de extracción y cómo afecta a la fluidez del mineral.
- *Análisis de similitud:*
Estudio de las similitudes a cumplir.
Identificación de fuerzas preponderantes.
Efecto de las fuerzas interparticulares en el material granular fino.
Relación entre las fuerzas de gravedad y capilares.
Análisis de las fuerzas de Van der Waals.
Limitaciones y simplificaciones de la investigación.
- *Análisis dimensional:*
Selección de variables relevantes para el modelamiento físico del flujo gravitacional.
- *Construcción del modelo físico y plan experimental:*
Definición de la escala del modelo físico.
Diseño y construcción del set experimental.
Elaboración de la metodología experimental.
- *Procedimiento experimental:*

Caracterización del material a usar como medio.

Realización de experimentos

- *Análisis de resultados:*

Definición de geometrías para los dos casos de extracción estudiados.

Determinación de la frecuencia de colgaduras para los dos casos de extracción estudiados.

Aplicación del teorema de Buckingham (Teorema de Pi) y ajuste de los datos experimentales para la determinación de dos modelos matemáticos predictivos.

- *Conclusiones finales:*

Discusión de los principales hallazgos y su aplicabilidad en minería de caving.

Recomendaciones para trabajos futuros.

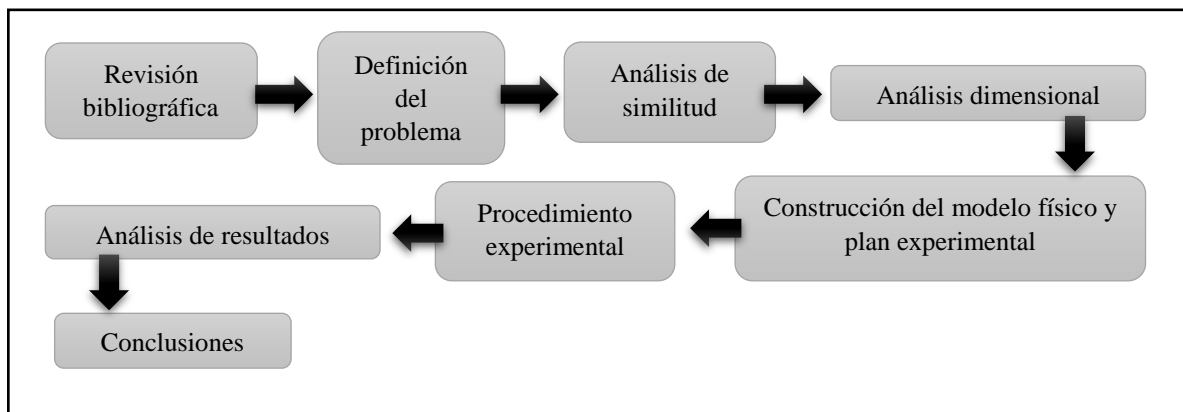


Fig. 1.1: Metodología de investigación

CAPÍTULO II

Revisión experimental del comportamiento de material granular fino en minería de caving

Abstract

Within caving mining, studying the behavior of gravitational flow is important for design purposes, ore recovery, and consequently, add value to mining activity. The aim of this project is to determine the height and width of the isolated extraction zone (IEZ), using an unconfined physical model at 1:75 scale under humidity conditions. The experimental results show that IEZ diameter increases according to moisture and accumulated mass extracted. The diameter tendency with a 6% humidity content and an accumulated extraction mass of 13 kg, becomes almost constant indicating a stationary behavior. On the other hand, the evolution of height remains invariant for humidities under 6%, while for values between 6% and 8% the height increases until the formation of upper arches where material fluidity reaches a state of "no flow". Finally, the first analysis of interparticular forces shows gravity force preponderance on 84% the material.

Resumen

Dentro de la minería de caving, estudiar el comportamiento del flujo gravitacional es importante para fines de diseño, recuperación de mineral y consecuentemente agregar valor a la actividad minera. El objetivo de esta investigación experimental es determinar la altura y ancho de la zona de extracción aislada (IEZ) en un modelo físico no confinado a escala 1:75. Los resultados experimentales muestran que el diámetro de IEZ aumenta de acuerdo a la humedad y la masa acumulada extraída. La tendencia del diámetro con un contenido de 6% de humedad y una masa de extracción acumulada de 13 kg, llega a ser casi constante mostrando un comportamiento estacionario. Por otro lado, la evolución de la altura se mantiene constante para humedades bajo 6%, mientras que para valores entre 6% y 8% la altura aumenta hasta la formación de arcos superiores en donde la fluidez del material llega a un estado de "no flujo". Finalmente, el primer análisis de las fuerzas interparticulares muestra la preponderancia de la fuerza de gravedad sobre el 84% del material.

2.1. Introducción

Entre los métodos de explotación de cuerpos mineralizados masivos el hundimiento ofrece una alta extracción de mineral a un bajo costo operativo en comparación a los restantes (Heslop, 2000). La fragmentación del mineral es un factor importante para determinar una tasa de extracción, en donde el material fino permite mayores tasas de extracción (Chitombo, 2013). Este proceso de reducción de tamaño envuelve dos tipos de fragmentación: primaria y secundaria. La fragmentación primaria se genera por los esfuerzos inducidos durante la

propagación del caving, que son propios del macizo rocoso y dependen de sus propiedades. La fragmentación secundaria sucede en el tiempo en que la roca hundida está en la columna de extracción y es la que produce gran cantidad de material fino por abrasión de los bordes de los bloques (Brown, 2007). El efecto de estos procesos depende de las características geomecánicas del macizo rocoso, en donde el cambio de granulometría del material podría generar una distribución de tamaño muy amplia durante la extracción apareciendo material fino en distintas cantidades.

Por otra parte el comportamiento del material fino bajo un contenido de humedad (material parcialmente saturado), podría impedir la fluidez del material (Kvapil, 1965) y consecuentemente alterará la geometría de IEZ.

Hasta la fecha, para mejorar el conocimiento del flujo gravitacional, se ha utilizado herramientas como modelamiento físico, numérico y pruebas a escala mina; para el caso de los modelos físicos a escala de laboratorio, los experimentos han utilizado como medio arena, grava, o material heterogéneo con diferente porcentaje de fino y grueso. De esta forma, estas investigaciones han tenido como principal objetivo entender el mecanismo envuelto en el flujo y su impacto sobre el diseño.

Laubscher (1994), para fines de diseño construyó un ábaco mediante una metodología empírica para determinar el ancho máximo de tiraje (ver Fig. 2.1). Las variables que involucra son: información geotécnica (calidad del macizo rocoso y frecuencia de fracturas por metro), ancho del punto de extracción y fragmentación esperada; así para material fino (100% < 0.3 [m]) el diámetro de la zona de flujo se encontrará en un rango de 6 – 6.5 [m]. Esta teoría ha sido ampliamente usada, sin embargo las condiciones del macizo rocoso pueden involucrar otras variables como la filtración de agua superficial y/o subterránea que cambia las características del material y con ello el comportamiento del flujo.

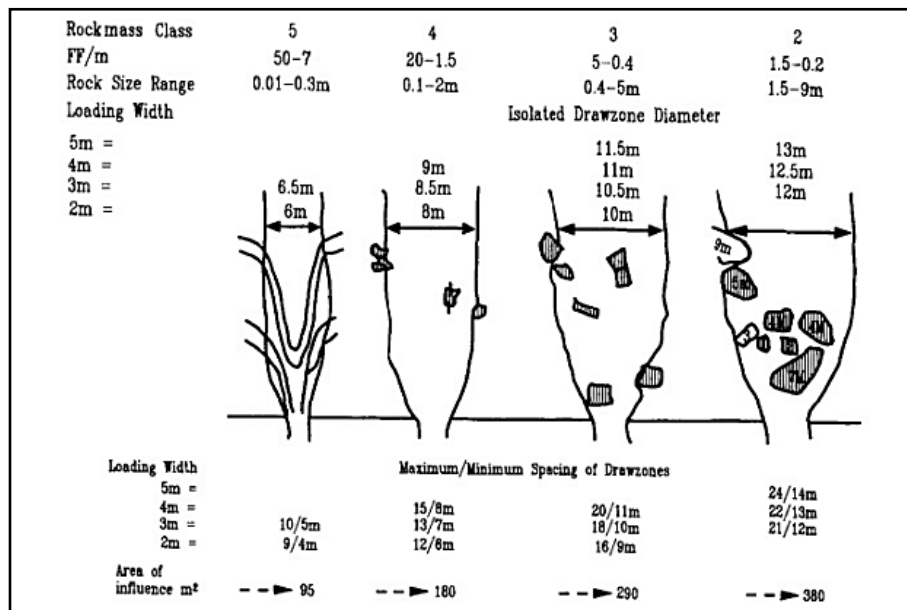


Fig. 2.1: Guía de diseño – Laubscher 1994

Por lo descrito, se ve necesario el estudio experimental de la geometría del flujo gravitacional en material granular fino no confinado bajo diferentes condiciones de humedad usando un modelo físico escala 1:75, y en base a los resultados obtenidos, estos datos serán una herramienta para mejorar la recuperación de mineral a través de modificaciones en las mallas de extracción o parámetros de diseño.

2.2. Equipo de laboratorio para el estudio de un flujo gravitacional no confinado

La escala de laboratorio seleccionada es de 1:75 y su justificación se debe al tipo de material que se ensayará por lo que se quiere mantener que la fuerza de gravedad gobierne el flujo y no otras fuerzas como las interparticulares. Además al tratarse de material fino el cambio de su geometría durante la experimentación puede ser claramente apreciable a una escala reducida mediante la metodología a utilizar.

Para validar la selección de la escala existe evidencia que resultados factibles han sido obtenidos usando un factor de escala 1:100 (Castro et al., 2007) y 1:200 (Castro and Pineda, 2012; Irribarra, 2014). Con esto la variedad de escalas a utilizarse puede ser muy amplia y está en función a los objetivos perseguidos por cada investigación.

El equipo de laboratorio en el que se llevó a cabo los experimentos consiste en un modelo de acrílico con dimensiones de 66.7 [cm], 46.4 [cm] y 26.6 [cm] que representan la altura, ancho y profundidad respectivamente (ver Fig. 2.2). Su altura tiene el objetivo de emular el comportamiento de una columna de mineral fragmentado de 50 [m]. Además, las dimensiones de la malla de extracción fueron determinadas previo a un benchmark del diseño de minas actuales. Así, hemos representado una amplia malla de extracción de 34 x 25 [m] (distancia entre calles y entre zanjas, respectivamente), siendo un poco más grande a la usada en la mina Diablo Regimiento (34 x 20 [m]) (Castro et al., 2012).

La geometría de la batea simula la que usará en la operación de Chuquicamata Subterránea (Codelco, 2011), batea de baja altura (7 [m]) utilizada en hundimiento convencional y para el sistema de extracción se escaló un equipo LHD de 14 [yd³] accionado eléctricamente que se desplazar en una zanja de 20.25 [m²].

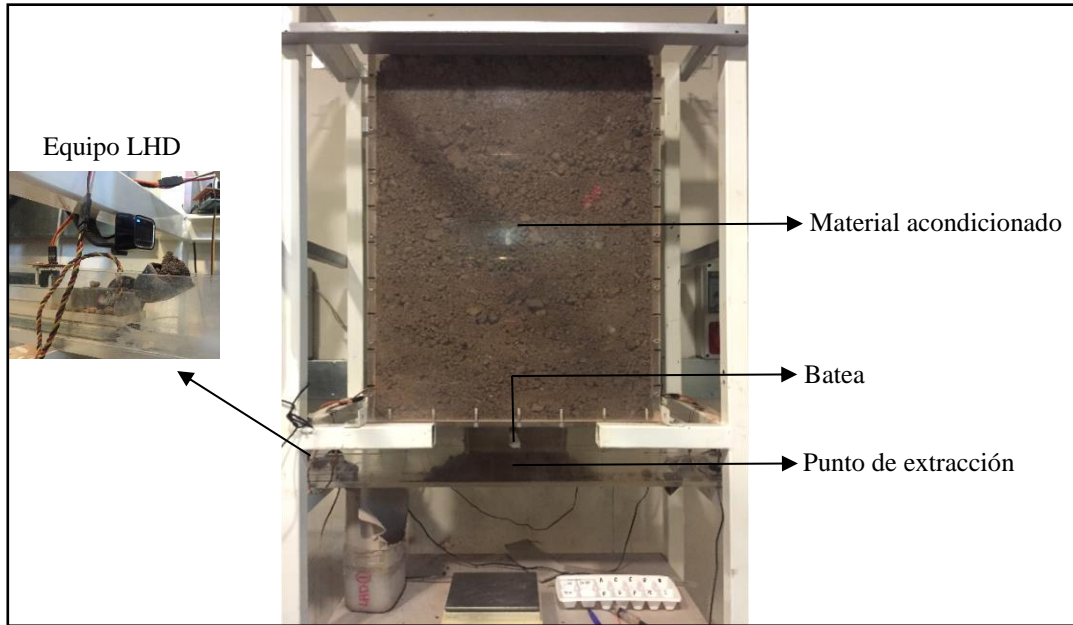


Fig. 2.2: Modelo físico no confinado – Escala 1:75

2.2.1. Definición del material

El material usado como medio en el trabajo experimental fue recolectado en varios puntos de extracción de la mina Esmeralda (El Teniente – CODELCO). La granulometría presenta una distribución amplia, con un índice de uniformidad de 43.33 y está definido como un material bien graduado. Su distribución de tamaño de partícula tiene un d_{50} de 3.1 [mm] con un tamaño máximo de 50 [mm].

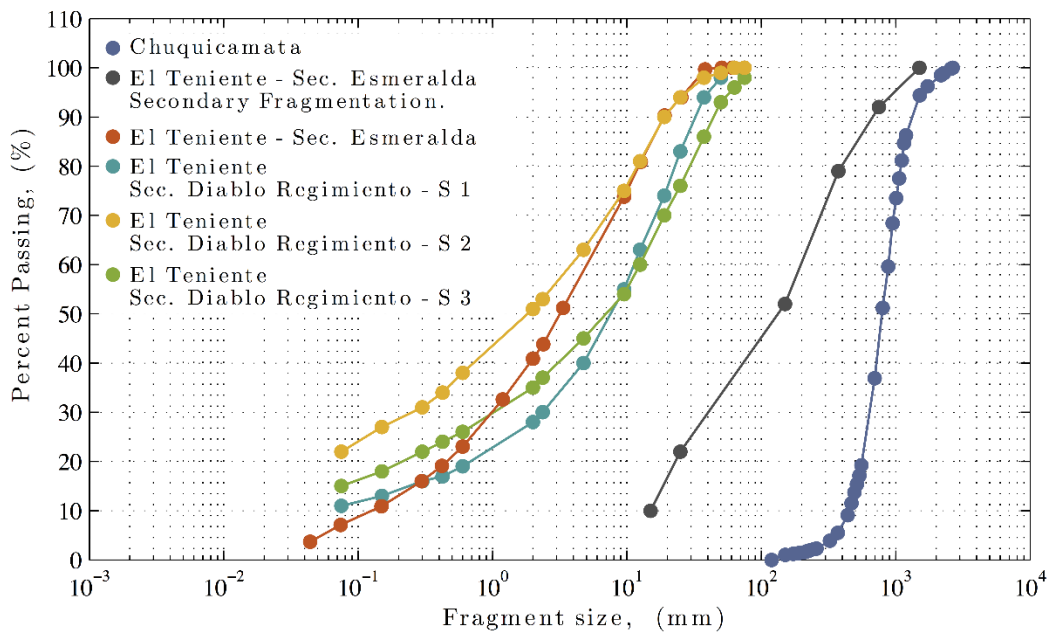


Fig. 2.3: Distribución granulométrica de la muestra a ensayar

La Fig. 2.3 presenta varias distribuciones de tamaños para identificar la diferencia entre la distribución de material fino y grueso. Así, la codificación “S” corresponde a muestras de material fino de la mina Diablo Regimiento y mediante estas líneas hemos podido establecer una banda en la que se encuentra el material fino tipo barro, de esta forma el d_{80} se encuentre entre los valores de 12 – 30 [mm]. Adicionalmente se muestra la distribución granulométrica esperada por el proyecto mina Chuquicamata Subterránea (Olivares et al., 2014) y la granulometría de material secundario observada en puntos de extracción del sector productivo de Esmeralda (Garcés et al., 2015).

