



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**DETERMINACIÓN DE LA INTENSIDAD DE ESTALLIDO DE AIRE EN
MINERIA DE BLOCK CAVING**

POR

MIGUEL ÁNGEL GABRIEL CIFUENTES LÓPEZ

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía:

Dr. René Gómez Puigpinos

Profesor Co-Guía:

Dr. Raúl Castro Ruiz

Enero 2025

Concepción (Chile)

© 2025 Miguel Ángel Gabriel Cifuentes López

RESUMEN

Debido al agotamiento de los yacimientos de minerales cercanos a superficie, hay una mayor tendencia a la minería subterránea para poder seguir extrayendo estos yacimientos. Existen diversos métodos de extracción subterráneos, tanto auto soportados, como de rellenos o hundimientos, donde estos últimos suelen ser más atractivos en yacimientos masivos debido a las ventajas en términos de costos operacionales y productividad. Sin embargo, están sujetos a diversos problemas geomecánicos y operacionales como los estallidos de aire.

Por este motivo, esta investigación se centra en desarrollar una metodología con el objetivo de prevenir o identificar el volumen de airgap y la intensidad de estallidos de aires en la minería de caving. Para esto, primero se realiza una revisión de casos de estudios, identificando que los parámetros más importantes y decisivos en la generación de estallidos de aires son la velocidad de extracción y la formación de arcos en la parte superior de la cavidad.

Para estudiar este fenómeno se recurre al acople de los softwares Flac3D y FlowSim BC para la obtención del volumen del airgap. El primer software entrega la geometría de la cavidad que se formaría y el segundo los datos correspondientes al volumen de Airgap generado para un plan de producción predeterminado. Luego, de la literatura se utiliza una fórmula para calcular la velocidad máxima promedio de aire que se esperaría percibir en los puntos de extracción.

En el primer caso simulado se aprecia como el volumen de airgap que se genera aumenta producto de que la velocidad de extracción es mayor a la velocidad de propagación del mientras que la simulación del segundo caso se genera la no propagación del caving en el tercer mes de extracción aumentando en gran medida el Airgap dentro de la cavidad debido a que no se detiene la extracción de material.

Principalmente se concluye que la metodología propuesta resulta útil para la obtención de volúmenes de airgaps y velocidades de estallidos de aires, donde velocidades de extracción mayores a velocidades de propagación genera un aumento en el volumen de airgap dentro de la cavidad mientras que la no detección de problemas en la propagación del caving aumenta drásticamente este volumen obteniendo alturas de Airgap que van en aumento incrementando la intensidad del estallido de aire que se apreciaría en los puntos de extracción.

ABSTRACT

The world's mining has had to resort to underground mining due to the depletion of near-surface mineral deposits, in order to continue extracting these deposits with great economic values. There are various underground mining methods, self-supported, filling or subsidence. The latter are usually more attractive due to the advantages they offer in massive orebodies. However they are also the ones with the greatest geomechanical and operational problems.

This research focuses on determining a methodology with the aim of preventing or identifying the volume of airgap and the intensity of air bursts in cave mining. For this, a review of study cases is first carried out. The most important and key parameters in the generation of air bursts are the extraction/draw rate and the formation of hang-ups in the cave-back.

To study the air bursts and airgap volume generated inside a cave mining, the use of a coupling of Flac3D and FlowSim BC software is necessary. The first software gives the cave geometry that would be formed month by month and the second software gives the airgap volume of that geometry for a specific production plan. Using an equation from the literature it is possible to obtain the average maximum air burst velocity that would be perceived at the draw point. In this research, 2 synthetic cases are elaborated with a production plan of 7 months.

Both simulated cases showed an increase in bulking as the airgap volume decreases with the increase of this factor. In the first case, due to having a draw speed higher than the propagation speed, the airgap volume increased slowly the first months and quickly in the later months. In the second case, due to a hang-up, the airgap volume increased quickly month by month. Finally, having a slow draw speed decreases the airgap volume inside the cave.

We can conclude that this proposed methodology is useful for obtaining the airgap volume and air burst velocity, where high extraction/draw rate increases the airgap volume inside the cave if those rates are over the propagation rate of the cave-back, and a non-detection of a hang-up inside the cave drastically increases the airgap volume inside the cave increasing the air burst intensity that would be perceived at the draw points.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas las personas que me acompañaron en mi proceso de formación profesional, a mi familia por su apoyo condicional a lo largo de todos los años, a los compañeros y amigos de la universidad que me ayudaron a lograr superar las dificultades. Agradecer a Diego Oyarzo por su apoyo a lo largo del desarrollo de esta memoria, explicándome y enseñándome conceptos que no eran familiares. De igual forma quiero agradecer al Profesor René Gómez y Raúl Castro por darme la oportunidad de formar parte del programa FONDECYT iniciación 11240668 y guiarme a lo largo de este proceso, brindándome la ayuda necesaria.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo General.....	2
1.2. Objetivos Secundarios	2
1.3. Alcances	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.....	3
2.1. Caving en Minería Subterránea	3
2.2. Propagación del Caving.....	4
2.3. Problemas Geomecánicos	6
2.3.1. Arcos Cohesivos	6
2.3.2. Airgap	7
2.3.3. Estallidos de Finos	7
2.3.4. Estallidos de Barros.....	8
2.3.5. Estallidos de Aires.....	9
2.4. Casos de Estudios	11
2.4.1. El Salvador	11
2.4.2. NorthParkes	14
2.5. Investigaciones referentes a propagación de caving	18
2.6. Investigaciones recientes de Estallidos de Aire o afines	20
3. Metodología	25
3.1. Flac3D	25
3.2. Acoplamiento.....	27
3.3. FlowSim BC	28
4. Plan Experimental	30
4.1. Caso 1: Velocidad de extracción superior a la velocidad de propagación del caving.....	30
4.2. Caso 2: Formación de un arco estable en cave-back	32
5. Resultados	35
5.1. Volumen de Airgap Caso 1	35
5.2. Volumen de Airgap Caso 2	39
6. Análisis de resultados.....	43
6.1. Velocidad máxima promedio de estallido de aire	43

6.1.1.	Vmax promedio Caso 1	44
6.1.2.	Vmax promedio Caso 2	45
6.2.	Variación de Parámetros	45
6.2.1.	Variación de las dimensiones del DP	46
6.2.2.	Variación del d50	46
6.2.3.	0% de esponjamiento	47
6.2.4.	Velocidad de extracción baja	49
7.	Conclusiones y Recomendaciones.....	51
7.1.	Conclusiones	51
7.2.	Recomendaciones	52
8.	REFERENCIAS.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Block Caving Tradicional(a)), Mecanizado (b)) y Panel Caving H.C (c)) [4].	4
Figura 2.2: Grafico de estabilidad de Laubscher (a) y grafico extendido de Mathews (b) [7].	4
Figura 2.3: Zonas identificadas en la propagación del caving [7, 8].	5
Figura 2.4: Arco cohesivo de tipo mecánico [11].	7
Figura 2.5: Representación de Airgap [8].	7
Figura 2.6: Estallido de Finos en minería [12].	8
Figura 2.7: Estallido de Barro [4].	8
Figura 2.8: Efecto pistón en un Airbursts [14].	9
Figura 2.9: Ubicación sector Inca-Oeste [11].	11
Figura 2.10: Litología presente en Inca Oeste [1].	12
Figura 2.11: Registro de eventos sísmicos (21/07/1999-05/12/1999) [1].	12
Figura 2.12: Solución para inducir caving [1].	13
Figura 2.13: Secuencia de Colapso, primer estallido de aire [1].	13
Figura 2.14: Registro de eventos sísmicos (09/12/1999-29/02/2000) [1].	14
Figura 2.15: Litología de la mina NorthParkes [19].	14
Figura 2.16: Diseño minero del yacimiento E26, Izq y Der vistas en 3D, Centro vista en planta [20].	15
Figura 2.17: Litología presente en el yacimiento E26 [20].	15
Figura 2.18: Pila de material de 60m con función de colchón de seguridad [20].	16
Figura 2.19: Incremento del Airgap en el yacimiento [20].	16
Figura 2.20: Aigrap final (Izq) y Caída de 0.5Mt de roca (Der) [20].	17
Figura 2.21: Causas del Airburst (Izq) y Salidas de aires (Der) [18].	17
Figura 2.22: Daño a equipos mineros y de perforación [20].	18
Figura 2.23: Impacto de las principales orientaciones de estrés en el undercut [7].	19
Figura 2.24: Ejemplos de resultados de propagación de caving en base a variación de parámetros [23,24].	19
Figura 2.25: Recreación del colapso en la mina Parabola a través de la metodología de Sainsbury [27].	20
Figura 2.26: Escenarios simulados [15].	21
Figura 2.27: Velocidades máximas del aire en cada simulación [15].	21
Figura 2.28: Velocidades máximas en función de la altura de airgap y el d50 [16].	23
Figura 2.29: Relación entre Volumen de material quebrado y Volumen de airgap [29].	24
Figura 3.1: Metodología propuesta para obtener volúmenes de airgaps y sus intensidades.	25

Figura 3.2: Representación esquemática de sloss para diversos grados de daño en un macizo rocoso [29]....	26
Figura 3.3: Criterio de Mohr-Coulomb en Flac3D [30].	27
Figura 3.4: Acoplamiento utilizado.	28
Figura 3.5: Esquema de los bloques de la vecindad y el movimiento ascendente del bloque vacío. (A) Antes de la extracción y (B) después de la extracción [33].	29
Figura 4.1: Representación caso 1, V.extracción y V.propagación normal (a) y V.extracción mayor a V.propagación (b).	30
Figura 4.2: Representación caso 2, V.extracción y V.propagación normal (a) y Sin velocidad de propagación (b).	30
Figura 4.3: Geometría de Caveback (Caso 1).	31
Figura 4.4: Malla de extracción Caso 1.	32
Figura 4.5: Geometrías de Caveback (Caso 2).	33
Figura 5.1: Volumen de airgap y muckpile con 35% de esponjamiento para el caso 1.	36
Figura 5.2: Volumen de airgap con variación de esponjamiento para el mes 1.	36
Figura 5.3: Volumen de airgap con variación de esponjamiento para el mes 4.	37
Figura 5.4: Volumen de airgap con variación de esponjamiento para el mes 7.	37
Figura 5.5: Volumen de Airgap acumulado dentro de la cavidad, Caso 1.	38
Figura 5.6: Alturas de Airgap alcanzadas dentro de la cavidad, Caso 1.	38
Figura 5.7: Volumen de airgap y muckpile con 35% de esponjamiento para el caso 2.	39
Figura 5.8: Mes 1 con variación de esponjamiento de la muckpile.	40
Figura 5.9: Mes 4 con variación de esponjamiento de la muckpile.	40
Figura 5.10: Mes 7 con variación de esponjamiento de la muckpile.	41
Figura 5.11: Volumen de Airgap acumulado dentro de la cavidad, Caso 2.	42
Figura 5.12: Altura máxima de Airgap dentro de la cavidad con variación de esponjamiento (ϵ), Caso 2.	42
Figura 6.1: Incremento del Volumen de Airgap con 0% de esponjamiento.	47
Figura 6.2: Volumen y Altura de Airgap obtenido con 0% de esponjamiento.	48
Figura 6.3: Formación de Volumen de Airgap con Extracción menores.	49
Figura 6.4: Grafico de Altura y Volumen máximo de Airgap.	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Clasificación de Beaufort para Velocidades de aire [17].	10
Tabla 4.1: Parámetros geomecánicos Caso 1.	31
Tabla 4.2: Parámetros geomecánicos Caso 2.	33
Tabla 6.1: Parámetros empleados en la fórmula de Palma [16].	43
Tabla 6.2: Relación de velocidades de aire y categorías de huracán [17].	44
Tabla 6.3: Velocidades máximas promedio de estallido de aire en [km/h], Caso 1.	44
Tabla 6.4: Velocidades máximas promedio de estallido de aire en [km/h], Caso 2.	45
Tabla 6.5: Variación de las dimensiones del DP.	46
Tabla 6.6: Velocidades máximas promedio de estallidos de aire [km/h] con variación de d50.	47
Tabla 6.7: Velocidad máxima promedio de estallido de aire [km/h] con 0% de esponjamiento.	48
Tabla 6.8: Velocidades máximas promedio para un estallido de aire con velocidades de extracción bajas.	50

1. INTRODUCCIÓN

La minería subterránea enfocada en caving ha logrado mejoras en términos de producción y beneficios económicos debido a su capacidad de permitir a las empresas mineras extraer cuerpos mineralizados masivos con menores costos operacionales, ya que solo se requiere perforación y tronadura inicial para que luego el macizo rocoso se vaya hundiendo por sí solo producto de la gravedad.

Las metodologías de caving poseen altos riesgos geomecánicos los cuales aparecen desde un inicio hasta el final de la operación minera. Al igual que en cielo abierto, estos riesgos pueden llevar a que una operación minera rentable económicamente acabe en clausura por parte de las autoridades pertinentes debido al descuido o poca preocupación por parte de sus ingenieros a cargo.

Los métodos de caving más conocidos y utilizados Block Caving y Panel Caving, donde uno de los mayores retos que estos presentan es lograr ritmos de extracciones altos, pero sin comprometer las labores, ya que a medida que aumenta este ritmo, el airgap que se genera dentro de la cavidad, el cual corresponde a aire/vacío entre una columna de material quebrado y el cave back, ira aumentando lo que significa un mayor riesgo si se produjese algún tipo de estallido, como lo son los de airburst [1]. Otro parámetro que es difícil de controlar y que suele ir de la mano con estos estallidos es la propagación del caving, algo que con el tiempo e investigaciones realizadas a desarrollado técnicas de preacondicionamiento capaces de reducir la calidad del macizo rocoso para obtener propagaciones de caving más favorables reduciendo el riesgo de la formación de arcos estables. Pero aun con todas estas mejoras logradas, los estallidos de aires siguen presentes [1].

Si bien se han realizado estudios con relación a esta temática, estos siguen siendo pocos en comparación con otros problemas presentes en la minería de caving, por lo que es de vital importancia obtener una metodología para determinar el airgap que se forma producto de la extracción y determinar su potencial riesgo si llegara a ocurrir un estallido de aire a través de softwares permitiendo el modelamiento numérico variando los parámetros que mayor influyen, ya que recrear uno de estos eventos en físico suele ser más dificultoso. Por tanto, la presente investigación se centrará en determinar el riesgo de estallidos de aires en la minería del caving.

1.1. Objetivo General

- Obtener una metodología para determinar la intensidad de un potencial estallido de aire en minería de caving.

1.2. Objetivos Secundarios

- Identificación del volumen del airgap a través del software FlowSim y Flac3D utilizando diversas configuraciones de parámetros.
- Realización de simulaciones en Flac3D para comprender la importancia de parámetros geomecánicos en la propagación del caving.
- Cuantificación de las velocidades máximas de estallidos de aire para diferentes escenarios.

1.3. Alcances

En esta investigación se tienen las siguientes limitaciones:

- Realización de un modelo sintético con datos de minas de BC.
- No se consideran parámetros como el agua, dilución y solo se utiliza un tipo de macizo rocoso.
- Se varía el tonelaje extraído mensual en base a 3 velocidades de extracción definidas para reducir tiempos de simulación.

2. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

Este capítulo consiste en la realización de una revisión bibliográfica asociada a la minería del caving junto con sus problemas geomecánicos y algunos casos de estudios respecto a la temática de esta investigación con el propósito de tener un contexto de la problemática que se busca solucionar.

2.1. Caving en Minería Subterránea

Con la transición de las empresas mineras desde cielo abierto a minería subterránea, junto con el agotamiento de las reservas cercanas a superficie, las empresas mineras se han visto en la necesidad de profundizar sus labores y recurrir a métodos económicamente rentables para poder obtener beneficios. Debido a esto, la utilización de metodología de hundimiento o caving es una alternativa bastante rentable, gracias a sus altas capacidades de producción y bajos costos operacionales (entre 5-15\$/ton), ya que casi todo el proceso es realizado por la gravedad mientras que la empresa solo debe preocuparse de extraer el mineral.

Existen tres métodos subterráneos basados en hundimiento, Sublevel Caving, Block Caving y Panel Caving, donde los más importantes y utilizados por la industria corresponden a los últimos dos con sus respectivas variantes que se han ido desarrollando a lo largo de los años [2]. La diferencia que existen entre estos dos métodos radica en que en Block Caving (ver Figura 2.1 a) y b)) corresponde a un método masivo de gran escala en donde el mineral se hunde a través de bloques o áreas de producción de forma natural tras la generación de un quiebre del macizo rocoso en un nivel conocido como de hundimiento, junto con la ayuda de la gravedad y el reordenamiento de esfuerzos internos en la roca esta se va fracturando en fragmentos de un tamaño más manejable que se puede extraer en los puntos de extracción por equipos LHD (Load Haul Dump) [3]. En la metodología de Panel Caving (ver Figura 2.1 c)) la forma de fracturar el macizo rocoso es prácticamente idéntica, pero en este caso el hundimiento es continuo a través de paneles.

