



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

MODELAMIENTO NUMÉRICO DE BOMBEO DE FINOS PARA APLICACIONES EN
MINERÍA DE BLOCK CAVING

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA

CARLOS OSIEL SEBASTIÁN VALDÉS FLORES

PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ

PROFESOR CO-GUÍA
RENÉ GÓMEZ PUIGPINOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
KIMIE SUZUKI MORALES
LENIN ARANCIBIA GUEVARA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Advanced Mining Technology Center

SANTIAGO DE CHILE

2023

MODELAMIENTO NUMÉRICO DE BOMBEO DE FINOS PARA APLICACIONES EN MINERÍA DE BLOCK CAVING

Los bombeos de fino son problemas de seguridad en faenas de block y panel caving alrededor del mundo, definiéndose como entradas súbitas de material fino y seco desde puntos de extracción. Desde un punto de vista histórico, Palabora es una de las primeras operaciones de caving en registrar estos eventos a fines del año 2006. Posteriormente, se tuvieron registros en Ridgeway Deeps (2014 - 2015) y Cadia East PC1 (2016).

El objetivo de este trabajo es la cuantificación de la influencia de la geometría de un Punto de Extracción sobre la magnitud de un bombeo de finos, la cual fue medida a través de indicadores como tonelaje desplazado, velocidad de flujo y capacidad de arrastre de colpas.

Para lograr el objetivo, las principales actividades de este trabajo fueron: (1) revisión crítica de la literatura, donde se demuestra la abundancia de faenas con registros de bombeo de finos, (2) reconocimiento de mecanismos de bombeo de finos y definición de evento característico, (3) calibración del modelo numérico en base al evento característico, (4) estudio de la influencia de la geometría del punto de extracción y (5) concluir y recomendar estudios posteriores.

Respecto del modelamiento numérico, la calibración se realizó en base a un evento característico registrado en Ridgeway Deeps, obteniéndose un error de simulación de 1% en el ítem de tonelaje desplazado (simulado: 257 [t], registrado: 260 [t]). Posterior a ello, se evaluó la geometría del punto de extracción, desde dos perspectivas: altura de la visera o brow-beam y ancho del punto de extracción. A partir de los resultados se determinó que:

- Una disminución de la visera en 1 [m] implicó un aumento de la magnitud expresada en tonelaje de 46% (simulado: 374 [t], base: 257 [t]). A su vez, incrementar la visera en 1 [m] implicó una reducción de la magnitud en un 51% (simulado: 125 [t], base: 257 [t]).
- Una disminución del ancho del punto de extracción de 1 [m] en cada pared implicó una disminución de la magnitud del evento de 25% (simulado: 193 [t], base: 257 [t]).

Además de lo anterior, se derivó la máxima magnitud esperada de un bombeo de finos para cada geometría de punto de extracción, lo cual se consiguió variando la cantidad de fino disponible.

A partir de este estudio se concluye sobre la relevancia de la geometría del punto de extracción en la magnitud de los eventos y su uso como medida de control. A su vez, se recomienda aplicar la metodología descrita en este trabajo en operaciones activas de modo de anticipar y controlar la magnitud esperada de un bombeo de finos.

NUMERICAL MODELLING OF INRUSH OF FINES FOR BLOCK CAVING APPLICATIONS

Inrush of fines are safety issues in block/panel caving mines around the world. These events are defined as sudden inflows of fine and dry material from extraction points. Historically, first events were registered in Palabora in late 2006, where lithological test concluded that fines came from the upper open pit mine. Later, there were records in Ridgeway Deeps (2014-2016) where the fines were associated to the upper Sublevel Cave mine, and Cadia East PC1 (2016) where the fines were associated to the shearing between broken mineral and the surrounding rock mass.

The focus of this study is the quantification of the drawpoint geometry influence on the inrush of fines events magnitude, measured through indicators like tonnage displaced, flow velocity and coarse fragments transportation.

The main activities of this work were: (1) exhaustive literature review, demonstrating the number of records of inrush of fines in several caving mines, (2) mechanisms associated to inrush of fines and definition of the base-event for calibration, (3) calibration of the numerical model, (4) analysis of the relation between drawpoint geometry and magnitude of the events, and (5) conclude and recommend future analysis.

Respect to the numerical model, calibration was based on a well-documented inrush of fines event recorded in Ridgeway Deeps, and the simulation error was 1% in terms of tonnage displaced (simulated: 257 [t], recorded: 260 [t]). Then, drawpoint geometry was analyzed in two areas: height of the brow-beam, and width of the drawpoint. The results indicated that:

- 1 [m] reduction of the height of the brow-beam implied a 46% increase of tonnage displaced (simulated: 374 [t], base: 257 [t]). On the other hand, 1 [m] increase of the brow-beam implied a 51% reduction of the tonnage (simulated: 125 [t], base: 257 [t]).
- 1 [m] reduction in each side of the drawpoint implied a 25% reduction of the tonnage displaced (simulated: 193 [t], base: 257 [t]).

Also, maximum expectable magnitude of an inrush of fines was obtained for each drawpoint geometry, through the variation of the amount of fines available at the drawpoint.

From this work, the relevance of the drawpoint geometry on the magnitude of inrush of fines and its application as a control strategy was concluded. Also, it was recommended to apply this methodology in active caving mines to foresee and control expectable magnitude of inrush of fines events.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Objetivo general | 2 |
| 1.2. Objetivos específicos..... | 2 |
| 1.3. Alcances | 2 |
| 1.4. Marco teórico | 3 |
| 1.4.1. Definición de materiales finos | 3 |
| 1.4.2. Bombeos de fino en Palabora Block Cave Lift 1 | 4 |
| 1.4.3. Bombeos de fino en Mt Wright, Australia | 5 |
| 1.4.4. Bombeos de fino en Ridgeway Deeps | 8 |
| 1.4.5. Bombeos de fino en Cadia East PC1-S1 | 10 |
| 1.4.6. Fuentes de material fino | 10 |
| 1.4.6.1. <i>Material proveniente de operaciones de caving superiores</i> | 11 |
| 1.4.6.2. <i>Material proveniente de un rajo</i> | 11 |
| 1.4.6.3. <i>Fuentes naturales</i> | 11 |
| 1.4.6.4. <i>Acumulación por migración de finos</i> | 12 |
| 1.4.6.5. <i>Fragmentación secundaria</i> | 12 |
| 1.5. Herramienta utilizada | 13 |
| 1.5.1. Funcionamiento de ESyS-Particle | 13 |
| 1.5.2. Comparación con otros software | 14 |
| 1.6. Estructura de la tesis..... | 16 |
| 2. Publicación 1..... | 17 |
| 3. Conclusiones generales | 38 |
| 4. Bibliografía | 39 |
| Anexos..... | 43 |
| Anexo A: Currículum Vitae del estudiante | 43 |
| Anexo B: Comprobante de presentación a revista | 46 |
| Anexo C: Perfil de material depositado | 48 |
| Anexo D: Vista en planta de material depositado | 51 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Declaración de materiales finos | 3 |
| Tabla 2 Principales micro parámetros utilizados por ESyS Particle..... | 13 |
| Tabla 3 Software tipo DEM disponibles | 15 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: PE en Palabora cerrados por bombes de fino/agua-barro. Puntos de extracción totales: 290. PE cerrados: 27 (morado). PE en riesgo de cierre: 19 (rojo) (Pretorius & Ngidi, 2008) | 5 |
| Figura 2: Vista frontal de bombeo de fino en Mt Wright (Long et al., 2017)..... | 5 |
| Figura 3: Spraymec enterrado por bombeo de fino (Long et al., 2017)..... | 6 |
| Figura 4: LHD R2900 enterrado por bombeo de fino (Long et al., 2017) | 6 |
| Figura 5: Primer mecanismo de bombeo de fino en Mt Wright. 1) Posición natural del mineral. 2) Mineral auto-soportado. 3) Esguerramiento de mineral | 6 |
| Figura 6: Abanico deficientemente perforado y cargado con eventual riesgo de "Bridge"/colgadura (Long et al. 2017)..... | 7 |
| Figura 7: "Bomb chucker" en Mt Wright (Long et al. 2017)..... | 7 |
| Figura 8: Water cannon atrapado en rill, Ridgeway Deeps (NSW Department of Industry 2017) .. | 8 |
| Figura 9: Inrush of fines alcanza calle de producción, Ridgeway Deeps. Material seco con manchas de humedad asociadas al agua para supresión de polvo (NSW Department of Industry 2017)..... | 9 |
| Figura 10: Equipo siniestrado en accidente fatal producto de bombeo de finos, Ridgeway Deeps (NSW Department of Industry 2017)..... | 9 |
| Figura 11: Disposición superficial de eventos de bombeo de finos en Cadia East PC1-S1 (Lett et al., 2022)..... | 10 |
| Figura 12: Yacimiento Inca de Oro (Soto 2010)..... | 11 |
| Figura 13: Interacción básica entre dos partículas dentro de ESyS-Particle..... | 13 |
| Figura 14: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 7 [m]..... | 48 |
| Figura 15: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 15 [m]..... | 48 |
| Figura 16: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 30 [m]..... | 48 |
| Figura 17: Perfil de flujo, Brow-beam: 1 [m], Altura de finos: 7 [m]..... | 48 |
| Figura 18: Perfil de flujo, Brow-beam: 1 [m], Altura de finos: 15 [m]..... | 49 |
| Figura 19: Perfil de flujo, Brow-beam: 1 [m], Altura de finos: 30 [m]..... | 49 |
| Figura 20: Perfil de flujo, Brow-beam: 3 [m], Altura de finos: 7 [m]..... | 49 |
| Figura 21: Perfil de flujo, Brow-beam: 3 [m], Altura de finos: 15 [m]..... | 49 |
| Figura 22: Perfil de flujo, Brow-beam: 3 [m], Altura de finos: 30 [m]..... | 49 |
| Figura 23: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 7 [m], Ancho PEX: 3 [m] | 50 |
| Figura 24: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 7 [m], Ancho PEX: 3 [m] | 50 |

| | |
|---|----|
| Figura 25: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 15 [m], Ancho PEX: 3 [m] | 50 |
| Figura 26: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 30 [m], Ancho PEX: 3 [m] | 50 |
| Figura 27: Vista en planta, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 7 [m]..... | 51 |
| Figura 28: Vista en planta, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 15 [m]..... | 51 |
| Figura 29: Vista en planta, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 30 [m]..... | 51 |
| Figura 30: Vista en planta, Brow-beam: 1 [m], Altura de finos: 7 [m]..... | 52 |
| Figura 31: Vista en planta, Brow-beam: 1 [m], Altura de finos: 15 [m]..... | 52 |
| Figura 32: Vista en planta, Brow-beam: 1 [m], Altura de finos: 30 [m]..... | 52 |
| Figura 33: Vista en planta, Brow-beam: 3 [m], Altura de finos: 7 [m]..... | 53 |
| Figura 34: Vista en planta, Brow-beam: 3 [m], Altura de finos: 15 [m]..... | 53 |
| Figura 35: Vista en planta, Brow-beam: 3 [m], Altura de finos: 30 [m]..... | 53 |
| Figura 36: Vista en planta, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 7 [m], Ancho PEX: 3 [m]..... | 54 |
| Figura 37: Vista en planta, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 15 [m], Ancho PEX: 3 [m]..... | 54 |
| Figura 38: Vista en planta, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 30 [m], Ancho PEX: 3 [m]..... | 54 |

1. Introducción

Block Caving es un método de minería masiva que permite alcanzar elevados ritmos de producción a bajos costos (Chitombo, 2019). Es por esta razón que el método es especialmente aplicable a cuerpos minerales de grandes dimensiones, equi-dimensionales y de baja ley.

Block Caving fue implementado inicialmente en roca secundaria oxidada, poco competente y de alta ley, mediante las técnicas de parrillas y parrillas-scapper, hace más de un siglo. A partir de los años 70's las operaciones más profundas de Block Caving comenzaron a adentrarse en roca competente (Chacón et al., 2004) lo cual trajo consigo importantes desafíos para la productividad de las operaciones.

Dentro de los riesgos geotécnicos y geomecánicos más comunes se tiene a los bombeos de agua-barro, colapsos, sismicidad, estallidos de roca, deformación de galerías y air-blast (Flores-González, 2019). A lo anterior se pueden agregar interferencias a la producción por colgaduras, sobre tamaños y reparación de viseras. Un nuevo peligro geomecánico se he registrado en varias minas de Block y Panel Caving, denominado bombeo de finos o inrush of fines.

De acuerdo con la revisión bibliográfica, existen al menos dos mecanismos desencadenantes de bombeos, los cuales son (Long et al., 2017):

- 1) Autosporte de material fino en un punto de extracción con posterior desestabilización y flujo.
- 2) Colgadura de gruesos bajo una masa de finos, con posterior desestabilización y flujo.

Este trabajo de tesis está orientado al segundo mecanismo, en donde se busca profundizar este concepto, desarrollar una herramienta que permita modelar y cuantificar la magnitud de un evento de este tipo, y finalmente, utilizar esta herramienta para comprender la relación entre magnitud de bombeo de finos y geometría del punto de extracción.

1.1. Objetivo general

Cuantificar el impacto de la geometría del punto de extracción sobre la magnitud de eventos de bombeo de finos relacionados al mecanismo de descuelgue de zanjas, utilizando herramientas numéricas.

1.2. Objetivos específicos

Las actividades fundamentales de este trabajo de título son los siguientes.

1. Revisión exhaustiva de la literatura y definición de evento representativo.
2. Construcción y calibración de un modelo numérico basado en elementos discretos.
3. Modificación de la geometría del punto de extracción, ancho y altura efectiva.
4. Modificación de la cantidad de fino disponible para fluir (sobre la colgadura).
5. Cuantificación de la magnitud de los eventos según distancia recorrida, tonelaje, velocidad de flujo, ángulos de deposición del material y eventual arrastre de rocas de grandes dimensiones.

1.3. Alcances

Las limitaciones de este estudio son las siguientes:

1. Revisión bibliográfica acotada, dado que no todas las operaciones mineras publican información respecto de bombeo de finos.
2. Uso de modelamiento numérico dado el beneficio en términos de tiempo de construcción y paralelismo respecto de escenarios de simulación.
3. Se analiza 1 mecanismo desencadenante de bombeos de fino. A través de la revisión bibliográfica se reconocen 2 mecanismos.
4. Se realiza una calibración del modelo numérico en base a un evento de bombeo de finos representativo. Dicha calibración considera la geometría de punto de extracción relacionada al evento característico y también una determinada cantidad de fino disponible, la cual está parametrizada por una altura medida desde la visera.
5. Con el fin de independizar la variable de cantidad de fino disponible respecto de los resultados, se analizaron otras dos cantidades de fino, todas parametrizadas por su altura medida desde la visera. Este análisis permitió, a su vez, derivar la magnitud máxima esperada de un evento de bombeo de finos.

1.4. Marco teórico

Los principales peligros geomecánicos que enfrentan hoy las operaciones de caving son: bombes de agua-barro, colapsos, eventos sísmicos, estallidos de roca, deformación de galerías y air-blast. Estos peligros cuentan con una historia ampliamente documentada, por ejemplo, los primeros estallidos de roca datan de 1976 en Teniente Sub6 (Sociedad Nacional de Minería, 1990), y los bombes de agua barro datan de finales del siglo XIX en Kimberly mine, Sudáfrica (Butcher et al., 2000).

El bombeo de finos es un tipo de peligro geomecánico, caracterizado por el flujo descontrolado de material fino y seco desde puntos de extracción (Pretorius & Ngidi, 2008), y capaz de transportar fragmentos de grandes dimensiones. A su vez, es un fenómeno nuevo en el marco de la industria minera dado que los primeros registros datan del año 2006 en la mina Palabora.

Cada operación con experiencia en estos eventos tiene su propia definición de materiales finos, lo cual se aborda en el siguiente apartado.

1.4.1. Definición de materiales finos

De acuerdo con la revisión bibliográfica, En la Tabla 1 se presenta un compilado de definiciones de materiales finos en minas en operación y también en estudios de flujo gravitacional.

Tabla 1 Declaración de materiales finos

| Operación/Estudio | Propietario/Autor | Método | Escala (solo para estudios) | Máx. Tamaño fino [cm] | Referencia |
|--|-------------------------------------|--------|-----------------------------|-----------------------|---------------------|
| A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model | R. Castro, R. Trueman, R. Halim, A. | PC/BC | 1:30 | 30 | Castro et al., 2007 |
| Esmeralda (El Teniente) | CODELCO Chile | PC | - | 5 | Sánchez, 2017 |
| Diablo Regimiento (El Teniente) | CODELCO Chile | PC | - | 7 | Sánchez, 2017 |
| Experimental quantification of hang up for block caving applications | R. Castro, R. Gómez, R. Hekmat, A. | PC/BC | 1:75 | 30 | Castro et al., 2016 |
| Cuantificación del riesgo de ingreso de agua barro en El Teniente | Á. Pérez | PC/BC | Numerical modelling | 25 | Pérez, 2017 |

| Operación/Estudio | Propietario/Autor | Método | Escala (solo para estudios) | Máx. Tamaño fino [cm] | Referencia |
|-------------------------|-------------------------------------|---|--------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Palabora Lift 1 | H. Paetzold, P. Lourens, R. Brazier | PC | - | 1 | Paetzold et al., 2020 |
| Ridgeway Deeps | Department of Industry, NSW | BC | - | 1 (d50) | NSW Dep. of Industry, 2017 |
| Pipa Norte Extensión HW | F. Hidalgo, I. Salinas | PC | - | 25 | Hidalgo & Salinas, 2020 |
| Mt Wright | S. Long, D. Carnovale, L. Louwrens | Sublevel Shrinkage Stopping (SLC variant) | - | 1 | Long et al., 2017 |

A partir de los datos de la Tabla 1, se puede reconocer que los materiales finos se encuentran en el rango 1 [cm] – 30 [cm]. Por esta razón, se ha determinado que un tamaño de 20 [cm] es representativo para este trabajo de tesis.