2.2.2. Metodología experimental

El procedimiento realizado a lo largo de los experimentos, se basa en anteriores trabajos (Castro et al., 2007; Castro and Pineda, 2012). Por otro lado, el acondicionamiento del material para alcanzar las humedades requeridas se lo hace en una relación en peso, entre masa líquida y sólida.

Se instalaron 768 marcadores codificados y distribuidos entre la columna de mineral y la batea con una ubicación espacial individual, cabe mencionar que el tamaño de estos corresponde al d_{50} del material para evitar alteraciones en el flujo. Los valores de las coordenadas X, Y y Z, posteriormente son utilizados para la interpolación y consecuentemente obtener la geometría del elipsoide.

En cada ciclo el material extraído es receptado en un recipiente y pesado en una balanza digital. En el caso de existir marcadores estos se recuperan, se anota su código e ingresan como parte de la masa de extracción acumulada.

Cuando inicia la subsidencia en el modelo, este se rellena con material ya extraído para lograr que el mineral dentro de la batea se mantenga bajo una carga constante. Además, para calcular la carga vertical producida sobre el material dentro de la batea, nosotros hemos usado la ecuación de Janssen (Eq. 2.1) (Nedderman, 1992), donde γ es la densidad del material $2.08 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, R_h radio hidráulico (área/perímetro), μ_w es el coeficiente de fricción de las paredes del modelo que tiene un valor de 0.31 para el acrílico, K es la constante de Janssen y se toma un valor correspondiente a 0.5, finalmente z representa la altura del modelo (0.66[m]). Los resultados muestran que la carga se encuentra en un rango entre 1.44 – 1.67 [kPa].

$$\sigma_{zz} = \frac{\gamma R_h}{4\mu_w K} \left(1 - e^{-\frac{4\mu_w K}{R_h} z} \right) \quad (2.1)$$

2.3. Análisis de similitud

El concepto de similitud considera dos sistemas, uno de los cuales se lo denomina prototipo y el otro modelo. Lo que se busca con este análisis es garantizar que los resultados de un modelo físico puedan ser escalados y representativos a una escala real. Teóricamente se conoce que para la existencia de similitud entre dos sistemas, se requiere que existan tres similitudes distintas, geométrica, cinemática y dinámica. Un modelo físico de una mina de caving que satisfaga todas las formas de similitud para muchos autores es difícil de construir

(Peters, 1984). Así, la similitud dinámica en un modelo es complicada de alcanzarla, debido a los efectos de escala que produce el cambio de tamaño en comparación con el prototipo. Para esto una aproximación es únicamente considerar las fuerzas preponderantes en el fenómeno de estudio (Castro et al., 2007).

El análisis realizado para el escalamiento del material fino se debe a que el flujo del mineral es influenciado por varios factores. Como ya se mencionó, el material ensayado corresponde a mineral fino (tipo barro) con un tamaño máximo de 50 [mm] y partículas menores a 0.074 [mm]. Escalando estos tamaños a la escala del modelo físico, corresponden a 0.67 [mm] y 9.86×10^{-4} [mm], material extremadamente fino en el que las fuerzas preponderantes que rigen al flujo gravitacional como la gravedad y fricción (Fuentes, 1996) tendrían un efecto menor al 100%.

Las fuerzas interparticulares como las de Van der Waals son microscópicas pero como aporte global al material experimentado pueden ser significativas y su acción podría causar un comportamiento del flujo alejado a la realidad, obteniendo un número sobreestimado de condiciones de “No Flujo”. Es por esto que las reglas de escalamiento no aplican a todos los flujos granulares y deben ser eventualmente modificadas, dependiendo de las fuerzas dominantes del problema en particular (Castro et al., 2007). Seville (2002), determina que: partículas esféricas con un diámetro de 100 [um] pueden mostrar fuerzas de Van der Waals igual al peso individual de cada partícula. Tomando en consideración lo descrito, las fuerzas de gravedad serán preponderantes en las partículas con un tamaño superior a 0.1 [mm]. Para el caso del material utilizado en esta investigación el 16% corresponde a partículas con tamaños inferiores a 0.149 [mm] (malla 100), por lo que consecuentemente las fuerzas de gravedad son preponderantes en el 84% del material.

2.4. Resultados experimentales

Para la determinación de IEZ se realizaron un total de cinco experimentos con distintos porcentajes de humedad, desde 0 a 8%. Este porcentaje de masa fue calculado como una relación de peso entre P_l (peso de líquido) y P_s (peso de material seco).

Los parámetros obtenidos en cada experimento se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla. 2.1: Resumen de los parámetros obtenidos en los experimentos

Parámetros	Datos				
	0	2	4	6	8
Humedad (%)	0	2	4	6	8
Masa del modelo ($P_l + P_s$) [kg]	233	205	215	196	178
Masa de extracción [kg]	21.47	22.04	21.41	22.27	5.09
% de extracción	9.21	10.75	9.96	11.36	2.34
Masa de extracción promedio [kg]	0.036	0.035	0.035	0.032	0.032
# extracciones	600	626	740	687	150
# de marcadores	82	96	85	99	42
# colgaduras	54	53	59	66	24

2.4.1. Geometría de la zona de extracción

Con el fin de comparar la forma de los elipsoides se analiza su geometría para distinta masa de extracción acumulada y así definir si existe una tendencia en la geometría en función de la humedad. El ensayo acondicionado con 8% alcanzó una altura de 13.6 [cm] (marcador B) impidiendo que el flujo continúe y el ensayo terminó. Para el caso del experimento en condiciones secas, existió libre movilidad del material y originó un diámetro menor en comparación a los ensayos húmedos.

En la Fig. 2.4a el diámetro que se indica para cada caso se ha determinado en la altura media de la elipse resultante de cada experimento. Como se visualiza, la variación del diámetro en función a la humedad es ascendente. Para la humedad de 6% se observa un comportamiento casi constante después de una masa de extracción acumulada de 13 [kg]. El incremento del diámetro para las humedades restantes no alcanza una meseta, sin embargo no se descarta que para una columna de mineral con mayor altura, el ancho de la elipse podría estabilizarse con mayor masa de extracción acumulada.

Para la figura 2.4b, el comportamiento en la tendencia de la altura es diferente. La humedad afecta directamente en su incremento. Para el ensayo de 6% la altura no superó el nivel D de los marcadores, alcanzando valores máximos de 36.1 [cm], correspondiente a 27 [m] a escala mina. La Fig. 2.5 muestra los elipsoides resultantes con una masa de extracción acumulada de 21.4 [kg] y la afección para las distintas humedades ensayadas.

Adicionalmente, el cambio en la forma de IEZ mediante cortes longitudinales a la batea para los elipsoides resultantes a diferentes porcentajes de humedad se muestra en la Fig. 2.5. Se verifica que para humedades de 6% el incremento de la altura se ve afectado, mientras que en los otros ensayos ($H < 6\%$) por efecto de los marcadores instalados hasta una altura de 69.6 [cm] la altura máxima alcanzada no varía significativamente.

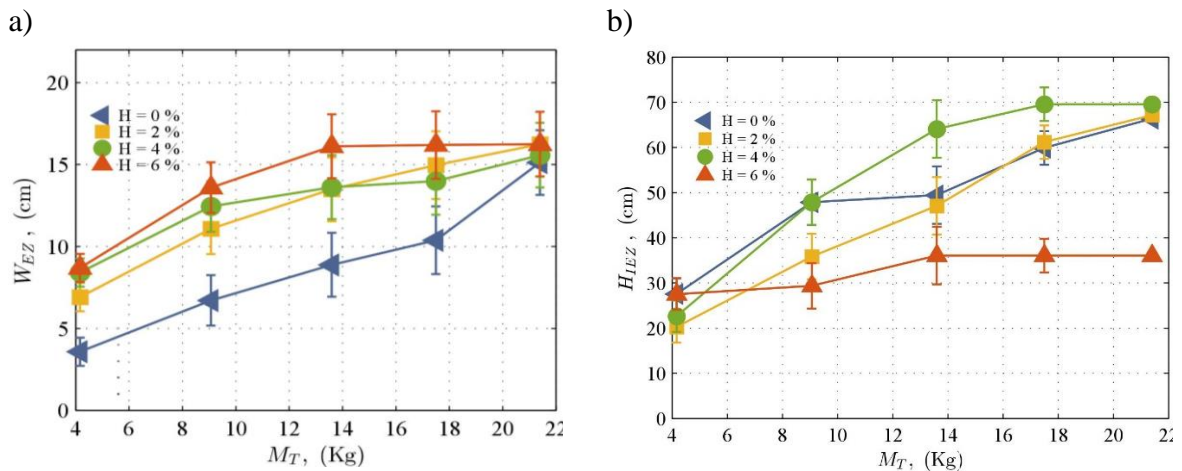


Fig. 2.4: Geometría de IEZ en función de la humedad para distintas masas acumuladas extraídas. a) Diámetro b) Altura

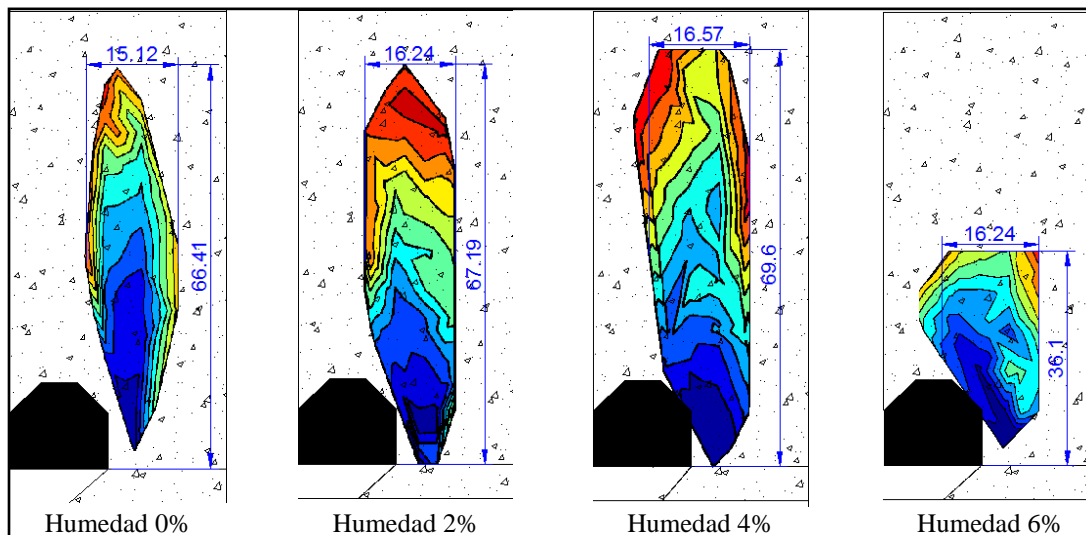


Fig. 2.5: Corte longitudinal del elipsoide a distintas humedades con una masa de extracción acumulada de 21.4 kg. Las dimensiones se encuentran en cm.

2.4.2. Implicación en el diseño minero

Con el transcurso del tiempo y la evolución de la minería de caving, el promedio de la distancia entre puntos de extracción ha ido incrementando. Flores and Karzulovic (2002) exponen que el promedio de espaciamiento entre puntos de extracción había incrementado desde 8 [m] para minas que operaron antes de 1970 hasta 12 [m] durante los 70' a 90', posterior a estas décadas han aumentado hasta 16 [m].

Para comprobar si los diámetros obtenidos en los experimentos cumplen con la teoría de interacción (Laubscher, 1994, 2000) los resultados obtenidos fueron escalados y proyectados sobre la malla de extracción de mina Esmeralda, la que cuenta con un layout de 34 x17 [m]. La Fig. 2.6, muestra traslape dentro de la batea, sin embargo entre bateas queda material aislado, disminuyendo la recuperación de mineral y consecuentemente la rentabilidad del proyecto. Adicionalmente, el área de la zona de traslape es mayor a medida que aumenta la humedad. Sin embargo, al analizar la pendiente de la tendencia para 0% de humedad el área podría aumentar debido a que con una mayor masa acumulada de extracción en el experimento el diámetro tiende a aumentar.

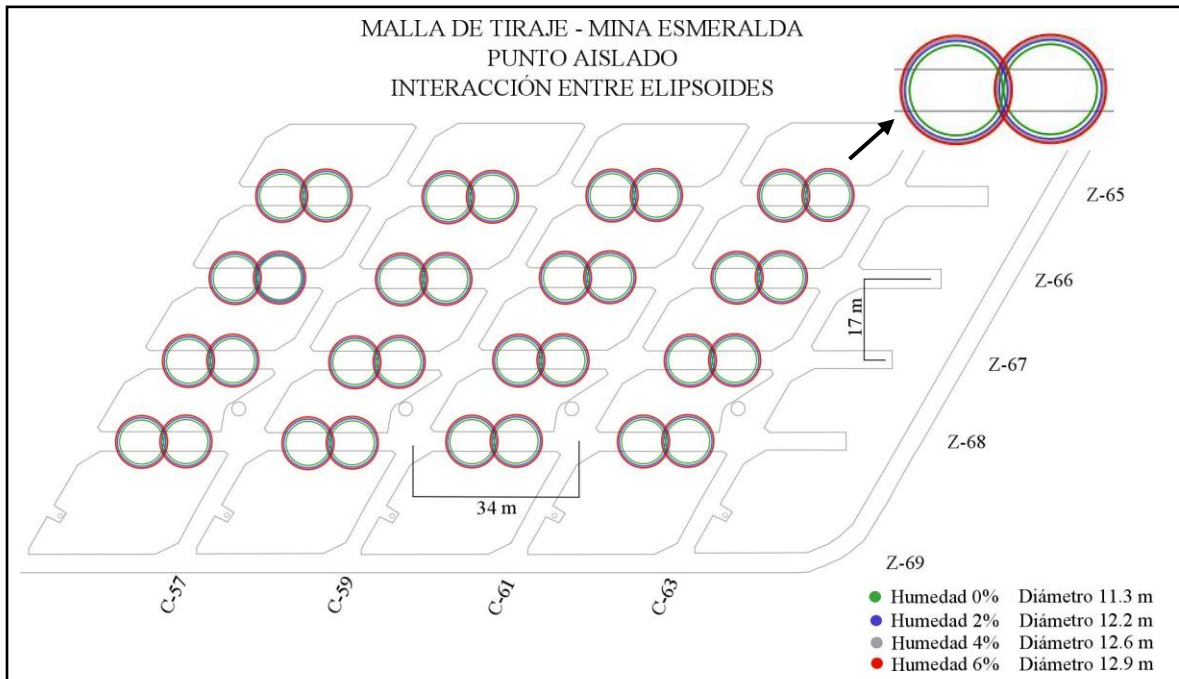


Fig. 2.6: Proyección de los diámetros de IEZ con humedades de 0, 2,4 y 6% en la malla de tiraje de Esmeralda. Las dimensiones se encuentran en metros.