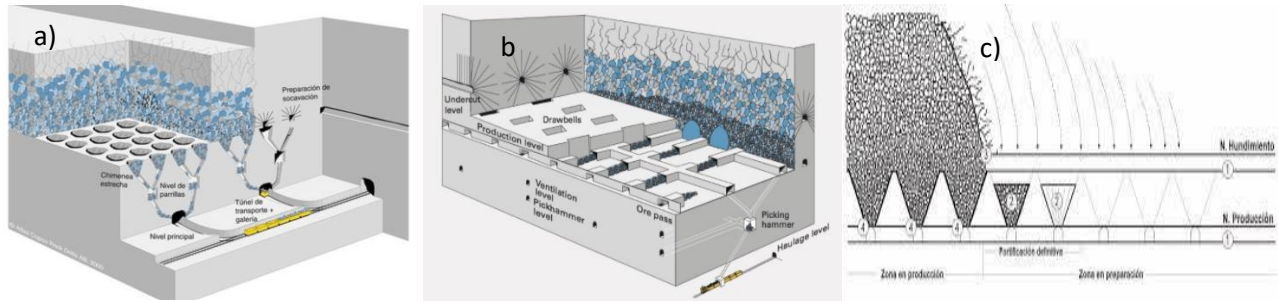


Figura 2.1: Block Caving Tradicional(a)), Mecanizado (b)) y Panel Caving H.C (c)) [4].

2.2. Propagación del Caving

Se han desarrollado varias estrategias para determinar la hundibilidad de un macizo rocoso que se desea hundir, donde las más recurrida o utilizada corresponde a los gráficos de estabilidad empíricos, estos gráficos relacionan el RH (Radio Hidráulico) el cual corresponde a la razón entre el área basal y el perímetro de la excavación junto con el MRMR (Mining Rock Mass Rating) donde el más común corresponde al de Laubscher en 1987 el cual fue creado en base a la recolección de datos de varias minas de caving del mundo, donde en este grafico se representan tres zonas, estables, transicionales y de hundimiento [5]. Debido a que el grafico de Laubscher era poco preciso para MRMR sobre 50 [6], este resulta ser menos confiable en comparación con el grafico de estabilidad extendido de Mathews. (ver Figura 2.2).

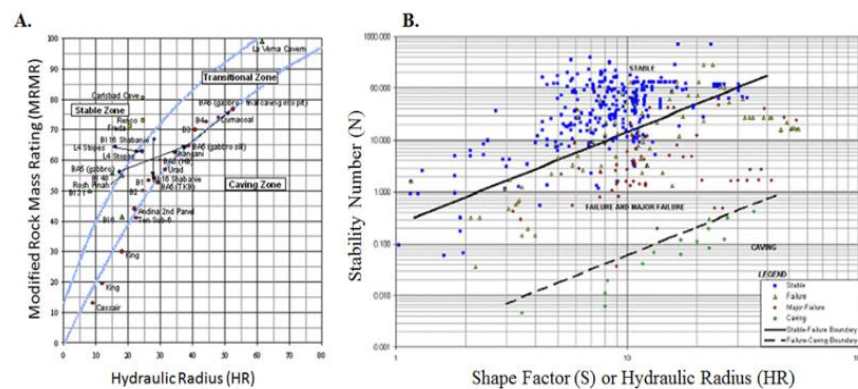


Figura 2.2: Grafico de estabilidad de Laubscher (a) y grafico extendido de Mathews (b) [7].

El proceso de caving inicia con la utilización de Perforación y Tronadura para generar la socavación inicial requerida, luego la extracción del material, el cual se esponja, provoca que la roca que se encuentra intacta sobre la pila de material quebrado empiece a debilitarse mientras ocurre reordenamiento de los esfuerzos. Mientras continúe la extracción del material, el quiebre en la roca continuará propagándose por toda la altura de la columna hasta llegar a la superficie.

De todos los modelos que se han realizado a lo largo de la historia para representar el comportamiento del caving dentro de una cavidad, el más aceptado es el propuesto por Duplancic y Brady [8] el cual se aprecia en la Figura 2.3, en este modelo se aprecian 5 regiones en una zona de caving [9], las cuales son las siguientes:

- **Mobilized zone:** Corresponde al material quebrado el cual ha caído desde el caveback moviéndose hacia los puntos de extracción esperando a que los equipos LHD lo extraigan.
- **Airgap:** Zona que se encuentra entre la pila de material quebrado y el caveback o parte superior de la cueva, corresponde a aire que su tamaño depende de la velocidad de extracción y la velocidad del caving.
- **Yielded zone** Zona caracterizada producto del macizo rocoso debilitado debido al fracturamiento inducido por la propagación del caving. Los esfuerzos presentes suelen ser bajos por lo que la actividad presente es nula.
- **Seismogenic zone:** Esta zona concentra la actividad sísmica producto del deslizamiento a lo largo de estructuras preexistentes y generación de nuevas fracturas.
- **Elastic zone:** En esta zona, la roca cava alrededor de la zona de caving se comporta de forma plástica.

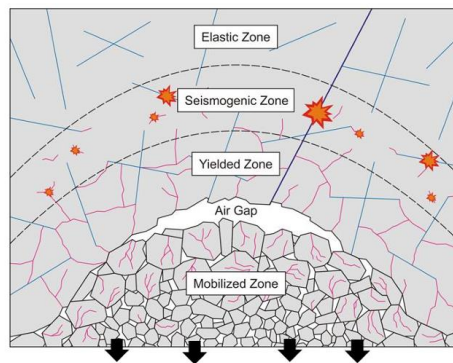


Figura 2.3: Zonas identificadas en la propagación del caving [7, 8].

Como se menciona, uno de los factores que dependen de la propagación del caving corresponde a la velocidad a la cual se extrae el material quebrado, donde se identifican dos velocidades medidas en $[\text{ton}/\text{m}^2 \cdot \text{día}]$:

- 1) **Velocidad de extracción en quiebre:** Esta velocidad se encuentra durante el inicio de la socavación hasta la conexión del caving con superficie o sectores explotados en una zona superior. Juega en rol importante en el tamaño del airgap por lo que se suele restringir esta velocidad para reducir problemas operaciones o que atenten contra los trabajadores, ya que un pobre control puede llevar a la formación de colgaduras o airblast. Por estas razones es que la velocidad de extracción se relaciona con la velocidad de propagación del caving y se va ajustando conforme se vaya propagando el caving.
- 2) **Velocidad de extracción en régimen:** Una vez que el caving conecta con superficie o con un nivel superior, la restricción en la velocidad de extracción es liberada y solo queda restringida por los parámetros de los equipos encargados de extraer el material quebrado. Debido a que hubo conexión, el airgap pierde su relevancia y por esta razón es que se puede aumentar la velocidad, ya que se asume que toda la columna se encuentra fragmentada. Por estas razones, la velocidad de extracción en régimen es mayor que la velocidad de extracción en quiebre.

2.3. Problemas Geomecánicos

Aunque la minería del caving suele ser rentable, esta viene con muchos riesgos en el área de la geomecánica, en especial aquellos que se relacionan con estallidos de aires o problemas en el macizo rocoso que pueden llegar a generarlos, algunos de estos se presentan a continuación.

2.3.1. Arcos Cohesivos

Los arcos cohesivos deben de entenderse como una respuesta natural del macizo rocoso con el fin de restaurar el equilibrio en el lugar. Estos ocurren debido al incremento en la compresión del material en la zona de esfuerzos y la relajación del arco. Existen dos tipos, los que se forman en caveback de un método de hundimiento y los que se forman en piques de traspaso o puntos de

extracción debido a encadenamiento estables del medio granular. Esta formación genera grandes problemas debido a que disminuye el ritmo y la disponibilidad de un punto o puntos de extracción y si se cumplen otras condiciones en el lugar provocar problemas más severos (ver Figura 2.4) [10].

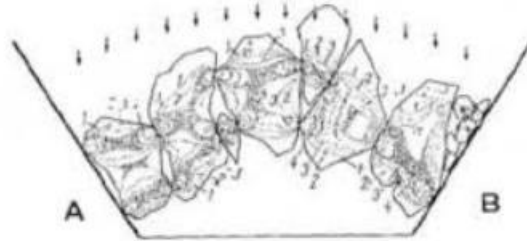


Figura 2.4: Arco cohesivo de tipo mecánico [11].

2.3.2. Airgap

Es el espacio que se forma entre la parte superior de la pila de material quebrado y el caveback el cual se encuentra conformado por aire como se aprecia en la Figura 2.5, a medida que va ocurriendo la propagación y desprendimiento de la roca, el airgap va subiendo, esto bajo buenas circunstancias. El tamaño que este tendrá depende de la velocidad de extracción en quiebre que se posea y la velocidad a la cual se está propagando el caving. Un nulo o pobre control de esta zona puede desencadenar en diversos estallidos, dependiendo de las condiciones que se encuentre presentes en la cavidad.

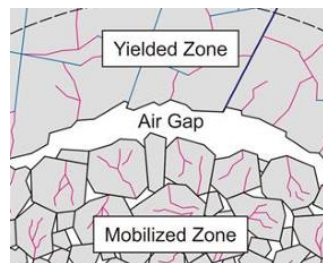


Figura 2.5: Representación de Airgap [8].

2.3.3. Estallidos de Finos

Estos estallidos se producen debido al flujo gravitacional y una granulometría del material baja, provocándose una acumulación de material fino y por lo general seco en la zona de extracción, en la Figura 2.6 se aprecia este fenómeno. Si se presentan espacios vacíos entre los fragmentos producto de una alta distribución de

tamaños, se provoca la migración a través de la percolación de este. Este material fino puede aparecer producto de la explotación de sectores productivos anteriores, fragmentación secundaria que se produce en la columna, la calidad de las rocas que provocan una mayor facilidad a su quiebre [12].



Figura 2.6: Estallido de Finos en minería [12].

2.3.4. Estallidos de Barros

Al igual que otros estallidos, estos corresponden a una entrada repentina y violenta de material agua-barro en el o los puntos de extracción, para que este evento ocurra se requiere de la presencia de 4 factores importantes: un material que forme el barro, la presencia de agua, una perturbación que provoque el fenómeno y un punto de descarga o salida por donde ocurra la salida repentina de este material [13], como se aprecia en la Figura 2.7. Cuando uno de estos eventos ocurre, provoca la pérdida de las zonas afectadas junto con grandes daños tanto a infraestructura como equipos mineros [14].



Figura 2.7: Estallido de Barro [4].

2.3.5. Estallidos de Aires

Los estallidos de aires son producto de un efecto pistón el cual es generado debido al colapso violento de un gran volumen de roca que se encuentra dentro de una cavidad subterráneo, en la Figura 2.8 se aprecia este efecto. La escala que tendrá este evento depende del tamaño de la cavidad, el volumen de roca que colapsa, la velocidad a la cual está colapsando, junto con otros parámetros dependientes del macizo rocoso y operacionales [15,16].

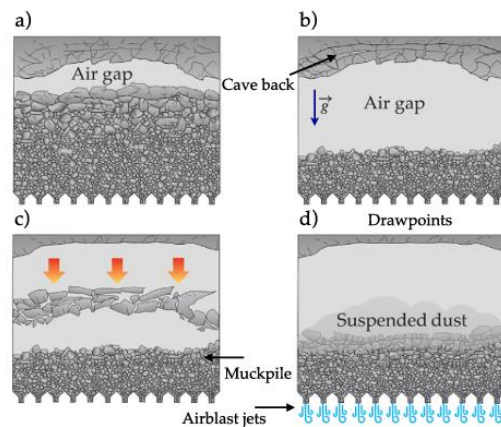


Figura 2.8: Efecto pistón en un Airbursts [14].

Dependiendo de la magnitud del evento, puede provocar volcamiento de equipos presentes en el lugar, daño o arranque a elementos de soporte, daño a trabajadores presentes, entre otros daños de diversa categoría. Se utiliza la escala de Beaufort [17] para clasificación de velocidades de aires en categorías de huracán para asociar las velocidades de estallidos de aires con daños posibles que provocarían (ver Tabla 2.1) en los puntos de extracción. Estos eventos pueden originarse en piques de traspaso si se cumplen las condiciones, donde se requeriría la formación de un arco estable en el punto de descarga o colgaduras.

Tabla 2.1: Clasificación de Beaufort para Velocidades de aire [17].

Velocidad el aire	Clasificación	Potencial Impacto
< 55 km/h	Vendaval moderado (Verde)	Problemas para caminar
55-125 km/h	Huracán categoría 1 (Amarillo)	Caída de personas. Daño en señaléticas, servicios, etc.
125-170 km/h	Huracán categoría 2 (Naranja)	Proyección de pequeños objetos y volcamiento en vehículos ligeros. Daño grave en ventanas, servicios, etc.
170-225 km/h	Huracán categoría 3 (Rojo)	Grandes objetos son proyectados. Daño en las instalaciones aledañas.
+225 km/h	Huracán categoría 4 (Rojo)	Daños severos, volcamiento y proyección de equipos mineros. Colapso de instalaciones metálicas en el sector.

Algunos parámetros que afectan la escala de los estallidos de aires son:

- **Radio Hidráulico:** Entre mayor sea el RH de la cavidad, mayor es el potencial de desprendimiento de un gran volumen de roca aumentando el posible daño que se generaría.
- **Velocidad de hundimiento del macizo rocoso:** Para que el riesgo disminuya se debe de tener una propagación adecuada en la columna de mineral que se está hundiendo, cualquier problema de propagación llevaría a la formación de arcos estables o cohesivos aumentando el riesgo de un posible estallido de aire.
- **Granulometría del material quebrado:** Si se presentan tamaños del material quebrado que generen vacíos entre ellos, al igual que la percolación en materiales finos, es más fácil que el aire viaje por la pila de material quebrado y salga con mayor velocidad por las salidas que encuentre.

- **Altura del material quebrado:** La primera medida que se utiliza en minería de caving para evitar o disminuir el riesgo de estallidos es dejar una altura de material quebrado para que actúe como colchón y disminuya o detenga el fenómeno. Si se tienen velocidades de extracción desfavorables para el caving, provocaría que esta altura disminuya, teniendo un colchón que no cumpla su función.

2.4. Casos de Estudios

2.4.1. El Salvador

La División El Salvador utiliza el método de BC basado en el diseño El Teniente-LHD, en una zona denominada como sector Inca-Oeste (ver Figura 2.9), donde se utiliza PC con una grilla de 15x15m, ocurrió la formación de un arco estable que provoco un estallido de aire.

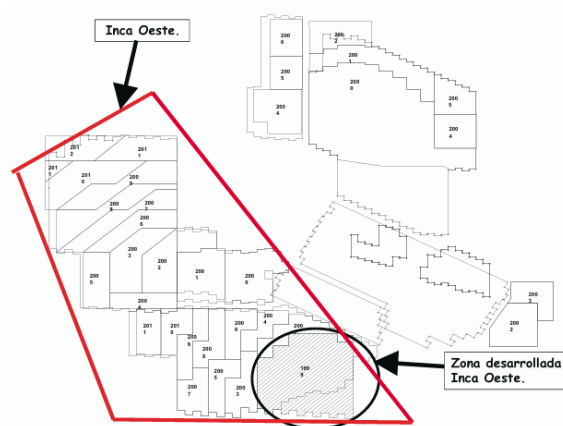


Figura 2.9: Ubicación sector Inca-Oeste [11].

En el sector Inca-Oeste la litología primaria corresponde a andesita primaria abiotizada con una veta intrusiva de 20m de ancho correspondiente a andesita primaria silicificada, la altura de mineralización en este sector es de 180 a 210 metros por lo que la utilización de una metodología de hundimiento era favorable (ver Figura 2.10) [11].

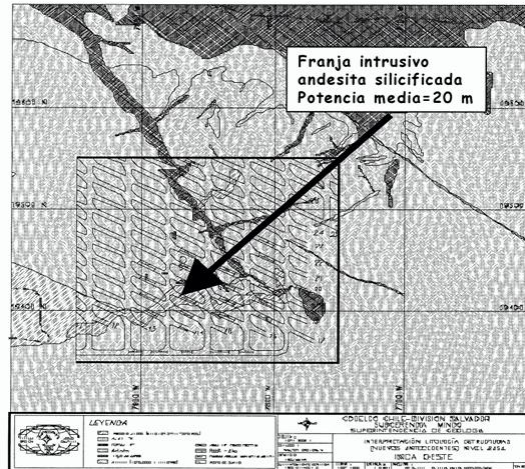


Figura 2.10: Litología presente en Inca Oeste [1].

En el año 1999, en este sector se formó un arco cohesivo de 15.000 m² sobre varios puntos de extracción, por lo que las velocidades en esta zona fueron disminuyendo hasta su detención debido a los riesgos que estaban presentes [1]. En los sectores aledaños a la zona afectada, se redujo las velocidades con el fin de evitar un colapso no planeado. Entre los años 1997 y 1999 se hizo registro de varios sismos en la zona afectada y alrededor de esta donde se refleja el reordenamiento de los esfuerzos en la zona, este reordenamiento se aprecia en la Figura 2.11.

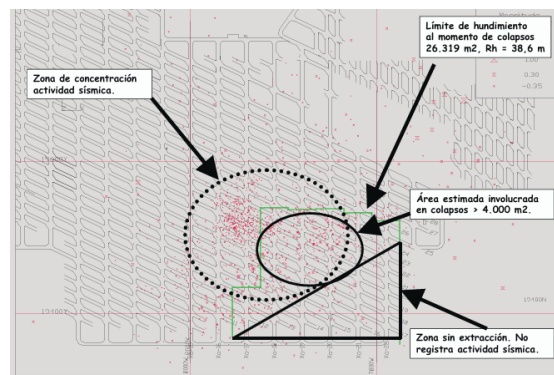


Figura 2.11: Registro de eventos sísmicos (21/07/1999-05/12/1999) [1].

La empresa, para poder retomar las labores en el sector, concluyó que se requeriría inducir caving en los sectores aledaños a la zona afectada o utilizar Perforación y tronadura (PyT) en la zona del caveback, similar a las soluciones para quitar colgaduras. Debido al tiempo que requeriría la implementación de PyT (10 meses) en el lugar, junto con varios factores de seguridad hacia los trabajadores, los ingenieros a cargo de solucionar este problema decidieron descartar la opción y seguir con provocar el colapso a través de inducir caving (ver Figura 2.12).