En los siguientes apartados se da cuenta de algunas operaciones de caving que han evidenciado eventos de bombeo de finos.

1.4.2. Bombeos de fino en Palabora Block Cave Lift 1

Palabora Block Cave es una operación subterránea ubicada bajo el rajo del mismo nombre, en Sudáfrica. En Palabora los “inrush” son considerados como flujos descontrolados de material seco y fino, con un tamaño bajo el centímetro (Paetzold et al., 2020).

Palabora desde 2013 ha cerrado permanentemente puntos de extracción con alta actividad de bombes de fino. Desde 2006 hasta 2020, más de 320 eventos de bombeo de finos y más de 150 eventos de agua-barro han ocurrido en Palabora. Los eventos de bombeo en Palabora tienden a cruzar la calle de producción y alcanzar la pared opuesta (Pretorius & Ngidi, 2008), lo que equivale a una distancia de 13 – 15 [m] (Calder et al., 2000).

La Figura 1 muestra el layout actual de Palabora, con algunos de sus puntos de extracción cerrados por alto riesgo de bombeo de fino.

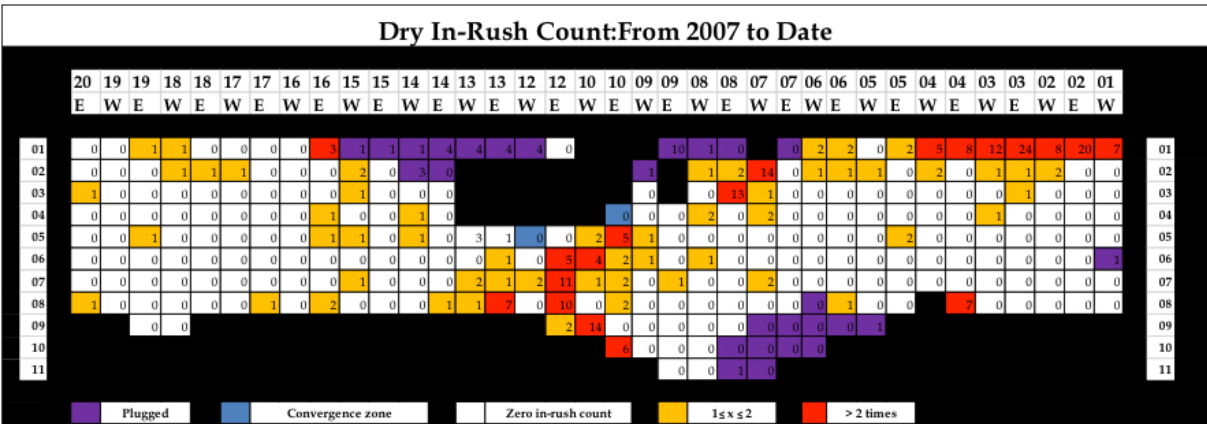


Figura 1: PE en Palabora cerrados por bombes de fino/agua-barro. Puntos de extracción totales: 290. PE cerrados: 27 (morado). PE en riesgo de cierre: 19 (rojo) (Pretorius & Ngidi, 2008)

1.4.3. Bombes de fino en Mt Wright, Australia

Esta operación de Sublevel Shrinkage Stopping (SSS) ha presentado bombes de finos desde el año 2014. De acuerdo con Long et al., (2017), los eventos fueron denominados “Flat Rill Events” y se describieron como flujos inesperados de material fino y seco desde puntos de extracción. El material se caracterizó como ultra fino (“dust”, menos de 1 [cm]) mezclado con partículas gruesas. La Figura 2 muestra una vista frontal de un bombeo de finos registrado en esta operación australiana.



Figura 2: Vista frontal de bombeo de fino en Mt Wright (Long et al., 2017)

Algunos eventos ocurridos en Mt Wright atraparon equipos mineros tales como Spraymec y LHD, tal como se puede apreciar en las Figura 3 y Figura 4, respectivamente.



Figura 3: Spraymec enterrado por bombeo de fino (Long et al., 2017)



Figura 4: LHD R2900 enterrado por bombeo de fino (Long et al., 2017)

De acuerdo con la evidencia, los bombeos de fino en Mt Wright tienen dos mecanismos.

En el primer mecanismo, el mineral fino se auto-soporta en el punto de extracción más allá de su ángulo de reposo y luego, producto de la acción del carguío, se desestabiliza y fluye. En algunos casos, estos eventos abarcan los cruzados de producción y logran alcanzar la calle cabecera. La Figura 5 muestra esquemáticamente este mecanismo.

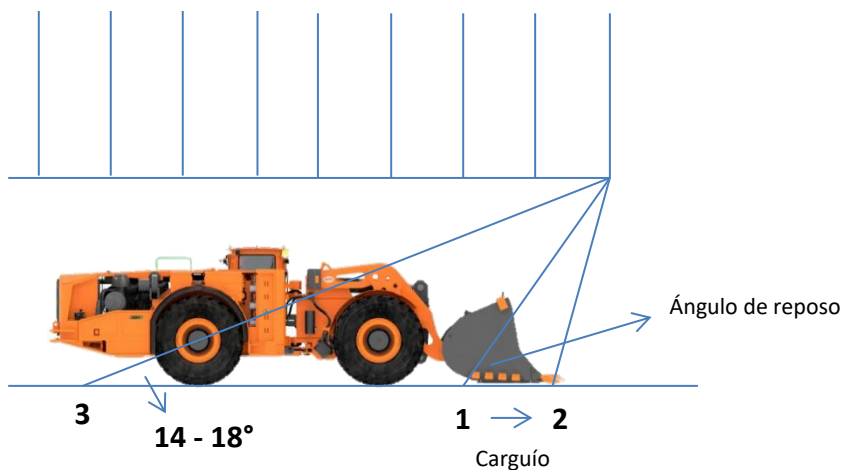


Figura 5: Primer mecanismo de bombeo de fino en Mt Wright. 1) Posición natural del mineral. 2) Mineral auto-soportado. 3) Escorrimento de mineral

Un segundo mecanismo se relaciona a eventos desencadenados por descuelgue de puntos de extracción. Mt Wright utiliza abanicos como unidad básica de explotación y uno de sus desafíos es la eficacia de la perforación y la tronadura, debido a la formación de “Bridges” y colgaduras. Un “Bridge” ocurre cuando el mineral más elevado de un abanico no es fragmentado, resultando en un bloque de mineral in-situ que soporta al estéril superior (Bull & Page, 2000). Por otro lado, las colgaduras ocurren cuando mineral tronado se atasca entre el estéril (ya hundido) y el mineral in-situ (a ser tronado en la siguiente parada).

La forma actual de descolgar es por tronadura, mediante la colocación de un paquete de explosivo o “bomb”. El equipo que se utiliza para este fin es un “Bomb chucker”, el cual es similar a un jumbo con un brazo telescópico adaptado para colocar el paquete de explosivo en la roca. En la Figura 6 se muestra un abanico productivo deficientemente perforado, con el eventual problema de “Bridge” y posible formación de colgadura. En la Figura 7 se muestra el equipo “Bomb Chucker”.

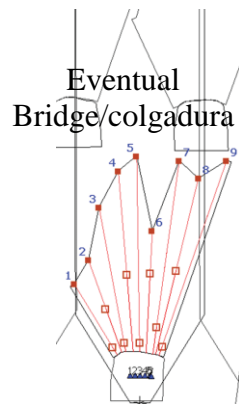


Figura 6: Abanico deficientemente perforado y cargado con eventual riesgo de "Bridge"/colgadura (Long et al., 2017)



Figura 7: "Bomb chucker" en Mt Wright (Long et al., 2017)

1.4.4. Bombeos de fino en Ridgeway Deeps

Ridgeway Deeps es una faena de Block Caving ubicada en Australia. Ésta comenzó su operación en 2010 y desde el 2016 está cerrada (NSW Department of Industry, 2017).

Ridgeway Deeps tuvo un amplio registro de eventos de bombeos de fino, la mayoría de estos asociados a colgadura y uso de equipos de descuelgue, como los water-cannon. A continuación se describe una breve reseña de algunos de estos eventos.

- En Septiembre de 2014 se produjo un bombeo de finos sin intervención de equipos. El material fino alcanzó la calle de producción y se dedujo que éste provenía de la conexión del cave-back con niveles superiores de SLC (Ridgeway Gold).
- En Noviembre de 2014 ocurren dos eventos de gran relevancia. En el primero de ellos el material levanta y arrastra un equipo LHD mientras cargaba, a una distancia de 5 [m] desde el PE. En un segundo evento, el material fluye 2 [m] más allá del bullnose. En ambos eventos el material fino se caracterizó con un d_{50} de 1 [cm].
- En Agosto de 2015 ocurre un bombeo con bajo contenido de finos. El factor desencadenante fue la acción de un water-cannon el cual quedó cubierto por mineral fino y también grandes colpas (ver Figura 8).



Figura 8: Water cannon atrapado en rill, Ridgeway Deeps (NSW Department of Industry, 2017)

- En Septiembre de 2015 un evento alcanza la calle de producción mostrando una altura de 2 [m] en el bullnose. Se constataron gruesos mezclados con el material fino. En la Figura 9 se muestra una fotografía de la calle de producción.

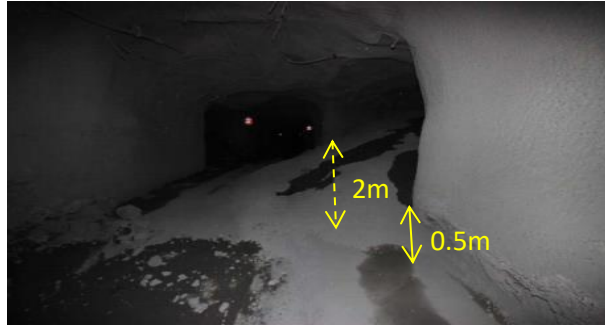


Figura 9: Inrush of fines alcanza calle de producción, Ridgeway Deeps. Material seco con manchas de humedad asociadas al agua para supresión de polvo (NSW Department of Industry, 2017)

- En Septiembre de 2015 ocurre otro bombeo esta vez con consecuencias fatales. De acuerdo con NSW Department of Industry (2017), el evento ocurrió debido a la actividad de descuelgue en el punto de extracción; una gran roca golpeó al equipo descolgador (water-cannon), desplazándolo hacia atrás y éste impactó a su operador. Se reportó una granulometría media del material fino (d_{50}) de 1 [cm], y éste arrastró consigo rocas de 0.5 - 1 [m] de diámetro. La magnitud de evento en términos de tonelaje fue de 260 [ton] y se determinó ángulos de flujo de 7° y 19° hacia el norte y sur, respectivamente, de la calle afectada. La Figura 10 muestra el equipo involucrado.



Figura 10: Equipo siniestrado en accidente fatal producto de bombeo de finos, Ridgeway Deeps (NSW Department of Industry, 2017)

1.4.5. Bombeos de fino en Cadia East PC1-S1

Cadia East es un conjunto de 4 bloques de producción, correspondientes a PC1-S1, PC1-S2, PC2-S1 y PC2-S2, ubicados en Australia y explotados por el método de Panel Caving.

En particular, en PC1-S1 se han registrado más de 550 eventos de bombeo de finos, cuya disposición superficial se detalla en la Figura 11. Para entender la razón del porqué estos registros forman una especie de anillo en el footprint de PC1-S1 se definió el concepto de Cave Back Polygon (CBP) como el área asociada a los puntos de extracción cuya altura de material quebrado supera los 900 [m] desde el Nivel de Hundimiento (Lett et al., 2022).

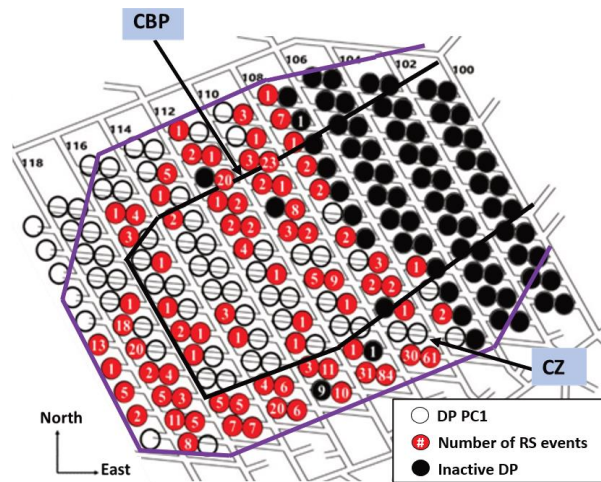


Figura 11: Disposición superficial de eventos de bombeo de finos en Cadia East PC1-S1 (Lett et al., 2022)

Luego, se determinó que el 91% de los registros estuvo asociado a puntos de extracción en el límite o bien fuera del CBP, región que fue denominada Critical Zone (CZ). A partir de esto se infirió que el material fino relacionado a los bombeos es producto de la conminución del mineral dentro de la cavidad y el cizalle producido contra el macizo rocoso estacionario.

En el caso de Cadia East PC1-S1 los eventos de bombeo de finos han estado asociados a los mismos dos mecanismos observados en la mina Mt Wright y que fueron descritos en la Sección 1.4.3.

1.4.6. Fuentes de material fino

En las Secciones 1.4.2, 1.4.3, 1.4.4 y 1.4.5 se presentaron faenas mineras operadas por métodos de caving que han registrado eventos de bombeo de finos, y en cada una de éstas se explicó la procedencia de dicho material.

No obstante, de acuerdo con la revisión bibliográfica se han encontrado otras fuentes de generación de finos y en este apartado se exponen de manera general estas fuentes. Esta sección está basada en el trabajo realizado por Valdés (2020).

1.4.6.1. *Material proveniente de operaciones de caving superiores*

Material fino sobre sectores actualmente explotados es una realidad en muchas faenas de block, panel y sublevel caving. Estos materiales han experimentado fragmentación primaria y secundaria, por lo cual se transforman en una fuente de material fino. Importantes faenas en el mundo, como Diablo Regimiento en El Teniente, E26 Lift2 en Northparkes, Kiruna y la actualmente cerrada Ridgeway Deeps, se caracterizan por operar bajo sectores abandonados que son fuente de material fino.

1.4.6.2. *Material proveniente de un rajo*

Algunas operaciones de caving alrededor del mundo se encuentran bajo un rajo. Por ejemplo, se puede mencionar a Chuquicamata Subterránea, Grasberg Block Cave (GBC) y Palabora. Las paredes de un rajo se transforman en una fuente importante de material de baja competencia, y cuando el hundimiento alcanza la superficie las paredes colapsan y este material cae dentro del cráter. Por ejemplo, en Palabora Block Cave se ha reconocido que el material asociado a los eventos de bombeo de finos proviene del rajo superior (Pretorius & Ngidi, 2008; Diering et al., 2018).

1.4.6.3. *Fuentes naturales*

Ciertos procesos geológicos pueden acumular materiales finos. Por ejemplo, los depósitos aluviales no consolidados y la harina de roca (“gouge”) en fallas o estructuras.

Un ejemplo de depósito no consolidado es Inca de Oro. Este depósito es un pórfido de Cu – Au situado en el norte de Chile. Sobre el pórfido hay una capa de gravas no consolidadas de espesor entre 40 y 200 [m]. Estas gravas tienen origen torrencial y presentan muy baja estratificación (Soto, 2010). En la Figura 12 se muestra una vista en perfil del yacimiento.

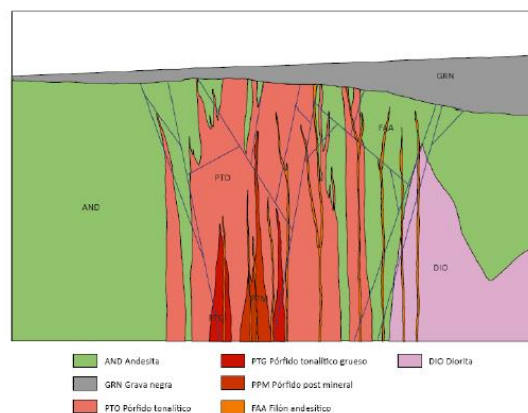


Figura 12: Yacimiento Inca de Oro (Soto, 2010)

El movimiento de fallas geológicas es otro mecanismo de generación natural de finos. Este proceso origina un material llamado “harina de falla” o “fault gouge”, el cual puede presentarse desde tamaño nanométrico hasta centimétrico (Tullis, 2015). El cizalle como generador de material fino también puede encontrarse en minas de caving, específicamente en el contacto del mineral quebrado con el macizo roco insitu (Lett et al., 2022).

1.4.6.4. Acumulación por migración de finos

La migración de finos dentro de la columna de quebrado ocurre gracias a la facilidad de su movimiento en torno a las partículas gruesas (Laubscher, 1994). Los materiales finos se mueven de forma horizontal y vertical junto a los gruesos, sin embargo, al percolar tienden a hacerlo en forma vertical (Pierce, 2010). Dado que los elipsoides de movimiento se vuelven más estrechos cerca de los puntos de extracción, el movimiento horizontal del material quebrado aumenta y los finos se acumulan. El efecto de la acumulación se amplifica cuando el tiraje es disparejo. Pretorius & Ngidi (2008) explican que los eventos de bombeo de fino observados en Palabora entre fines de 2006 y 2008 se originaron solamente en puntos de extracción con bajo tonelaje extraído, aledaños a puntos de extracción con alto tonelaje extraído (HOD).