2.5. Conclusiones

La variación de la altura en la zona de flujo para humedades inferiores al 6% tiene pequeñas oscilaciones mostrando una tendencia casi constante, pero para los casos en donde la humedad es mayor, las fuerzas interparticulares tienen un mayor efecto e impiden la movilidad del material. Otra conclusión importante es que la evolución del diámetro de la zona de flujo es inversa a la altura, de esta forma la humedad es un factor importante para el incremento de la altura, disminuyendo la excentricidad del elipsoide.

Mediante el escalamiento y proyección de los diámetros, se determina que las mallas de extracción usadas actualmente son muy amplias para los elipsoides generados por material fino, existiendo únicamente interacción dentro de la batea y quedando material aislado entre estas.

Se puede corroborar que el flujo del mineral con una granulometría fina disminuye considerablemente con la humedad, llegando a existir ensayos donde la fluidez era inexistente debido a que aparecen fuerzas interparticulares como las capilares.

Bibliografía

- Brown, E T, 2007. Block caving geomechanics, 2nd edn. Julius Kruttschnitt Minerals Research Centre, The University of Queensland: Brisbane.
- Castro, R. 2007. Study of the mechanisms of gravity flow for block caving. PhD Thesis, the University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Chileshe, P. R. K., & Phiri, S. N. (1994). New production from " exhausted" block-caving areas at Nchanga Mine. *Mining*. 1, 237-245.
- Chitombo, G. P. 2013. Cave mining: 16 years after Laubscher's 1994 paper' Cave mining–state of the art'. *Mining Technology*.
- Craig, R. F., 2004. *Soil Mechanics*, 7th, Spon Press: New York.
- Fuentes, R. 1996. “Apéndice 1: Consideraciones sobre Similitud y Escalamiento”, CMM, Apéndices informe final PB5: “Similitud Física del Flujo gravitacional”, Santiago, Chile
- Garcés, D., 2015. Estudio de flujo gravitacional de material hundido por medio de trazadores inteligentes. Memoria Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Chile.
- Kvapil, R. 1965. Gravity flow of Granular Materials in Hoppers and Bins”. Part I and II. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.* Vol 2, 35-41.
- Iribarra, S. 2014. Estudio experimental de migración de finos en minería de caving. Memoria de Ingeniería Civil de Minas. Universidad de Chile, Chile.
- Laubscher, D. 1994. “Cave Mining – the state of the art”. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp.279-293.
- Olivares, D. 2015. ‘Influence of fine material, humidity and vertical loads on the flow ability of caved rock’, American Rock Mechanics Association conference. San Francisco.
- Peters, D.C., 1984. "Physical modeling of the draw behavior of broken rock in caving", *Quarterly of the Colorado School of Mines*, vol 79 no 1.
- Pineda, M. 2012. Study of the gravity flow mechanisms at Goldex by means of a physical model. Tesis de Magíster en minería. Universidad de Chile, Chile.
- Pöschel, T., Salueña, C., & Schwager, T., 2002. Scaling properties of granular materials, *Physical Review E - Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics*, 64:011308.
- Seville, J. P. K., Willett, C. D., & Knight, P. C. (2000). Interparticle forces in fluidisation: a review. *Powder Technology*, 113(3), 261-268.

CAPÍTULO III

Gravity Flow Characterization of Fine Granular Material in Presence of Moisture for Block Caving Mining

Abstract

Block and Panel are based on the action of gravity for ore breakage and transport, so the material reaches the drawpoint through the gravity flow. The study of gravitational flow is of vital importance because it is one of the factors that defines the design, planning, ore recovery and consequently the profitability of the mining project. The study aim is to investigate the influence of humidity and fine material on ellipsoid geometry and hang – ups frequency. Ten laboratory experiments were carried out on a physical model (scale 1:75). The results indicate that the dimensions of the ellipsoid depend on three variables: moisture, particle size, and accumulated extraction mass. For the case of the wet tests, the increase in diameter reaches a maximum value and becomes almost constant, while the behavior for the dry material is upward. However, with a moisture content of more than 6%, "non-flow" conditions occur due to the formation of a cohesive arch. Finally, the hang – ups frequency obtained through trials, show values very near to real values at Esmeralda Mine.

3.1. Introduction

Block caving is a mining method offers high extraction rates and the low operational costs (Heslop, 2000; Brown, 2007). The caving process transforms the initially in situ solid rock into a broken rock, which flows by the action of gravity towards the drawpoints. The material flow could present different behaviors that are related to the type of ore broken. Thus, the gravity flow characteristics have great influence on engineering design including drawpoint spacing (Chitombo, 2010). Likely, the rock fragmentation within the ore column is the most important parameter governing the performance of a caving operation. Rock fragmentation reduces as the column extraction percentage increases due to flow, process known as secondary breakage.

Laubscher (1994, 2000) have proposed an empirical guideline to define the drawpoint spacing. The empirical design guide considered Rock Mass Rating (RMR) or the fractures frequency, the width of the drawpoint and expected fragmentation. In the case of coarse fragmented rock, with a granulometry between 2 – 9 [m], Laubscher estimates a flow diameter range of 8 – 13 [m], while for fine cave rock (100% low to 0.3 (m)) it will reach 6 – 6.5 [m]. Thus, the draw zone is 2.17 to 3 times the drawpoints width. Recent studies in Sublevel Caving mines that involves the flow of blasted rock, have indicated the width of extraction zone is 1.4 times the drawpoint width (Hustrulid and Kvapil, 2008). Therefore the

width of the flow zone for fine fragmented rock is in the range from 1.4 to 3 times the drawpoint width.

In order to improve the gravity flow behavior knowledge and verify data or theories, many research have been performed through physical, numerical models, and full-scale trials. In terms of physical modeling in the last years much of the efforts have concentrated on understanding the flow of coarse cave rock using gravel as the model media (Power, 2004; Castro et al., (2007)). Castro et al., (2007) concluded that the height and width of isolated extraction zone (IEZ) and isolated movement zone (IMZ) continuously increases with the extracted mass and the height of draw. Trueman et al., (2008) found that the movement zones of adjacent drawpoints do not interact if the drawpoint spacing is greater than the width of IMZ. Olivares et al., (2015) has conducted test to quantify the influence of the amount of fines, vertical load, and water content on the flow behavior of cave rock. They concluded that the amount of fines has a large impact on the frequency of hang – ups.

Regarding the knowledge of the flow of fine cave rock the research using physical modeling to date is rather limited. Most researchers have used sand as the model media under dry conditions (Kvapil, (1965 – 1992); Marano, (1980); Susaeta, (2004)). This means that the influence of water on fines is unknown.

This research has the aim of study the flow behavior of fine fragmented rock through controlled experiments. For this purpose we first conducted an analysis of similitude to define the boundary and initial conditions for the experiments. Then we build the experimental set – up, we carried out trials under unconfined conditions to evaluate the influence of moisture content on the extraction zone and hang – up frequency. Finally, we compared the experimental result to available mine data.

3.2. Analysis of similitude for fine granular flow

The concept of similarity considers two systems, the prototype and the model (Barenblatt, 1996). The theory explains that a scaling system and a real system are similar if three similarities, geometric, kinematic, and dynamic are satisfied (Langhaar, 1951; Barenblatt, 1996). In term of dynamic similitude it is necessary that the main forces acting on the system are well represented. This analysis guarantee that the results obtained in the physical model are representative of the prototype. In the following section the justifications for the selection of the model media and physical model geometry are presented.

3.2.1. Model media

3.2.1.1. Size distribution

In order to characterized fine cave rock samples were obtained from draw points located at the Esmeralda Sector at El Teniente mine. The material is considered by the mine personnel as fine material, and correspond to drawpoints with a high percentage of extraction. Fig. 3.1 presents the size distribution of the samples indicating that the average particle size (d_{50}) is 3.1 [mm] with a maximum size of 50 [mm]. The media has been defined as a well-graded

with a Cu of 43.33 and its content consists of 26.2% gravel, 66.7% of sand, and 7.10% with silt and clay.

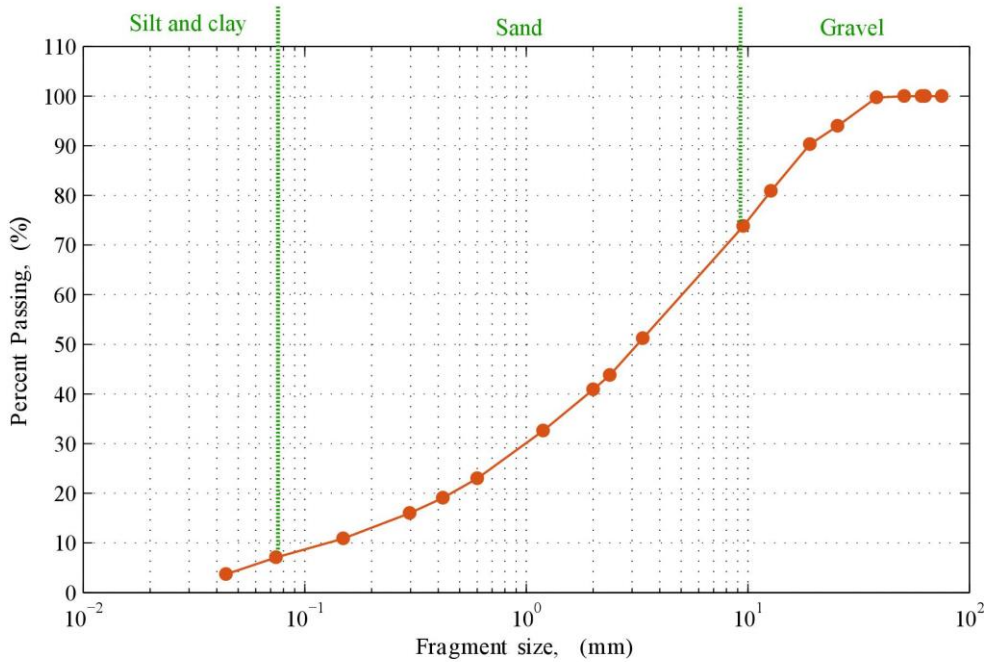


Fig. 3.1: Size distribution of fine cave rock at Esmeralda Mine

3.2.1.2. Shear strength characterization

The shear strength characteristics of the fine caved rock were determined by shear tests. The applied normal forces were in a range from 49.03 to 441.29 [kPa]. Fig 3.2 shows the results of the test which indicated that cohesion is 21.06 [kPa], and the friction angle reaches 16.5°. These values of cohesion and friction angle are characteristic of cohesive soils (Lambe, 1969).

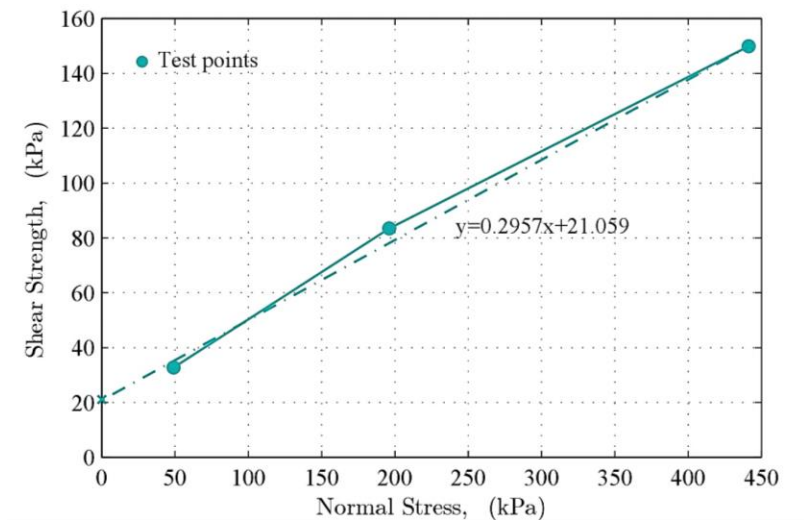


Fig. 3.2: Maximum shear strength for the media tested

The above test do not considered low-stress conditions. Previous unconfined compression tests were conducted for the same media as reported by Castro et al., (2017) for a range of relative densities as show in Fig. 3.3 the results indicate that the strength is low for low relative densities.

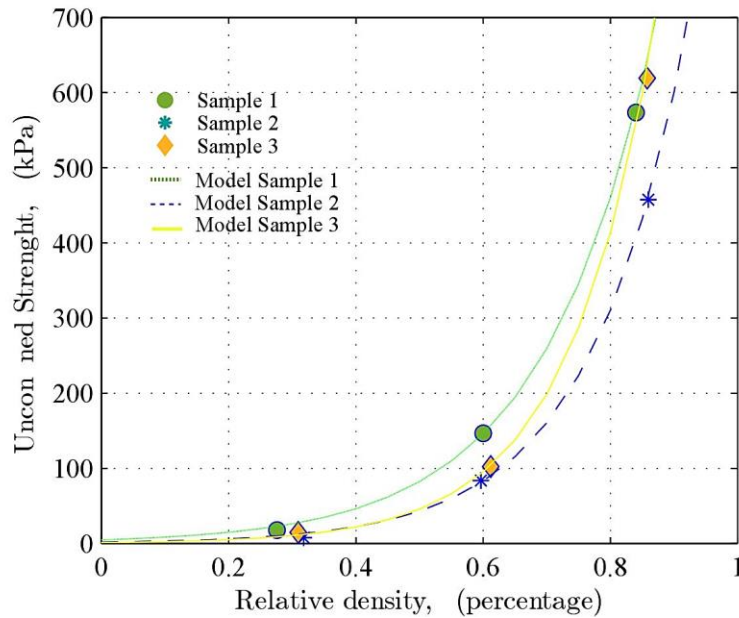


Fig. 3.3: Unconfined compression for three samples at Diablo Regimiento mine. (Castro et al., (2017))

Therefore, the Shear strength parameters depends on the confinement. For low confinement the cohesion would be between 0.4 – 0.8 [kPa] and friction angle of 35°. For high confinement the cohesion would be 21.1 [kPa] and friction angle of 16°.

3.2.1.3. Analysis of forces

The gravity flow of fine cave rock mainly involves the forces of gravity, friction, and cohesion (Castro et al., 2016). The similitude analysis for fine fragmented rock consist of defining the impact of water and fragment size on capillary and electrostatic forces. It also defines the experimental conditions of the model media. In the appendix A the relationships for the capillary forces are stated. In Fig. 3.4 shows the relationship between gravity force (F_G) and capillary forces (F_C) as a function of fragment size. The results indicate that the larger the amount of humidity the larger the capillary forces. Also the smaller the fragment size the larger the influence of humidity. As noted capillary forces could be larger than gravity forces for a given set of fragment size and humidity. For example for a humidity of 8% capillary forces are larger than gravity for particles below 2.65 [mm]. In the case of 2% water content capillary forces have more effect than gravity for particles below 2.30 [mm].