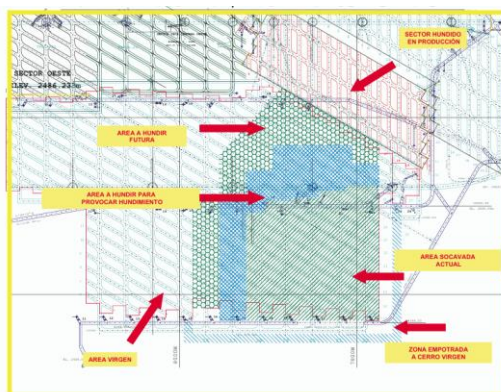


Figura 2.12: Solución para inducir caving [1].

El día 5 de diciembre de 1999, en el sector Inca-Oeste, ocurrió el primer colapso de 4000m² el cual genero vientos de 500km/h y el día 8 de diciembre de 1999 ocurrió el segundo colapso el cual tuvo área de colapso y vientos menores, debido a que el primer colapso provoco la formación de una pila de material quebrado sobre los puntos de extracción afectados disminuyendo el airgap y generando un colchón que disminuyo los efectos del segundo colapso [1]. En la Figura 2.13 se aprecian las etapas de este evento.

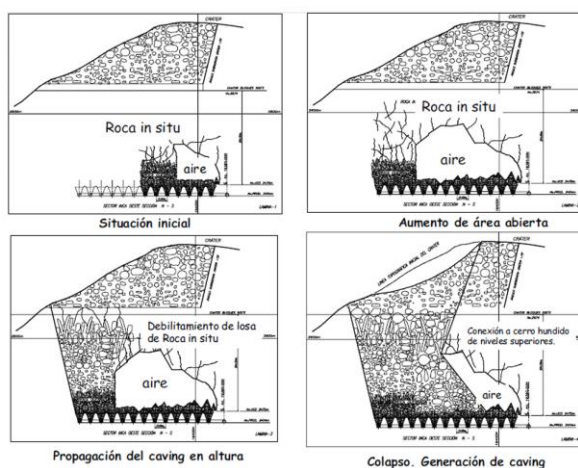
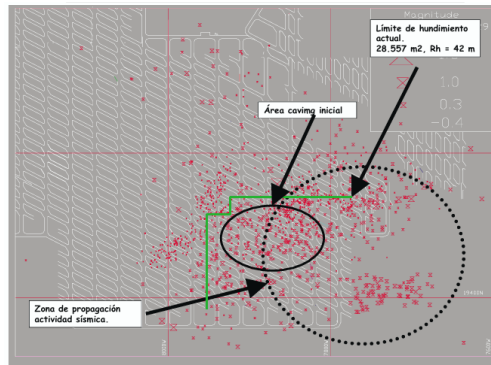


Figura 2.13: Secuencia de Colapso, primer estallido de aire [1].

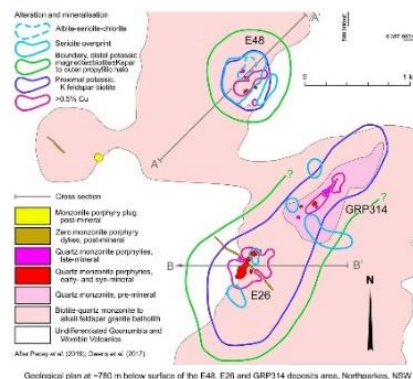
Con respecto a los daños generados producto de este colapso, 17 trabajadores sufrieron heridas menores producto de caídas, varios vehículos resultaron volcados, destruidos o con daños, elementos de soportes sufrieron daños, levantamiento de polvo, etc. Luego de lo sucedido, la actividad sísmica en la zona afectada se vio incrementada concentrándose en la zona donde había estado el arco cohesivo (ver Figura 2.14).



La empresa, luego de este evento, decidió aumentar las medidas de seguridad en todas sus zonas de trabajos, aumentando las mediciones sísmicas, mayores controles a las velocidades y a la propagación del caving con el fin de evitar futuras formaciones de arcos cohesivos, entre otras.

2.4.2. NorthParkes

La mina NorthParkes se ubica cerca de Parkes en New South Wales, Australia, comenzó a operar el año 1993 con 2 open pits y 1 mina subterránea, se encarga de producir cobre y oro, usando el método de BC en minería subterránea, producto de este método el año 1999, en el sector E26 ocurrió un gran estallido de aire [18].



El yacimiento E26 de la mina NorthParkes empezó como un open pit que luego cambio a subterráneo, similar a la decisión que tomo Chuquicamata en Chile, producto de que iba a ser el primer yacimiento de Australia en usar el método de BC, la empresa decidió contratar a los mejores ingenieros en este método con el objetivo de poder tener un diseño minero favorable (ver Figura 2.16) y evitar problemas futuros debido a la litología presente en el lugar (ver Figura 2.15).

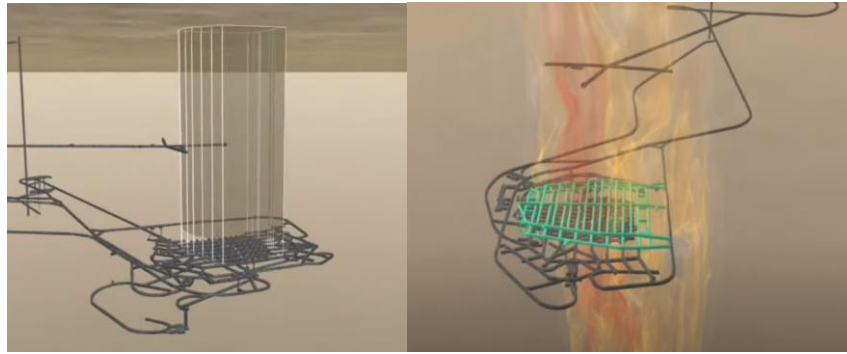


Figura 2.16: Diseño minero del yacimiento E26, Izq y Der vistas en 3D, Centro vista en planta [20].

Una vez iniciada las labores de explotación en el año 1997, la empresa decidió dejar partir a estos ingenieros expertos, por lo que los únicos trabajadores que quedaron eran para labores de extracción de minerales y otras labores, pero casi ninguno con experiencia previa en este método. En este yacimiento se encuentran dos zonas litológicas, en la Figura 2.17 se aprecian y estas corresponden a:

- **Gypsum Leached Zone:** Esta zona corresponde a yeso el cual ha sido disuelto producto de la presencia de agua, esta agua aparece debido a las lluvias en este sector de Australia, la cual percola a través de la roca y genera un macizo rocoso menos competente.
- **Heavy Gypsum Veining:** Corresponde a una presencia abundante de vetas de yeso en esta parte del macizo rocoso, también se le conoce como abundante formación de vetas de yeso, por lo que esta parte presenta mejor competencia.

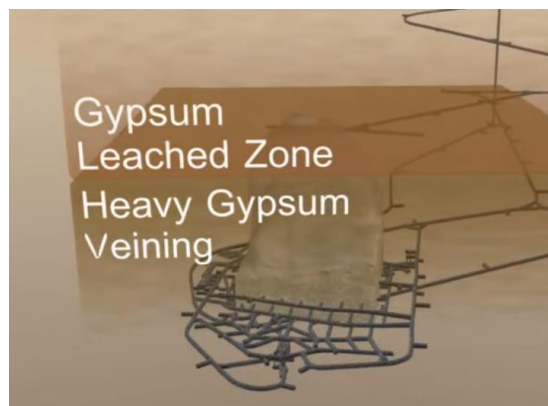


Figura 2.17: Litología presente en el yacimiento E26 [20].

Desde el inicio de las actividades de caving en el cuerpo mineralizado, hubo problemas con la formación de arcos estables o cohesivos por lo que la empresa tomó la decisión de usar PyT con

fracturamiento hidráulico (FH) pero esto no trajo los resultados esperados, aun así, la empresa siguió usando este método. Para poder cumplir con las metas productivas, la empresa tomo la decisión de aumentar los ritmos de extracción de $0.12 \text{ [t/m}^2\cdot\text{día]}$ en 1997 a $0.26 \text{ [t/m}^2\cdot\text{día]}$ en 1999, algo que no es sugerido cuando no se tiene un caving favorable. Para medidas de seguridad, se dejó una altura de pila de quebrado correspondiente a 60m como colchón con el objetivo de proteger los niveles de extracción si ocurriese un evento de estallido como se aprecia en la Figura 2.18, esta fue la única medida que se mantuvo durante los años. A medida que la operación avanzaba, la altura del airgap dentro de la cavidad iba en aumento, pasando desde 50m en 1997 a 110m entre los años 1998 y 1999 hasta alcanzar los 180m antes de ocurrir el estallido de aire (ver Figura 2.19).

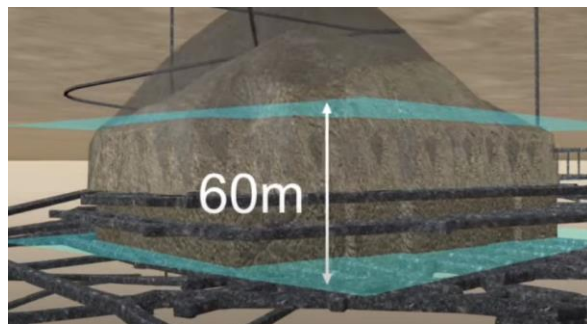


Figura 2.18: Pila de material de 60m con función de colchón de seguridad [20].

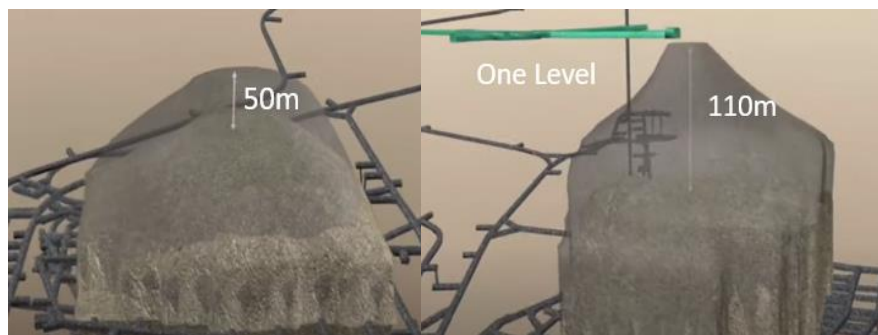


Figura 2.19: Incremento del Airgap en el yacimiento [20].

En un nivel conocido como OneLevel, el cual sería para futuras labores en el lugar, ocurrió un evento de estallidos de finos lo que llevo a la colocación de un muro de concreto y se colocó extensómetros para medir y registrar actividad sísmica en el lugar, con el objetivo de aumentar la seguridad en el sector. El día 07 de junio de 1999, en el yacimiento E26 de la mina NorthParkes, ocurrió un estallido de aire nunca antes visto. Previo a este suceso, se registró la caída de 0.5Mt de roca desde la zona del arco cohesivo (ver Figura 2.20 Der). Para ese día la pila de material quebrado

y la zona donde se formó el arco cohesivo había registrado un airgap de 180m y 50m con respecto al OneLevel (ver Figura 2.20 Izq).

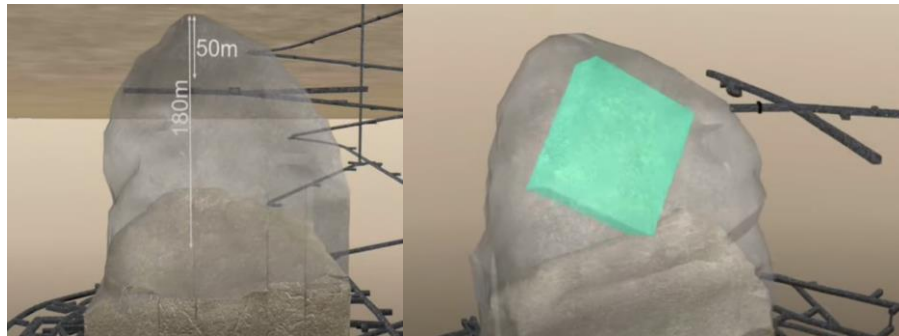


Figura 2.20: Aigrap final (Izq) y Caida de 0.5Mt de roca (Der) [20].

La cantidad de roca que provoco este estallido corresponde a 5.5 Mm^3 de macizo rocoso el cual aplasto 4.4 Mm^3 de aire presente en el airgap como se aprecia en la Figura 2.21 Izq, provocando velocidades de aire correspondientes a 1000 km/h o superiores y presiones mayores a 1500 kPa [18]. Ese día había 65 trabajadores haciendo labores de mantención, cuando en un día normal son solo 25 trabajadores. Las principales vías de escape para el aire correspondieron a 3, la primera corresponde a la zona de subducción o cráter, la segunda corresponde a los puntos de extracción y la tercera corresponde al OneLevel (ver Figura 2.21 Der).

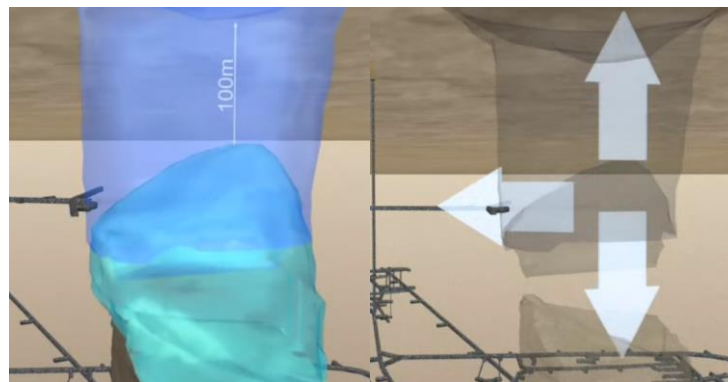


Figura 2.21: Causas del Airburst (Izq) y Salidas de aires (Der) [18].

Esta última zona de escape fue por donde la gran mayoría de aire fue expulsado a grandes velocidades provocando la muerte de 4 trabajadores (2 contratistas de Pontil y 2 trabajadores de NorthParkes), generando múltiples daños a los sistemas de ventilación, donde ocurrió la destrucción de un muro de 1ton el cual quedo totalmente destruido y fue expulsado por el conducto de ventilación,

la zona del shaft la cual quedo con daños y hubo registro de trabajadores viendo como salían escombros, 1 vehículo destruido y otro con daños visibles (ver Figura 2.22). Con respecto a los trabajadores que se encontraban en los niveles de extracción y producción, estos sufrieron heridas menores correspondientes a daños auditivos o cegueras momentáneas junto con otras heridas, debido a que el colchón de 60m detuvo parte de este aire es que no hubo consecuencias mayores en esta zona [21].



Figura 2.22: Daño a equipos mineros y de perforación [20].

Las acciones posteriores al colapso fueron de cierre total para el inicio de las investigaciones en el lugar las cuales duraron 24 días, donde se redactó un documento de recomendaciones futuras para labores en BC junto con la formación de nuevas reglas para la extracción y propagación del caving con el fin de que nunca se repita este evento. Cabe destacar que, hasta este incidente, las investigaciones con respecto a estallidos de aire era pocas [21].

2.5. Investigaciones referentes a propagación de caving

La propagación de caving es un factor importante en los estallidos de aires, debido a que una propagación lenta junto con una velocidad de extracción elevada provoca un aumento en el volumen de Airgap generado. Además, dependiendo de las propiedades del macizo rocoso, puede ocurrir que la propagación del caving se detenga formando un arco estable a cierta altura, lo que podría desencadenar en un colapso de la parte superior de la cavidad provocando el efecto pistón que desencadena en el estallido de aire.

Los primeros estudios de propagación de caving empezaron alrededor de los años 70s [7], donde estos eran en 2D y se teorizaba que la presencia de fallas afectaba a la velocidad de propagación, esto se aprecia en la Figura 2.23. Entre los años 1990-2000 ocurrió la transición de modelos numéricos 2D a 3D junto con la incorporación de fallas de forma manual a las simulaciones, donde se obtenían resultados similares a la realidad, pero seguían limitados por el factor computacional y de software,

ya que hasta ese entonces el uso de PFC3D tomaba tiempos de simulaciones extensos para escala mina.

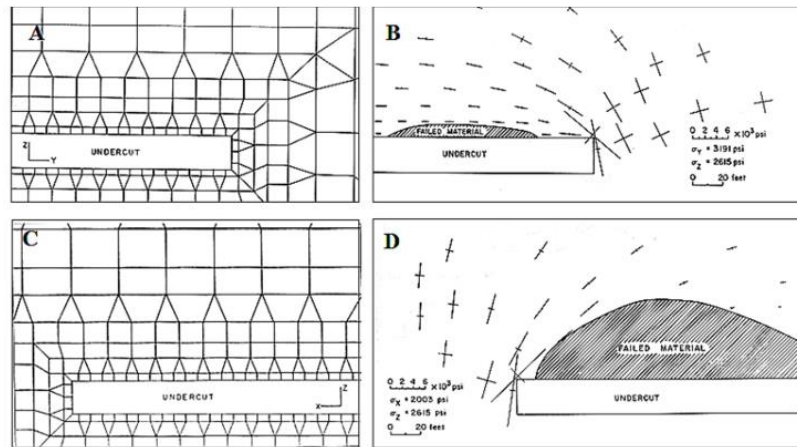


Figura 2.23: Impacto de las principales orientaciones de estrés en el undercut [7].

Pierce [22] creo una forma de propagación de caving la cual se centraba principalmente en la velocidad de extracción y el plan de producción, dándole una nueva visión a como se generaba la propagación en el macizo rocoso, lo cual fue aceptado, pero con ciertas dudas. Sainsbury en el 2008 [23] toma la metodología propuesta por Pierce y logra recrear una propagación de caving para un plan de producción preestablecido logrando incorporar la presencia de fallas al software Flac3D, debido a que este posee más capacidad para simular a escala mina con tiempos mucho menores.