Desde el punto de vista científico, la migración de finos se ha estudiado en modelos físicos (Bridgwater et al., 1978; Castro, 2007; Pierce, 2010; Armijo, 2014; Arancibia, 2021) y también en modelos numéricos (Leonardi et al., 2008; Pierce, 2010). Arancibia (2021) estudió el proceso de migración de finos a través de modelamiento físico analizando diferentes estrategias de extracción (interactiva y aislada), diferentes cantidades de fino sobre el mineral grueso y diferentes distribuciones granulométricas del mineral caracterizadas por su coeficiente de uniformidad (Craig, 2004) y concluyó que la migración de finos aumenta cuando la extracción es aislada, cuando la cantidad de finos sobre el mineral es mayor y cuando la uniformidad del material de mayor tamaño es menor, esto es, se tiene una curva granulométrica homogénea.

1.4.6.5. Fragmentación secundaria

Pierce et al. (2010) explica tres mecanismos relacionados a la fragmentación secundaria dentro de la cavidad de una mina de caving: impacto tras caer del cave-back, compresión dentro del elipsoide de movimiento y cizalle en la periferia de este elipsoide. Estos mecanismos son responsables de la formación de finos en la cavidad, especialmente los mecanismos de compresión y cizalle.

1.5. Herramienta utilizada

En este trabajo de grado se hace uso de una herramienta numérica y se descarta el modelamiento físico debido a que el primero ofrece ventajas en términos de tiempo de construcción y paralelismo respecto de escenarios a evaluar.

Más particularmente, se hace uso de una herramienta de simulación basada en el Método de Elementos Discretos (DEM), denominada ESyS-Particle. Este software permite representar estructuras complejas, como instalaciones mineras o material fragmentado, a través de una agrupación de esferas, cada una de las cuales es indivisible.

1.5.1. Funcionamiento de ESyS-Particle

El funcionamiento básico de ESyS-Particle consiste en el cálculo de fuerzas en el contacto de dos partículas. Las dos fuerzas más importantes que son calculadas corresponden a las fuerzas normales o de repulsión, y fuerzas tangenciales o de roce. En la Figura 13 se muestran estas dos fuerzas actuando entre dos partículas, cuyos símbolos están definidos en la Tabla 2.

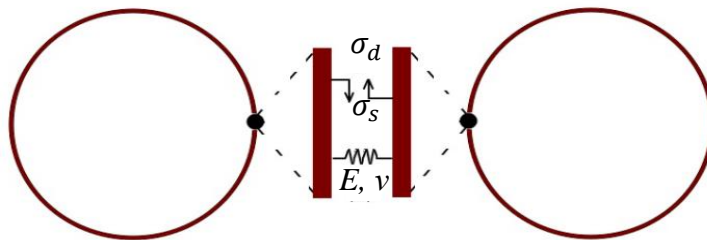


Figura 13: Interacción básica entre dos partículas dentro de ESyS-Particle

Tabla 2 Principales micro parámetros utilizados por ESyS Particle

| Micro parámetro | Descripción |
|---|---|
| Coefficiente de roce dinámico, σ_d | Componente dinámico del roce |
| Coefficiente de roce estático, σ_s | Componente estático del roce. |
| Young modulus, E [Mpa] | Rigidez de la superficie de la partícula. Componente fundamental de la fuerza normal. |
| Poisson ratio, ν | Deformación del material según la carga normal. |
| Viscosity (damping) | Factor de corrección para la acumulación excesiva de energía cinética. |

La determinación de la fuerza neta sobre una partícula en las 3 direcciones del espacio permite el cálculo de una aceleración, la que a su vez se puede integrar para determinar el cambio de velocidad y actualizar la posición en cada dirección. Este procedimiento se realiza tanto para las fuerzas normales como para las fuerzas tangenciales, y en las siguientes líneas se detalla el formulismo para las fuerzas normales.

- a) La fuerza neta normal sobre una partícula se calcula en un tiempo dado “t” usando la Tercera Ley de Newton y considerando todas las partículas en contacto.

$$F_{ij}(t) = -F_{ji}(t)$$

- b) Se determina la Fuerza Neta sobre la partícula en cada dirección del espacio.

$$F_i^{NET}(t) = \sum_{j=1}^N F_{ij}(t)$$

- c) Utilizando la Segunda Ley de Newton, se determina la aceleración normal de la partícula de acuerdo con su masa. En este paso de cálculo se incluye el damping lineal.

$$a_i(t) = \frac{F_i^{NET}(t) - \mu_L * v_i * m_i}{m_i}$$

- d) La velocidad de las partículas es calculada para el siguiente momento del tiempo (t + dt) usando la aceleración recién calculada. Con la velocidad, es actualizada la posición de la partícula.

$$v_i(t + dt) \approx v_i(t) + dt * a_t(t)$$

$$p_i(t + dt) \approx p_i(t) + dt * v_i(t + dt) + \frac{1}{2} dt^2 a_i(t)$$

1.5.2. Comparación con otros software

Además de ESyS-Particle, existen otros software con características similares, los cuales se listan en la Tabla 3; no obstante, se decidió utilizar ESyS-Particle dadas las siguientes ventajas.

- Es de libre acceso.
- Sencilla construcción de modelos y Análisis 3D del movimiento de las partículas.
- Medición de posición, masa, volumen, velocidad, aceleración, fuerza y energía.
- Se puede asignar la cantidad de recursos para su funcionamiento

Tabla 3 Software tipo DEM disponibles

| DEM software | Descripción | Restricción de procesadores | Open – source | Ejemplos |
|---------------|--|-----------------------------|---------------|--|
| ESyS-Particle | ESyS Particle es un software basado en arreglos de partículas esféricas para modelar procesos de deformación, propagación de fracturas, flujo granular y fragmentación. | No | Yes | Ha sido usado para simular hipocentro de terremotos, conminución, flujo en silos y fragmentación de rocas. |
| PFC 3D | PFC modela materiales sintéticos compuestos de partículas de tamaño variable, rígidas, y que interactúan entre ellas. Permite representar materiales sólidos y granulares. | Sí 1 CPU-core | No | PFC es usado para modelar ensayos triaxiales, fracturamiento hidráulico, falla frágil de roca, estabilidad de taludes, flujo de material y propagación del caving. |
| CFD-DEM | FOAM es una versión de libre acceso de CFD que puede simular fluidos en un espacio 3D. | No | Yes | Se ha utilizado para simular transporte de sedimentos. |
| LBM-DEM | LBM se utiliza para representar finos como un medio continuo y también permite la formación de gruesos. | No | No | Se ha utilizado para simular el proceso de migración de finos en block caving. |
| FEM-DEM | FEM es similar a ESyS Particle porque se basa en el cálculo de las fuerzas de contacto entre las partículas. | No | No | Se ha utilizado para simular fragmentación secundaria en una columna de mineral de block caving. |
| Rocky-DEM | Rocky-DEM permite el uso de partículas de forma personalizada e importable, así como la creación de estructuras sólidas y elásticas. | No | No | Se ha utilizado en flujo granular, optimización de procesos y diseño de equipamiento. |

1.6. Estructura de la tesis

La estructura de este trabajo de grado consiste en los siguientes capítulos:

1. Introducción: Donde se describe el problema, se plantean los objetivos y alcances, se realiza una revisión bibliográfica acerca de eventos asociados al estudio, se describe la herramienta a utilizar y se define el material fino considerado.
2. Publicación 1: Resumen del trabajo de grado.
3. Conclusiones generales.
4. Referencias generales.
5. Anexos: Los anexos incluyen dos tipos de información para cada uno de los escenarios evaluados en este trabajo.
 - a. Currículum Vitae del estudiante.
 - b. Comprobante de envío de publicación a revista.
 - c. Vista en planta que incluye zanja y calle de producción. Esta vista permite comprender el alcance del material desde el punto de extracción y también permite evidenciar el arrastre de partículas gruesas.
 - d. Vista de perfil de la calle de producción. Esta vista se obtuvo en el eje de la calle, de modo que estos registros permiten observar el perfil del flujo de mineral y calcular la altura.

2. Publicación 1

Título de la publicación: Numerical modeling of swell rill of fines for block caving applications.

Estado del documento: En revisión. Revista: Rock Mechanics and Rock Engineering. Fecha de envío: 03/03/2023.

Raúl CASTRO¹, Carlos VALDÉS¹, René GÓMEZ^{1,2}

¹ Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile

² Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción

Keywords: caving, fine material, granular material, inrush, mining, risk.

Contribución de los autores:

Carlos Valdés: Investigación, redacción.

Raúl Castro: Guía general del trabajo, corrección.

René Gómez: Redacción, corrección.

NUMERICAL MODELING OF SWELL RILL OF FINES FOR BLOCK CAVING APPLICATIONS

Carlos Valdés¹, Raúl Castro¹, René Gómez²

¹ Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile

² Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción

ABSTRACT

In cave mining, Rill Swell of Fines (RSF) events are outflows of dry fine-grained material from drawpoints. Unfortunately, these events have implied fatal consequences and damage to infrastructures. Nevertheless, there is a lack of reported information about these events. This paper studies the RSF events due to hang-ups using the discrete element method. Here, different drawpoint geometries and the initial mass of fine material are analyzed. The numerical model is constructed and calibrated based on an RSF event reported in Ridgeway Deeps Block Cave. The calibrated model achieved a good adjustment with a 1% of error in tonnage of fine material observed and a similar profile of fine material deposited. It is observed that the brow beam had a noticeable influence on the RSF magnitude, primarily on the tonnage of the material flow, and the distance reached by coarse particles dragged by fine material flow at the extraction drift. Additionally, drawpoint width also highly influenced the RSF magnitude in terms of tonnage, distances, and coarse particles dragged. The study concluded that the drawpoint geometry influenced the expected RSF events independently of the initial mass of fine material over the hang-up. Then, the drawpoint geometry is a parameter that could be designed to minimize risk related to RSF events.

Keywords: caving, fine material, granular material, inrush, mining, risk.

INTRODUCTION

In cave mining, Rill Swell of Fines (RSF) events are uncontrolled outflows of dry fine-grained materials from drawpoints, in which large rocks can also be dragged by the fine material. One of the first reported events was registered in Palabora mine, Block Cave Lift 1, which was described as a fine rush with fine material flowing on air (Pretorius & Ngidi, 2008). Then, from May 2006 to 2020, more than 300 fine rushes occurred in Palabora, and those drawpoints classified as high risk have been closed (Paetzold et al., 2020; Pretorius & Ngidi, 2008).

Additionally, other underground mines have also experienced fine rushes. For example, Ridgeway Deeps mine has experienced these events since September 2014, in which the fine material was recognized as part of the previous Sublevel Caving (SLC) mine above (Department of Industry, 2017). In Australia, Cadia East PC1 has experienced in-rushes of fine material since February 2016 mainly placed at the cave-back boundary projection in the production level (Lett et al., 2022). Also, Mt. Wright mine has experienced in-rushes since May 2014 as a consequence of the

poor performance of ring charging, formation and release of boulders, and fine material release during hang-up removal activities (Long et al., 2017).

According to the literature, RSF events are related to two different mechanisms: (1) removal of hang-ups and (2) slope failure of the material at drawpoint (Long et al., 2017). Removal of hang-up activity generates free space through which large masses of fine material can fall and flow; such as have occurred in Ridgeway Deeps (Department of Industry, 2017), Palabora ((Pretorius & Ngidi, 2008), Mt. Wright (Long et al., 2017), and Cadia East PC1 (Lett et al., 2022). A slope failure mechanism can occur during LHD loading where fine material, located over the drawpoint, is destabilized, and flows out; this kind of event has been recognized at Mt. Wright (Long et al., 2017) and Cadia East PC1 (Lett et al., 2022). Both mechanisms require a previous accumulation of fine material in the drawbell, while the presence of coarse fragments leads to the occurrence of one or another mechanism.

The presence of fine material is critical in caving mines with inrush risk potential. Fine materials can appear due to the mining process, or they can be present in previous mine sectors. Valdés (2020) identified at least four sources of fine material that can be involved in RSF events such as secondary fragmentation, fine material migration, fine material from an open pit, and previous underground mine sectors. These sources can be independently or together to influence fine material available in underground mines.

Secondary fragmentation is the last fragmentation stage that the ore undergoes in the broken column before being extracted from the drawpoints. Here, the rock is mainly fragmented by compression and abrasion (Brown, 2007; Eadie, 2003). Additionally, some authors (Brown, 2007; Dorador, 2016; Laubscher, 2000; Pierce et al., 2010) also include fragmentation by impact, when a rock block falls from the cave-back. Several efforts have been done to estimate these fragmentations (Eadie, 2003; Gómez et al., 2017, 2021; Merino, 1986; Pierce, 2010), which could be used to predict the fine material available in block caving mines.

On the other hand, fines migration is the process that fine materials flow more rapidly than coarse materials inside the broken column and eventually arrive at the drawpoint (Laubscher, 1994). In block caving, this process has been studied mainly through physical modeling (Bridgwater et al., 1978; Castro, 2007; Pierce, 2010; Armijo, 2014; Arancibia, 2021; Castro et al. 2022a), and also through numerical modeling (Leonardi et al., 2008; Pierce, 2010; Castro et al. 2022b). In cave mining, fine migration is mainly ruled by the ratio between coarse and fine fragment size, the particle size distribution of ore, rock density, and draw strategies. Dorador (2016) and Pierce (2010) suggest that fine migration also occurs around the ellipsoid of movement induced by shearing. The fine material migration can accumulate fine material in drawbells increasing the risk of SRF events.

Various cave mining methods have been developed after an open pit mine ceased (Flores, 2005; Flores & Catalan, 2019). The material from the pit slope eventually fails and becomes part of the caving-induced subsidence due to the caving process. The material incorporated from the open pit is commonly softer and more fractured than the in-situ mineralized underground rock, thus,

susceptible to secondary fragmentation and fine material percolation. For example, Palabora Block Cave Lift 1 experienced SRF events related to fine material from the pit slopes (Pretorius & Ngidi, 2008). Also, abandoned cave mines are sources of fine material for future deeper projects, such as Ridgeway Deeps Block Cave (Department of Industry, 2017).

There is a lack of studies focusing on understanding the key variables in SRF events. Mine studies provide valuable information, but the variables and mechanisms involved cannot be controlled for deeper analysis. Then, this study is focused on the SRF mechanism related to the hang-up removal applying numerical modeling to analyze these events. The numerical model is previously calibrated based on mine data available.

METHODOLOGY

This SRF study is focused on the mechanism related to removal of hang-ups applying numerical modelling to quantify the magnitude of these events. Therefore, the methodology is based on the steps described below:

Material for modelling

The definition of “Fine material” in mining depends primarily on the operation or sector. For example, at Diablo Regimiento sector in El Teniente, fine materials are considered 7 [cm] diameter or smaller (Sánchez, 2017). At Palabora Block Cave Lift 1, fine materials are considered 1 [cm] diameter or smaller (Paetzold et al. 2020). Also, gravitational flow and risk-assessment studies have considered fine materials 25 – 30 [cm] diameter or smaller (Castro et al. 2007; Pérez 2017). Table 1 presents examples of fine material definition in the cave mining industry and related studies.

Table 1: Fine material in cave mining

| Operation’s name/Study | Owner/author | Mining method | Scale (only for studies) | Max. size [cm] | Reference |
|--|---------------------------------|---------------|--------------------------|----------------|--------------------|
| A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model | R. Castro, R. Trueman, A. Halim | PC/BC | 1:30 | 30 | Castro et al. 2007 |
| Esmeralda (El Teniente) | CODELCO Chile | PC | - | 5 | Sánchez 2017 |
| Diablo Regimiento (El Teniente) | CODELCO Chile | PC | - | 7 | Sánchez 2017 |
| Experimental quantification of hang up for block caving applications | R. Castro, R. Gómez, A. Hekmat | PC/BC | 1:75 | 30 | Castro et al. 2016 |

| Operation's name/Study | Owner/author | Mining method | Scale (only for studies) | Max. size [cm] | Reference |
|---|-------------------------------------|---|--------------------------|----------------|------------------------|
| Cuantificación del riesgo de ingreso de agua barro en El Teniente | Á. Pérez | PC/BC | Numerical modelling | 25 | Pérez 2017 |
| Palabora Lift 1 | H. Paetzold, P. Lourens, R. Brazier | PC | - | 1 | Paetzold et al. 2020 |
| Ridgeway Deeps | Department of Industry, NSW | BC | - | 1 (d50) | Dep. of Industry 2017 |
| Pipa Norte Extensión HW | F. Hidalgo, I. Salinas | PC | - | 25 | Hidalgo & Salinas 2020 |
| Mt Wright | S. Long, D. Carnovale, L. Louwrens | Sublevel Shrinkage Stopping (SLC variant) | - | 1 | Long et al. 2017 |

According to the definition of fine material in cave mining industry, the numerical modelling material was set to 0.2 [m] in diameter. On the other hand, coarse material was set to 0.75 – 1.5 [m] in diameter. Both fragment size distribution can be observed in Figure 1.