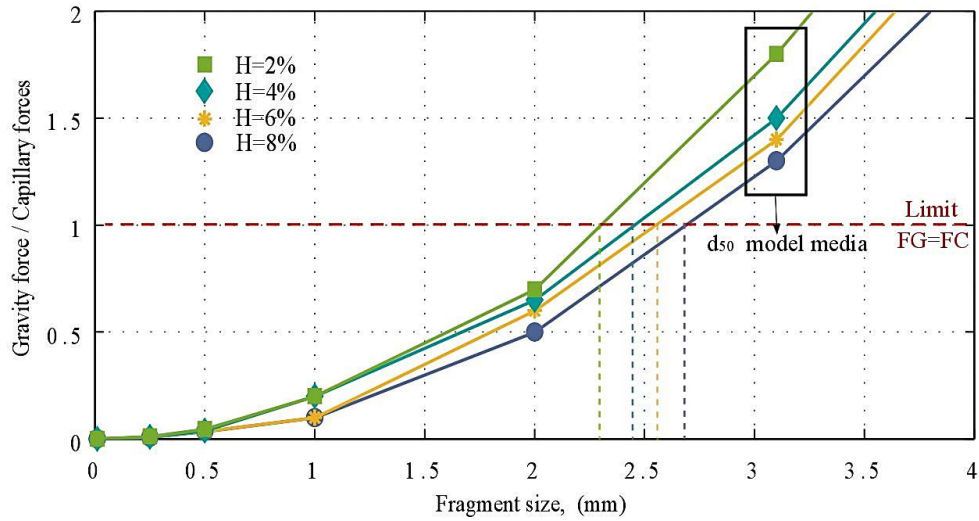


Fig. 3.4: Relation between gravity force (F_G) and capillary forces (F_C) as a function of fragment size, for four humidity values.

Another source of cohesion are electrostatic forces which exist in all material, independent of its chemical nature (Israelachvili, 1991). The electrostatic forces are larger than gravity for particle's diameters below 100 [μm] (Seville et al., 2002). In the case of fine cave rock gravity forces are larger than electrostatic forces for 84% of the total mass.

The Fig. 3.5 indicates the fragmentation for different geometrical scales (e.g. 1:100, 1:75, 1:50) and the critical size under which capillary forces would be dominant. The results indicate that if the material is reduced in size capillary forces would be larger than gravity for 100% of the total mass. Therefore, in order to study the flow of fine cave rock the same media should be used.

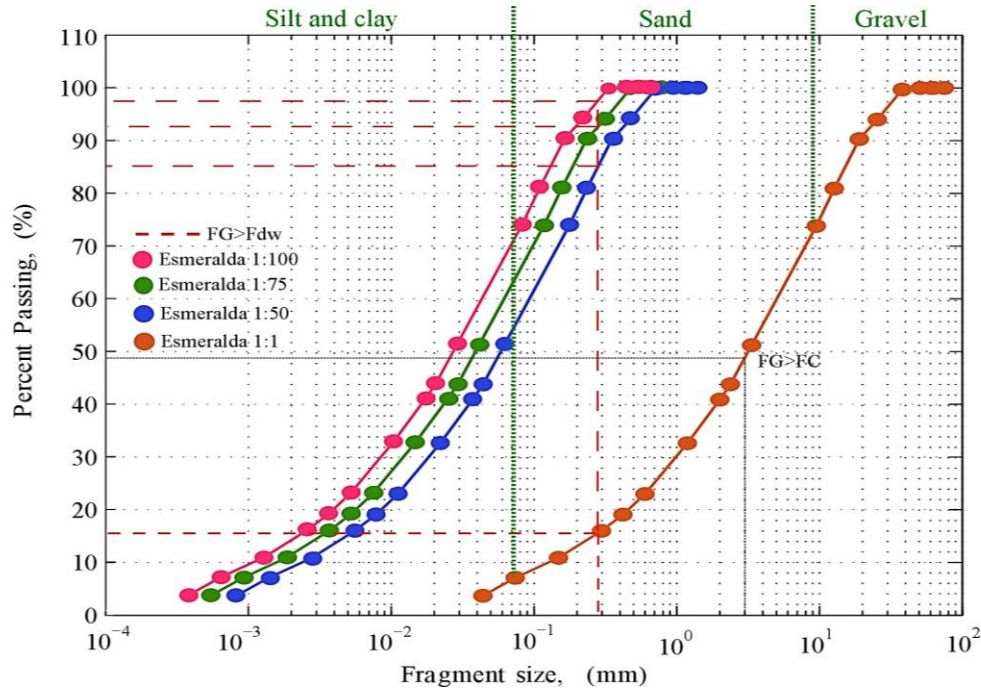


Fig. 3.5: Interparticle forces effect as a function of material fragment size.
FC: Capillary forces; FG: Gravity force

3.2.2. Geometry of the physical model

After define the model media the second step was to design and built the physical model. The laboratory scale selected was 1:75. The main advantage of small scale compared with full-scale is the low cost, reduced work time and it offers a good view of the physical phenomenon too. Moreover, recent studies indicate that satisfactory results can be obtained using a scale factor 1:100 (Castro et al., 2007) and 1:200 (Castro and Pineda, 2015).

Fig. 3.6 presents the geometry of the physical model. The dimensions of the flow chamber was 66.7 [cm], 52.12 [cm], and 33.3 [cm], height, width and depth, respectively (50.00 [m], 39.10 [m], 25.00 scaled).

The dimensions of the drawbell were 9.33 [cm] high and 19.50 [cm] long (7.00 [m] and 14.60 [m] scaled). The dimension of drawpoint drift was 6 x 6 [cm] (4.50 x 4.50 [m] scaled). The extraction system considered a scaled LHD's bucket with a volume of 2.52×10^{-5} [m³] (10.64 [m³] scaled). The physical model has two scaled LHD, these allow to have different extraction conditions: draw from one or two drawpoints.

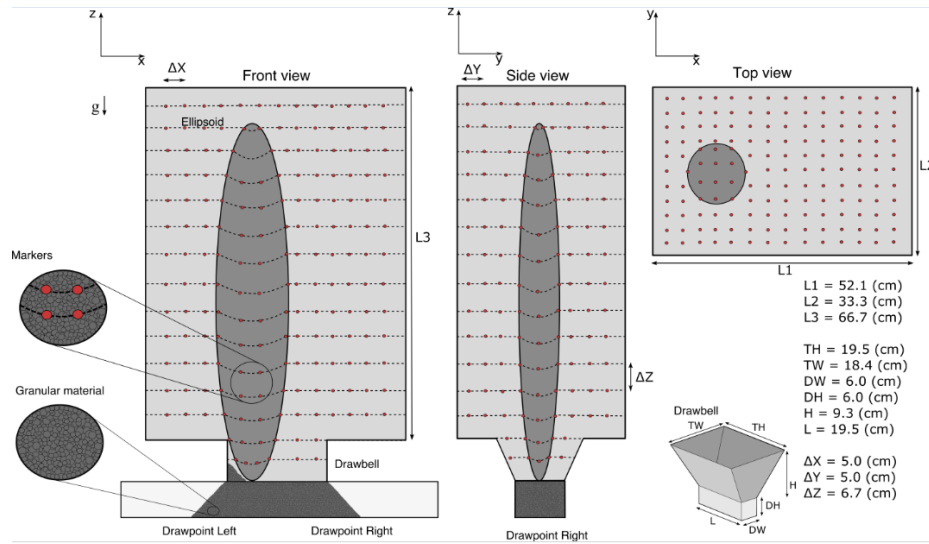


Fig. 3.6: Experimental set-up – Scale 1:75 - Physic model, distribution of markers in ore column and drawbell dimensions

3.2.3. Boundary conditions

In gravity flow is important to define the column height as this defines the geometry of the extraction zone and the vertical loads acting at the production level. In cohesive granular materials vertical stresses σ_v given by Eq. 3.1. This formula is an extension of the Janssen (1895) formula and takes into account any tendency for fines to adhere to ore pass walls, as well as friction of mud (Pariseau, 1983; Beus et al, 2001).

$$\sigma_v = \frac{\gamma R_h - cM}{M \tan(\phi)} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-zM \tan(\phi)}{R_h} \right] \right\} \quad (3.1)$$

Where γ is specific weight of the material (20.80 [kN/m³]), R_h is hydraulic radius of the flow zone (area/perimeter), z is the depth, M is given by the Eq.3.2 and depends on the friction angle.

$$M = \frac{1}{[1 + 2(\tan \phi)^2]} \quad (3.2)$$

In order to establish the vertical loads during flow the mechanical parameters shown in Section 3.2.1 were considered along with different draw-zone diameters (see Fig.3.7). As exhibit the larger the draw-zone diameters the larger the vertical load. In this context, for the flow zone diameters within a range of 5 – 20 [m], the maximum loads are between 30 and 350 [kPa].

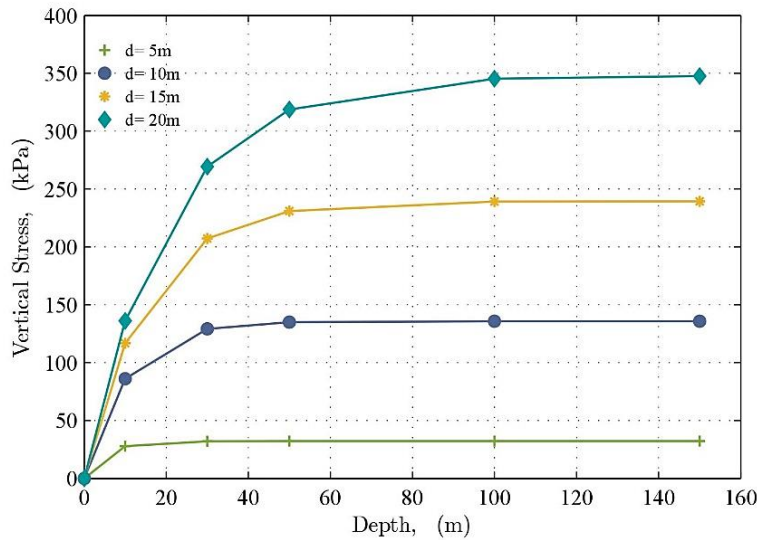


Fig. 3.7: Vertical load expected at the mine as a function of depth and draw-zone diameters

In the case of the physical model, we applied Eq. 3.1 (considering the mechanical properties presented in Section. 3.2.1.2) indicating that the vertical loads are in a range from 4.55 to 3.78 [kPa]. This means that there are smaller than in the prototype and may induce distortions in the results. However, in terms of flow of cohesive materials it is important that the ratio between vertical load and cohesion (strength) or flow factor is kept constant in order to avoid distortions (Jenike, 1967). In Table. 3 the flow factor for physical model and prototype are presented, showing that the flow factor are similar.

Table. 3.1: Flow factor between prototype and physical model

	Cohesion (c) [kPa]	Vertical load (σ_v) [kPa]	σ_v / c
Prototype	21.06	150.00	7.12
Physical model	0.60	3.78	6.30

3.3 Experimental Methodology

For to determine the extraction zone geometry, 768 painted numbered markers were positioned inside the model and recovered at the drawpoint. Each marker had a code and an unique location (coordinates X, Y and Z). Moreover, their sizes correspond to the average diameter of the material d_{50} , thus they do not alter the material flow. Extraction zones were measured through the back analysis of recovered labeled markers. This technique has been tested successfully in experimental research on physical models that have the aim to measure the flow zones geometry (Castro et al., 2007).

Another key point is that during the experiments when 20% the total mass has drawn approximately, it was observed that the flow reached the surface. In this case, the model was

refilled with the extracted material to avoid the subsidence develop and to maintain constant the column high and consequently, the vertical strength on the system. Additionally, it was observed that during the extraction no flow conditions or hang – ups occurred. These events were noted that occur in a series of consecutive steps: full drawbell or flow conditions, start of hang – up or characterized by a void at the drawbell, and no flow conditions as show in Fig. 3.8.

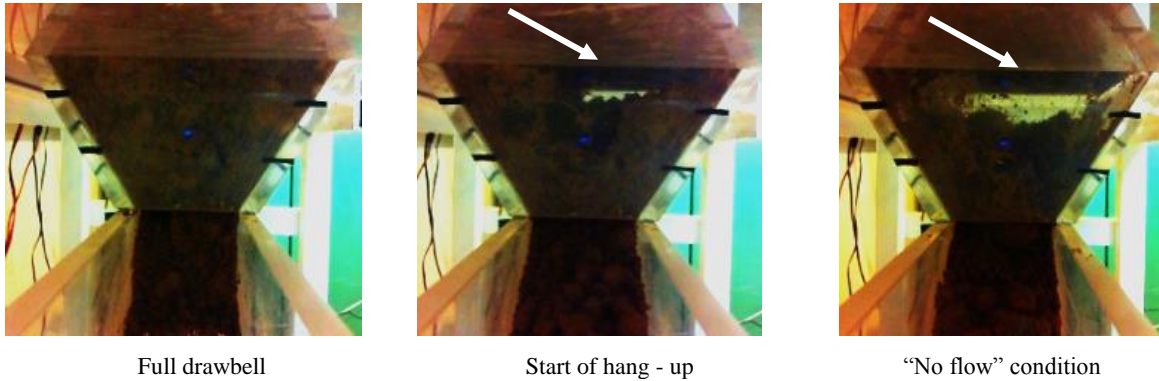


Fig. 3.8: Evolution of a "No Flow" condition - Cross-sectional view of the drawbell

In order to achieve the research objectives ten experiments were conducted (see Table 3.2). In the experiments the amount of water was changed from 0% to 8%. Also the number of drawpoints varies from one to two. In order to quantify the experimental error additional experiments or replicas were carried out.

Table. 3.2: Summary of data obtained during experimental

Description	Units	Experiments									
		Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 7	Exp 8	Exp 9	Exp 10
Drawpoints	-	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Humidity	%	0	0	2	2	4	4	6	6	8	8
Accumulated extracted mass	kg	21.4	50.8	22.0	45.5	21.4	44.3	22.3	44.2	4.8	29.0

3.4. Experimental results analysis

The geometry of the flow zone as a function of mass drawn using the data obtained through the recovered markers. Fig. 3.9 shows an example of the flow zone for isolated draw, while Fig. 3.10 for two drawpoints. In the case of isolated draw the extraction zone follows a cylinder shape that increases in height with the extraction in agreement with the theory. In the case of two drawpoints, initially the draw zones acted in isolation but due to the close spacing, the flow zones later merged into a single extraction zone.