Además, Sainsbury identifica varios parámetros que afectan de buena o mala forma a la propagación del caving [24] (ver Figura 2.24), recreando a través de escenarios sintéticos y un plan de producción distintas geometrías de caving para estos parámetros geomecánicos a través del modelo constitutivo de Mohr-Coulomb y Hoek and Brown.

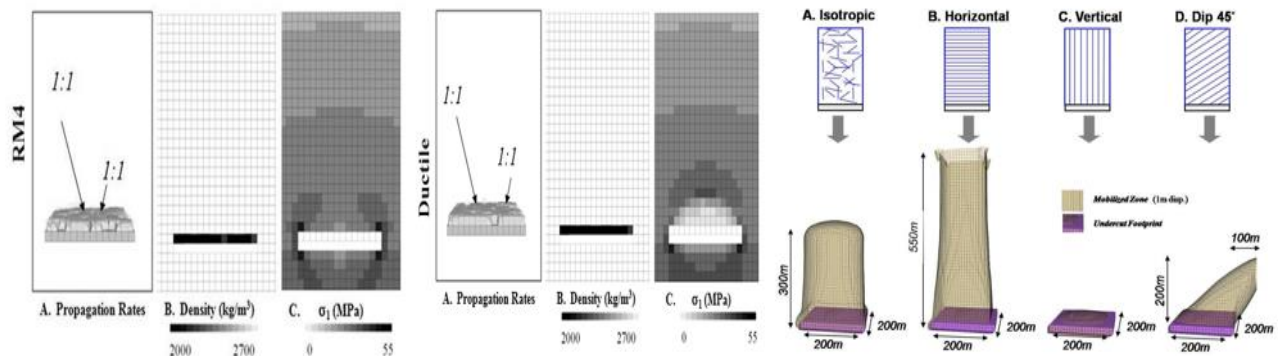


Figura 2.24: Ejemplos de resultados de propagación de caving en base a variación de parámetros [23,24].

Estos estudios sobre propagación de caving [25, 26] permiten observar, para un plan de producción establecido, como se comportaría el macizo rocoso a través del tiempo y predecir con anticipación la formación de arcos estables o reducciones en la velocidad de propagación, previniendo estallidos de aires dentro de las cavidades o colapsos en sectores superiores como se aprecia en la Figura 2.25.

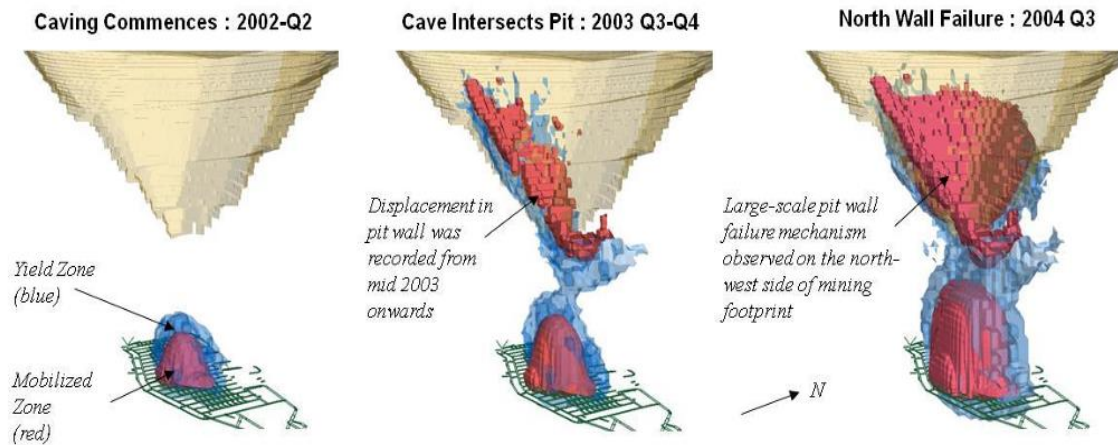


Figura 2.25: Recreación del colapso en la mina Parabola a través de la metodología de Sainsbury [27].

2.6. Investigaciones recientes de Estallidos de Aire o afines

Los estallidos de aire son uno de los riesgos con menor información al respecto en comparación con otros problemas o riesgos geomecánicos, debido a que estos solo ocurren cuando los ingenieros no poseen buenos estudios en base a la propagación del caving que ocurrirá en el macizo rocoso o la velocidad de extracción para un periodo determinado sobrepasa la velocidad de propagación del caving. Los estudios sobre estallidos de aires se centran en comprender si se formara un volumen de Airgap lo suficientemente grande como para poder provocar, a través de un efecto pistón en la cavidad, un estallido de aire de gran intensidad. Palma [15], a través de la utilización de LBM (Lattice Boltzmann Method) y DEM recrean 4 escenarios con distintas formas de muckpile para recrear un estallido de aire donde deja caer un volumen de caveback sobre esta muckpile obtención información sobre la velocidad máxima del aire que se percibiría en los puntos de extracción [15] (ver Figura 2.26).

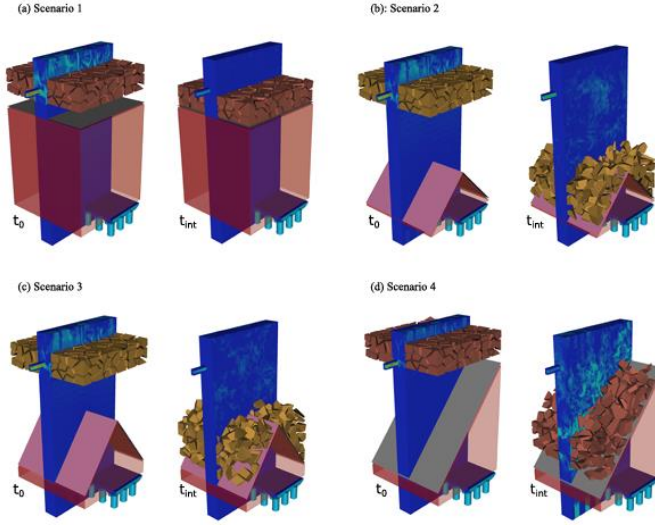


Figura 2.26: Escenarios simulados [15].

En base a estas simulaciones realizadas, Palma obtiene distintos resultados variando la permeabilidad y la forma de la muckpile, lo cual afecta a la velocidad máxima que se apreciaría en los puntos de extracción, estos resultados se aprecian en la Figura 2.27. En base a estas simulaciones se observa como la altura que tenga el Airgap y el tiempo de caída afectan a la intensidad que se genere y a menor permeabilidad presente en la muckpile ayuda a disminuir esta intensidad lo cual se aprecia en la fórmula que obtiene en base a estas simulaciones realizadas.

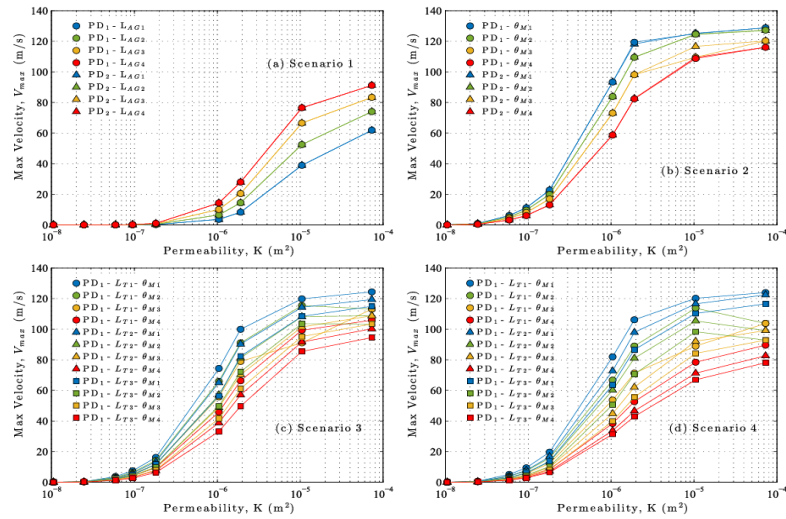


Figura 2.27: Velocidades máximas del aire en cada simulación [15].

$$V_{max} = \alpha_1 \sqrt{2gL_{AG}} \exp\left(\frac{\alpha_2}{Da}\right) \quad (1)$$

Los parámetros que se emplean en la formula obtenida son los siguientes:

- Alpha1: parámetro adimensional de valor 2.223.
- Alpha2: parámetro adimensional de valor $-1.19 \cdot 10^{-6}$
- g: Valor de la gravedad, 9.81 m/s^2 .
- Lag: Altura del Airgap dentro de la cavidad medido en metros [m].
- k: permeabilidad de la muckpile [m^2].
- d: diámetro promedio asumido para partículas formando un medio poroso [m].
- Da: Numero de Darcy expresado como k/d^2 .

La aplicación de esta fórmula requiere de poseer la información sobre la permeabilidad de la muckpile, ya que este parámetro es el que más afecta al resultado de la V_{max} que se apreciaría en los puntos.

En la Figura 2.26 se visualiza como la forma de la muckpile afecta a la intensidad del estallido de aire. Debido a que esta fórmula utiliza el factor de permeabilidad, el cual depende de datos extraídos directamente del lugar estudiado, es que esta fórmula propuesta no entrega un nivel de confianza alto, por lo que Palma [16] realiza nuevas simulaciones con un nuevo modelo sintético en FEM utilizando la ecuación de Ergun simplificada creando un modelo sintético de BC con 2 puntos de extracción, muckpile, Airgap y caveback donde realiza un total de 529 simulaciones variando la altura del Airgap y el d_{50} de la muckpile [16] (ver Figura 2.28). En base a los resultados e investigaciones realizadas, entrega una nueva fórmula donde integra el parámetro de las dimensiones del punto de extracción a la velocidad máxima promedio en m/s que se apreciaría en los puntos de extracción.

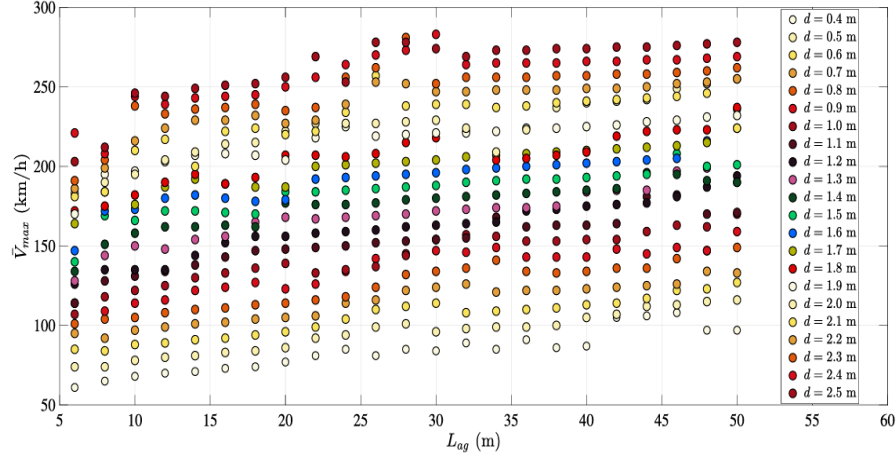


Figura 2.28: Velocidades máximas en función de la altura de airgap y el d50 [16].

$$V_{max} = \alpha_1 \sqrt{2gH_{DP}} L^{\alpha_2} D^{\alpha_3} \quad (2)$$

Los parámetros utilizados en la formula obtenida son los siguientes:

- Alpha1: Parámetro adimensional con valor 8.4832.
- Alpha2: Parámetro adimensional con valor 0.1370.
- Alpha3: Parámetro adimensional con valor 0.6350.
- g: Corresponde a la fuerza de gravedad con valor 9.81 m/s².
- Hdp: Corresponde a la altura del punto de extracción [m].
- Lag: Corresponde a la altura del arigap medido desde la parte superior de la cavidad hasta la parte superior de la muckpile [m].
- Ddp: Corresponde al diámetro del punto de extracción [m].
- d: Corresponde al diámetro de la partícula, se utiliza el d50 [m].
- L: Corresponde al valor obtenido de Lag/Ddp.
- D: Corresponde al valor obtenido de d/Ddp.

Los parámetros alpha1, alpha2 y alpha3 son obtenidos a través del método de mínimos cuadrados.

Aplicando la metodología de Sainsbury [28], Oyarzo [29] realiza una investigación sobre propagación del caveback y airgap en base a tasas de extracción definidas para un Panel Caving con 5 secciones en base a un plan de producción establecido y 3 velocidades de extracción definidas. Realizó un acople de Flac3D y FlowSim BC con diversos softwares con el objetivo de poder comprender la propagación del caveback y la formación de airgaps en base a la tasa de extracción. Obtuvo resultados que permiten tener mayor comprensión de como la propagación del caveback afecta

a la formación de airgaps y esta metodología es aplicable a diversas etapas de la planificación minera, además de concluir que grandes velocidades de extracción generan grandes volúmenes de airgaps, esto se aprecia en el grafico de la Figura 2.29.

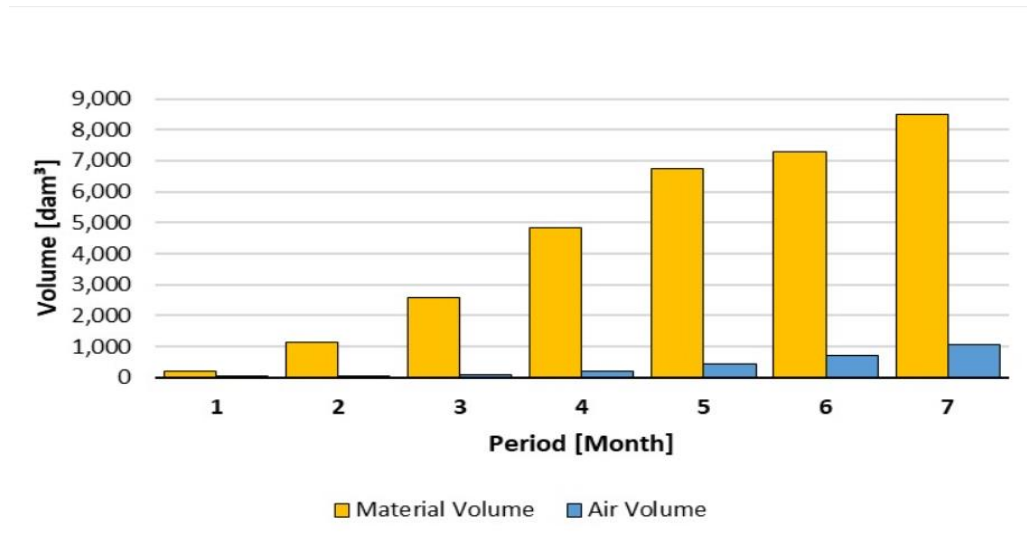


Figura 2.29: Relación entre Volumen de material quebrado y Volumen de airgap [29].

3. Metodología

Para poder comprender y analizar la formación de volúmenes de airgaps y su posterior riesgo de estallidos de aires, se propone generar geometrías de cavebacks relacionada a 2 casos de estudio utilizando el software Flac3D para su posterior análisis en FlowSim BC para obtener el volumen de airgap en base a variación de la velocidad de extracción. Además, se usarán otros softwares con la finalidad de acoplar Flac3D y FlowSim.

En la Figura 3.1 se aprecia la metodología a seguir para lograr obtener los volúmenes de airgaps, para lo cual se requiere diseñar un plan de producción, una malla de extracción y un modelo de bloques requeridos por algunos softwares, los cuales cada uno serán explicados en sus respectivos casos.

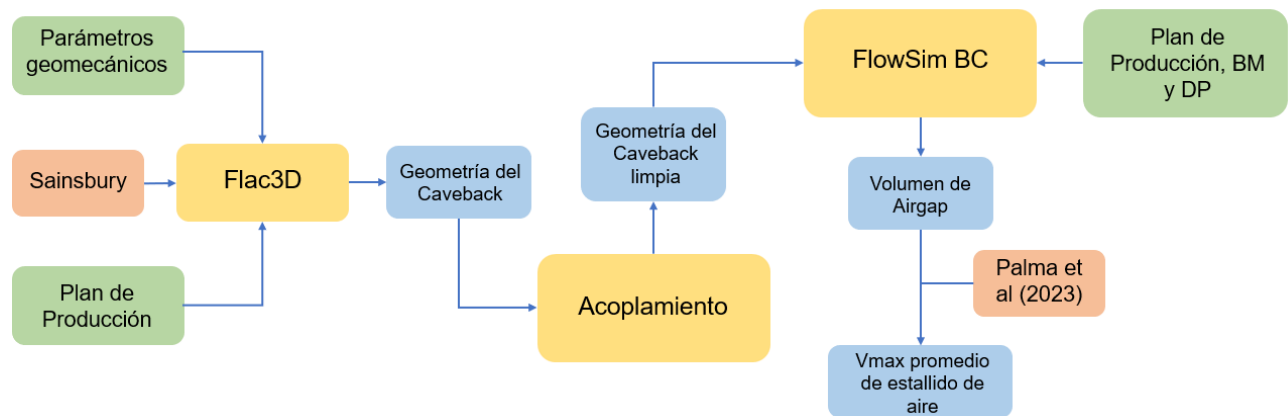


Figura 3.1: Metodología propuesta para obtener volúmenes de airgaps y sus intensidades.