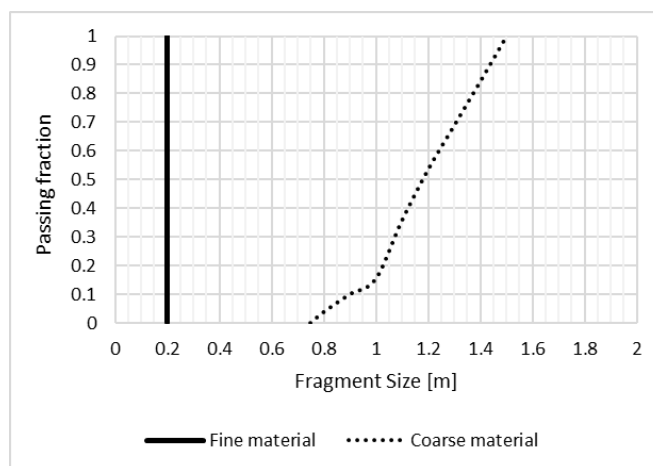


Figure 1: Fragment-size distribution of the Numerical model material

Base-event for calibration

A Ridgeway Deeps's event registered in September 2015 (Dep. of Industry, 2017) was used for calibration. This event implied the outflow of dry fine material due to the removal of a hang-up. The event was a magnitude of 260 [t] and large rocks of 0.5 – 1.5 [m] diameter were dragged by the fine. The flow was also described in terms of the distance reached and deposition angle in the production drift, both of them measured in the two senses of the production drift: towards north, opposite to the extraction drift sense; and towards south, in the same sense of the extraction drift. Geometrical characteristics of this event are summarized in Table 2 and presented in Figure 2.

Table 2: Base-event characteristics

| Parameter | Value | Unit |
|--|-------|----------------|
| Tonnage | 260 | t |
| Real volume (non-apparent) | 95 | m ³ |
| Run-out distance towards north | - | m |
| Run-out distance towards south | 9.4 | m |
| Large rocks in production drift? | Yes | - |
| Deposition angle towards north, 1 [m] over the floor | 19 | ° |
| Deposition angle towards south, 1 [m] over the floor | 7 | ° |

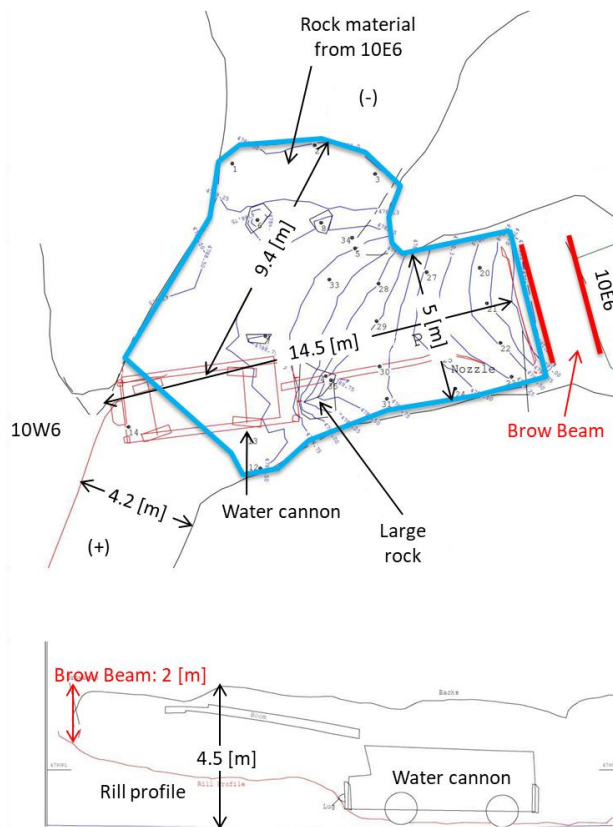


Figure 2: Geometrical characteristics of the drawpoint and the event studied. A: plan view of the deposition profile. B: lateral view of the deposition profile (Dep. of Industry 2017)

According to the deposition profile, deposition angle towards south was greater than the deposition angle towards north due to the presence of a water cannon which was damaged and dragged; run-out distance towards south wasn't determined due to the same reason.

Drawbell and pillar geometries

Production level of Ridgeway Deeps Block Cave is based on an off-set Herringbone layout, with 30 [m] between production drifts and 18 [m] between extraction drifts. Production and extraction drifts form 45-degree corners. Distance from one drawpoint to the other in the same drawbell is 11 [m] and drawbell height is 14 [m] from the drawpoint roof.

Figure 3 and Figure 4 present detailed geometrical characteristics of the drawbell and the pillar, respectively.

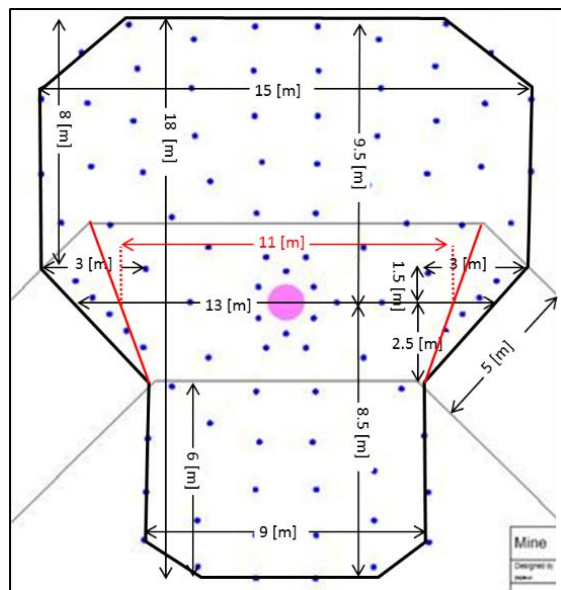


Figure 3: Drawbell geometry (Dunstan & Popa 2012)

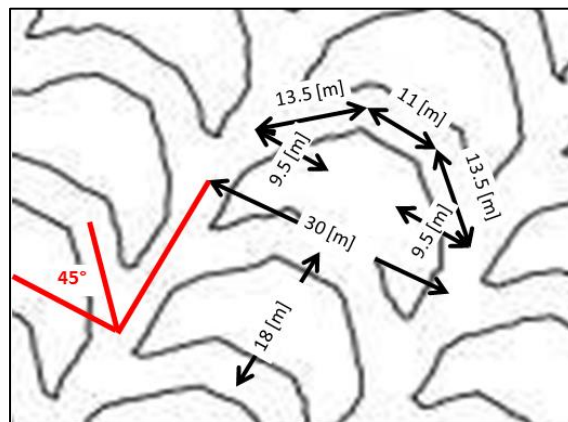


Figure 4: Pillar geometry and layout (Cuello & Newcombe 2018)

Numerical modelling tool

The Discrete Element Method, DEM (Cundall & Strack 1979) is a numerical tool widely used for solving problems involving flow of granular assemblies or fragmentation, represented as individual elements or particles. These particles interact with one another and other objects via contact force laws (Hancock & Weatherley 2008).

The basis of the DEM software is the particle-pairs contact. When this contact is done, particles experience elastic repulsion and frictional forces, which are transformed into translational and rotational moments. Through the application of the 2nd Newton's Law, particle's linear and angular accelerations are obtained. Then, through time integration of the acceleration, particle's new velocity and new position are derived. These mathematical steps are known as Δt . The smaller the value of Δt the greater the accuracy of the solution, but it requires longer computation time (Hancock & Weatherley 2008).

For the purposes of this study, ESyS-Particle software was employed. ESyS-Particle is a free-access software, parallel implementation of DEM written in C++ with a Python API (Weatherley et al. 2010), which permits to create bonded and not bonded granular assemblies of spheres, to assign contact coefficients such as friction and repulsion, to model rotational and translational particles, and to incorporate rigid structures into the simulations.

Setup of the Numerical model

Setup of the numerical model considers two drawpoints, one drawbell, two production drifts, two extraction drifts, two brow-beams, large particles, fine particles, a hang-up in one of the two drawpoints composed by large particles (white) and a mass of fines (red) over the hang-up, as can be seen in the Figure 5.

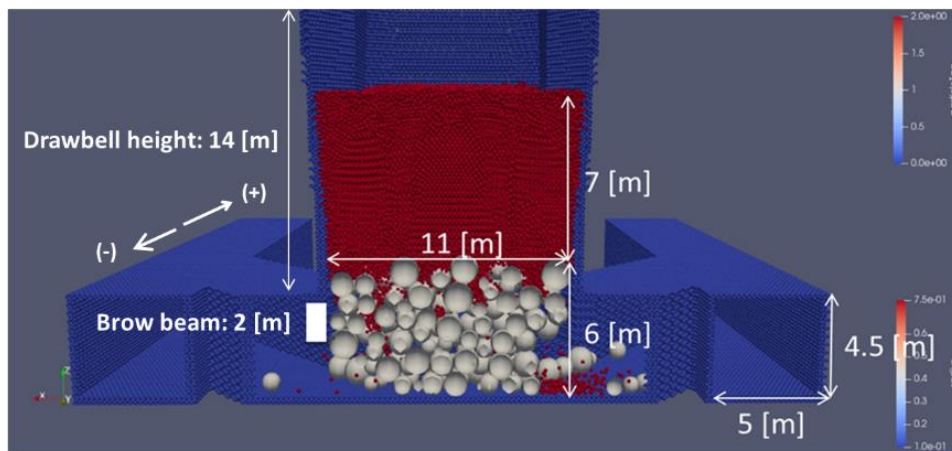


Figure 5: Initial setup of the numerical model developed in ESyS Particle. Red material is composed by fines. White material is composed by coarse fragments

The hang-up was placed at the drawpoint brow and the experiments were focused on the behavior of the material after flowing out from the drawpoint when part of the hang-up is removed. The hang-up volume removed was full face up to 4.5 [m]-deep into the drawpoint, volume equivalent to 3-times the largest fragment size. Figure 6 presents the volume of large particles removed in the experiments to release the fine material over the production level.

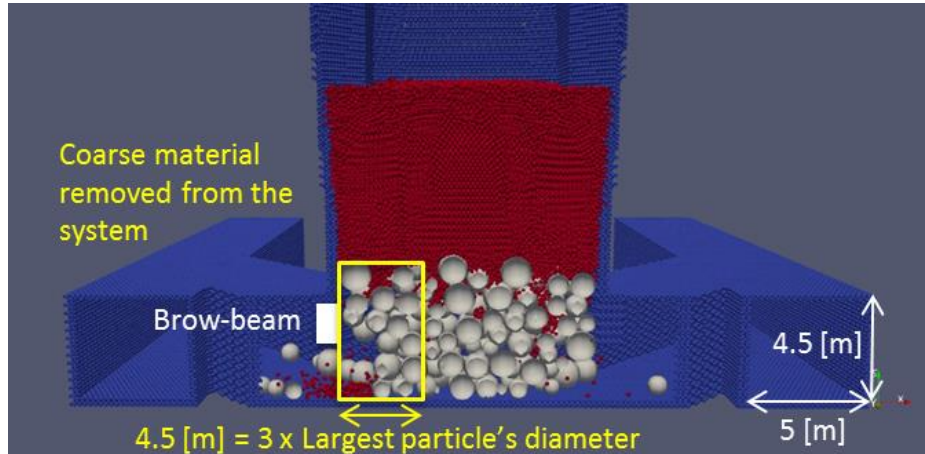


Figure 6: Volume of large particles removed

Quantification of the SRF magnitude was done through the measurement of 7 parameters which are described below. Run-out distance, height of the material and deposition angle measurement procedures are graphically described in

Figure 7.

- Tonnage of the event including fine and coarse fragments, [t].
- Run-out distance towards north and towards south, measured from the intersection of the extraction drift axis and production drift axis, [m].
- Presence of large particles (>0.75 [m] diameter) in the production drift.
- Height of the material on the production drift axis, [m].
- Deposition angle towards north and towards south. This indicator was measured 1 [m] from the floor of the production drift, $^{\circ}$
- Speed/time profile of the flow's face [m/s].
- Maximum speed of the flow [m/s].

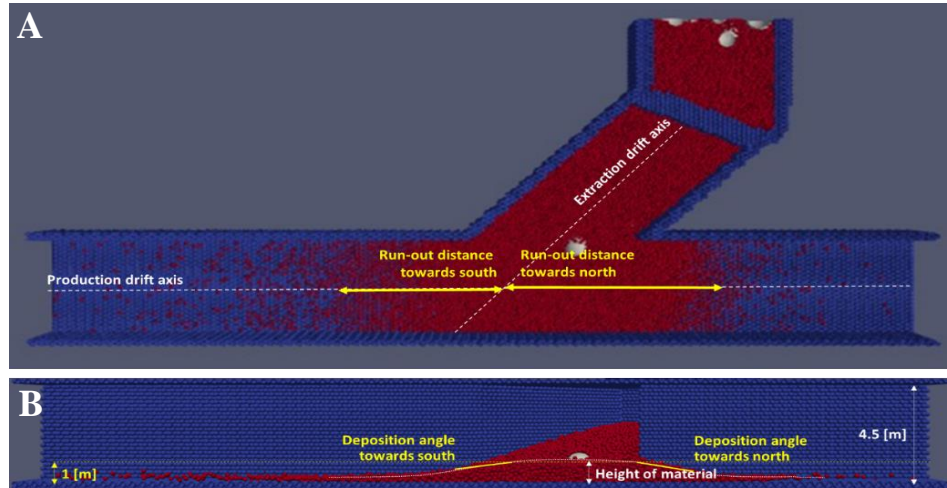


Figure 7: A: measurement of run-out distance. B: measurement of the height of flow and deposition angles

The variables analyzed in this study are:

- The quantity of fine material over the hang-up. That variable was studied through its height, analyzing columns of 7 [m], 15 [m] and 30 [m].
- The effective height of the drawpoint. The effective drawpoint height is the nominal height of the drawpoint (4.5 [m] in this study) less the brow-beam height. Brow-beams are structures placed at the drawpoint brow to control SRF or Mudrush events.
- The effective drawpoint width measured wall-to-wall.

CALIBRATION

Calibration of the numerical model was done according to the base-event described in Section 2.2. The variables involved in the calibration phase were the elastic repulsion module, and the static and dynamic coefficients of friction. Particle density was set to 2.7 [t/m³], Poisson-ratio was set to 0.3, and Young modulus was not required due to numerical particles were not deformable. Drawpoint geometry and quantity/height of fine material over the hang-up were set to the following values:

- Drawpoint width: 5 [m]
- Nominal drawpoint height: 4.5 [m]
- Effective drawpoint height: 2.5 [m] (brow-beam: 2 [m])

Height of fine material over the hang-up: 7 [m] Table 3 presents the results for the best adjustment achieved. Results of the calibration phase achieved 1% of deviation in terms of the tonnage and 1° of deviation in terms of the deposition angle. As same as the base-event for calibration, fine material fell, flowed and dragged large particles until the extraction drift bullnose, as can be seen in Figure 8.

Table 3: Results of calibration

| Calibration | Elastic repulsion, [Mpa] | Static coefficient of friction | Dynamic coefficient of friction | Tonnage, [t] | Run-out distance (+), [m] | Run-out distance (-), [m] | Large rocks in prod. drift? | Deposition angle (-), [°] | Deposition angle (+), [m] | Height of flow, [m] | Max. speed, [m/s] |
|-----------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------|
| Base-event | - | - | - | 260 | - | 9.4 | Yes | 7° | (Machine) | - | - |
| Best adjustment | 4.5 | 0.9 | 0.8 | 257 | 6.4 | 9.3 | Yes | 8° | 7° | 1.1 | 8.8 |

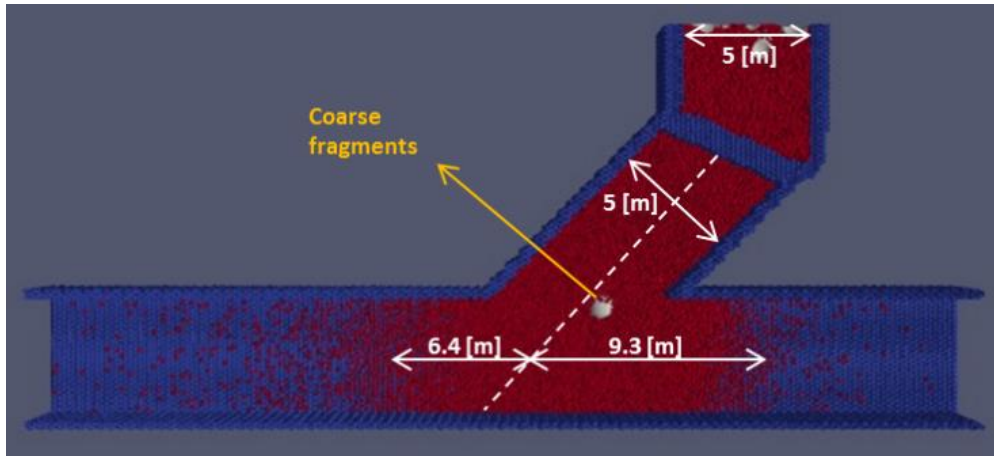


Figure 8: Plan view of the event modelled, calibration phase

RESULTS OF THE STUDY

This study was focused on the relation between the drawpoint geometry and the quantity of fines over the hang-up with the magnitude of the SRF events.

Relation Between Drawpoint Geometry and SRF Magnitude

Drawpoint height and drawpoint width were studied to determine the magnitude of potential SRF events. Quantity/height of fines over the hang-up was fixed to the calibration phase value: 7 [m].

Drawpoint height

Drawpoint height was analyzed in terms of the brow-beam height while the drawpoint width was fixed to 5 [m] and mass of fines over the hang-up was defined by a height of 7 [m]. Brow-beams of 1 [m], 2 [m] and 3 [m]-high were studied. Brow-beam of 2 [m] was the base case equivalent to setup in the calibration phase. Table 4 presents the magnitude of the SRF events modelled.