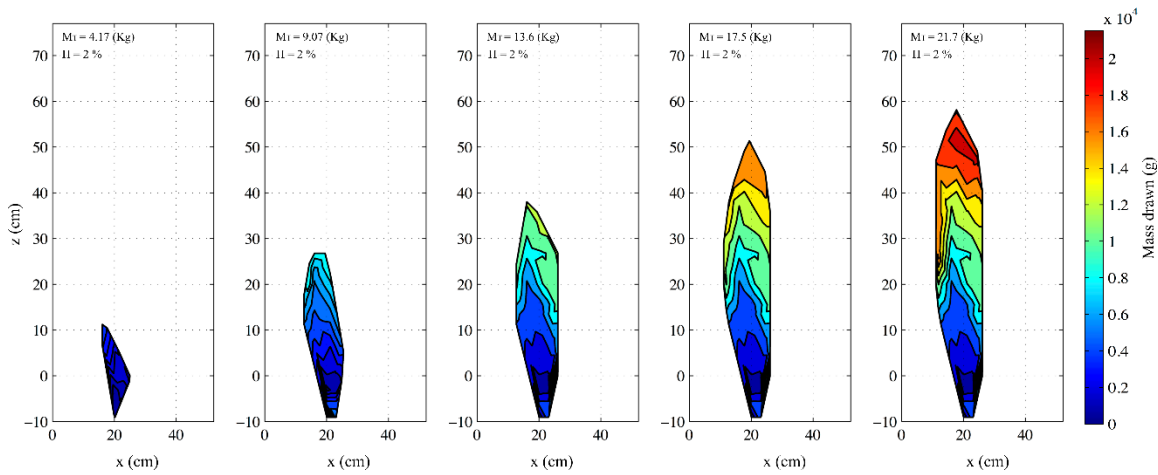


Fig. 3.9: Evolution of the ellipse to different accumulated extraction mass with 4% moisture - Isolated draw - Longitudinal view to the drawbell

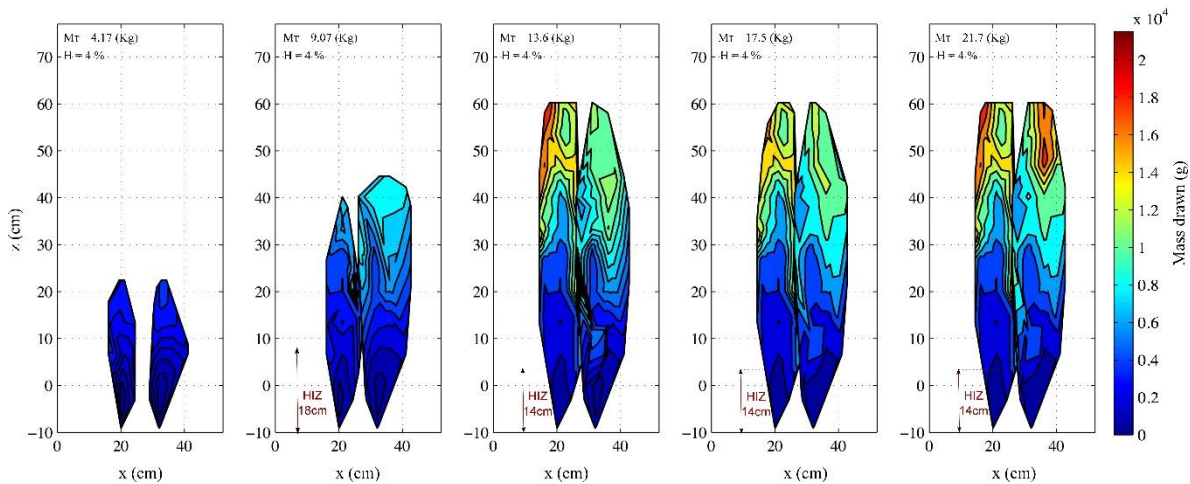


Fig. 3.10: Height of the extraction zone as a function of accumulated extraction mass with 4% moisture - Tests with draw from two drawpoints - Longitudinal view to the drawbell

3.4.1. One drawpoint - Isolated draw

The data verify that the trend between geometry (height and width) and extracted mass is increasing, like was observed in the study of Castro et al., (2007). However, the experiments with higher moisture content showed different behavior. In the case of the experiment with 8% moisture 4,17 [kg] mineral extracted before definitive cohesive arch occurred. The hang-up had a height of 13.6 [cm] on the drawbell. This prevented the free flow of material and the test was terminated. Hence the following analysis only considers results up to 6% humidity.

Fig. 3.11a illustrates that increase in height is affected by moisture content equal to 6%. While the other trials achieved the maximum height allowed by physical model.

On the other hand, the trend of the draw zone diameter versus extracted mass is ascending, but its increments have different slopes depending on the humidity. In these cases when the accumulated mass extraction is approximately 14 [kg], the slopes begin to decrease. Wet trials show an upward trend with slopes ranging from 2 – 21% between last points of extraction mass (17.4 and 21.4 [kg]). However, the slope for 0% moisture is greater of 33% (see Fig. 3.11b). There is an evidence that the increase in diameter for 0% moisture could reach a threshold with an ore column with greater height. Thus, the ellipse width could be stabilized with a greater extracted mass. Consequently, the maximum diameter generated in dry material will be higher than in wet material.

In this way, the diameters generated by wet fine cave rock are a problem for the mining design, because there will not be interaction between the ellipsoids. Therefore, significant tonnage of immobile material shall affect ore recovery.

In order to compare the results with the available literature referent to flow of fine cave rock, we made a comparison between experimental data and data of Laubscher. His empirical guide indicates the expected diameter of isolated draw zone to a width of drawpoint. In this context, we obtained a dimensionless number as a ratio between parameters indicated (see Table 3.3).

Table. 3.3: Ratio between drawpoint width and flow zone width, considering Laubscher data and experimental data

Data	Flow zone - W_{FZ} Width [m]	Drawpoint - W_{DP} Width [m]	Dimensionless number W_{FZ}/ W_{DP}
Laubscher	6.50	3.00	2.17
Laubscher	6.00	2.00	3.00
Experiment 1	0.161	0.06	2.68
Experiment 3	0.167	0.06	2.78
Experiment 5	0.177	0.06	2.95
Experiment 7	0.182	0.06	3.03

The values indicate that the experimental data is inside the Laubscher data range, nevertheless, his data do not consider the humidity parameter. According to experimental results for the dry samples, the diameter of draw zone increases lower than wet samples and it does not reach a maximum value. Consequently with a greater height of extraction column the width of flow zone could be larger and the ratio (W_{FZ}/ W_{DP}) too.

Five replicas were carried out with humidity content of 4% to calculate the experimental error. It was found that the relative error for the diameter reaches 9.67%, while that of the height is 6.69%.

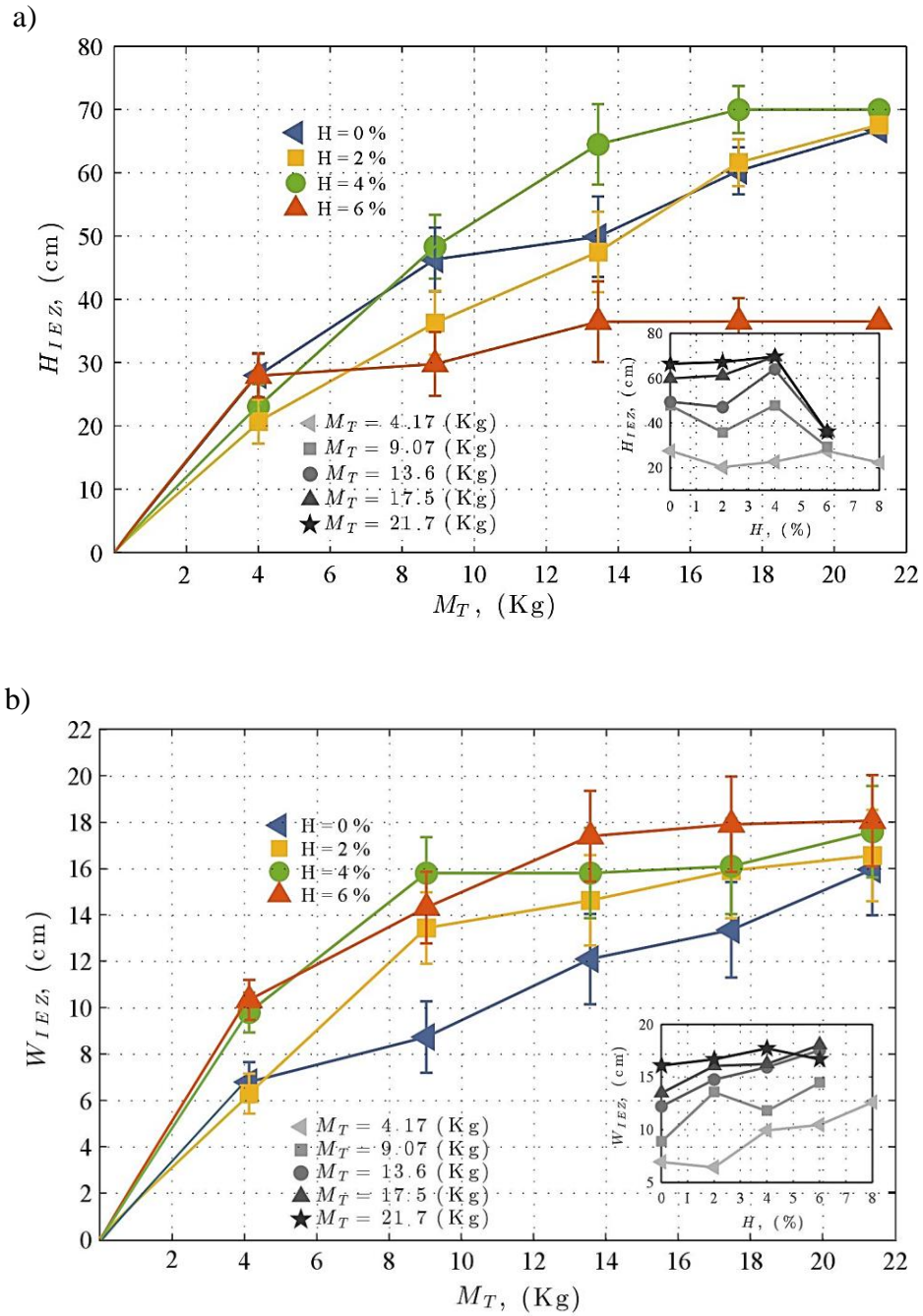


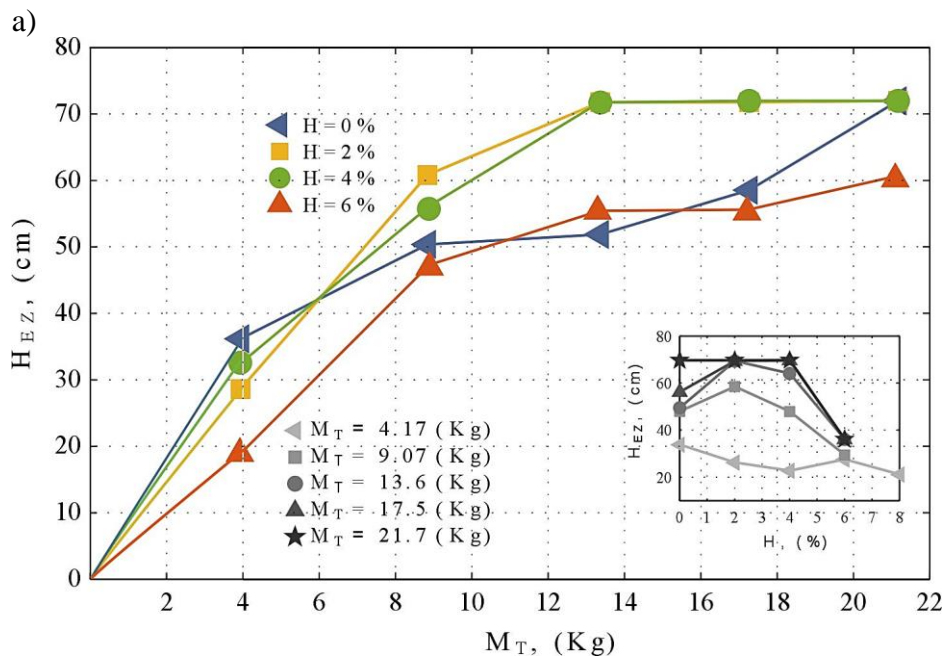
Fig. 3.11: a) IEZ height and b) IEZ width as function of accumulated masses, for different humidities. Inside: Ellipsoid geometry (H_{IEZ} and W_{IEZ}) as a function of humidity.

3.4.2. Two drawpoints – Interaction drawn

The purpose of these trials is determinate the difference in ellipsoid geometry and hang – ups frequency due to greater flow produced by extraction of two drawpoints.

The increase of the height occurs for all tests even for experiment with 6% humidity (see Fig. 3.12a). This result confirms that an alternating extraction causes the material to have greater mobility. In the case of diameter, Fig. 3.12b indicates that the tests with humidity increases until reaching a maximum value that tends to be almost constant, but the diameter of the dry material is increasing with small variations in its slope. This slope reaches approximately a value of 36% and it does not attain a threshold. The main analysis is the same of the last section. The diameter of dry fine cave rock with a greater percentage of column extraction the diameter dimension will continue increasing.

There is a qualitative difference between the geometry of draw for one and two drawpoints. The isolated flow produces a flow zone with a larger diameter and smaller height. However, for both cases, the height increases along the caved mineral column and the diameter reaches a maximum value, thus the ellipsoid adopts a geometry like cylindrical.



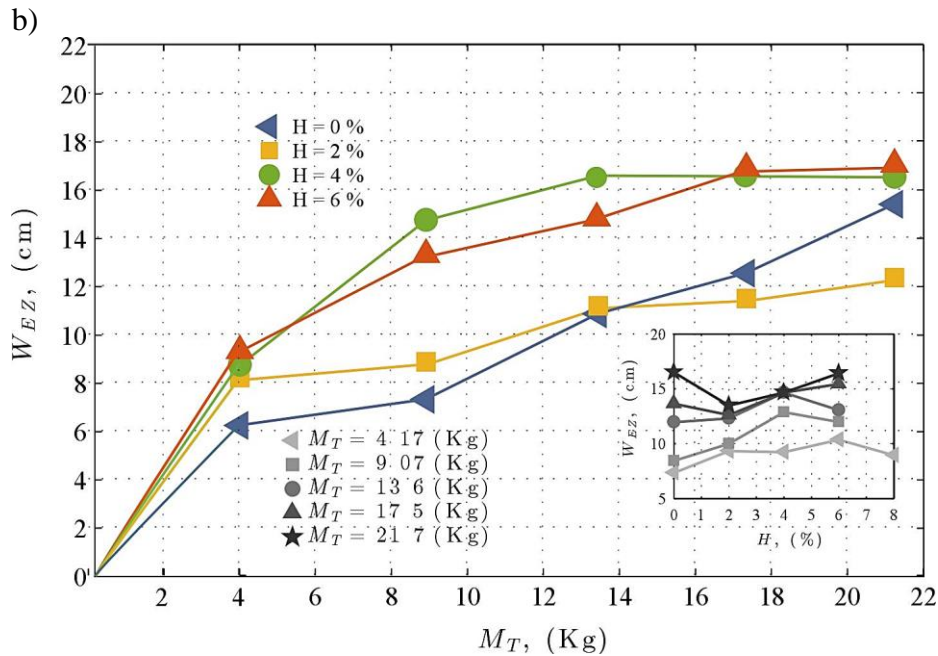


Fig. 3.12: a) EZ height and b) EZ width as function of accumulated masses, for different humidities. Inside: Ellipsoid geometry (HEZ and WEZ) as a function of humidity.

3.4.3. Interferences during the flow

During the experiments, we recollected additional data and these help us to determinate a hang- up frequency. This term is the most common event which interrupts the flow of material, this phenomenon is frequently used to analyze the flow condition of broken rock (Troncoso, 2006). Frequency of hang - ups was quantified in terms of the extracted mass between two consecutive hang-ups [grams/hang up] which was subsequently scaled up to ton/hang up. The quantitative analysis shows that the increase of hang- up frequency has a direct relation with humidity

In order to quantify the interference during the flow, Table 3.4 contains data about hang- up frequency between two conditions of test extraction. When the draw is interactive, the hang – ups decrease in 3% and 12%, nevertheless the difference is not significant. Thus, in both extraction cases, the results with humidity equal to 6% do not have difference due to the action of capillary forces. In the case of dry fine cave rock, the occurrence of hang-ups is due to the migration of fines, while the greater fragments generate mechanical arches.