3.1. Flac3D

Software de modelamiento numérico de análisis continuo el cual emplea el método de volúmenes finitos donde se simula el comportamiento tridimensional de estructuras de suelo, roca, concreto y otros materiales. Estos materiales son representados por poliedros con mallado tridimensional los cuales son establecidos por el usuario donde cada elemento se comporta de acuerdo con la razón esfuerzo/deformación lineal o no lineal que se ingrese, en respuesta de las fuerzas o condiciones de bordes aplicadas.

Posee varias funciones y modelos constitutivos para poder modelar el macizo rocoso o el material quebrado, donde en este caso y para poder simular un Block Caving tradicional se utilizarán dos modelos constitutivos, los cuales son:

-Modelo Constitutivo IMASS: Representa el daño alrededor de una excavación, pendiente o proceso de derrumbe. Ha sido desarrollado para representar la respuesta del macizo rocoso a los cambios de tensión donde 4 factores que controlan el comportamiento del macizo rocoso son los siguientes: Cohesión y tensión, fragilidad post-peak, Ablandamiento y comportamiento de dilatación. En la Figura 3.2 se tiene una representación de este modelo.

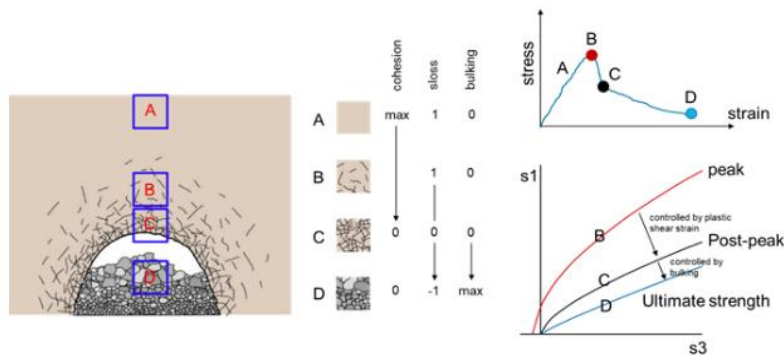


Figura 3.2: Representación esquemática de sloss para diversos grados de daño en un macizo rocoso [29].

-Modelo Constitutivo Mohr-Coulomb: En Flac3D, este modelo es la fusión de una función de fluencia por corte y una función de fluencia por tensión donde la posición de un punto de tensión en esta envolvente está controlada por una regla de flujo no asociada para falla por corte y una regla asociada para falla por tensión. Sigue los parámetros de M-C estándar pero las funciones son ajustadas para un espacio en 3D (ver Figura 3.3).

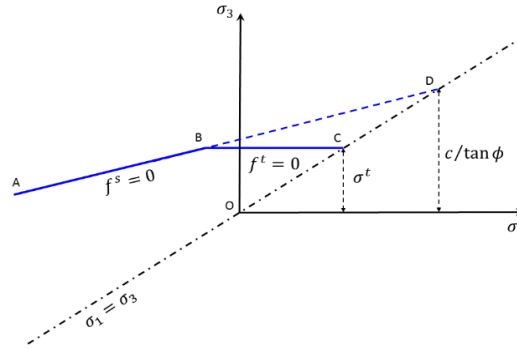


Figura 3.3: Criterio de Mohr-Coulomb en Flac3D [30].

Para ambos casos de estudio se utilizan velocidades de extracción tanto para la creación de las geometrías de cavebacks como para el estudio de generación de airgaps en FlowSim BC, las cuales corresponden a:

- 1) $0.33 \text{ t/m}^2 \cdot \text{día}$ = Velocidad inicial de extracción la cual se aprecia en el inicio de las actividades luego de las tronaduras.
- 2) $0.66 \text{ t/m}^2 \cdot \text{día}$ = Incremento de la velocidad de extracción a medida que se propaga el caving.
- 3) $1 \text{ t/m}^2 \cdot \text{día}$ = Velocidad que se alcanza en régimen y corresponde a la velocidad máxima antes de la conexión con superficie o un nivel anterior.

3.2. Acoplamiento

El software Flac3D nos permite visualizar la geometría del caveback en base al plan de producción que se quiera evaluar y con el software FlowSim BC se puede visualizar tanto la pila de material quebrado como la formación de Airgap en una cavidad, por lo que, juntando estos dos softwares en base a un mismo plan de producción y parámetros geomecánicos es posible adquirir gran cantidad de información para una labor minera.

El tipo de archivo que FlowSim BC recibe corresponde a geometrías de caveback de tipo Caras 3D en formato .dxf, para obtener este tipo de archivo se utiliza un acople conformado por 3 softwares como se muestra en la Figura 3.4, el cual logra transformar la geometría que se exporta de Flac3D en un archivo que FlowSim BC es capaz de leer. Debido a que el archivo obtenido corresponde a un número determinado de Caras 3D por el ingeniero a cargo, es posible ingresar a otros softwares que

reciban este formato de archivo, por lo que este tipo de acoplamiento es universal y no solo único para Flac3D-FlowSim BC.

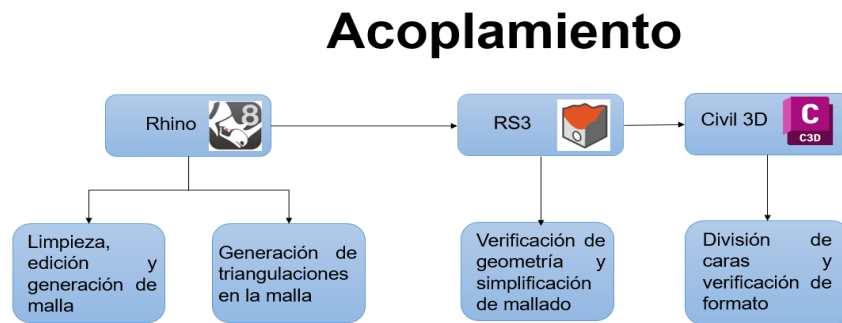


Figura 3.4: Acoplamiento utilizado.

3.3. FlowSim BC

El software FlowSim BC corresponde a una herramienta que utiliza autómatas celulares para emular el flujo debido a la gravedad para metodologías de Block/Panel caving en base a un plan de producción dado. Los autómatas celulares es un modelo matemático el cual simula un sistema de elementos discretos, donde las características que definen a estos autómatas celulares son [31,32]:

-Espacio: El espacio en cual el software trabaja corresponde a una discretización de los bloques o células en $2 \times 2 \times 2$ [m] de dimensiones como estándar, donde es posible aplicar tamaños menores para lograr representaciones mejores en flujo gravitacional a costa de un mayor tiempo de simulación.

-Estado: Cada bloque o célula discretizada puede poseer tres estados diferentes los cuales son: granular, sólido o vacío. El estado granular corresponde a los bloques que simulan el material quebrado y poseen un valor de 1, el estado sólido corresponde a los bloques que no se pueden mover dentro de la simulación teniendo un valor de 0 y el estado vacío corresponde a bloques con densidad nula similar a lo que sería el aire teniendo en valor de -1. Estos estados pueden intercambiarse entre sí dentro del programa.

-Vecindad: Corresponde a todos los bloques adyacentes al bloque de interés los cuales se encuentran en una cota superior o en la misma cota, por lo que corresponde a un total de 17 bloques, ya que el bloque de interés no se contabiliza.

-Función de transición: Esta función determina la transición entre los estados y es aplicada en la simulación para el movimiento de los bloques por lo que para poder calcular este movimiento para un bloque de vacío se aplica el enfoque del inverso a la distancia, la cual se aprecia a continuación:

$$P_i = \frac{d_i^{-n} x f_{50i}^{-m}}{\sum_{k=1}^9 d_k^{-n} x f_{50k}^{-m}} \quad (3)$$

Donde cada parámetro corresponde a:

$-d_i$: Distancia en metros de un bloque i a una celda vacía.

$-n$: Coeficiente adimensional definido por el usuario el cual relaciona el comportamiento general del flujo de la roca.

$-m$: Parámetro adimensional definido por el usuario el cual se relaciona con el potencial de migración de finos.

$-f_{50}$: Tamaño el cual se encuentra por debajo el 50% de la muestra.

En la Figura 3.5 se muestra cómo se produce el ascenso de un bloque de vacío, descenso de un bloque granular o intercambio entre estos dos estados a medida que se realiza la extracción de material en la base.

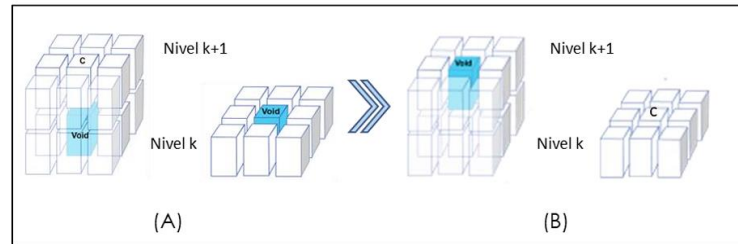


Figura 3.5: Esquema de los bloques de la vecindad y el movimiento ascendente del bloque vacío. (A) Antes de la extracción y (B) después de la extracción [33].

Para que esta función de transición se active en el software, es necesario que se cumpla el requisito mínimo de vacíos en la vecindad, conocido como condición de vacíos (C_v). Este valor posee un rango entre 0 y 9 el cual es ingresado manualmente por el usuario, si este valor es igualado o superado el vacío puede ascender o propagarse.

4. Plan Experimental

Para poder estudiar la formación de Airgap en las cavidades de un método de Block Caving, se diseñan dos casos sintéticos para su mayor comprensión, el primer caso simulando una mayor velocidad de extracción que supere a la velocidad de propagación del caving y un segundo caso recreando la formación de un arco estable o no propagación del caving en una etapa temprana del plan de producción, pero sin detener la extracción de material. En la Figura 4.1 y Figura 4.2 se aprecia una representación de estos escenarios.

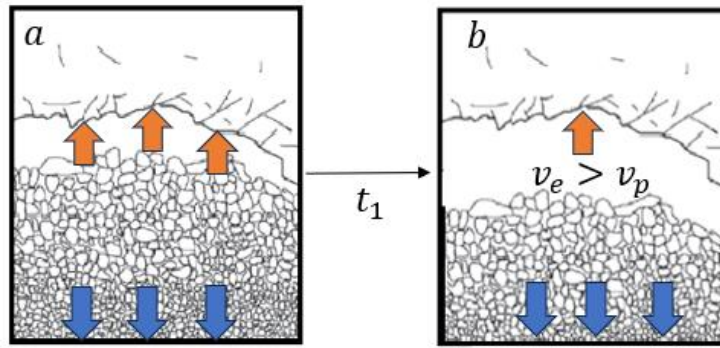


Figura 4.1: Representación caso 1, $V_{extracción}$ y $V_{propagación}$ normal (a) y $V_{extracción}$ mayor a $V_{propagación}$ (b).

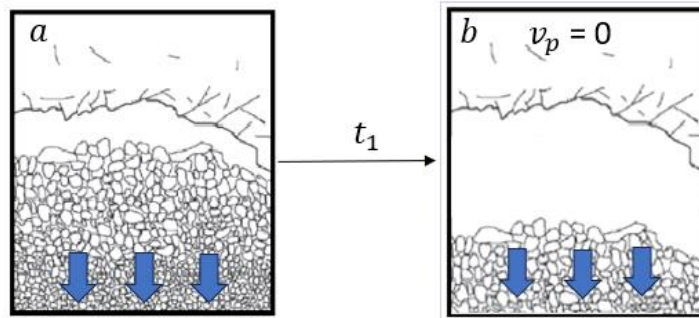


Figura 4.2: Representación caso 2, $V_{extracción}$ y $V_{propagación}$ normal (a) y Sin velocidad de propagación (b).

4.1. Caso 1: Velocidad de extracción superior a la velocidad de propagación del caving

En este caso se busca simular el volumen de aire cuando la velocidad de extracción supera a la velocidad de propagación del caving en el tiempo, con el objetivo de ver la generación de airgap en estas condiciones mes a mes. Para lo cual se confecciona la geometría de los meses deseados en el software Flac3D (v7.00) obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 4.3, donde se presentan los meses 1, 3, 5 y 7, donde para poder generar cada geometría se recurre a la variación de

la velocidad de extracción en el código del software, alcanzando una altura inicial de 70m para el primer mes y una altura máxima final de 200m para el mes 7.

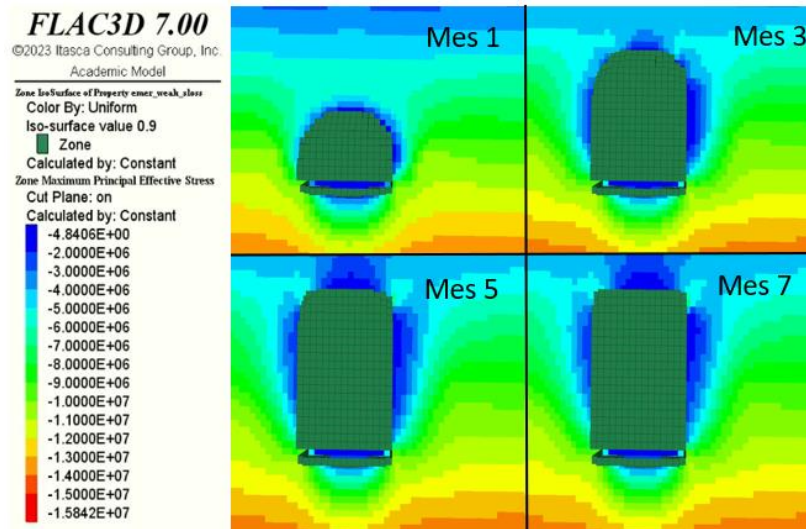


Figura 4.3: Geometría de Caveback (Caso 1).

A continuación, se describen los parámetros utilizados para la confección de estas geometrías:

-Parámetros geomecánicos: Estos parámetros se asignan a cada modelo constitutivo a utilizar, donde IMASS corresponderá a los parámetros del macizo rocoso y el de M-C corresponderá al material quebrado, estos valores se aprecian en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Parámetros geomecánicos Caso 1.

Macizo Rcoso		Material Quebrado	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Densidad [kg/m ³]	2700	Densidad [kg/m ³]	1600
GSI	60	Módulo de Young [GPa]	0.2
UCS [MPa]	100	Coefficiente de Poisson	0.28
m _i	12	Fricción [°]	45
Módulo de Young [GPa]	15	Cohesión [MPa]	0
		Dilatación [m]	0

Con respecto a los parámetros necesarios que se deben de incluir en el software de FlowSim BC, estos corresponden a 3 csv, cada uno conteniendo la información requerida, los cuales se describen a continuación:

-Malla de Extracción: Para este caso se utiliza una malla de 30x16 [m], con un total de 72 puntos de extracción y 36 bateas rectangulares (ver Figura 4.4) con lo que se obtiene un RH de 37.5.

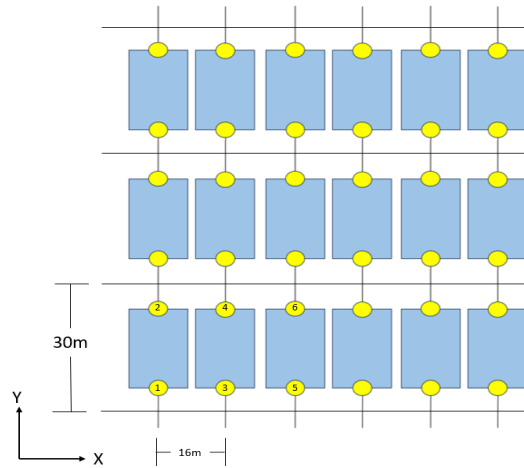


Figura 4.4: Malla de extracción Caso 1.

-Plan de producción: Se consideran 7 meses en los cuales la cantidad de material extraído por mes (Ton) irán en aumento el aumento de la velocidad de extracción de acuerdo con el plan de producción establecido.

-Modelo de Bloques: Se considera un BM de 150x150x350[m] donde se considera la no entrada de dilución y un esponjamiento de variable entre 35% y 47%.

4.2. Caso 2: Formación de un arco estable en cave-back

En este caso se busca simular el volumen de aire cuando se genera un arco estable en la cavidad, pero sin disminuir la velocidad de extracción, con el objetivo de comprender el volumen de Airgap mientras no hay propagación. Al igual que el caso 1, se confecciona la geometría de los meses deseados en el software Flac3D (v7.00) obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 4.5, donde se presentan los meses 1, 3, 5 y 7, para este caso, desde el mes 2 en adelante ocurre la no propagación la cual se ve reflejada en el software con el no cambio en la geometría del caveback, donde se alcanza una altura máxima de 110m de cavidad.

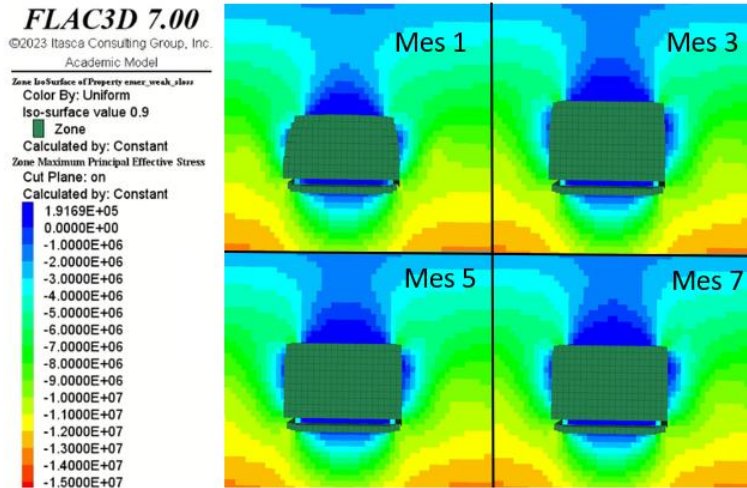


Figura 4.5: Geometrias de Caveback (Caso 2).