Table 4: SRF magnitude for different brow-beam (BB) heights

| Parameter | BB 1 [m] | BB 2 [m], Base case | BB 3 [m] |
|---|----------|------------------------|----------|
| Tonnage, [t] | 374 | 257 | 125 |
| Run-out distance in direction +, [m] | 11 | 6.4 | 6.5 |
| Run-out distance in direction -, [m] | 7.8 | 9.3 | 2.8 |
| Large rocks in prod. drift? | Yes | Yes | No |
| Deposition angle in direction +, 1 [m] over the floor | 14° | 7° | - |
| Deposition angle in direction -, 1 [m] over the floor | 17° | 8° | - |
| Height of flow | 1.6 | 1.1 | 0.4 |
| Max. speed, [m/s] | 9.1 | 8.8 | 8.5 |

Results showed a clear relation between the drawpoint geometry and the SRF magnitude. The brow-beam of 1 [m]-high implied an SRF event of 374 [t], 46% larger than the event associated to the brow-beam of 2 [m]. On the other hand, the brow-beam 3 [m]-high implied an SRF event of 125 [t], 51% smaller than the base case. Besides, the event associated to the brow-beam of 1 [m]-high was able to drag large particles until the production drift axis. On the contrary, the event associated to the brow-beam of 3 [m]-high wasn't able to drag large particles until de bullnose. Plan view of the material deposited is presented in Figure 9.

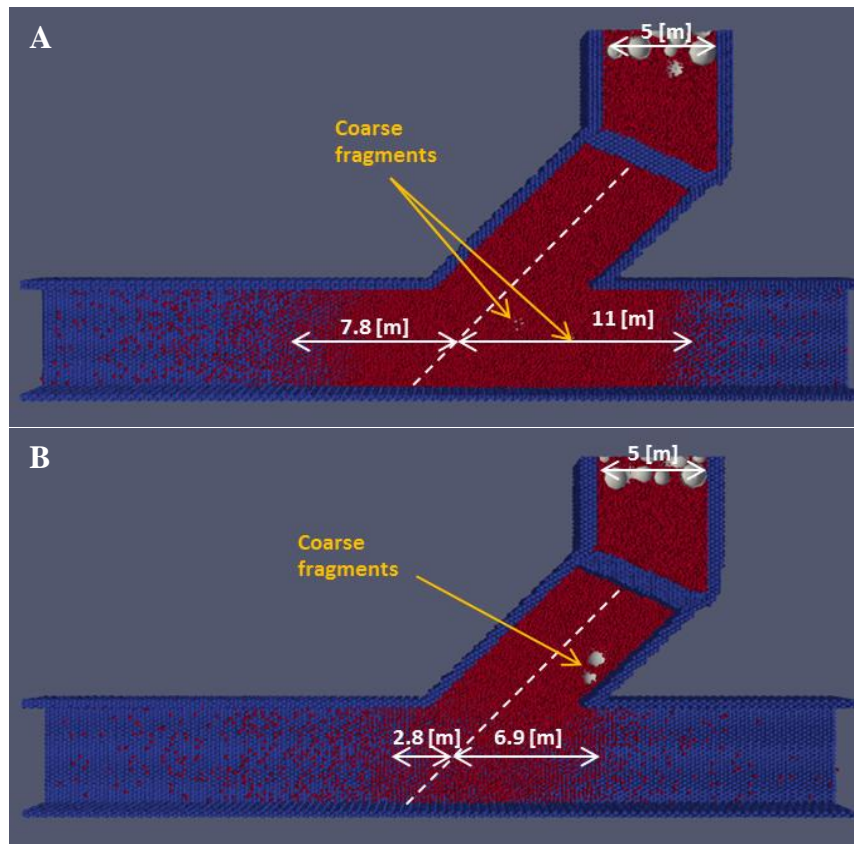


Figure 9: Plan view of the event modelled. A: 1-[m] brow-beam. B: 3 [m] brow-beam. Coarse fragments for event associated to the brow-beam of 1 [m] were covered by the fine material

From the point of view of the speed profiles, Figure 10 presents the results associated to each brow-beam. Results showed that material velocity was influenced by the effective height of the drawpoint. The speed profiles showed log-normal shapes in all cases, indicating that maximum velocities were achieved in the beginning of the event and then they decreased along the time. Speed profile decreasing in time was not identical for the 3 brow-beams studied, indicating that the event associated to a brow-beam of 1 [m]-high had more energy than the events associated to the brow-beams of 2 [m] and 3 [m]-high. That observation is the basis for understanding why the SRF tonnage was the greatest for the brow-beam of 1 [m]-high. In summary, according to the Figure 10, it was derived a maximum velocity range of 8.5 – 9.1 [m/s] for brow-beams from 3 [m] to 1 [m]-high.

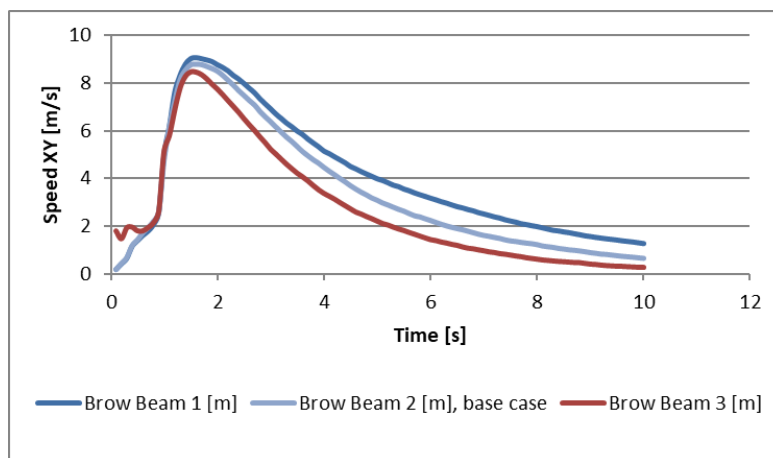


Figure 10: Speed profiles for different brow-beams

Drawpoint width

A sensitivity analysis was done for the drawpoint width. A drawpoint width of 3 [m] was evaluated and compared with the drawpoint width of 5 [m] used in section 4.1.1. Effective drawpoint height was fixed to 2.5 [m], i.e. a brow-beam of 2 [m], and the mass of fines over the hang-up was defined by a height of 7 [m].

Table 5 presents the magnitude of the SRF event modelled. According to the results, the event modelled achieved a magnitude of 193 [t], 25% smaller than the base event. Also, large rocks were dragged by the fines, but they didn't arrived at the production drift as can be observed in Figure 11.

Table 5: SRF magnitude for different drawpoint widths

| | 5 [m]-wide, Base case | 3 [m]-wide |
|---|-----------------------|------------|
| Tonnage, [t] | 257 | 193 |
| Run-out distance in direction +, [m] | 6.4 | 3 |
| Run-out distance in direction -, [m] | 9.3 | 6.9 |
| Large rocks in prod. drift? | Yes | No |
| Deposition angle in direction +, 1 [m] over the floor | 7° | - |
| Deposition angle in direction -, 1 [m] over the floor | 8° | - |
| Height of flow | 1.1 | 0.8 |
| Max. speed, [m/s] | 8.8 | 8.6 |

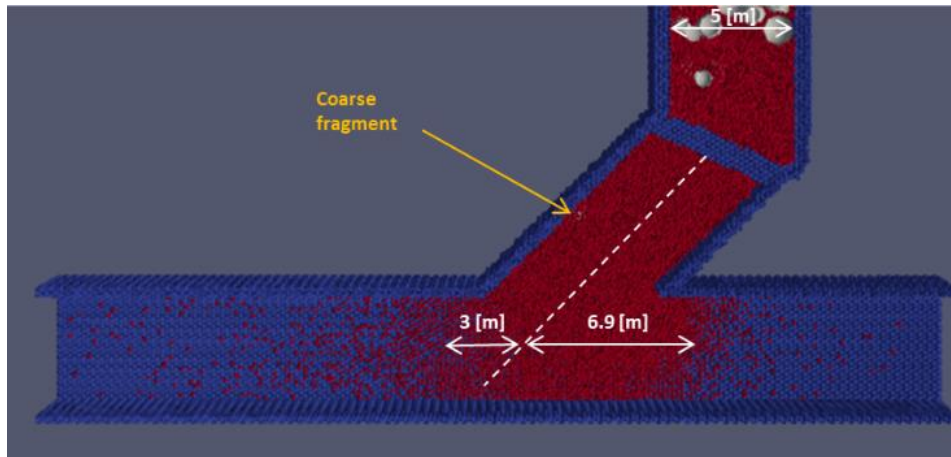


Figure 11: Plan view of the event modelled, drawpoint of 3 [m]-wide. Coarse fragments dragged were covered by the fine material

Figure 12 presents the speed profile for the 3 [m]-wide drawpoint, and 5 [m]-wide was included for comparisons. From the point of view of the speed profiles and maximum speeds, events based on drawpoints of 3 [m]-wide and 5 [m]-wide showed similar profiles and maximum speeds, indicating that the flow's velocity was not influenced by the width of the drawpoint.

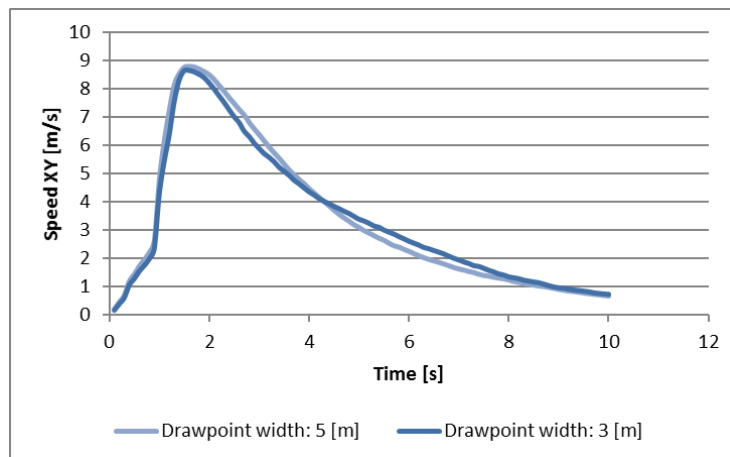


Figure 12: Speed profile for drawpoint width 3 [m] and 5 [m]

Relation between available fined-grained material and SRF magnitude

Quantity of fines over the hang-up was analyzed through its height: columns of fines of 15 [m] and 30 [m]-high were studied and compared with the columns of 7 [m]-high used in previous sections. Brow-beam heights of 1 [m], 2 [m] and 3 [m] and drawpoint width of 5 [m] and 3 [m] were considered.

Table 6 presents the SRF magnitude for events associated to columns of fines of 15 [m]-high, and Table 7 presents the SRF magnitude for events related to columns of fines of 30 [m]-high. According to the results, SRF magnitude expressed in tonnage was noticeably influenced by the drawpoint geometry, specially the brow-beam height: for a brow beam of 1 [m]-high the SRF magnitude was 374 – 495 [t] depending on the available quantity of fines over the hang-up, for a brow beam of 2 [m]-high the SRF magnitude was 257 – 334 [t] and for a brow beam of 3 [m]-high the SRF magnitude was 125 – 147 [t]; therefore the smaller the brow-beam the larger the event.

The presence of large rocks into the production drift was noticed for the brow-beams of 2 [m] and 1 [m]-high, but not for the brow-beam of 3 [m], independently of the mass of fines over the hang-up which is explained by the flowability of the fine material for different drawpoint openings.

Table 6: SRF magnitude for 15 [m] column of fines

| | DP width: 5 [m] | | | DP width: 3 [m] |
|---|-----------------|-----------|-----------|-----------------|
| | BB: 1 [m] | BB: 2 [m] | BB: 3 [m] | BB: 2 [m] |
| Tonnage, [t] | 446 | 287 | 137 | 212 |
| Run-out distance in direction +, [m] | 8.8 | 8.2 | 3.6 | 4 |
| Run-out distance in direction -, [m] | 13 | 9.8 | 6.5 | 7.3 |
| Large rocks in prod. drift? | Yes | Yes | No | Yes |
| Deposition angle in direction +, 1 [m] over the floor | 15° | 7° | - | - |
| Deposition angle in direction -, 1 [m] over the floor | 17° | 8° | - | - |
| Height of flow | 2 | 1.1 | 0.4 | 0.5 |
| Max. speed, [m/s] | 10.2 | 10 | 9.8 | 9.9 |

Table 7: SRF magnitude for 30 [m] column of fines

| | DP width: 5 [m] | | | DP width: 3 [m] |
|---|-----------------|-----------|-----------|-----------------|
| | BB: 1 [m] | BB: 2 [m] | BB: 3 [m] | BB: 2 [m] |
| Tonnage, [t] | 495 | 334 | 147 | 234 |
| Run-out distance in direction +, [m] | 12.3 | 11.5 | 5 | 5.1 |
| Run-out distance in direction -, [m] | 13.3 | 10.6 | 6.5 | 9.4 |
| Large rocks in prod. drift? | Yes | Yes | No | Yes |
| Deposition angle in direction +, 1 [m] over the floor | 13° | 7° | - | - |
| Deposition angle in direction -, 1 [m] over the floor | 16° | 12° | - | - |
| Height of flow | 2 | 1.4 | 0.5 | 1 |
| Max. speed, [m/s] | 11.5 | 11.1 | 10.9 | 11 |

Figure 13 and Figure 14 present the speed profiles. As it was observed in previous sections, log-normal shapes were maintained, and similar profiles and maximum velocities were obtained for the same quantity of fines over the hang-up. These observations permit to conclude that speed profiles and maximum speeds were not clearly influenced by the drawpoint geometry. On the other hand, the quantity of fines over the hang-up showed a clear impact on the maximum speeds, achieving 9.8 – 10.2 [m/s] for 15 [m]-high column of fines and 10.9 – 11.5 [m/s] for 30 [m] column of fines.

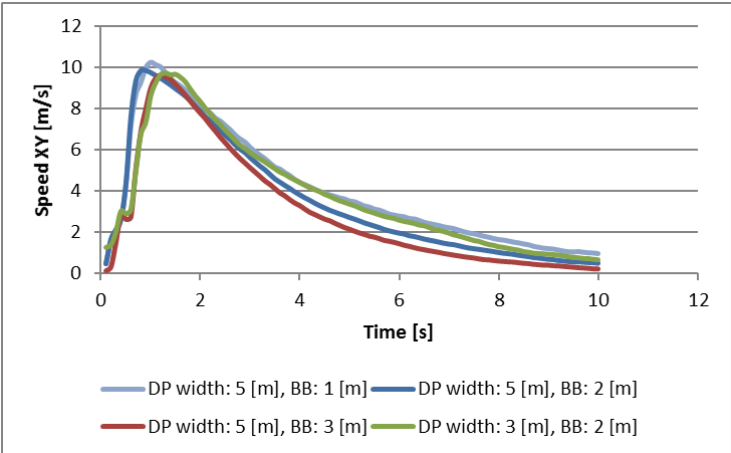


Figure 13: Speed profiles for 15 [m] columns of fines

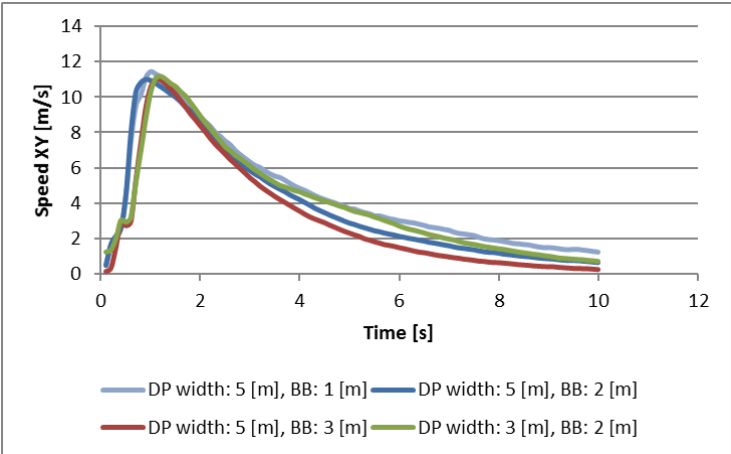


Figure 14: Speed profiles for 30 [m] columns of fines

DISCUSSION

Respect to the magnitudes calculated in this study, it was observed that SRF events tended to achieve maximum expectable magnitudes no matter the quantity of fines over the hang-up. Figure 15 summarizes the magnitudes of the SRF events modelled. From this figure it can be concluded that magnitude had an asymptotic behavior with respect the quantity of fines over the hang-up, hence there was a maximum expectable SRF event for each drawpoint geometry. Considering drawpoints of 5 [m]-wide, maximum expectable SRF events could be 500 [t], 350 [t] and 150 [t] for brow-beams of 1 [m], 2 [m] and 3 [m]-high, respectively. Also, considering drawpoints of 3 [m]-wide and brow-beam of 2 [m]-high (effective drawpoint height of 2.5 [m]), maximum expectable SRF event could be 250 [t].