Table. 3.4: Summary of hang- up frequency obtained during experiments

Experiments	Hang - ups [u]	Hang - ups frequency [grams/hang up]	Hang - ups frequency [ton/hang up]	Hang-ups/1000 ton
1	53	427.97	180.55	5.54
2	48	464.43	195.93	5.1
3	55	392.8	165.71	6.03
4	54	400.24	168.85	5.92
5	59	351.98	148.49	6.73
6	55	380.74	160.63	6.23
7	63	337.73	142.48	7.02
8	63	341.84	144.21	6.93

For to scale up to ton/hang up, we used the Eq.3.3. Thus, the number of hang – ups per 1000 extracted tons have similar results without greater difference between isolated and interactive flow, they are within a range of 5 – 7.

$$tons = g \frac{scale^3}{1x10^6} = g \frac{(75)^3}{1x10^6} \tag{3.3}$$

Additionally, we compared the experimental data with other investigations for to validate the results, Olivares et al., (2015) found 4.7 [hang-ups/kton] for zero humidity, without load, and fine material with d50 of 7.1 [mm] when the extraction carried for an isolated point. In the case of wet trials, the number of hang-ups are different due to the material behavior. The data with humidity present a range of 6.7 – 10.3 [hang-ups/kton] for a content moisture between 3% and 6%. The hang-ups are associated with the formation of cohesive arcs. The fine material tends to occupy the space between the fragments and forms a compact structure that prevents movement. The difference between the data presented in this research and Olivares data show a difference that could be related to the physical model type, and undoubtedly material used.

On the other hand, the best way to validate the experimental data is compared with a real database. Thus, we used data at Esmeralda Mine at Teniente Mine. The hang – ups values recorded at an extraction point are between 3.2 - 5.6 [hang-ups/kton]) (see Fig. 3.13), and they are associated to drawpoints with fine material and moisture in a range from 1 to 7%. Moreover, other drawpoints without humidity content present hang – ups too. Its values are around to 5.31 [hang-ups/kton]. Thus, the experimental data are near to real values and the difference could be linked to experimental errors.

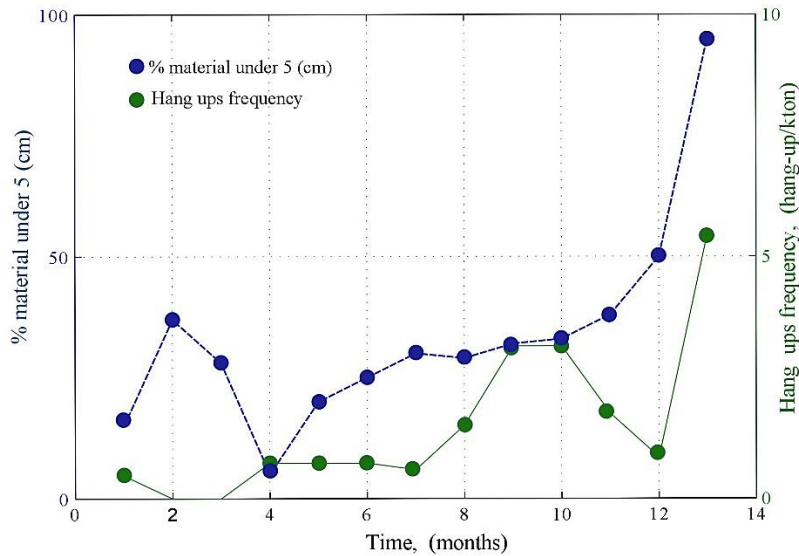


Fig. 3.13: Hang up frequency in one drawpoint at the Esmeralda Sector at El Teniente mine

Throughout the experiments, we observed a no flow condition when the humidity content was of 6%. This produced a hang-up, as a form of a cohesive arch. In this context, the hang-ups in wet material could be related by the following causes: a) wide material size distribution, the spaces that remain between the gravel are occupied by sand, silt, and clay, resulting in greater interparticle contact. b) The percentage of added humidity in trials modified the conditions of the material. The interparticle forces in the material are random in magnitude and direction due to the multiple contacts between the particles, this increases the interparticle contact and the resistance of the soil skeleton. d) Finally, the humidity of 6% is close to the optimal humidity 6.3% (test modified proctor ASTM D1557). Thus, with a greater or lesser humidity than optimum moisture, the structure formed by material cohesion could be less resistant.

3.5. Conclusions

Through analysis of similitude, we found that the fine caved rock is affected by interparticle forces. Thus, the relation obtained between gravity force and capillary forces indicates that 2.8 [mm] is the minimum particle size to 8% humidity for gravity force governs the flow of 50% of the material. In the case of the Van der Waals forces affect to 16% of test material and its effect cannot be considered. Therefore, in order to study the flow of fine caved rock, the same media should be used.

The tests verified that inside the experimental set up the parameters with the greatest effect on the geometry change were accumulated extraction mass and humidity. The results obtained with different accumulated masses indicates that: for isolated extraction, the diameters are larger and the height is smaller, while for interactive extraction the greater flow of material, produces ellipsoids with a smaller diameter and greater height.

However, for both cases, the flow behavior shows that for wet material the diameter trend of the extraction zone reaches a threshold. Consequently, with lower moisture than 6% the final geometry of ellipsoid could come to a cylinder. In the case of dry material, the diameter dimension with a greater percentage of column extraction could continue increasing.

Moreover, a change in the geometry of the ellipsoid under moisture content of 6% was observed. The result was a cohesive arch that avoided the material free flow. Thus, the humidity produced an apparent cohesion to sand that changed resistance characteristics of the fine caved rock.

Another important point is the dimensionless number between isolated diameter and drawpoint width. The values are ranging from 2.7 – 3, evidencing that the ellipsoid width in a flow of fine caved rock could be larger than gave data by Laubscher in the case of dry material.

The experiments carried out from two drawpoints indicate that the interaction height of draw zones across major apex is lower in a material with higher humidity content. However, for all moisture percentages do not exist overlapping between drawbells due to extraction drifts distance and as result, the mineral without movement decrease the ore recovery.

Interferences occurred during the experiments, in terms of the hang – ups frequency for the two extraction cases, did not differ significantly from each other. The hang – ups are between 5.54 and 7.02 [hang - ups/ kton], while the real values obtained at drawpoints associated with fine caved rock and moisture at Esmeralda mine are in a range of 3.20 - 5.60 [hang - ups / kton]. The approximation between the real data and experimental data is due to the flow factor (ratio between vertical load and strength) is similar in both cases (physical model and prototype).

Finally, the effect of not scaling the material adds a distortion to the research. It is evident that the limitation in the gravitational flow study is the difficulty to represent all its characteristics within the prototype. However, we proposed a physical model and considered some assumptions, allowing to obtain a simplified version of the problem. The results obtained are an approximation and allow a better understanding of the mechanism involved in a flow of fine caved rock under wet conditions.

Bibliography

- Barenblatt, G. I. (1996). Scaling, self-similarity, and intermediate asymptotics: dimensional analysis and intermediate asymptotics (Vol. 14). Cambridge University Press.
- Beus, M. J., Pariseau, W. G., Stewart, B. M., & Iverson, S. R. (2001). Design of ore passes. *Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies*, 627-634.
- Brown, ET. Block caving geomechanics. Brisbane: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland. 2007
- Castro, R., Trueman, R., & Halim, A. (2007). A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(6), 860-870.
- Castro, R., & Pineda, M. (2015). The role of gravity flow in the design and planning of large sublevel stopes. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(2), 113-118.
- Castro, R., Gómez, R., Casali, A., & Hekmat, A. Experimental and comminution model framework for secondary fragmentation prediction in Block Caving. In *Proceedings of MassMin*. Sydney, Australia. 2016; P. 175 - 181
- Castro, R. L., Basaure, K., Palma, S., & Vallejos, J. (2017). Geotechnical characterization of ore related to mudrushes in block caving mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(3), 275-284.
- Chitombo, G. P. (2010). Cave mining: 16 years after Laubscher's 1994 paper 'Cave mining—state of the art'. *Mining Technology*, 119(3), 132-141.
- Heslop, T. G. (2000). Block caving—controllable risks and fatal flaws. In *Proc. Massmin Conf.*, Brisbane (pp. 280-291).
- Israelachvili, JN., *Intermolecular and surface forces: revised third edition*. 1991
- Jenike, A. W. (1967). Quantitative design of mass-flow bins. *Powder Technology*, 1(4), 237-244.
- Kvpil, R. (1965, September). Gravity flow of granular materials in Hoppers and bins in mines—II. Coarse material. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 2, No. 3, pp. 277-292). Pergamon.
- Hustrulid, W., & Kvpil, R. (2008). Sublevel caving—past and future. In *Proceedings 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, MassMin* (pp. 107-132).
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil mechanics*. Massachusetts institute of technology.
- Langhaar, H. L. (1951). *Dimensional analysis and theory of models* (Vol. 2). New York: Wiley.
- Laubscher, D. H. (1994). Cave mining—the state of the art. *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 94(10), 279-293.

-
- Laubscher, D. H. (2000). A practical manual on block caving. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Brisbane.
 - Marano G., 1980. The interaction between adjoining drawpoints in free flowing materials and its application to mining, pp. 25-32, Chamber of Mines Journal, Zimbabwe.
 - Olivares, D., Castro, R., & Hekmat, A. (2015, November). Influence of Fine Material, Humidity and Vertical Loads on the Flowability of Caved Rock. In 49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
 - Pariseau, W. G. (1966). The gravity induced movement of materials in ore passes analyzed as a problem in Coulomb plasticity (Doctoral dissertation, University of Minnesota.).
 - Power, G. R. (2004). Modelling granular flow in caving mines: large-scale physical modelling and full-scale experiments.
 - Seville, J. P. K., Willett, C. D., & Knight, P. C. (2000). Interparticle forces in fluidisation: a review. Powder Technology, 113(3), 261-268.
 - Susaeta A., 2004. Theory of gravity flow (Part I), Proceedings of MassMin2004, pp. 167-172, Santiago, Chile.
 - Susaeta A., 2004. Theory of gravity flow (Part II), Proceedings of MassMin2004, pp. 173-178, Santiago, Chile.
 - Troncoso, S. (2006). Simulation of operational interferences impact on production planning (Doctoral dissertation, Thesis. Santiago, Chile, Universidad de Chile.(In Spanish)).
 - Trueman, R., Castro, R., & Halim, A. (2008). Study of multiple draw-zone interaction in block caving mines by means of a large 3D physical model. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(7), 1044-1051.

Appendix A.

Interparticle forces effect on the model media

We now discuss two relevant forces, capillary and Van der Waals. To determine the influence of capillary forces (F_C), we sought a relationship with the gravity force. The result shall determine the size of the particle in which the capillary forces could govern the flow.

Only for capillary forces the following analysis considers two identical solid particles, negligible liquid surface curvature in planes containing the sphere centers and constant hydrostatic pressure in the liquid volume.

In Fig. A.1, R represents the radius of a spherical particle; R_0 and R_1 are the curvature radius of the air-liquid interface in the narrowest region of the liquid volume and θ is the contact angle due to surface tension.

The F_C acting in the liquid meniscus, has two components, one due to the surface tension, F_{TS} , appearing on the liquid perimeter, and another as a result of the liquid pressure F_P , (Kane and Sternheim, 1992) (Eq. A.1 and A.2).

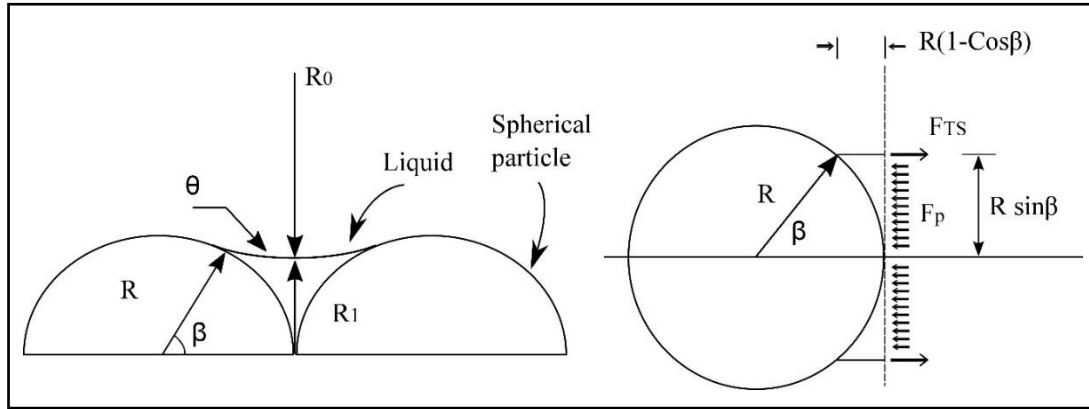


Fig. A.1: Capillary effect between two particles (Nase et al., 2000)

$$F_{TS} = 2\pi\gamma_c R \sin \beta \quad (A.1)$$

$$F_p = P\pi(R \sin \beta)^2 \quad (A.2)$$

Where γ_c is the surface tension the liquid, β is the angle given by the line defined by the interface solid-liquid-air, and the pressure, P , comes from Laplace's equation (Nase et al., 2000). This relates the difference of pressures to both sides of a liquid membrane closed with its tension. P is given by (Eq. A.3).

$$P = \frac{\gamma_c}{R \sin \beta} \quad (A.3)$$

Under those equations, the expression corresponding to the capillary forces is:

$$\begin{aligned}
 F_C &= F_{TS} - F_P \\
 F_C &= 2\pi\gamma_c R \sin \beta - P\pi(R \sin \beta) \\
 F_C &= 2\pi\gamma_c R \sin \beta - \left(\frac{\gamma_c}{R \sin \beta} \right) \pi(R \sin \beta)^2 \\
 F_C &= \pi\gamma_c R \sin(\beta)
 \end{aligned} \tag{A.4}$$

With Eq. (A.4), we can define the ratio between gravity and capillary force given by the Eq. (A.5). Where the material density is represented by γ .

$$\begin{aligned}
 \frac{F_G}{F_C} &= \frac{mg}{\pi\gamma_c R \sin(\beta)} \\
 \frac{F_G}{F_C} &= \frac{\gamma V g}{\pi\gamma_c R \sin(\beta)} \\
 \frac{F_G}{F_C} &= \frac{4 \gamma g}{3 \gamma_c} \frac{R^2}{\sin \beta}
 \end{aligned} \tag{A.5}$$

We determined the humidity content (H) as the ratio between the weight of the water (W_w) and the total weight (W_t), that include water (W_w) and solids (W_s) (Lambe, 1969) (Eq. A.6). Where $V_{l/s}$ is the ratio between the volume of water and solids, and $\rho_{l/s}$ is the ratios between the density of water and solids.

$$H = \frac{w_w}{w_t} = \frac{w_w}{w_w + w_s} = \frac{V_{l/s}}{V_{l/s} + \rho_{l/s}} \tag{A.6}$$

We have used Eq. (A.7) to determinate the ratio between the volume of water and solids ($V_{l/s}$) as a function of β and calculate an angle value between the solid-liquid-air interface (β) for each moisture tested.

$$V_{l/s} = \frac{3}{2}(1 - \cos\beta) \left(\sin^2\beta - (1 - \cos\beta)(\sin\beta - \frac{1}{3}(1 - \cos\beta)) \right) \tag{A.7}$$

Using the humidity values with their respective β data, $\gamma=2.6$ [gr/cm³], $\gamma_c= 0.074$ [N/m], we applied the Eq. (A.5) with different particle size. It is found that for H=8%, capillary forces are dominant in a ratio greater than one when the grain size is less than 2.8 [mm], so this dimension is the minimum for the gravity force to govern the flow.

CAPÍTULO IV

Mathematical models for the prediction of flow zone geometry considering fine caved rock and moisture

The following text is one of the specific objectives set out in this research. A mathematical formulation was obtained to express a relation between the variables present in the experimental plan. Thus, using the tool of dimensional analysis and recollected data through the experiments, two mathematical models were proposed. The formulated equations are an instrument and it could predict quantitatively both the height and width of the ellipsoid in fine and wet material flow.