A continuación, se describen los parámetros utilizados para la confección de estas geometrias:

-Parámetros geomecánicos: Se mantienen ambos modelos constitutivos, donde IMASS corresponderá a los parámetros del macizo rocoso y el de M-C corresponderá al material quebrado (ver Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Parámetros geomecánicos Caso 2.

Macizo Rocosco		Material Quebrado	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Densidad [kg/m ³]	2700	Densidad [kg/m ³]	1600
GSI	65	Módulo de Young [GPa]	0.2
UCS [MPa]	100	Coefficiente de Poisson	0.28
m _i	12	Fricción [°]	45
Módulo de Young [GPa]	15	Cohesión [MPa]	0
		Dilatación [m]	0

Con respecto a los parámetros necesarios que se deben de incluir en el software de FlowSim BC, estos corresponden a 3 csv, cada uno conteniendo la información requerida, los cuales se describen a continuación:

-Malla de Extracción: Para este caso se utiliza una malla de 30x16 [m], con un total de 144 puntos de extracción y 72 bateas rectangulares (se emplea la misma malla que en el caso 1) con lo que se obtiene un RH de 47.5 [m].

-Plan de producción: Se consideran 7 meses en los cuales la cantidad de material extraído por mes (Ton) irán en aumento para simular el aumento de la velocidad de extracción de acuerdo con el plan de producción.

-Modelo de Bloques: Se considera un BM de 200x200x400[m] donde se considera la no entrada de dilución y un esponjamiento variable entre 35% y 47%.

5. Resultados

En el siguiente capítulo se explican los resultados obtenidos para cada caso sintético generado, el Airgap obtenido y la variación del porcentaje de esponjamiento (ϵ) para ambos casos, donde se aumenta en un 4% aproximadamente, partiendo con un valor de 35% y terminando con un valor de 47% de esponjamiento para la muckpile. Este valor en Flowsim BC corresponde al parámetro Cv.

5.1. Volumen de Airgap Caso 1

En la Figura 5.1 se aprecia la visualización del caso 1 donde se aprecia en color rojo la muckpile formada y en celeste el Airgap que se forma en la parte superior de la cavidad, donde el borde que se aprecia corresponde al acople. Se aprecia como a medida que hay propagación del caving (velocidades entre 2 a 3 m/día para el primer mes hasta el tercer mes) la formación de Airgap en la parte superior es relativamente pequeña en cantidad, pero siempre incrementando producto de las velocidades de extracción que se mantienen en estos 3 meses iniciales del plan de producción ($0.33 \text{ ton/m}^2 \cdot \text{día}$). Entre los meses 4-6 la velocidad de extracción se duplica ($0.66 \text{ ton/m}^2 \cdot \text{día}$), mientras que la velocidad de propagación disminuye a 1 m/día aproximadamente, producto de esto el volumen de airgap dentro de la cavidad aumenta drásticamente con respecto a los meses anteriores, de esta forma la altura de Airgap también crece. En el mes 7 la velocidad de propagación corresponde a 0 m/día y la velocidad de extracción alcanza su máximo valor ($1 \text{ ton/m}^2 \cdot \text{día}$) donde se aprecia el volumen de Airgap que se tendría dentro de la cavidad para este plan de producción. Estos resultados corresponden a un esponjamiento (ϵ) del 35% aproximadamente.

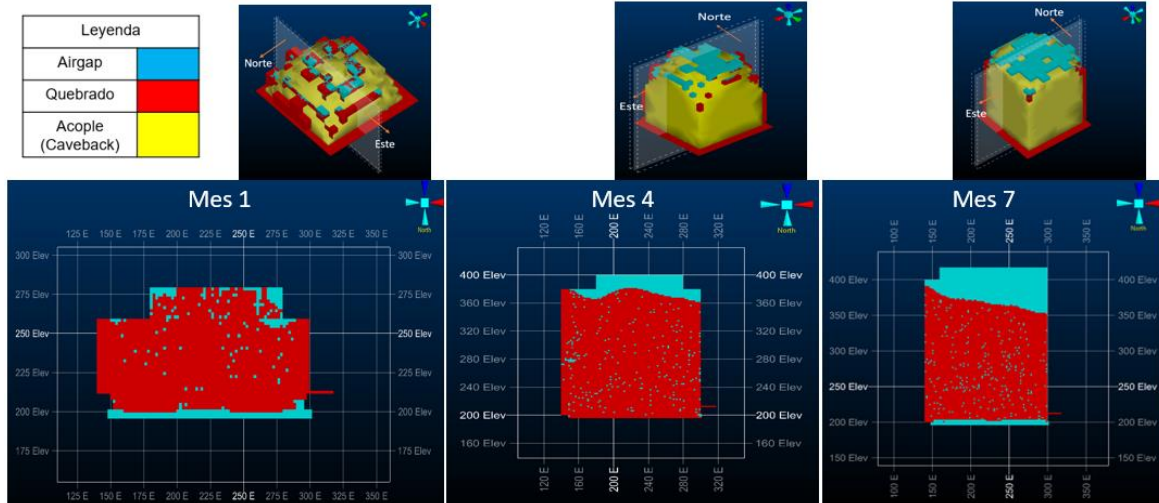


Figura 5.1: Volumen de airgap y muckpile con 35% de esponjamiento para el caso 1.

Se rehace el caso 1 aumentando el valor del esponjamiento de la muckpile, donde en la Figura 5.2 se aprecia el mes 1 con variación de esponjamiento, en la Figura 5.3 se aprecia el mes 4 con variación de esponjamiento y en la Figura 5.4 se aprecia el mes 7 con variación de esponjamiento, estos resultados corresponden a un esponjamiento del 39%, 43% y 47% respectivamente (Cv de 4, 5 y 6). Se visualiza como al aumentar el porcentaje de esponjamiento el volumen de Airgap disminuye y la altura de la muckpile aumenta.

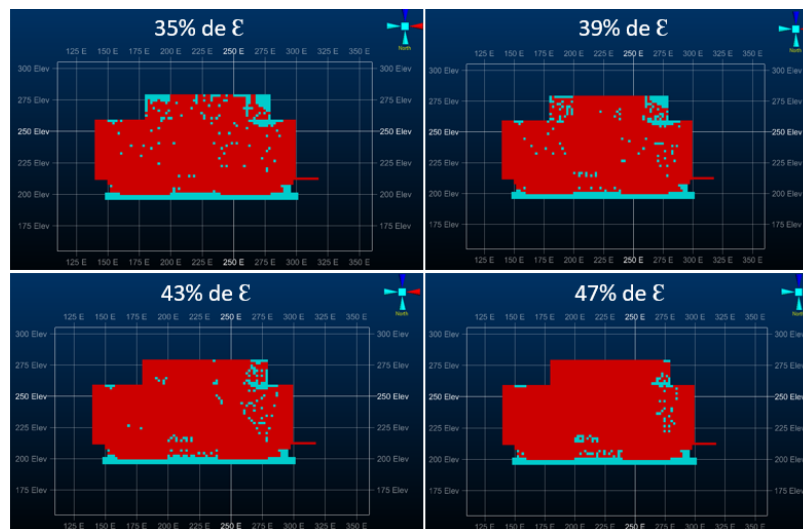


Figura 5.2: Volumen de airgap con variación de esponjamiento para el mes 1.

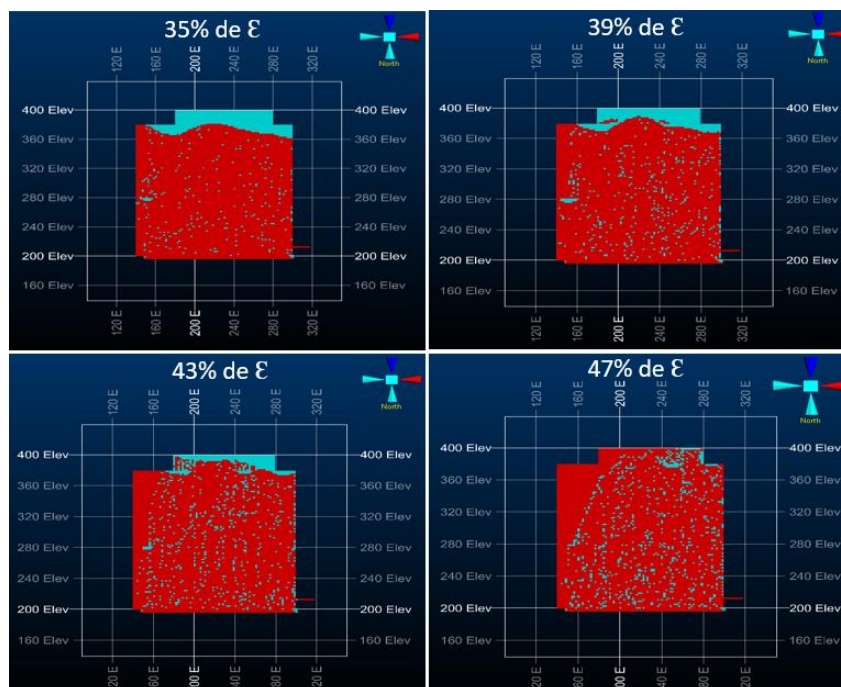


Figura 5.3: Volumen de airgap con variación de esponjamiento para el mes 4.

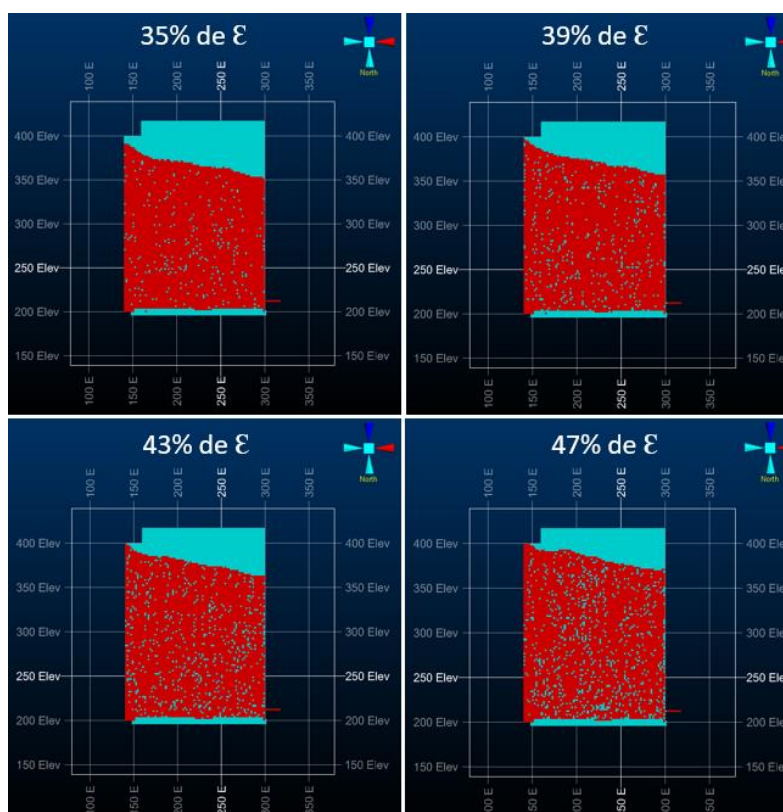


Figura 5.4: Volumen de airgap con variación de esponjamiento para el mes 7.

En la Figura 5.5 se aprecia el grafico con los resultados de arigap obtenidos para el caso 1 con las variaciones de esponjamiento, donde se aprecia el aumento de volumen de Airgap para los meses 4 y 7 producto de este incremento en la velocidad y como a medida que aumenta el porcentaje de esponjamiento dentro de la muckpile el volumen de Airgap disminuye en aproximadamente un 10% a 15%.

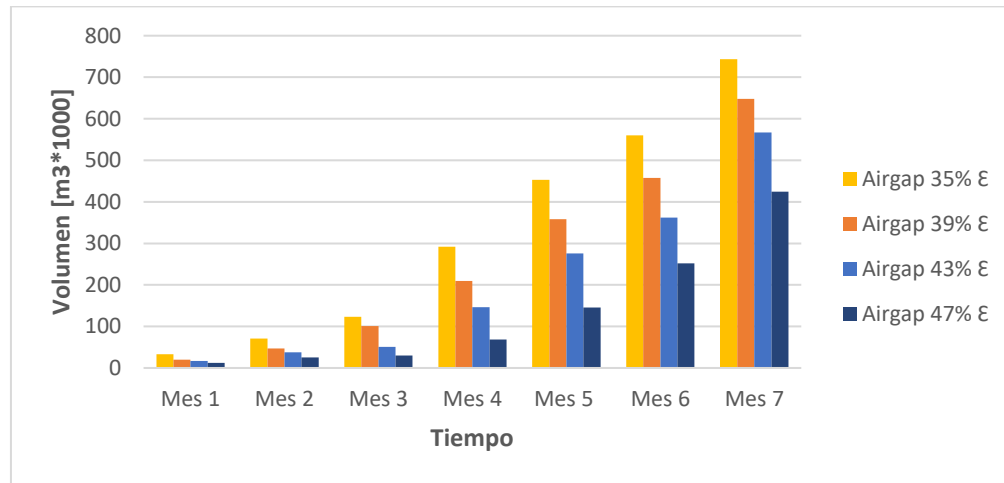


Figura 5.5: Volumen de Airgap acumulado dentro de la cavidad, Caso 1.

En base a este gráfico, se puede ver como el aumento en las velocidades de extracción por sobre la velocidad de propagación del caving provoca aumentos en los volúmenes de airgaps, el cual dependiendo del esponjamiento de la muckpile presentara un valor mayor o menor, provocando que la altura del Airgap también cambie. En la Figura 5.6 se posee las alturas de airgaps para cada mes del plan de producción y los distintos porcentajes de esponjamientos simulados.

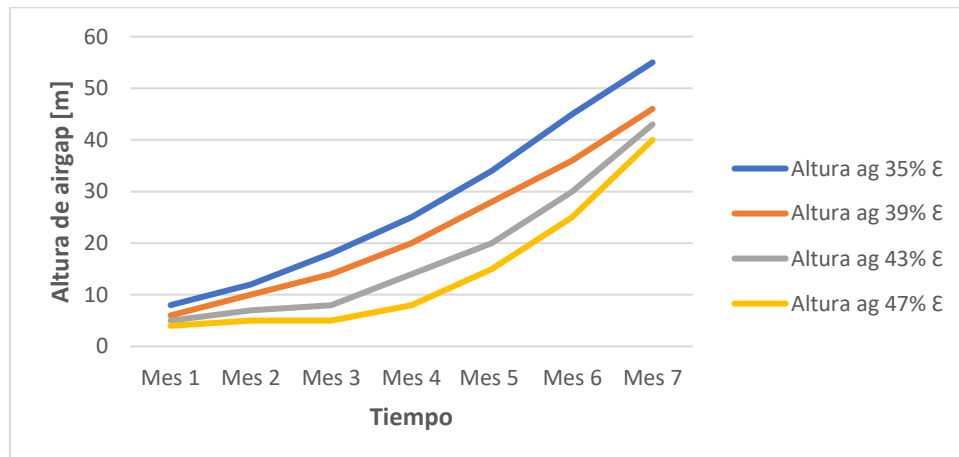


Figura 5.6: Alturas de Airgap alcanzadas dentro de la cavidad, Caso 1.

A medida que el volumen de Airgap va en aumento, la altura máxima de Airgap también crece, en especial cuando se aumenta la velocidad de extracción (mes 4 y mes 7). A un mayor porcentaje de esponjamiento, la altura del Airgap máxima disminuye.

5.2. Volumen de Airgap Caso 2

A continuación, se describe los resultados obtenidos del software FlowSim BC. En este caso, ocurre una formación de arco estable luego del segundo mes de producción, por lo que las velocidades de propagación se vuelven 0 [m/día], pero sin detener las velocidades de extracción sino aumentándolas hasta alcanzar la velocidad en quiebre. Además, se realiza una modificación al esponjamiento (ϵ) igual como se realizó para el caso 1 iniciando en un valor de 35% (C_v de 3) y aumentando en 10% hasta alcanzar el 47% (C_v de 6).

En la Figura 5.7 se aprecia el Airgap formado en la parte superior y la muckpile formada para los meses 1, 4 y 7. En este caso, el primer mes posee una velocidad de propagación de 2 a 3 m/día para luego decaer a 1 m/día el segundo mes, acabando en 0 m/día del mes 3 al mes 7. Producto de esta formación de arco estable, el volumen de Airgap crece en gran medida a medida que avanzan los meses, en especial cuando ocurren aumentos en las velocidades de extracción.

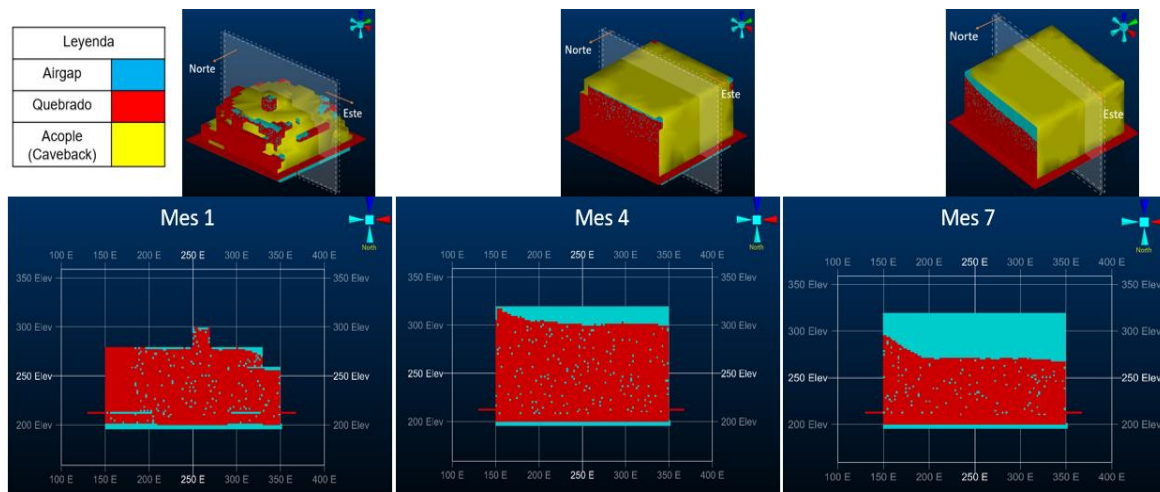


Figura 5.7: Volumen de airgap y muckpile con 35% de esponjamiento para el caso 2.