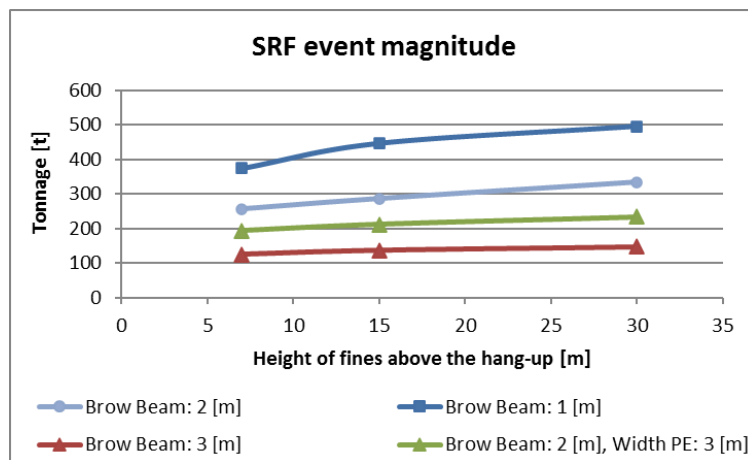


Figure 15: SRF magnitude for different heights of fines over the hang-up and different drawpoint geometries

Respect to the speed profiles, all cases showed log-normal shapes with a maximum in 2 [s], indicating that material accelerated in the first 2 [s] of the flow, due to the fall from its initial position on the hang-up, achieved a maximum speed and then the material decelerated due to the interaction with itself and with the walls of the model by repulsion and friction.

From the point of view of the presence of large rocks into the production drift, it was noticed that the smaller the brow beam or the major of the quantity of fines over the hang-up, the greater the probability of appearance. That was based on the potential energy of the fines available to flow. Potential energy increases with smaller brow-beams due to the larger free space available to fall, and potential energy also increases with major quantity of fines equivalent to the mass suspended. However, the incremental of the potential energy due to the quantity of fines suspended was not linear according to the experiments, which can be derived from the asymptotic behavior of the SRF magnitudes in terms of tonnage.

The observations done in this study show an opportunity to maintain the operation of mining sectors which had classified as high risk of SRF events. Geometrical characteristics of the

drawpoints allow to estimate maximum expectable events, which can be reduced modifying that geometry as caving progresses and finer fragmentation arrives to the drawpoints.

CONCLUSION

This numerical study has evaluated the magnitude of SRF events associated to release of hang-ups for different drawpoint geometries and quantity of fines.

From the point of view of the velocity of the material, it was concluded that effective drawpoint height and quantity of fines over the hang-up had a noticeable influence on the speed profile and maximum speed. On the contrary, drawpoint width did not show a clear relation with these indicators. Also, all speed profiles showed log-normal shapes indicating that event presented high velocities at the beginning and decreasing in time.

In terms of SRF tonnage, each drawpoint geometry was associated to a maximum expectable event, which can be explained because the material, coarse and fine, was dry and exposed to elastic repulsion, damping and friction, then the flow stopped due to these contact forces.

SRF events are potential hazards for cave mining operations. One of the most common practices to deal with this hazard is to shut-down the drawpoints, such as Palabora Lift 1 (Paetzold et al. 2020). According to this study, maximum expectable events can be derived for each drawpoint geometry. Therefore, mining operations could modify the drawpoint geometry as caving progresses and finer fragmentation arrive to the drawpoint, and also define suitable protocols for securely drawing, as the incorporation of tele-remote technologies.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper describes a work carried out in the dependencies of the Block Caving Laboratory and funded by the Chilean Government and Advanced Mining Technology Center of the University of Chile through the Basal Project AFB 180004.

REFERENCES

- Armijo, F., Irribarra, S., & Castro, R. (2014). Experimental study of fines migration for caving mines. In R. Castro (Ed.), *Proceedings of the 3rd international symposium on block and sublevel caving, Caving 2014* (pp. 356–362).
- Bridgwater J, Cooke MH & Scott AM (1978) “Interparticle percolation: equipment development and mean percolation velocities”, *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, Vol.56
- Brown, E. (2007). Fragmentation Assessment. In *Block Caving Geomechanics* (pp. 184–228).
- Castro, R. (2007). *Study of the Mechanisms of Gravity Flow for Block Caving*. University of Queensland.

- 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 & Mining Sciences*
- Castro, R., Arancibia, L., & Gómez, R. (2022a). Quantifying fines migration in block caving through 3D experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 151(December 2021), 8–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105033>
- Castro, R., Gómez, R., & Arancibia, L. (2022b). Fine material migration modelled by cellular automata. *Granular Matter*, 24(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10035-021-01173-8>
- Castro, R., Gómez, R., & Hekmat, A. (2016). Experimental quantification of hang-up for block caving applications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 85, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.02.005>
- 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. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/v115n2a4>
- Cuello, D., & Newcombe, G. (2018). Key geotechnical knowledge and practical mine planning guidelines in deep, high-stress, hard rock conditions for block and panel caving mining. In Y. Potvin & J. Jakubec (Eds.), *Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, Caving 2018* (pp. 17–36). ACG.
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47–65. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+discrete+numerical+model+for+granular+assemblies#0>
- Department of Industry (2017) “Report into the death of Lee Peters at Ridgeway Mine, Cadia, NSW on 6 September 2015”, Investigation report, New South Wales, Australia
- Dorador, L. (2016). Experimental Investigation of the effect of Broken ore Properties on Secondary Fragmentation During Block Caving. University of British Columbia.
- Dunstan, G., & Popa, L. (2012). Innovative Cave Establishment Practices at Ridgeway Deeps. *Massmin 2012: Sixth International Conference and Exhibition on Mass Mining*.
- Eadie, B. (2003). A framework for modelling fragmentation in block caving. The University of Queensland.
- Flores, G. (2005). Rock mass response to the transition from open pit to underground cave mining. University of Queensland.
- Flores, G., & Catalan, A. (2019). A transition from a large open pit into a novel “macroblock variant” block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile. *Journal of Rock*

Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(3), 549–561.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.010>

- Gómez, R., Castro, R., Betancourt, F., & Moncada, M. (2021). Comparison of normalized and non-normalized block caving comminution models. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121(11), 581–588. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1150/2021>
- Gómez, R., Castro, R. L., Casali, A., Palma, S., & Hekmat, A. (2017). A Comminution Model for Secondary Fragmentation Assessment for Block Caving. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(11), 3073–3084. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1267-2>
- Hancock, W. R., & Weatherley, D. K. (2008). 3D simulations of block caving flow using ESyS-Particle. *SHIRMS 2008: First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium*, 221–229.
- Hashim, M., & Sharrock, G. (2012). Dimensionless percolation rate of particles in block caving mines. *6th International Conference & Exhibition on Mass Mining, Massmin 2012*.
- Hidalgo, F., & Salina, I. (2020). Secondary rock ore reserve recovery using a primary rock layout: Extensión Hw Pipa Norte, a case study. In R. Castro, F. Baez, & K. Suzuki (Eds.), *Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining, Massmin 2020* (pp. 155–165). Universidad Chile.
- Laubscher D (1994) “Cave mining – the state of the art”, *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, South Africa*
- Laubscher, D. H. (2000). Secondary fragmentation. In *Block cave manual. International Caving Study (1997-2000)*.
- Leonardi, C. R., Owen, D. R. J., Feng, Y., & Ferguson, W. J. (2008). Computational modelling of fines migration in block caving operations. In H. Schunnesson & E. Nordlund (Eds.), *5Th Conference and Exhibition on Mass Mining* (pp. 1063–1072).
- Lett, J., Castro, R., Pereira, M., Osorio, A., & Alvarez, P. (2022). BCRisk applications for rill swell hazard analysis in PC1: case study at Cadia East Operations. In Y. Potvin (Ed.), *Caving 2022: Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving* (pp. 561–572). Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/doi:10.36487/ACG_repo/2205_38
- Long, S., Carnovale, D., & Louwrens, L. (2017). Mt Wright – managing unique risks. *13th AUSIMM Underground Operators’ Conference*, 295–304.
- Hashim, M. H., Sharrock, G., & Saydam, S. (2008). A Review of Particle Percolation in Mining. In Y. Potvin, J. Carter, A. Dyskin, & R. Jeffrey (Eds.), *SHIRMS 2008* (pp. 273–284). Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/acg_repo/808_72

- Merino, L. (1986). Predicting the size distribution of ore fragments in block caving mines. Imperial College.
- Olivares, D., Castro, R., & Hekmat, A. (2015). Influence of Fine Material, Humidity and Vertical Loads on the Flowability of Caved Rock. 49th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium.
- Paetzold, H., Lourens, P., & Brazier, R. (2020). Reopening and closure of a block cave. In R. Castro, F. Baez, & K. Suzuki (Eds.), Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining, Massmin 2020 (pp. 103–114). Universidad de Chile.
- Pérez, A. (2017) “Cuantificación del Riesgo de Ingreso de Agua-Barro en El Teniente”, MSc. Tesis, Universidad de Chile
- Pierce, M. E. (2010). A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines. University of Queensland.
- Pierce, M., Weatherley, D., & Kojovic, T. (2010). A hybrid methodology for secondary fragmentation prediction in cave mines. In Y. Potvin (Ed.), Second International Symposium on Block and Sublevel Caving (pp. 567–581). ACG. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1002_39_weatherley-pierce
- Pretorius, D., & Ngidi, S. (2008). Cave management ensuring optimal life of mine at Palabora. 5Th Conference and Exhibition on Mass Mining, 63–71.
- Reyes, B. (2021). Caracterización de elipsoides de extracción con material cohesivo en block/panel caving utilizando rocky DEM. Universidad Técnica Federico Santa Maria.
- Sánchez V. (2017) “Determinación y Caracterización de las Zonas de Extracción en un Flujo Gravitacional Aislado de Material Granular fino en Presencia de Humedad”, MSc. Tesis, Universidad de Chile
- Valdés, C. (2020). Estudio exploratorio sobre mecanismos y las consecuencias de eventos de inrush of fines para aplicaciones a minería de Block Caving. Universidad de Chile.
- Weatherley, D., Boros, V., Hancock, W., & Abe, S. (2010). Scaling benchmark of ESyS-Particle for elastic wave propagation simulations. 6th IEEE International Conference on E-Science, 277–283.

3. Conclusiones

A partir de este trabajo de grado se pudo concluir que:

- El modelamiento numérico es una herramienta eficaz para entender problemas físicos como los eventos de bombeo de finos en minería de block/panel caving. La calibración se realizó en base a un evento característico registrado en Ridgeway Deeps, obteniéndose un error de simulación de 1% en el ítem de tonelaje desplazado (simulado: 257 [t], registrado: 260 [t]).
- La geometría de un punto de extracción tiene una relación directa con la magnitud de los eventos de bombeo. En general, a una mayor altura efectiva o mayor ancho de éste, se esperará un evento de mayor magnitud.
 - Una disminución de la visera en 1 [m] implicó un aumento de la magnitud expresada en tonelaje de 46% (simulado: 374 [t], base: 257 [t]). A su vez, incrementar la visera en 1 [m] implicó una reducción de la magnitud en un 51% (simulado: 125 [t], base: 257 [t]).
 - Una disminución del ancho del punto de extracción de 1 [m] en cada pared implicó una disminución de la magnitud del evento de 25% (simulado: 193 [t], base: 257 [t]).
 - Al variar la cantidad de fino disponible en el Punto de Extracción (PEX) se pudo determinar la magnitud máxima esperada para cada geometría:
 - Brow-beam 1 [m] y Ancho de PEX 2 [m]: 500 [t].
 - Brow-beam 2 [m] y Ancho de PEX 2 [m]: 350 [t].
 - Brow-beam 3 [m] y Ancho de PEX 2 [m]: 150 [t].
 - Brow-beam 2 [m] y Ancho de punto de extracción 3 [m]: 250 [t].
- Este estudio demuestra que el cambio de geometría del punto de extracción es una medida de control eficiente para reducir el impacto de eventuales bombeos de fino.

En base a los resultados y conclusiones de este estudio, se plantean recomendaciones de trabajo futuro:

- Profundizar los conceptos de acumulación de finos sobre puntos de extracción.
- Estudiar el mecanismo de Falla de talud como precursor de bombeo de finos.

4. Bibliografía

Esta sección dispone la bibliografía utilizada en la Introducción de este trabajo y en la Publicación 1.

Arancibia L (2021) “Modelamiento experimental y empírico de la dilución en block caving”, MSc Tesis, Universidad de Chile, Chile

Armijo, F., Irribarra, S., & Castro, R. (2014). Experimental study of fines migration for caving mines. In R. Castro (Ed.), Proceedings of the 3rd international symposium on block and sublevel caving, Caving 2014 (pp. 356–362).

Bridgwater J, Cooke MH & Scott AM (1978) “Interparticle percolation: equipment development and mean percolation velocities”, Transactions of the Institute of Chemical Engineers, Vol.56

Brown, E. (2007). Fragmentation Assessment. In Block Caving Geomechanics (pp. 184–228).

Bull G & Page CH (2000) “Sublevel Caving – Today’s Dependable Low-Cost ‘Ore Factory’”, proceedings of the 3rd International Conference and Exhibition on Mass Mining, Australia

Butcher R, Joughin W & Stacey TR (2000) “An investigation of methods to combat mudrushes in diamond and base metal mines”, Safety in Mines Research Advisory Committee, Sudáfrica

Calder K, Townsend P & Russell F (2000) “The Palabora Underground Mine Project”, proceedings of the 3rd International Conference and Exhibition on Mas Mining, Australia

Castro R (2007) “Study of the mechanisms of gravity flow for block caving”, PhD Tesis, University of Queensland, Australia

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 & Mining Sciences

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. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/v115n2a4>

Castro R, Gómez E & Hekmat A (2016) “Experimental quantification of hang-up for block caving applications”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*

Castro, R., Arancibia, L., & Gómez, R. (2022a). Quantifying fines migration in block caving through 3D experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 151(December 2021), 8–10. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105033>

- Castro, R., Gómez, R., & Arancibia, L. (2022b). Fine material migration modelled by cellular automata. *Granular Matter*, 24(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10035-021-01173-8>
- Chacón J, Göpfert H & Ovalle A (2004) “Thirty years evolution of block caving in Chile”, proceedings of the 4th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Chile
- Chitombo G (2019) “Importance of Geology in Cave Mining” Society of Economic Geologists Newsletter, N°19, University of Queensland, Australia
- Craig R.F. (2004) *Craig’s soil mechanics*, 7th Edition, pp. 71 – 74
- Cuello, D., & Newcombe, G. (2018). Key geotechnical knowledge and practical mine planning guidelines in deep, high-stress, hard rock conditions for block and panel caving mining. In Y. Potvin & J. Jakubec (Eds.), *Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, Caving 2018* (pp. 17–36). ACG.
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29(1), 47–65. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:A+discrete+numerical+model+for+granular+assemblies#0>
- Department of Industry (2017) “Report into the death of Lee Peters at Ridgeway Mine, Cadia, NSW on 6 September 2015”, Investigation report, New South Wales, Australia
- Diering T, Ngidi S, Bezuidenhout JJ & Paetzold HD (2018) “Palabora Lift 1 block cave: understanding the grade behavior”, proceedings of the 4th International Symposium on Block and Sublevel Caving, Australia
- Dorador, L. (2016). *Experimental Investigation of the effect of Broken ore Properties on Secondary Fragmentation During Block Caving*. University of British Columbia.
- Dunstan, G., & Popa, L. (2012). *Innovative Cave Establishment Practices at Ridgeway Deep*s. *Massmin 2012: Sixth International Conference and Exhibition on Mass Mining*.
- Eadie, B. (2003). *A framework for modelling fragmentation in block caving*. The University of Queensland.
- Flores, G. (2005). *Rock mass response to the transition from open pit to underground cave mining*. University of Queensland.
- Flores-González G (2019) “Major hazards associated with cave mining: are they manageable?”, proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk, Australia
- Gómez, R., Castro, R., Betancourt, F., & Moncada, M. (2021). Comparison of normalized and non-normalized block caving comminution models. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121(11), 581–588. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1150/2021>

- Gómez, R., Castro, R. L., Casali, A., Palma, S., & Hekmat, A. (2017). A Comminution Model for Secondary Fragmentation Assessment for Block Caving. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(11), 3073–3084. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1267-2>
- Hancock, W. R., & Weatherley, D. K. (2008). 3D simulations of block caving flow using ESyS-Particle. *SHIRMS 2008: First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium*, 221–229.
- Hashim, M., & Sharrock, G. (2012). Dimensionless percolation rate of particles in block caving mines. *6th International Conference & Exhibition on Mass Mining, Massmin 2012*.
- Hidalgo F. & Salinas I. (2020) “Secondary rock ore reserve recovery using a primary rock layout: Extension Hw Pipa Norte, a case study”, proceedings of the 8th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Chile
- Laubscher D (1994) “Cave mining – the state of the art”, *Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, South Africa*
- Laubscher, D. H. (2000). Secondary fragmentation. In *Block cave manual. International Caving Study (1997-2000)*.
- Leonardi CR, Owen DRJ, Feng YT & Ferguson WJ (2008) “Computational modeling of fines migration in block caving operations”, proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Suecia
- Lett J, Castro R, Pereira M, Osorio A & Álvarez P (2022) “BCRisk applications for rill swell hazard analysis in PC1: case study at Cadia East Operations, proceedings of the 5th International Conference on Block and Sublevel Caving, Australia
- Long S, Carnovale D & Louwrens L (2017) “Mt Wright – managing unique risks”, proceedings of the 13th AUSIMM Underground Operators’ Conference, Australia
- Hashim, M. H., Sharrock, G., & Saydam, S. (2008). A Review of Particle Percolation in Mining. In Y. Potvin, J. Carter, A. Dyskin, & R. Jeffrey (Eds.), *SHIRMS 2008* (pp. 273–284). Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/acg_repo/808_72
- Merino, L. (1986). Predicting the size distribution of ore fragments in block caving mines. Imperial College.
- Olivares, D., Castro, R., & Hekmat, A. (2015). Influence of Fine Material, Humidity and Vertical Loads on the Flowability of Caved Rock. *49th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*.
- Paetzold H, Lourens P & Brazier R (2020) “Reopening and closure of a block cave”, proceedings of the 8th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Chile

- Pérez A (2017) “Cuantificación del Riesgo de Ingreso de Agua-Barro en El Teniente”, MSc. Tesis, Universidad de Chile
- Pierce M (2010) “A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines”, PhD. Tesis, University of Queensland, Australia
- Pierce M., Weatherley S.K. & Kojovic T. (2010) “A hybrid methodology for secondary fragmentation prediction in cave mines”, proceedings of the 2nd International Symposium on Block and Sublevel Caving, Australia
- Pretorius D & Ngidi S (2008) “Cave management ensuring optimal life of mine at Palabora”, proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining, Suecia
- Reyes, B. (2021). Caracterización de elipsoides de extracción con material cohesivo en block/panel caving utilizando rocky DEM. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Sánchez YV (2017) “Determinación y Caracterización de las Zonas de Extracción en un Flujo Gravitacional Aislado de Material Granular fino en Presencia de Humedad”, MSc. Tesis, Universidad de Chile
- Sociedad Nacional de Minería (1990) “Boletín Minero N°48”, Chile
- Soto M (2010) “Hidrogeología e Hidroquímica de Aguas Subterráneas en el distrito Inca de Oro, Región de Atacama: Procesos de Interacción Agua – Roca y dispersión Geoquímica”, MSc. Tesis, Universidad de Chile, Chile
- Tullis T (2015) “Mechanisms for friction of rock at earthquake slip rate”, Treatise on Geophysics 2^o Edición, Cap 4.6, Brown University, EE.UU
- Valdés C (2020) “Estudio exploratorio sobre los mecanismos y las consecuencias de eventos de inrush of fines para aplicaciones en minería de block caving”, Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Chile
- Weatherley, D., Boros, V., Hancock, W., & Abe, S. (2010). Scaling benchmark of ESyS-Particle for elastic wave propagation simulations. 6th IEEE International Conference on E-Science, 277–283.