4.1 Dimensional Analysis

Dimensional analysis is a mathematical tool to generate equations and simplify the analysis of many variables that describe a physical phenomenon (Langhaar, 1951). It is based on the idea that the physical laws do not depend on arbitrarily chosen as units. For example, the functions expressing physical laws must have some fundamental properties, such as homogeneity or symmetry (Barenblatt, 1996).

Dimensional analysis has been important in experimental work in the design, implementation, analysis and synthesis of data (Gibbings, 2011). Thus, the presentation of the results shall be more compact and clear. Another utility provided by the dimensional analysis is to allow appropriate scaling, and consequently obtain a useful concept called magnitude order. Based on this approach, if we use scales, the results of small-scale models might be extrapolated to real-life models (Dehghani and Ataee-Pour, 2011). In our research, the results are representative a physical model to aiming to represent a block caving mine prototype.

The need to use dimensional analysis is to obtain approximate mathematical models and by these equations determine the ellipsoid geometry for isolated draw (IEZ) and interactive draw (EZ). To perform a dimensional analysis (DA) there are methods that follow a methodology. In this research we have used Buckingham Pi theorem (Gibbings, 2011). Initially, we choose the relevant variables, but this selection might be highly subjective (Ruzicka, 2008). We have considered important variables that are present and change throughout a block caving mining operation (Eq. 4.1). The selection was based on available bibliographic information and the variables present in the physical model. In the vertical load case, we add it to the analysis with the aim to have an additional variable and consequently a dimensionless group, thus the mathematical models will be more consistent. By using the mentioned theorem the variable σ_v was annulled, due to it was the only variable with unit time (T) between physical quantities.

$$H_{IEZ} = f(V_{ex}, D_{50}, A, H, \rho_s, M_T, \sigma_v) \quad (4.1)$$

Table. 4.1: Variables used for dimensional analysis

Denomination	Description	Units	Physical quantities
V_{ex}	Extraction volume	m^3	L^3
D_{50}	Average particle size	m	L
A	Area drawpoint	m^2	L
H	Humidity	Kg	M
ρ_s	Density	Kg/m^3	ML^{-3}
M_T	Cumulative mass extracted	kg	M
σ_v	Vertical load	N/m^2	MLT^{-2}
H_{IEZ}	Height of the movement area	m	L
W_{IEZ}	Width of the movement area	m	L

Secondly, we rewrite these dimensional quantities into dimensionless numbers or groups (Ruzicka, 2008). The dimensionless groups ($\Pi_n, \Pi_{n+1}, \Pi_{n+2} \dots$) represent the most important parameters of the process (Campos et al., 2006). Using such theorem and the variables selected, we obtained five dimensionless numbers (Eq. 4.2 to 4.6).

Dimensionless numbers

$$\Pi_1 = \frac{H}{M_T} \quad (4.2)$$

$$\Pi_2 = H_{IEZ} \sqrt[3]{\frac{\rho_s}{M_T}} \quad (4.3)$$

$$\Pi_3 = \frac{\rho_s V_{ex}}{M_T} \quad (4.4)$$

$$\Pi_4 = d_{50} \sqrt[3]{\frac{\rho_s}{M_T}} \quad (4.5)$$

$$\Pi_5 = A \sqrt[3]{\left(\frac{\rho_s}{M_T}\right)^2} \quad (4.6)$$

The Eq. 4.7 will be in function of the dimensionless groups already mentioned (Eqs. 4.1, 4.3, 4.4, 4.5). This group contains the variables (H_{IEZ} , W_{IEZ} , H_{EZ} , W_{EZ}) that define the ellipsoid geometry.

$$\Pi = H_{IEZ} \sqrt[3]{\frac{\rho_s}{M_T}} \quad (4.7)$$

In order to simplify the dimensionless quantities, we have made relations between them. The result was: Λ_1 corresponds to Π_4/Π_5 (Eq. 8) and Λ_2 is the product of Π_1 and Π_3 (Eq. 4.9). Replacing the values of each variable, the results suggest that the experimental measurements of H_{IEZ} and W_{IEZ} can be represented by the Eqs. (4.10) and (4.11), respectively. The values of the dimensionless groups: $\Pi_1 H_{IEZ}$ and $\Pi_1 W_{IEZ}$ are in the range of 5.52 – 1.16 and 1.37 – 0.44, respectively. In the case of Λ_1 its values are 0.20 – 0.11 and for Λ_2 the range is $(193333 - 6) \times 10^{-9}$, respectively.

$$\Lambda_1 = \frac{D_{50}}{A} \sqrt[3]{\frac{M_T}{\rho_s}} \quad (4.8)$$

$$\Lambda_2 = \frac{\rho_s V_{ex} H}{M_T^2} \quad (4.9)$$

$$\Pi_{H_{IEZ}} = f(\Lambda_1, \Lambda_2) \quad (4.10)$$

$$\Pi_{W_{IEZ}} = g(\Lambda_1, \Lambda_2) \quad (4.11)$$

4.1.1 Mathematic model for isolated extraction - IEZ

The measured data for (Eq. 4.7) applied to W_{IEZ} was fitted with the empirical relationship (Eq. 4.12), where C_0 y C_1 are constants (see. Fig 4.1a).

$$\Psi = \frac{C_0 \Lambda_1}{\ln(C_1 \Lambda_2)} \quad (4.12)$$

The result of the experimental fit using Ψ equation indicates that: numerically the denominator product is a value less than zero and the constant C_1 shows a value of 1.112×10^{-7} . The result of the natural logarithm of a number less than zero is a negative value, for this reason the value of C_0 is adjusted with -115.07, and thus the values of the empirical relation become positive. If we analyze the parameters that are involved in this relationship, D and A (not changed throughout the experiments) are maintained as constant values during the experiment, V_{ex} could be qualified as constant because the difference between the maximum and minimum value is 3.48×10^{-6} . For our numerical experiments Λ_2 determines the change in the diameter of IEZ, because it contains the variables H , M_T and ρ_s .

Through the new variable Ψ , the theoretical values (Π_T) are modeled by a polynomial function of second - order (Eq. 4.13).

$$\Pi_T = a\Psi^2 + b\Psi + c \quad (4.13)$$

The setting values for parameters a , b , and c are: -1.929, 3.236 y -0.536. The Π_E versus Π_T values for the model is presented in Fig. 4.1a. Their data fixed was with a R-square value of 0.7709. For the height case, we have replicated the procedure described above. The empirical relationship (Eq. 4.14) adjusted experimental data with an R-square value of 0.8388.

$$\Psi = C_0 \Lambda_1^{[C_1 + C_2 \ln(1 + C_3 \Lambda_2)]} \quad (4.14)$$

For the adjustment, four coefficients are found, C_0 to C_3 , their values are 5.909, 0.399, 0.047 and 1.291×10^4 respectively. As can be seen inside of Fig. 4.1b, the small graphic presents the correlation (solid line) between Π_E and Π_T . The Π_T values are fitted with a Ψ variable function, additionally they are modeled with a polynomic of second-order (Eq. 4.13). The fit parameters a , b and c have taken the values 0.515, -1.326 and 2.520.

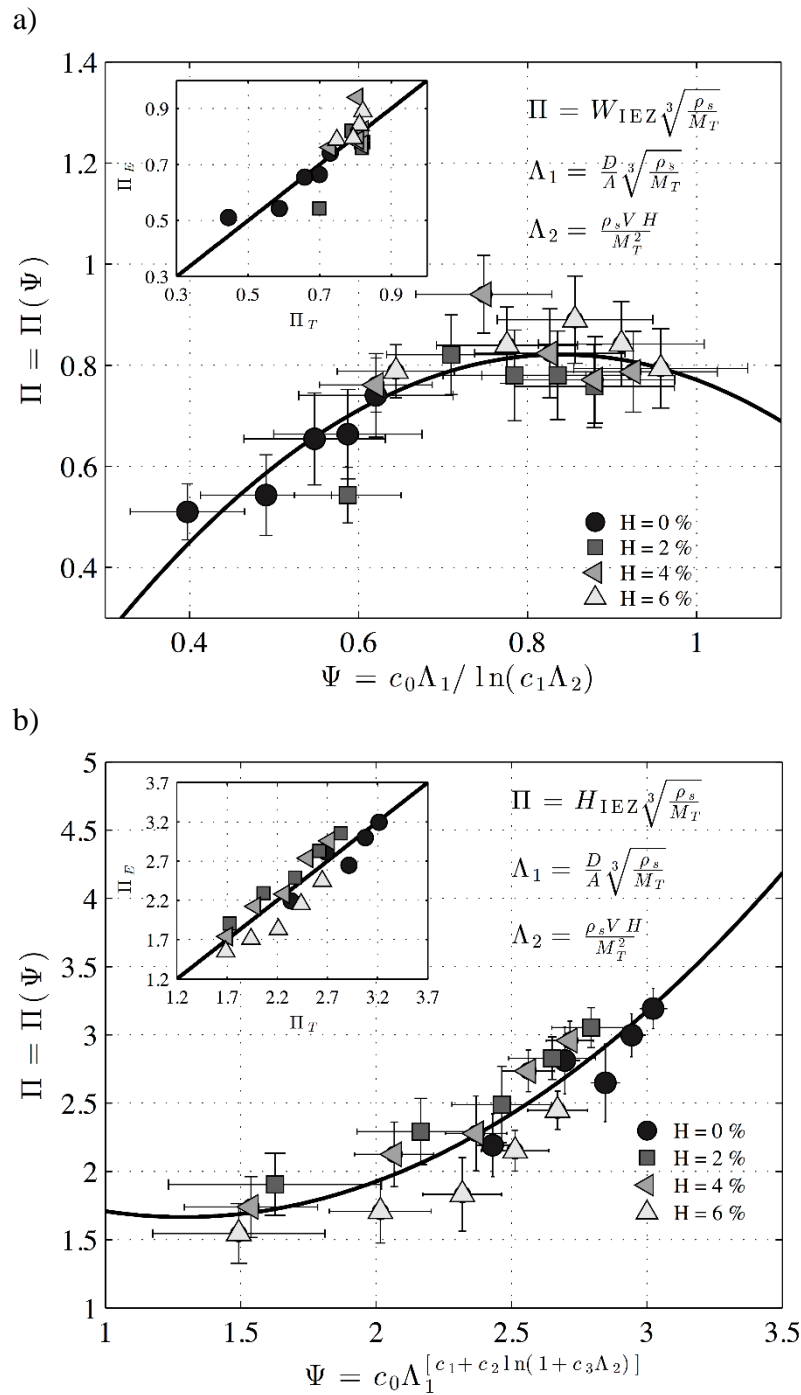


Fig. 4.1: Data fit for Π as a function of the dimensionless group $\Psi = \Psi(\Lambda_1, \Lambda_2)$ Isolated case. The solid black line represents a polynomial function of degree 2. Inside: Experimental Π as a function of Theoretical Π , where the solid black line indicates the identity. a) Width, b) Height

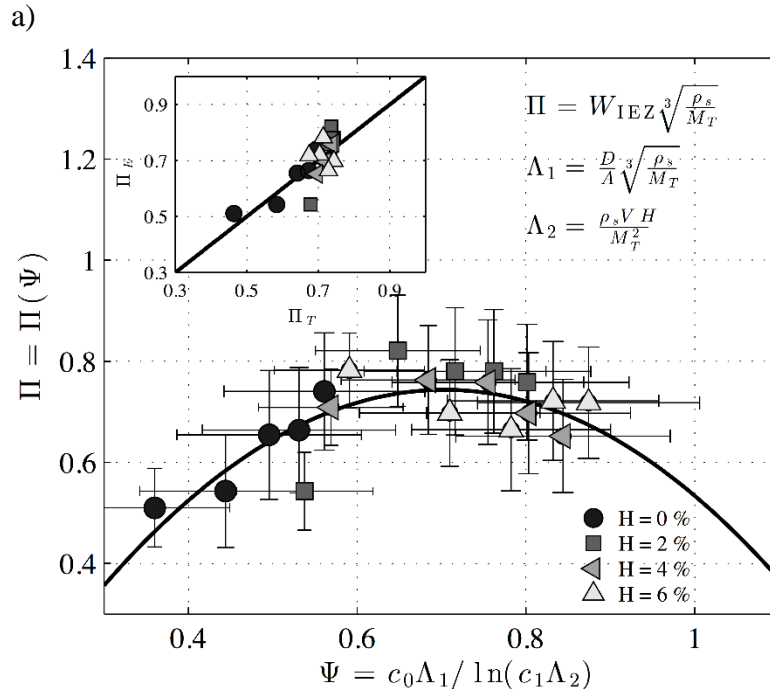
In this way, the models found explain a different percentage of variability. But for the H_{IEZ} case 95% of the experimental Π total variation is explained by the proposed model. Moreover, we have used errors propagation for to determinate the experimental error that has been produced in the trials.

4.1.2 Mathematic model for extraction from two drawpoints - EZ

The mathematical model proposed for EZ was obtained using the methodology detailed in the first section. The Eqs (4.12) and (4.14) are identical, nonetheless the fit coefficients have taken different values. The empirical relation ΨW_{EZ} (width model) has two constants C_0 : -1.09×10^2 and C_1 : 2.233×10^{-7} , while that ΨH_{EZ} (height model) constants have four C_0 to C_3 , theirs values are 2.833, -0.029 , 0.128 and 1.062×10^3 respectively.

The empirical relation ΨW_{EZ} has fitted by a polynomial function of second – order (Eq. 4.13). This presents adjustment parameters with values very near to ΨW_{IEZ} case (a: -2.379 , b: 3.346 and c: -0.433) (see. Fig 4.2a). On the other hand, for the ΨH_{EZ} fitted we have used the same Eq. (4.15) with parameters as: a: 0.178 , b: 0.169 and c: 0.920 (see. Fig 4.2b). This fit allows to estimate the parameters of the relation theorist values versus experimental, thus the R-square value the models can to explain different percentage of variability between them. The width determination coefficient is 0.6273 and 0.522 for height.

If, the R^2 in two extraction cases are compared, the IEZ models offer a better fit. The explanation is based on experimental error due to water evaporation during the trials. The approximate time in each EZ experiment taken two or three days and the physic model design was not build for to keep the humidity without variation. Additionally, as can be seen in all figures the experimental errors are shown in error bars form.