Se realiza una variación en el esponjamiento (ϵ), lo cual se visualiza en la Figura 5.8 para el mes 1, Figura 5.9 para el mes 4 y Figura 5.10 para el mes 7. Al igual que el caso 1, al aumentar este factor de la muckpile, el volumen de Airgap disminuye mes a mes, pero producto de que no se genera

propagación de caving, no genera un gran impacto como en el anterior caso, aun así, logra disminuir el volumen de Airgap.

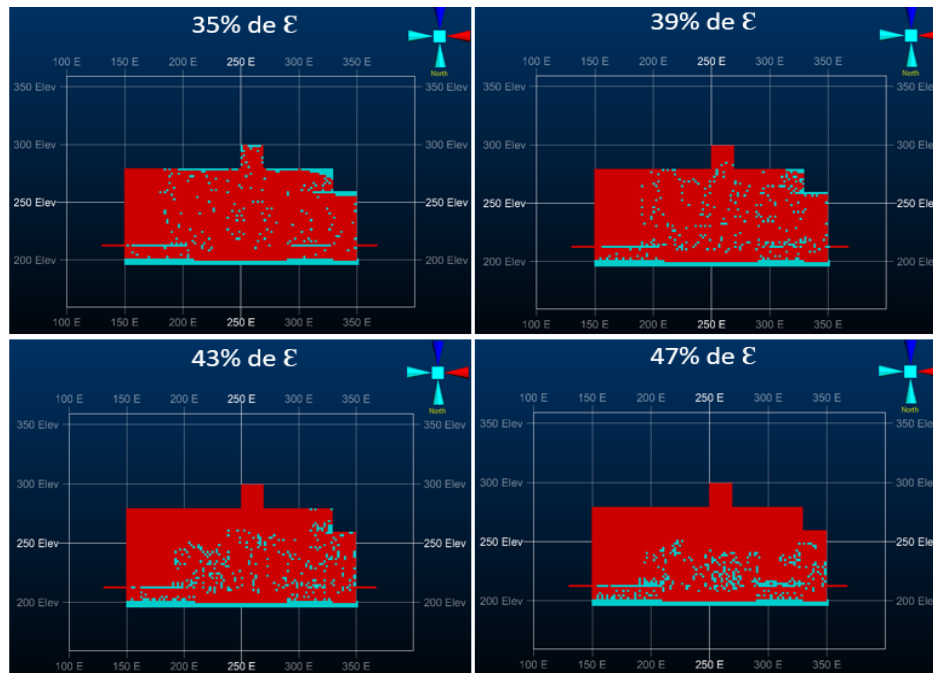


Figura 5.8: Mes 1 con variación de esponjamiento de la muckpile.

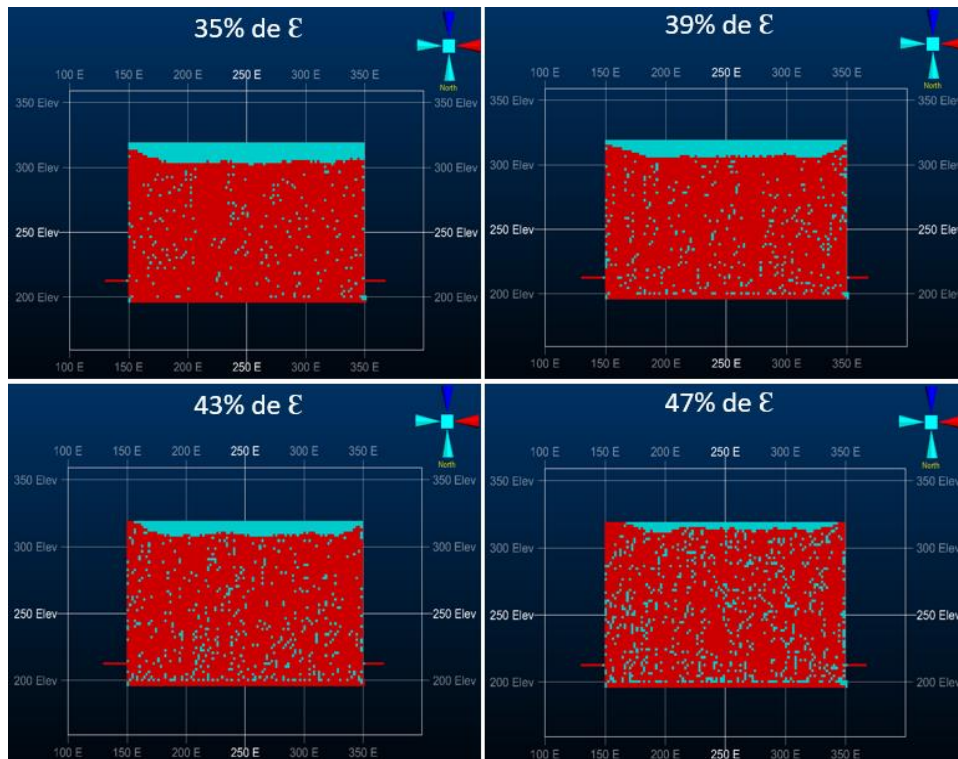


Figura 5.9: Mes 4 con variación de esponjamiento de la muckpile.

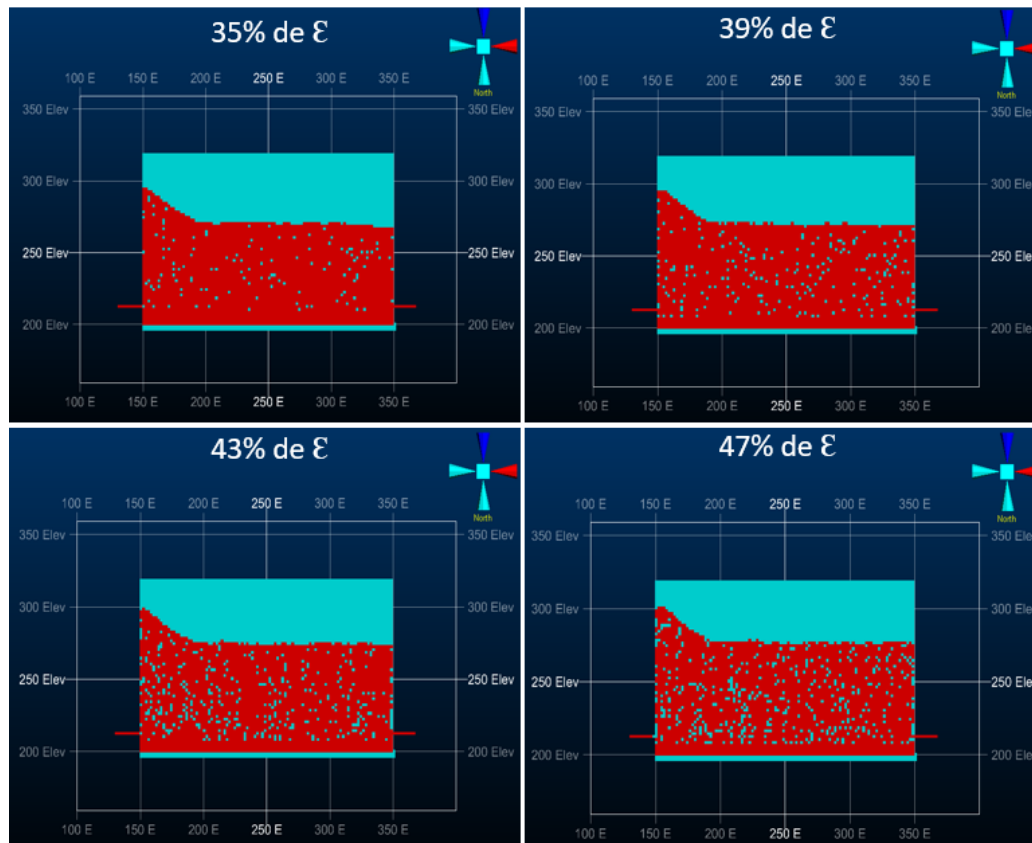


Figura 5.10: Mes 7 con variación de esponjamiento de la muckpile.

Con respecto a los valores de airgaps para cada porcentaje de esponjamiento, en la Figura 5.11 se posee el grafico donde se aprecia como a un menor valor de esponjamiento, el volumen de Airgap es mayor, en especial para este caso donde no ocurre propagación de caving en etapas tempranas del plan de producción. La reducción de volumen de Airgap a medida que aumenta el esponjamiento es de alrededor de un 10%.

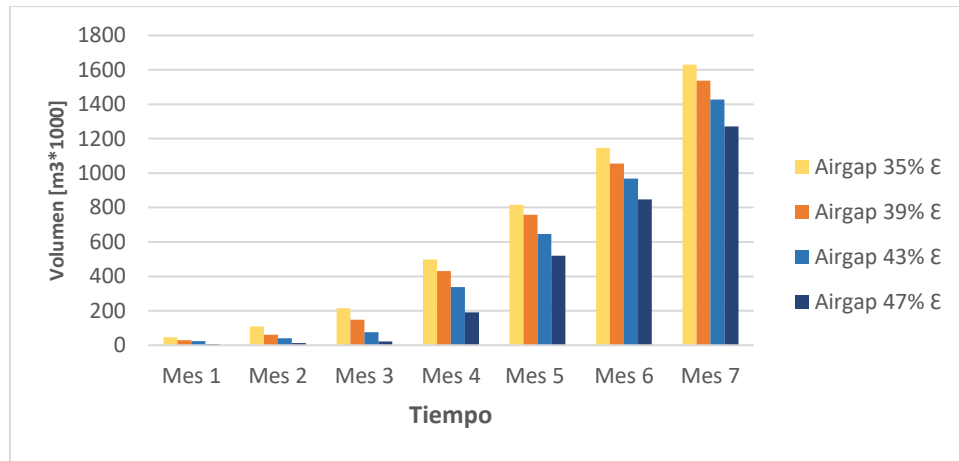


Figura 5.11: Volumen de Airgap acumulado dentro de la cavidad, Caso 2.

De igual forma, en la Figura 5.12 se tiene el gráfico con las distintas alturas de Airgap máximas dentro de la cavidad para cada mes y cada porcentaje de esponjamiento simulado, donde a un menor porcentaje (35%) se posee la mayor altura de Airgap (54 [m]) y a mayor porcentaje (47%) se posee la menor altura de Airgap (42 [m]) para el último mes del plan de producción, donde la diferencia es de 12 metros dentro de la cavidad lo cual tendrá un efecto en la velocidad máxima promedio que se apreciaría. En los primeros tres meses la altura del Airgap no supera los 15 metros, lo cual se debe a que hasta ese tiempo existe propagación y la velocidad de extracción es baja, cuando ocurre el aumento de la velocidad y la formación del arco estable la altura crece hasta alcanzar los 40 metros dentro de la cavidad.

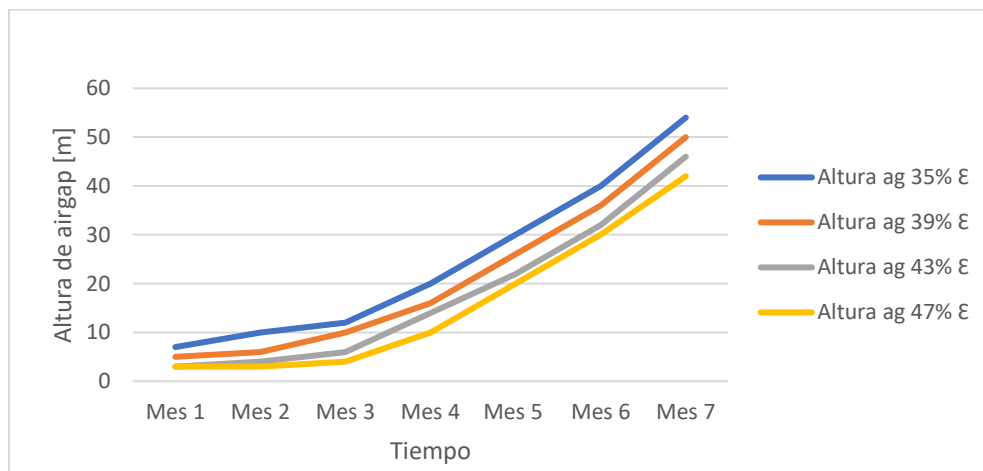


Figura 5.12: Altura máxima de Airgap dentro de la cavidad con variación de esponjamiento (ε), Caso 2.

6. Análisis de resultados

En este capítulo se analizará la velocidad máxima promedio de estallido de aire en base a la fórmula propuesta por Palma [16] para ambos casos sintéticos realizados, donde se modificarán algunos parámetros para ver su importancia en la fórmula y el impacto que tendría en la velocidad máxima promedio que se sentiría. Además, se utiliza la clasificación de Beaufort [17] sobre clasificación de velocidades de huracanes y su relación con velocidades de aire con el objetivo de comprender el posible daño que causaría un evento.

6.1. Velocidad máxima promedio de estallido de aire

La fórmula de Palma [16] nos permite saber la velocidad máxima promedio que se esperaría sentir en los puntos de extracción si ocurriera un estallido de aire. A diferencia de una fórmula propuesta años anteriores, esta se basa en el colapso de una parte del caveback y no el colapso completo.

A continuación, se presenta la Tabla 6.1 con los datos utilizados en la fórmula, donde la altura del Airgap corresponde a los obtenidos en el capítulo anterior, la cual es variable dependiendo del mes del plan de producción que se esté evaluando. Se realiza un análisis para cada caso con sus respectivos esponjamientos, con el fin de poder entender la relación de este factor y la velocidad máxima promedio que se percibiría en los puntos de extracción.

Tabla 6.1: Parámetros empleados en la fórmula de Palma [16].

Parámetro	Valor
d50 [m]	0.91
Altura DP [m]	5
Ancho DP [m]	5
Altura Airgap [m]	Variable
Alpha1	8.4832
Alpha2	0.1370
alpha3	0.6350
Gravedad [m/s ²]	9.81

En la Tabla 6.2 se posee una clasificación de velocidades de vientos en categorías de huracanes con distintos colores de celdas de Beaufort [17] la cual será de referencia con respecto a las velocidades obtenidas de cada caso.

Tabla 6.2: Relación de velocidades de aire y categorías de huracán [17].

Velocidad del Aire	Categoría de Huracán
55-125 [km/h]	Categoría 1 [amarillo]
125-170 [km/h]	Categoría 2 [naranja]
170-225 [km/h]	Categoría 3 [rojo]
225+ [km/h]	Categoría 4 [rojo]

6.1.1. Vmax promedio Caso 1

En la Tabla 6.3 se poseen los valores de las velocidades máximas promedios para cada porcentaje de esponjamiento para cada mes del plan de producción, donde cada casilla presenta un color el cual representa su equivalencia a una categoría de huracán. Se aprecia como al aumentar las velocidades de extracción, y por ende la altura del Airgap, la velocidad máxima promedio aumenta hasta alcanzar valores que causarían daños en equipos mineros si ocurriera un estallido de aire.

Tabla 6.3: Velocidades máximas promedio de estallido de aire en [km/h], Caso 1.

Mes / Esponjamiento	35%	39%	43%	47%
Mes 1	122.57	117.835	114.93	111.47
Mes 2	129.57	126.375	120.35	114.93
Mes 3	136.97	132.335	122.57	114.93
Mes 4	143.28	138.965	132.34	122.57
Mes 5	149.445	144.52	138.965	133.595
Mes 6	155.295	148.96	146.905	143.28
Mes 7	159.63	155.445	154.33	152.805

Con respecto al factor del esponjamiento, al aumentar su porcentaje dentro de la muckpile, la velocidad máxima promedio disminuye entre un 2% a 5% dependiendo el mes, teniendo un mayor impacto en los meses donde se presenta una mayor velocidad de propagación y una menor velocidad de extracción. En el último mes, producto de que ya no se tiene velocidad de propagación y la velocidad de extracción es la velocidad en quiebre, la diferencia entre estos valores es mínima, de solo algunos kilómetros.

6.1.2. Vmax promedio Caso 2

En la Tabla 6.4 se poseen los valores de las velocidades máximas promedios para cada porcentaje de esponjamiento para cada mes del plan de producción para el caso 2, donde cada casilla presenta un color el cual representa su equivalencia a una categoría de huracán.

Tabla 6.4: Velocidades máximas promedio de estallido de aire en [km/h], Caso 2.