Anexos


Anexo A: Currículum Vitae del estudiante




CARLOS OSIEL SEBASTIÁN VALDÉS FLORES


 Chileno

 RUT: 19.254.910-8

 03/10/1995

 +56 9 72538542

 carlos.valdes@ug.uchile.cl

 [Cruz](#) 702, Constitución, Chile

Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile. Proactivo, entusiasta, coleccionista de rocas y amante de las caminatas. Hábil en la resolución de problemas y con foco en aprender cada día. Espero aportar con el conocimiento adquirido, superar desafíos en equipo y promover un buen ambiente laboral

ASPIRACIONES PROFESIONALES

Docente / Jefe de turno - Desarrollo de mina o Movimiento de roca

EXPERIENCIA ACADÉMICA

| | | |
|----------------|---|----------------------|
| 2020 - 2022 | Profesor auxiliar/Ayudante de Postgrado Diploma de Postítulo en Ingeniería del Caving Diploma Geo-Minero-Metalurgia, Diseño y Planificación de Minas Subterráneas Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile | Santiago, Chile |
| 2019 - 2022 | Profesor auxiliar/Ayudante de Pregrado Fundamentos de Tecnología Minera Simulación de Procesos Mineros Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile | Santiago, Chile |
| 2021 | Integrante de Comisión de Tesis de Pregrado Universidad de Concepción | Concepción, Chile |
| 2016 - 2017 | Profesor particular Servicios particulares de Educación Media | Santiago, Chile |

EXPERIENCIA LABORAL

| | | |
|----------------|---|--------------------|
| 2021 - 2023 | Ingeniero en Modelamiento Numérico - BCTEC Ingeniería y Tecnología SPA - Simulación de Sistemas de Manejo de Materiales en minas subterráneas masivas y determinación de capacidad productiva mediante técnicas de Eventos Discretos - Simulación de eventos de bombeo de finos en minas australianas mediante herramientas de Elementos Discretos | Santiago, Chile |
| 2020 | Ingeniero en Práctica - Guía metodológica para la evaluación de proyectos mineros subterráneos, Propuesta técnica-económica Laboratorio de Block Caving, Universidad de Chile | Santiago, Chile |
| 2018 - 2019 | Ingeniero en Práctica - Elementos básicos y requerimientos para la automatización de LHD y camiones BCTEC Ingeniería Y Tecnología SPA - Evaluación de nuevas opciones de flotación Química Rhenium LTDA | Santiago, Chile |

EDUCACIÓN SUPERIOR

| | | |
|----------------|---|--------------------|
| 2021 - 2022 | Magíster en Minería (candidato) Modelamiento numérico de bombeo de finos en minería de block caving mediante herramientas de Elementos Discretos Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile | Santiago, Chile |
|----------------|---|--------------------|

2014 - **Ingeniero Civil de Minas, Licenciado en Ciencias de la Ingeniería, Mención Minería y Metalurgia extractiva** Santiago, Chile
 2020
 Modelamiento físico de bombeo de finos para aplicaciones en minería de block caving
 Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile

PUBLICACIONES

- *Cómo los fundamentos de ventilación nos pueden ayudar a comprender algunos aspectos del COVID-19*
 Raúl Castro, Carlos Valdés, Álvaro Pérez, Omar Salas, Pablo Cid
 Revista Minería Chilena, 2020

INFORMACIÓN ADICIONAL

Idiomas Español nativo
 Inglés intermedio

Competencias Informáticas AutoCAD Promodel MatLab
 EsysParticle Python Microsoft Office
 JKSimBlast VentSim RocScience Suite
 Visual

REFERENCIAS

PhD. Raúl Castro
 Profesor asociado, Universidad de Chile
 Investigador principal, AMTC

PhD. René Gómez
 Profesor asociado, Universidad de Concepción

Anexo B: Comprobante de presentación a revista

Rock Mechanics and Rock Engineering

Geometrical Design Parameters Affecting Rill Swell Events for Block Caving Applications
--Manuscript Draft--

| | | | |
|--|--|--|-----------------|
| Manuscript Number: | | | |
| Full Title: | Geometrical Design Parameters Affecting Rill Swell Events for Block Caving Applications | | |
| Article Type: | Original Paper | | |
| Keywords: | numerical modeling; discrete element method; granular material; mining risk | | |
| Manuscript Classifications: | 400.010: Underground construction; 400.090: Mining; 600.020: Rockfall; 600.070: Risk assessment and analysis; 800.030: Discrete Element Method | | |
| Corresponding Author: | Rene Esteban Gomez, Ph.D. Universidad de Concepcion Facultad de Ingenieria Concepción, Biobío CHILE | | |
| Corresponding Author Secondary Information: | | | |
| Corresponding Author's Institution: | Universidad de Concepcion Facultad de Ingenieria | | |
| Corresponding Author's Secondary Institution: | | | |
| First Author: | Carlos Valdés, MD | | |
| First Author Secondary Information: | | | |
| Order of Authors: | Carlos Valdés, MD | | |
| | Raúl Castro, OHD | | |
| | Rene Esteban Gomez, Ph.D. | | |
| Order of Authors Secondary Information: | | | |
| Funding Information: | <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 60%;">Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (AFB220002)</td> <td style="width: 40%;">Dr. Raúl Castro</td> </tr> </table> | Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (AFB220002) | Dr. Raúl Castro |
| Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (AFB220002) | Dr. Raúl Castro | | |
| | | | |

Abstract:

Rill Swell (RS) events are outflows of dry fine-grained material from drawpoints in cave mining. Not only can these events negatively affect production, but they can also have fatal consequences. This paper discusses the magnitude of RS events associated with hang-ups using the discrete element method. Different drawpoint geometries and the initial mass of fine material were analyzed using a numerical model constructed and calibrated based on an RS event recorded in Ridgeway Deeps Block Cave. Results from the calibrated model as compared with real results from the mine site showed a

1% error rate in tonnage of fine material reported and a similar profile of fines deposited. The brow beam had a noticeable influence on the RS magnitude, mainly on the tonnage of the flow, and the distance reached by coarse particles dragged into the extraction drift. Additionally, drawpoint width also highly influenced the RS magnitude in terms of the amount of tonnage, distance, and coarse particles dragged. The study concludes that drawpoint geometry highly influences the expected RS events independently of the initial mass of fine material over the hang-up.

Powered by Editorial Manager® and Prodxion Manager® from Aries Systems Corporation

Anexo C: Perfil de material depositado

Ángulo de deposición y altura del material depositado en el eje de la calle de producción (perfil del flujo) para diferentes geometrías de punto de extracción (brow-beam y ancho del PEX) y masas de fino sobre la colgadura (Alturas de fino sobre la colgadura). El objetivo de este anexo es mostrar la magnitud y alcance de eventos de bombeo de finos modelados.

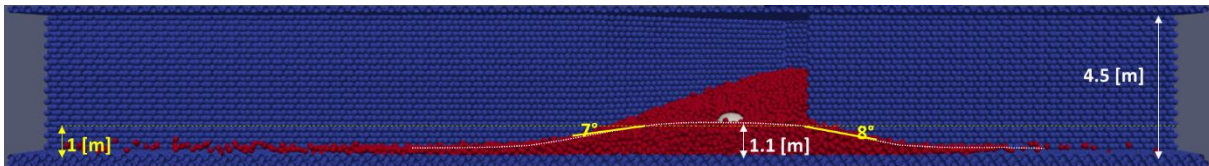


Figura 14: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 7 [m]

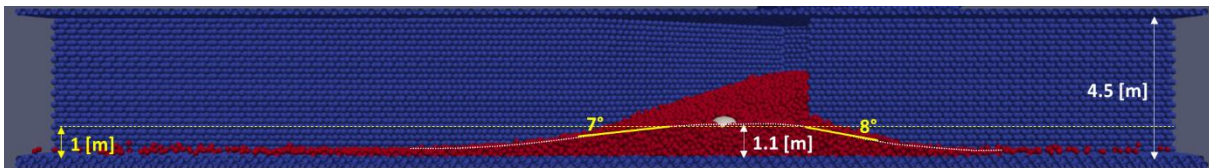


Figura 15: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 15 [m]

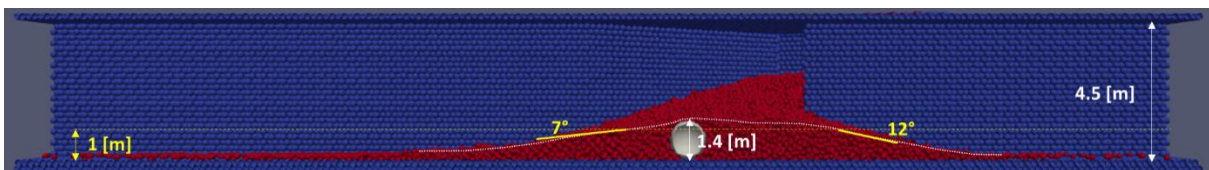


Figura 16: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 30 [m]

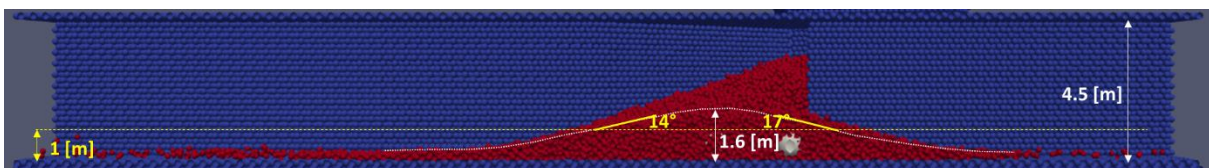


Figura 17: Perfil de flujo, Brow-beam: 1 [m], Altura de finos: 7 [m]

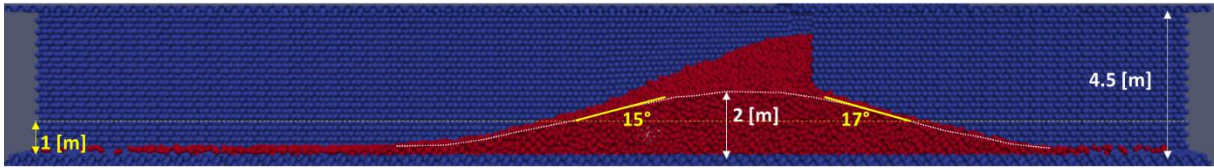


Figura 18: Perfil de flujo, Brow-beam: 1 [m], Altura de finos: 15 [m]

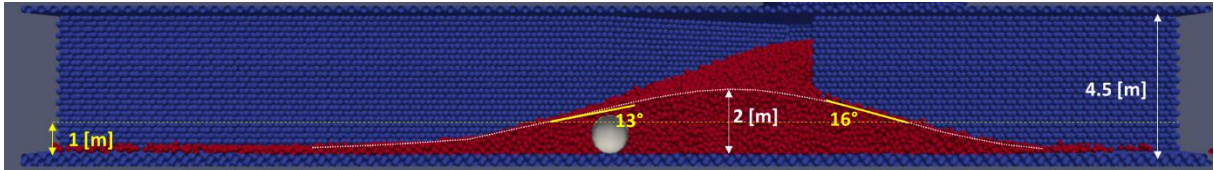


Figura 19: Perfil de flujo, Brow-beam: 1 [m], Altura de finos: 30 [m]



Figura 20: Perfil de flujo, Brow-beam: 3 [m], Altura de finos: 7 [m]

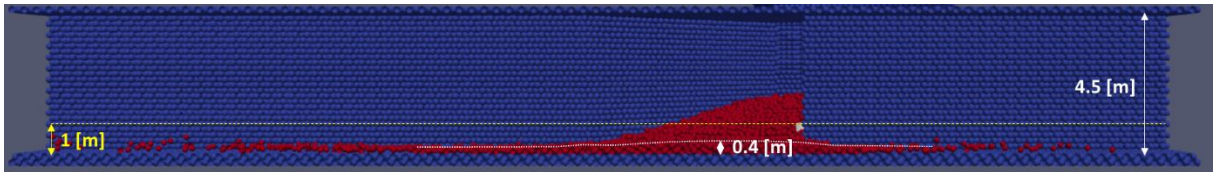


Figura 21: Perfil de flujo, Brow-beam: 3 [m], Altura de finos: 15 [m]

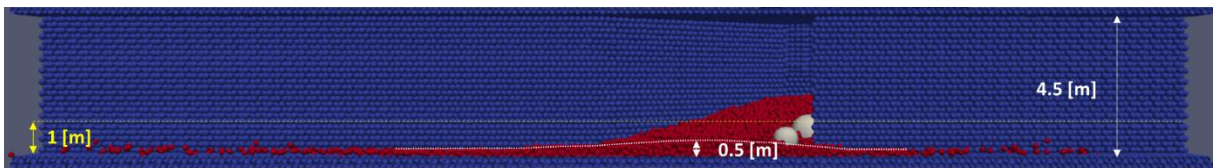


Figura 22: Perfil de flujo, Brow-beam: 3 [m], Altura de finos: 30 [m]

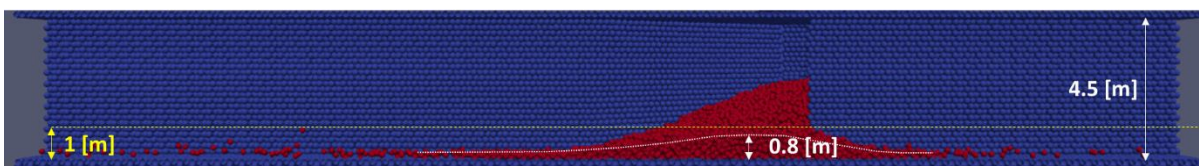


Figura 23: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 7 [m], Ancho PEX: 3 [m]

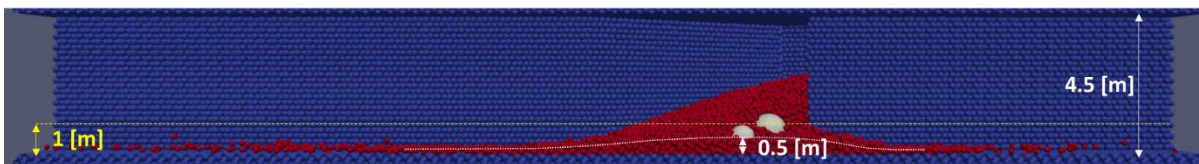


Figura 24: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 7 [m], Ancho PEX: 3 [m]

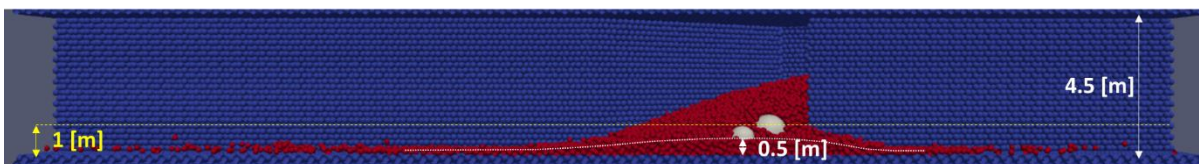


Figura 25: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 15 [m], Ancho PEX: 3 [m]

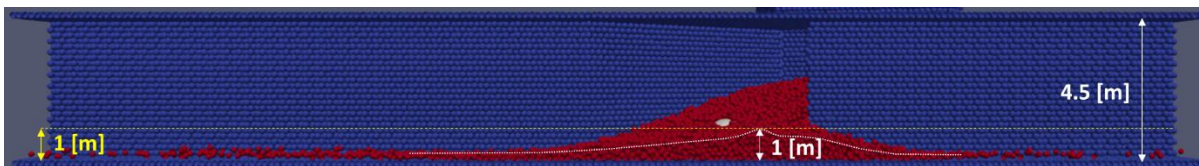


Figura 26: Perfil de flujo, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 30 [m], Ancho PEX: 3 [m]

Anexo D: Vista en planta de material depositado

Distancias alcanzadas en la calle de producción y arrastre de colpas mayores (vista en planta) para diferentes geometrías de punto de extracción (brow-beam y ancho del PEX) y masas de fino sobre la colgadura (Alturas de fino sobre la colgadura). El objetivo de este anexo es mostrar la magnitud y alcance de eventos de bombeo de finos modelados.