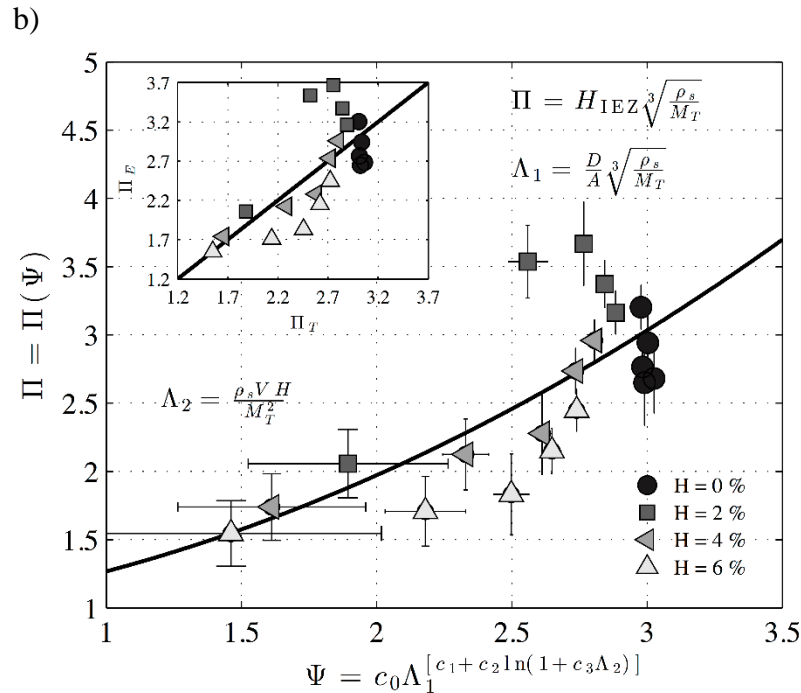


Fig. 4.2: Data fit for Π as a function of the dimensionless group $\Psi = \Psi(\Lambda_1, \Lambda_2)$ Alternate case. The solid black line represents a polynomial function of degree 2. Inside: Experimental Π as a function of Theoretical Π , where the solid black line indicates the identity. a) Width, b) Height

4.2 Conclusions

In order to propose a predictive tool through experimental data, we have determined two mathematical models with different adjustment coefficients for the two extraction cases studied. The IEZ case presents a better model than EZ, owing to a good fit in its R^2 value. The differences between models is based on an experimental error due to water evaporation during the trials, nevertheless the models may calculate an approximate ellipsoid geometry under certain parameters involved in the mine caving, thus they shall be used for design purposes and ore recovery percentages can be improved.

Bibliography

- Barenblatt, G. I. (1996). Scaling, self-similarity, and intermediate asymptotics: dimensional analysis and intermediate asymptotics (Vol. 14). Cambridge University Press.
- Campos, I., Torres, R., Ramirez, G., Ganem, R., & Martínez, J. (2006). Growth kinetics of iron boride layers: Dimensional analysis. *Applied Surface Science*, 252(24), 8662-8667.
- Dehghani, H., & Ataee-Pour, M. (2011). Development of a model to predict peak particle velocity in a blasting operation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(1), 51-58.
- Gibbings, J. C. (2011). Dimensional analysis. Springer Science & Business Media.
- Langhaar, H. L. (1951). Dimensional analysis and theory of models (Vol. 2). New York: Wiley.
- Ruzicka, M. C. (2008). On dimensionless numbers. *Chemical Engineering Research and Design*, 86(8), 835-868.

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

El análisis de similitud realizado, muestra que el material fragmentado fino está sujeto a fuerzas interparticulares, como las fuerzas capilares en un 48% y las fuerzas de Van de Waals afectan al 16% del material. Por lo tanto, para mantener las características del material presente en la mina, el medio experimental no fue escalado.

Los resultados muestran que dentro del set experimental, las variables con mayor efecto en la geometría de las zonas de flujo son la humedad y la masa de extracción acumulada. Así los diámetros obtenidos con material húmedo indican que el valor máximo se alcanza a una menor masa de extracción acumulada en comparación con el que genera el material seco. En este contexto, el análisis de las pendientes en el incremento del diámetro como función de la masa de extracción, el valor máximo de 33% se encontró en el experimento con 0% de humedad. Esto indica que el incremento del diámetro podría continuar a media que se extrae mayor cantidad de mineral. Por otro lado, las pendientes para los ensayos con humedad son menores y oscilan entre 2 y 21% por lo que la geometría del flujo adopta una forma similar a un cilindro, en donde el diámetro adquiere un valor máximo y la altura se propaga a lo largo de la columna de mineral.

Además se determinó un cambio en las características del material bajo un contenido de agua del 6%. La resistencia del material aumentó debido al efecto de la humedad sobre la arena que produjo una cohesión aparente. La evidencia de lo mencionado fue una colgadura superior sobre la batea en forma de un arco cohesivo que evitó el libre flujo del material. Adicionalmente, el análisis del ensayo proctor modificado (ASTM D1557) estableció una humedad óptima de 6.3% en donde el material podría presentar su mayor resistencia. Con este valor se explica que la formación del arco cohesivo es el efecto del contenido de humedad que se encuentra muy cerca a la óptima y altera las características resistentes del material fragmentado fino.

Con el objetivo de establecer la implicancia en el diseño minero, los diámetros experimentales fueron escalados y proyectados sobre mallas de extracción amplias (34 x 17 [m]). Se observó que los elipsoides cumplen con la teoría de interacción dentro de la batea pero no entre ellas. De esta forma se produce material aislado y que en dependencia del ambiente de esfuerzos propios del macizo rocoso y el factor tiempo durante la extracción, podría compactarse generando mineral inmóvil que como consecuencia afecta a la recuperación minera.

Por otro lado, para comparar los valores sugeridos por Laubscher mediante su guía de diseño empírica, obtuvimos una relación adimensional entre los diámetros experimentales de flujo aislado y el ancho del punto de extracción. Los valores se encuentran en un rango entre 2.68 – 3.03, dentro del rango establecido por Laubscher (2.17 – 3.00). Sin embargo como ya se señaló, los diámetros producidos en material seco podrían incrementarse y consecuentemente esta relación también. Así, el ancho de la zona flujo generado por material fino podría ser mayor a la que se indica en esta guía de diseño.

Las interferencias ocurridas durante los experimentos, en términos de índice de frecuencia de colgaduras para los dos casos de extracción no distan significativamente entre sí. Los eventos se encuentran entre 5.54 y 7.02 [colgaduras/kton], mientras que los valores reales obtenidos en puntos de extracción asociados a material fino y humedad de mina Esmeralda están en un rango de 3.20 - 5.60 [colgaduras/kton]. La aproximación entre los datos reales y los obtenidos mediante el modelo físico, se debe a que la relación (flow factor) entre la carga vertical sobre la batea y la resistencia del material en términos de cohesión es similar en los dos casos (modelo físico y prototipo).

Respecto a los modelos matemáticos propuestos para determinar el ancho y altura de los elipsoides, han considerados algunas variables relevantes en la minería de caving como fragmentación del material y distintos porcentajes de humedad. Los valores de ajuste de estos modelos muestran diferencias en función al tipo de extracción, desde uno o dos puntos. El mejor R^2 , para la altura y diámetro es para el caso de la extracción aislada en donde el modelo explica el 95% de la variabilidad entre los datos experimentales y teóricos. Sin embargo para la extracción alternada los modelos no sobrepasan un coeficiente de determinación de 0.62. Este valor se justifica por un posible error experimental asociado, debido al periodo de tiempo que llevó la realización de los ensayos y los cambios de humedad en el modelo físico no podía ser controlado. No obstante las ecuaciones propuestas conllevan un modelo científico y para la minería podrían ser una herramienta de aproximación para efecto de diseño.

Finalmente, es importante destacar que el efecto de no escalar el material añade una distorsión a la investigación. Por lo que existe una limitación en el estudio del flujo gravitacional en material fino para representar todas las características del prototipo. Sin embargo, hemos propuesto un modelo físico y considerado algunas suposiciones que han permitido obtener una versión simplificada del problema. Así, los resultados obtenidos son una aproximación que permite una mejor comprensión en el flujo de material fino bajo condiciones de humedad.

5.2 Trabajo Futuro

Escasos estudios experimentales se encuentran en la bibliografía sobre el estudio de flujo gravitacional en material fino. Durante varios años se ha utilizado a la arena como medio en el modelamiento físico, no obstante esta ha sido escala con el objetivo de estudiar el flujo en material grueso. Esta investigación presenta nuevos hallazgos sobre el comportamiento del flujo gravitacional en material fino considerando diferentes porcentajes de humedad, sin embargo una serie de preguntas abiertas siguen sin resolverse en este campo, por lo tanto, sería recomendable continuar con esta línea de investigación. Así, para próximos estudios en modelos físicos es necesario incorporar otras variables en la configuración experimental con el objetivo de tener una representación más cercana al prototipo.

Por otro lado, se conoce que existen otros parámetros que influyen en la geometría de la zona de flujo, por lo que sería adecuado plantear un set experimental con distintas dimensiones para el punto de extracción y batea que se ocupen actualmente en diseños operacionales.

Adicionalmente para analizar la implicancia de la geometría en el diseño, se debe estudiar no sólo la interacción en la batea sino también la interacción entre estas en la búsqueda de una estrategia de extracción considerando múltiples puntos. Finalmente para validar los resultados experimentales se requieren de datos obtenidos mediante la instalación de marcadores para la determinación de las zonas de flujo en material fino a escala mina.

En relación al material a utilizar en futuros experimentos bajo condiciones de humedad, si es proveniente de la mina, se recomienda previamente realizar un análisis mineralógico como difracción de rayos x para determinar el tipo de minerales en término de arcillas y así explicar el comportamiento del material en función a sus propiedades como superficie específica, poder absorbente, plasticidad y cohesión.

De forma análoga a los modelos matemáticos propuestos para la definición de la geometría de las zonas de flujo, se podría establecer un modelo para la predicción de índices de frecuencia de colgaduras, en donde un objetivo para esta línea de investigación sería añadir parámetros basados en las propiedades del material fino como cohesión, ángulo de fricción y resistencia.

BIBLIOGRAFÍA

- Barenblatt, G. I. (1996). Scaling, self-similarity, and intermediate asymptotics: dimensional analysis and intermediate asymptotics (Vol. 14). Cambridge University Press.
- Beus, M. J., Pariseau, W. G., Stewart, B. M., & Iverson, S. R. (2001). Design of ore passes. *Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies*, 627-634.
- Brown, E T, (2007). Block caving geomechanics, 2nd edn. Julius Kruttschnitt Minerals Research Centre, The University of Queensland: Brisbane.
- Campos, I., Torres, R., Ramirez, G., Ganem, R., & Martínez, J. (2006). Growth kinetics of iron boride layers: Dimensional analysis. *Applied Surface Science*, 252(24), 8662-8667.
- Castro, R., Trueman, R., & Halim, A. (2007). A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(6), 860-870.
- Castro, R. (2007). Study of the mechanisms of gravity flow for block caving. PhD Thesis, the University of Queensland, Brisbane, Australia.
- Castro, R., & Pineda, M. (2015). The role of gravity flow in the design and planning of large sublevel stopes. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(2), 113-118.
- Castro, R., Gómez, R., Casali, A., & Hekmat. (2016). Experimental and comminution model framework for secondary fragmentation prediction in Block Caving. In *Proceedings of MassMin*. Sydney, Australia. P. 175 - 181
- Castro, R. L., Basaure, K., Palma, S., & Vallejos, J. (2017). Geotechnical characterization of ore related to mudrushes in block caving mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(3), 275-284.
- Chileshe, P. R. K., & Phiri, S. N. (1994). New production from " exhausted" block-caving areas at Nchanga Mine. *Mining*, 1, 237-245.
- Chitombo, G. P. (2010). Cave mining: 16 years after Laubscher's 1994 paper 'Cave mining—state of the art'. *Mining Technology*, 119(3), 132-141.
- Craig, R. F., 2004. *Soil Mechanics*, 7th, Spon Press: New York.
- Dehghani, H., & Atae-Pour, M. (2011). Development of a model to predict peak particle velocity in a blasting operation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(1), 51-58.
- Flores, G., & Karzulovic, A. (2002). Geotechnical guidelines for a transition from open cut to underground mining: benchmarking report. Project ICSII, Task, 4.
- Fuentes, R. (1996). “Apéndice 1: Consideraciones sobre Similitud y Escalamiento”, CMM, Apéndices informe final PB5: “Similitud Física del Flujo gravitacional”, Santiago, Chile

- Garcés, D., 2015. Estudio de flujo gravitacional de material hundido por medio de trazadores inteligentes. Memoria Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Chile.
- Gibbings, J. C. (2011). Dimensional analysis. Springer Science & Business Media.
- Heslop, T. G. (2000). Block caving—controllable risks and fatal flaws. In Proc. Massmin Conf., Brisbane (pp. 280-291).
- Irribarra, S. (2014). Estudio experimental de migración de finos en minería de caving. Memoria de Ingeniería Civil de Minas. Universidad de Chile, Chile.
- Israelachvili, J.N., Intermolecular and surface forces: revised third edition. 1991
- Jenike, A. W. (1967). Quantitative design of mass-flow bins. Powder Technology, 1(4), 237-244.
- Kane, J. W., & Sternheim, M. M. (1991). General physics. John Wiley and Sons.
- Kvapil, R. (1965, September). Gravity flow of granular materials in Hoppers and bins in mines—II. Coarse material. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 2, No. 3, pp. 277-292). Pergamon.
- Hustrulid, W., & Kvapil, R. (2008). Sublevel caving—past and future. In Proceedings 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, MassMin (pp. 107-132).
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). Soil mechanics. Massachusetts institute of technology.
- Langhaar, H. L. (1951). Dimensional analysis and theory of models (Vol. 2). New York: Wiley.
- Laubscher, D. H. (1994). Cave mining - the state of the art. Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 94(10), 279-293.
- Laubscher, D. H. (2000). A practical manual on block caving. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Brisbane.
- Marano G., (1980). The interaction between adjoining drawpoints in free flowing materials and its application to mining, pp. 25-32, Chamber of Mines Journal, Zimbabwe.
- McCormick, R. J. (1968). How wide does a drawpoint draw?. EMJ, Greighton Mine, Ontario, Canada, 106-116.
- Olivares, D., Castro, R., & Hekmat, A. (2015, November). Influence of Fine Material, Humidity and Vertical Loads on the Flowability of Caved Rock. In 49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
- Nase, S. T., Vargas, W. L., Abatan, A. A., & McCarthy, J. J. (2001). Discrete characterization tools for cohesive granular material. Powder Technology, 116(2), 214-223.
- Pariseau, W. G. (1966). The gravity induced movement of materials in ore passes analyzed as a problem in Coulomb plasticity (Doctoral dissertation, University of Minnesota.).
- Peters, D.C., (1984). "Physical modeling of the draw behavior of broken rock in caving", Quarterly of the Colorado School of Mines, vol 79 no 1.

- Pineda, M. (2012). Study of the gravity flow mechanisms at Goldex by means of a physical model. Tesis de Magíster en minería. Universidad de Chile, Chile.
- Pöschel, T., Salueña, C., & Schwager, T., (2002). Scaling properties of granular materials, *Physical Review E - Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics*, 64:011308.
- Power, G. R. (2004). Modelling granular flow in caving mines: large scale physical modelling and full scale experiments.
- Ruzicka, M. C. (2008). On dimensionless numbers. *Chemical Engineering Research and Design*, 86(8), 835-868.
- Seville, J. P. K., Willett, C. D., & Knight, P. C. (2000). Interparticle forces in fluidisation: a review. *Powder Technology*, 113(3), 261-268.
- Susaeta A., (2004). Theory of gravity flow (Part I), *Proceedings of MassMin2004*, pp. 167-172, Santiago, Chile.
- Susaeta A., (2004). Theory of gravity flow (Part II), *Proceedings of MassMin2004*, pp. 173-178, Santiago, Chile.
- Troncoso, S. (2006). Simulation of operational interferences impact on production planning (Doctoral dissertation, Thesis. Santiago, Chile, Universidad de Chile. (In Spanish).
- Trueman, R., Castro, R., & Halim, A. (2008). Study of multiple draw-zone interaction in block caving mines by means of a large 3D physical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(7), 1044-1051.
- Van As, A., & Van Hout, G. J. (2008). Implications of widely spaced drawpoints: MassMin2008. In H. Schunnesson, & E. Nordlung (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining*.
- Whiteman D., (2010). The smart market system – a new tool for measuring underground orebody flow in block and sublevel mines, in *Proceedings Second International Symposium on Block and Sublevel Caving* (ed: Y Potvin), pp 603-621 (Australian Centre for Geomechanics: Perth)