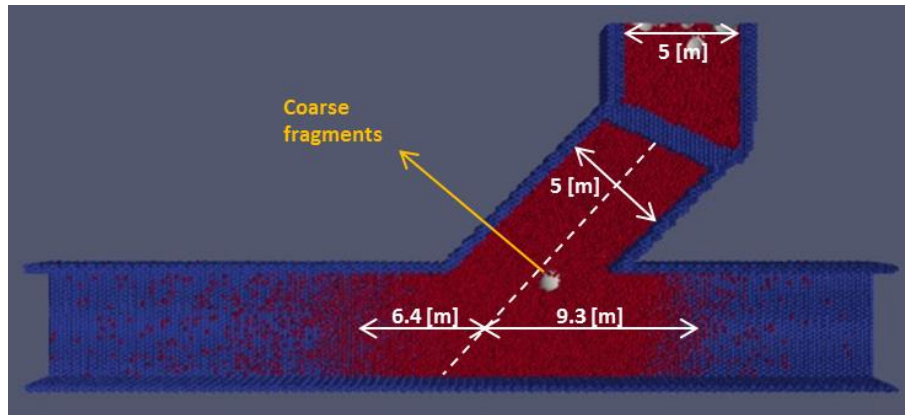


Figura 27: Vista en planta, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 7 [m]

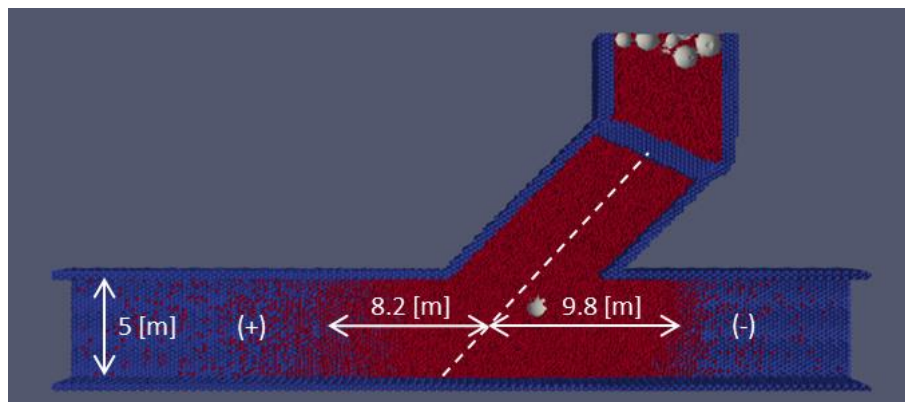


Figura 28: Vista en planta, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 15 [m]

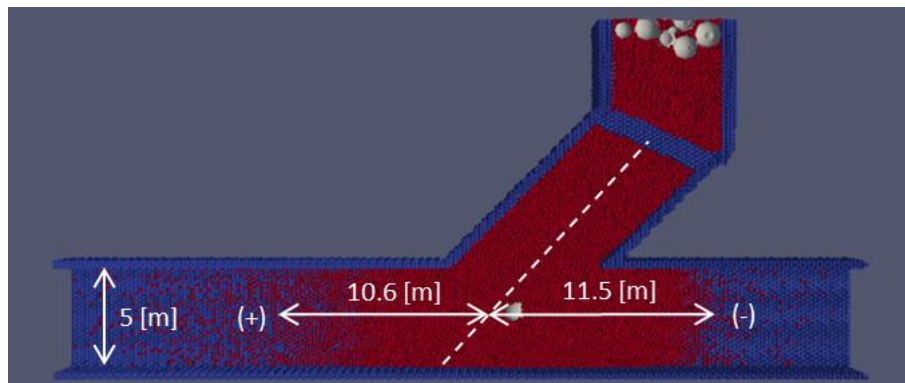


Figura 29: Vista en planta, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 30 [m]

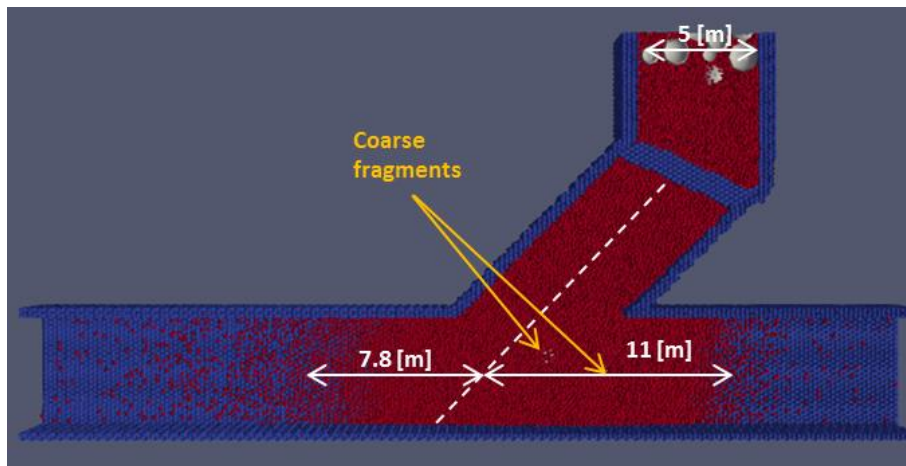


Figura 30: Vista en planta, Brow-beam: 1 [m], Altura de finos: 7 [m]

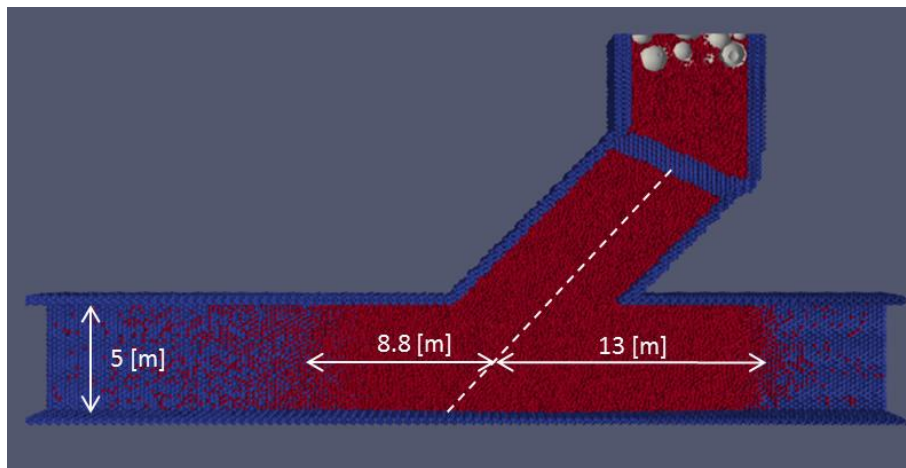


Figura 31: Vista en planta, Brow-beam: 1 [m], Altura de finos: 15 [m]

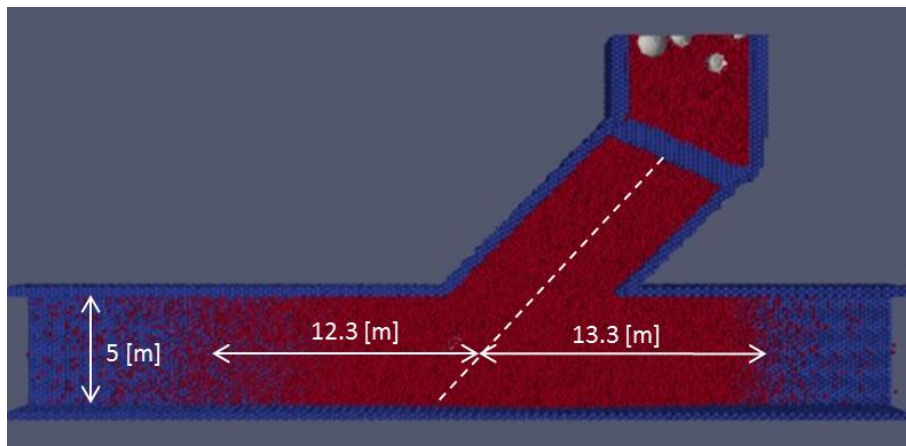


Figura 32: Vista en planta, Brow-beam: 1 [m], Altura de finos: 30 [m]

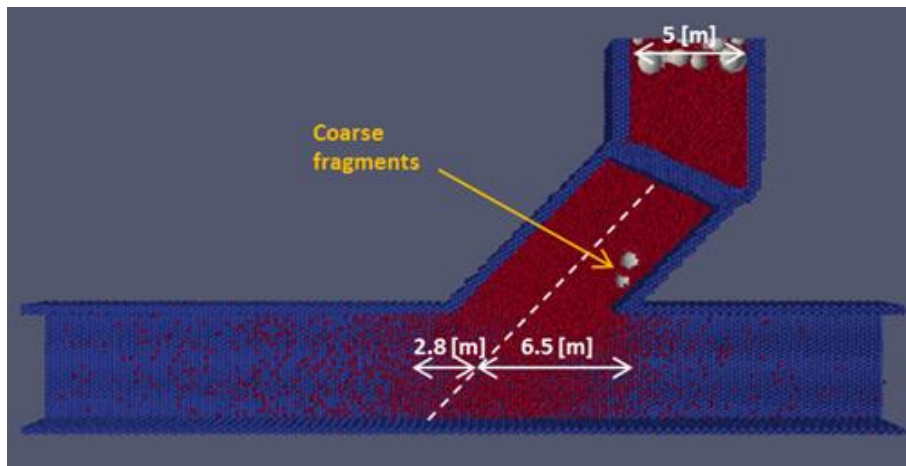


Figura 33: Vista en planta, Brow-beam: 3 [m], Altura de finos: 7 [m]

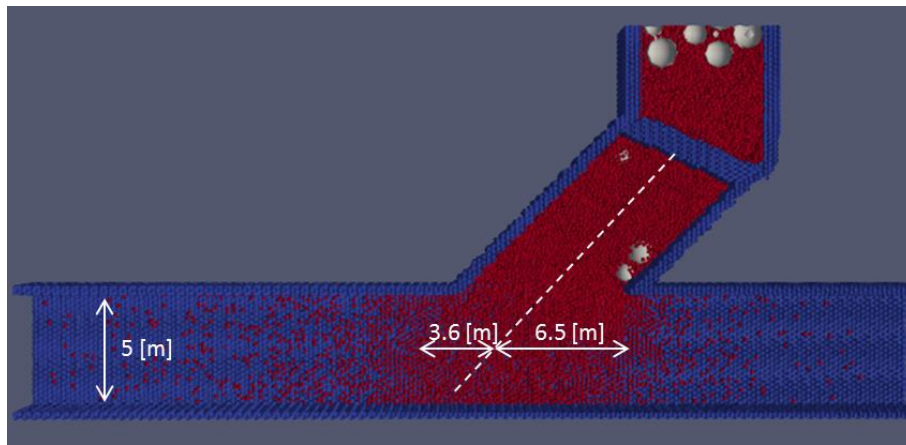


Figura 34: Vista en planta, Brow-beam: 3 [m], Altura de finos: 15 [m]

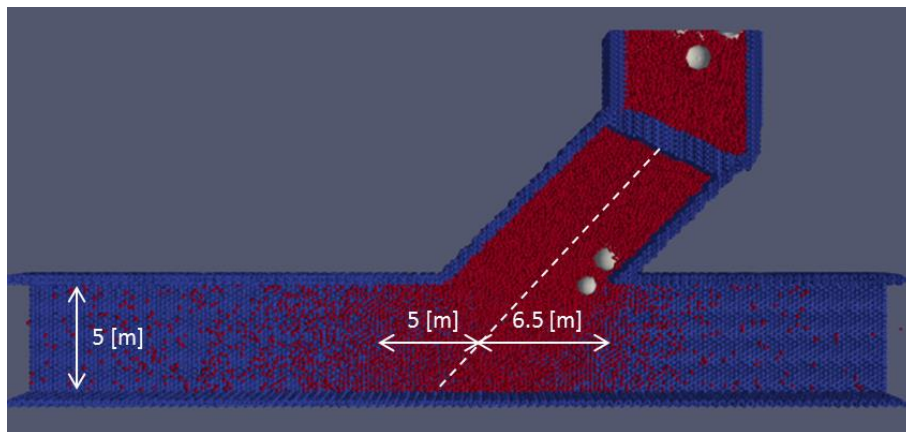


Figura 35: Vista en planta, Brow-beam: 3 [m], Altura de finos: 30 [m]

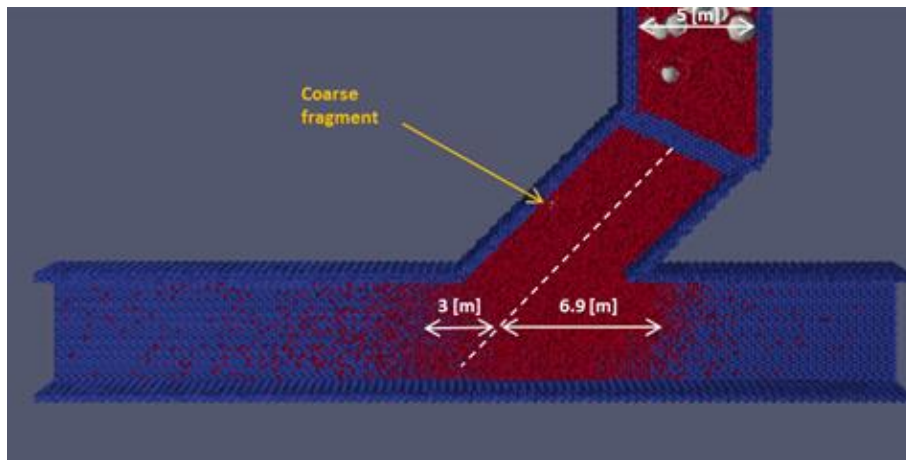


Figura 36: Vista en planta, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 7 [m], Ancho PEX: 3 [m]

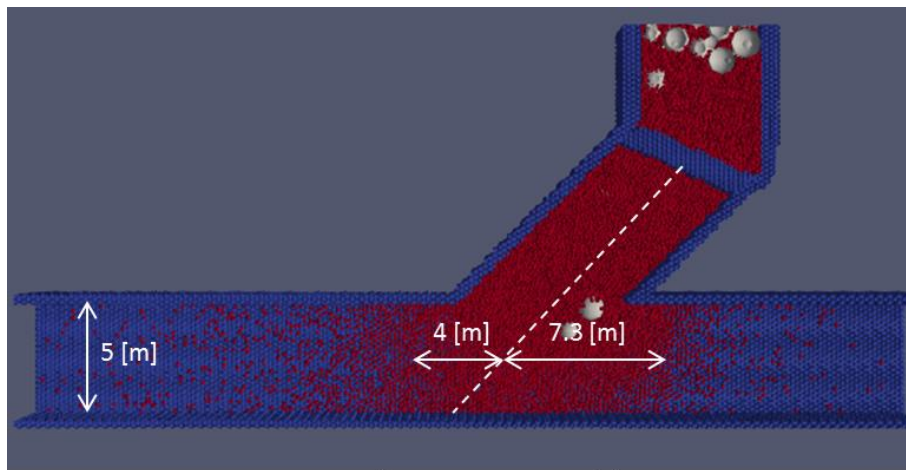


Figura 37: Vista en planta, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 15 [m], Ancho PEX: 3 [m]

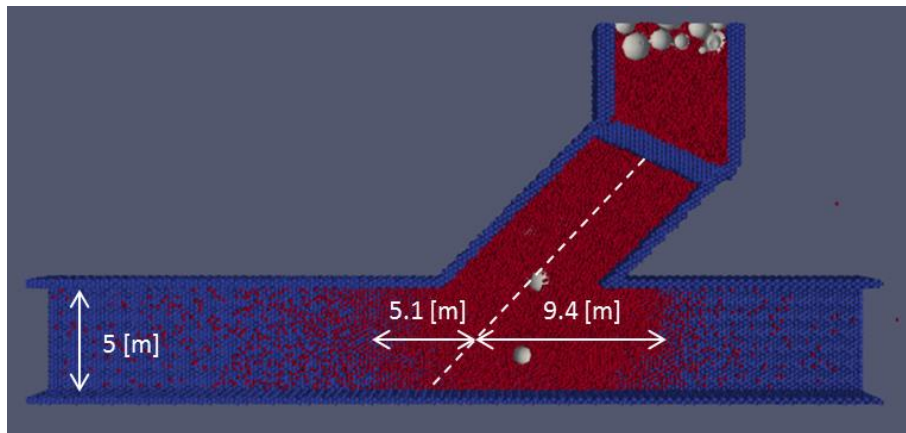


Figura 38: Vista en planta, Brow-beam: 2 [m], Altura de finos: 30 [m], Ancho PEX: 3 [m]