Mes / Esponjamiento	35%	39%	43%	47%
Mes 1	120.35	114.93	107.155	107.155
Mes 2	126.375	117.835	111.465	107.155
Mes 3	129.57	126.375	117.835	111.465
Mes 4	138.965	134.785	132.34	126.375
Mes 5	146.905	144.045	140.79	138.965
Mes 6	152.805	150.62	148.215	146.905
Mes 7	159.22	157.55	155.765	153.835

Con respecto al factor del esponjamiento para este caso, al aumentar su porcentaje dentro de la muckpile, la velocidad máxima promedio disminuye en alrededor de un 5%, en especial en los meses donde la velocidad de extracción es baja. Cuando ya no se tiene una velocidad de propagación, el factor del esponjamiento deja de ser un factor importante para la reducción de la velocidad máxima, como se aprecia desde el mes 3 en adelante donde la diferencia entre velocidades es de alrededor de un 2% aproximadamente.

6.2. Variación de Parámetros

Se realiza una variación a las dimensiones del punto de extracción (Hdp y Ddp), con 3 nuevos valores, 3x3 [m], 4x4 [m] y 5x5[m] con el fin de ver cómo se relación con la velocidad máxima promedio de estallido de aire que se sentiría en los puntos de extracción. Además, se modifica el valor del d_{50} con 3 valores (0.5 [m], 0.91 [m] y 1.5[m]) para ver la implicancia en el aumento de la velocidad. Cabe recalcar que esto se realiza solo para ver que factor de la formula importa más, ya que para un estudio más detallado habría que realiza una simulación completa en Flowsim BC modificando estos parámetros en los archivos correspondientes y calculando el volumen de Airgap y altura que se obtendría. Solo se busca saber cuál parámetro genera un aumento mayor en la velocidad que se obtendría según la fórmula de Palma [16], ya que de esta forma se podría controlar este parámetro para disminuir el resultado.

6.2.1. Variación de las dimensiones del DP

En la Tabla 6.5 se tienen las velocidades máximas promedio de la intensidad del estallido de aire para un esponjamiento del 35% y 47%, donde se varía las dimensiones del DP. En base a estos resultados, un incremento en las dimensiones implica una disminución en la intensidad del estallido de aire que se sentiría.

Tabla 6.5: Variación de las dimensiones del DP.

Mes / Dimensiones	35% de esponjamiento			47% de esponjamiento		
	3x3 [m]	4x4 [m]	5x5 [m]	3x3 [m]	4x4 [m]	5x5 [m]
Mes 1	125.65	116.19	109.35	114.26	105.66	99.44
Mes 2	132.82	122.83	115.59	117.81	108.94	102.53
Mes 3	140.41	129.84	122.20	117.81	108.94	102.53
Mes 4	146.87	135.82	127.82	125.65	116.19	109.35
Mes 5	153.19	141.66	133.32	136.95	126.64	119.18
Mes 6	159.19	147.21	138.54	146.87	135.82	127.82
Mes 7	163.63	151.31	142.40	156.64	144.85	136.32

Además, un incremento en el valor del diámetro (Ddp) del punto de extracción genera una disminución en la velocidad máxima promedio, pero un aumento en la altura (Hdp) del punto de extracción genera un aumento en la velocidad del punto de extracción, por lo que buscar una configuración entre las dimensiones de Ddp y Hdp generaría una disminución de la intensidad del estallido de aire y una disminución en los posibles daños.

6.2.2. Variación del d50

En la Tabla 6.6 se poseen las velocidades máximas promedios obtenidas para tres d50 diferentes, con esponjamiento del 35% y 47%. En base a los resultados obtenidos, se aprecia la aparición de velocidades que son similares a las de un huracán de categoría 3, incluso para un 47% de esponjamiento para un d50 de 1.28 [m].

Tabla 6.6: Velocidades máximas promedio de estallidos de aire [km/h] con variación de d50.

Mes / Dimensiones	35% de esponjamiento			47% de esponjamiento		
	0.5 [m]	0.91 [m]	1.28 [m]	0.5 [m]	0.91 [m]	1.28 [m]
Mes 1	74.76	109.35	150.19	67.99	99.44	136.58
Mes 2	79.03	115.59	158.77	70.10	102.53	140.82
Mes 3	83.54	122.20	167.83	70.10	102.53	140.82
Mes 4	87.39	127.82	175.56	74.76	109.35	150.19
Mes 5	91.15	133.32	183.11	81.48	119.18	163.69
Mes 6	94.72	138.54	190.28	87.39	127.82	175.56
Mes 7	97.36	142.40	195.59	93.20	136.32	187.24

6.2.3. 0% de esponjamiento

Se realiza una simulación extra con un esponjamiento del 0% (Cv 0 en FlowSim BC) como un caso sintético extremo, donde se utilizan el plan de producción del caso 1 junto con sus geometrías de caveback obtenidas.

En la Figura 6.1 se tiene una imagen con los resultados obtenidos en el software de FlowSim BC, donde se aprecian los meses 1, 4 y 7 respectivamente. Se aprecia la nula presencia de aire entre material quebrado en la muckpile, lo cual es esperable debido a que no se posee esponjamiento del material, teniendo una generación de volumen de aire en la zona superior debido a que, según la fórmula que rige la ascensión de un bloque en el software, todos los bloques de vacío/aire suben hasta la parte superior de la cavidad sin ninguna restricción.

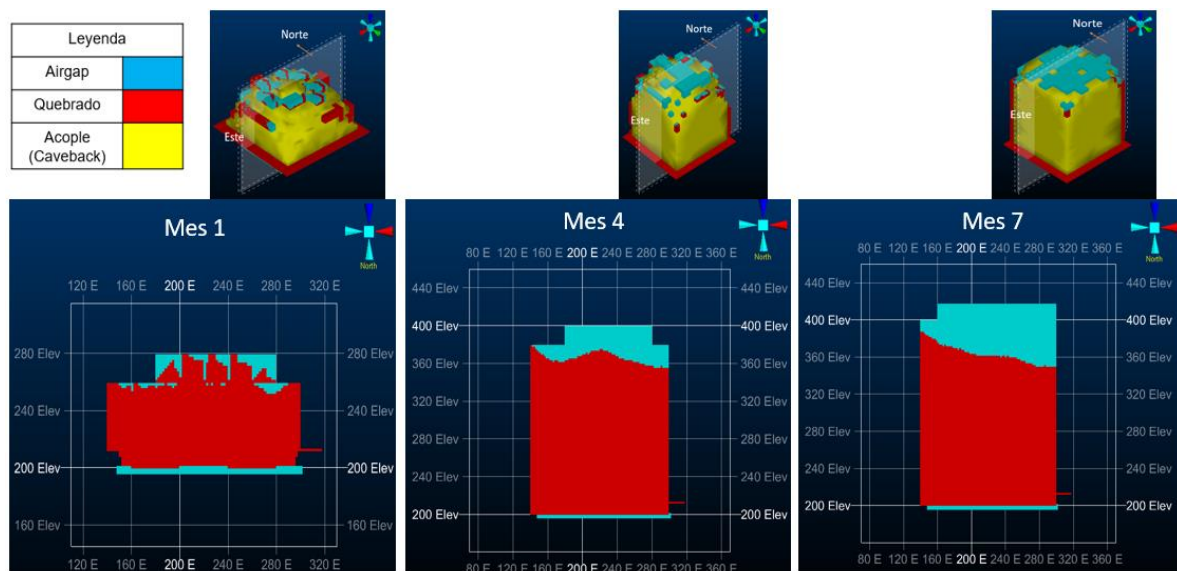


Figura 6.1: Incremento del Volumen de Airgap con 0% de esponjamiento.

En la Figura 6.2 se posee el grafico con los volúmenes de aire en el eje y principal y las alturas de Airgap obtenidas en el eje y secundario. Para este porcentaje de esponjamiento se posee los volúmenes y alturas de airgaps máximos en comparación con los porcentajes evaluados en capítulos anteriores. En la Tabla 6.7 se poseen los valores de la velocidad máxima promedio aplicando la fórmula de Palma [16], donde estas velocidades se encuentran dentro de la categoría 2 de vientos de huracán.

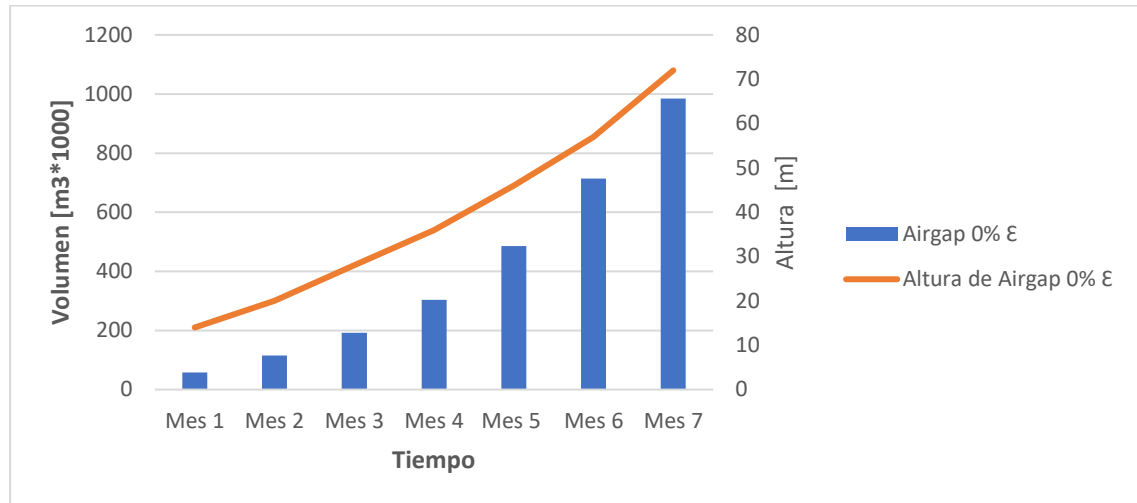


Figura 6.2: Volumen y Altura de Airgap obtenido con 0% de esponjamiento.

Tabla 6.7: Velocidad máxima promedio de estallido de aire [km/h] con 0% de esponjamiento.

Mes	Velocidad [ton/m²*día]	Vmax promedio [km/h]
Mes 1	0.33	132.34
Mes 2	0.33	138.965
Mes 3	0.33	145.52
Mes 4	0.66	150.62
Mes 5	0.66	154.815
Mes 6	0.66	160.405
Mes 7	1	165.62

Según estos resultados obtenidos, se logra apreciar como el esponjamiento es un factor clave en la formación de volúmenes de airgaps, donde poseer un menor valor de este implica un aumento en el volumen dentro de la cavidad y un aumento en la velocidad máxima promedio de un estallido de aire.

6.2.4. Velocidad de extracción baja

En el caso 1, se realiza un modelo sintético con velocidades de extracción superiores a las velocidades de propagación del caving. Para validar esto, se realiza lo opuesto, utilizar un plan de producción con velocidades de extracción menores (hasta un 70% menores que las empleadas originalmente) con el fin de obtener resultados opuestos a los apreciados. Se emplean los datos del caso 1 con un porcentaje de esponjamiento del 39% (Cv 4 en FlowSim BC).

En la Figura 6.3 se aprecian los meses 1, 4 y 7 con sus respectivos volúmenes de Airgap en la parte superior del caving. Los primeros 4 meses no se aprecia formación de Airgap producto de que el caving se propaga a una velocidad mayor (2-3 m/día) que la velocidad de extracción impuesta para esos meses. A partir del 5 mes y hasta el 7 mes, la velocidad de propagación disminuye y se aprecia formación de Airgap en la parte superior producto de que la velocidad de extracción empieza a superar a la velocidad de propagación, donde en el último mes del plan de producción no se aprecia propagación y por lo tanto el volumen de Airgap empieza a crecer en gran medida junto con la altura del Airgap.

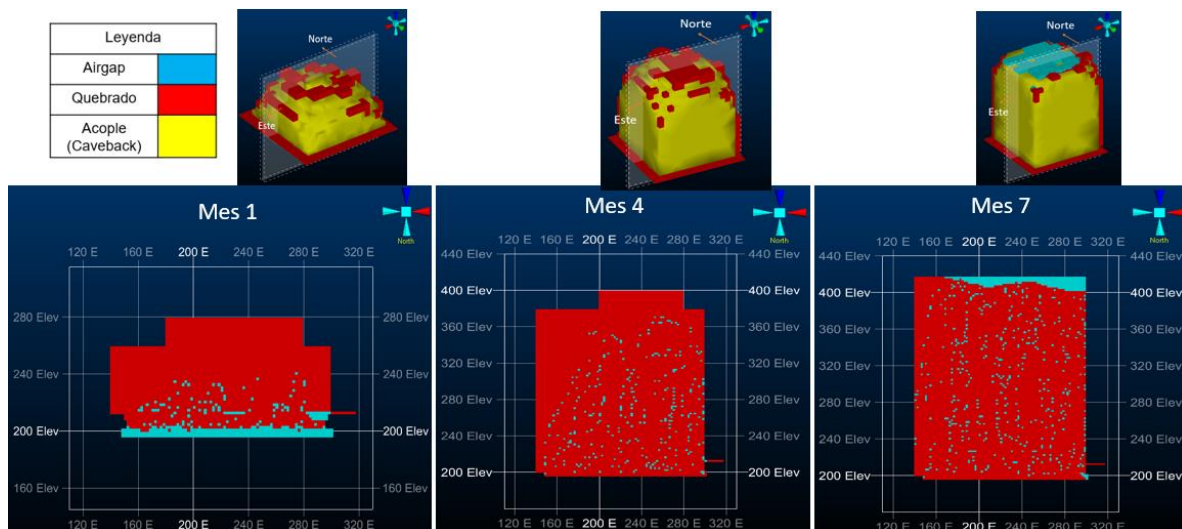


Figura 6.3: Formación de Volumen de Airgap con Extracción menores.

En la Figura 6.4 se aprecia el gráfico con los volúmenes y alturas de Airgap obtenidas con velocidades de extracción menores, donde los primeros meses no se obtiene volumen de Airgap formado, en el 5 mes en adelante empieza a aparecer e incrementarse este valor.

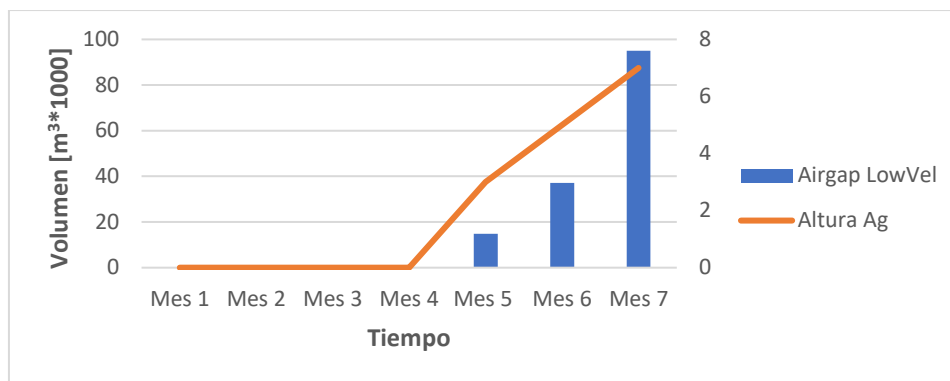


Figura 6.4: Gráfico de Altura y Volumen máximo de Airgap.

En la Tabla 6.8 se poseen las velocidades de extracción empleadas junto con las velocidades máximas promedio obtenidas que se apreciarían en los puntos de extracción. Debido a la nula presencia de Airgap, las velocidades máximas para los primeros 4 meses corresponden a 0, a medida que se aprecia la formación de Airgap, las velocidades máximas empiezan a crecer alcanzando una categoría 1 de velocidades de huracán.

Tabla 6.8: Velocidades máximas promedio para un estallido de aire con velocidades de extracción bajas.

Mes	Velocidad [ton/m2*día]	Vmax promedio [km/h]
Mes 1	0.1	0
Mes 2	0.12	0
Mes 3	0.15	0
Mes 4	0.2	0
Mes 5	0.24	107.16
Mes 6	0.3	114.93
Mes 7	0.33	120.35

Comparando estos resultados con los obtenidos a velocidades de extracción mayores (Caso 1), se ve la diferencia entre un buen control de la velocidad y los efectos que este tendría, tanto en la formación del Airgap y su posterior incremento en volumen y la intensidad que tendría el estallido de aire de producirse.

7. Conclusiones y Recomendaciones

En el siguiente capítulo se discuten las principales conclusiones obtenidas en base a la investigación realizada junto con recomendaciones para trabajos a futuro en base a los estallidos de aire.

7.1. Conclusiones

Aplicando la metodología de Sainsbury en el software de Flac3D junto con la utilización de un plan de producción es posible replicar una geometría de caveback similar a la que se obtendría en la realidad para cada mes que se está evaluando, logrando verificar en etapas tempranas posibles problemas con la propagación o colapsos que puedan ocurrir dentro de la cavidad.

Aplicando el acoplamiento descrito en esta investigación es posible unir los softwares Flac3D y Flowsim BC con el propósito de aprovechar las ventajas que ambos entregan para la obtención de geometrías de caveback y volúmenes de aires dentro de la cavidad, obteniendo en una etapa temprana de la planificación minera información útil para prevenir estallidos de aires.

Se obtiene el volumen de airgap para ambos casos sintéticos analizados en base a un plan de producción establecido junto con la altura de Airgap que se tiene dentro de la cavidad, logrando obtener la velocidad máxima promedio de aire que se observaría en los puntos de extracción si ocurriera un evento de estallido de aire en base a la fórmula propuesta por Palma [16].

En base a la variación de los parámetros de la fórmula empleada se obtiene una variación en la velocidad máxima promedio del estallido de aire que se apreciaría en los puntos de extracción. Un incremento en las dimensiones del punto de extracción genera una disminución de la velocidad máxima, un incremento en la granulometría (d_{50}) genera grandes incrementos en la velocidad máxima y un aumento en el factor de esponjamiento de la muckpile (C_v de Flowsim BC) provoca disminución del volumen de Airgap mientras ocurra propagación de caving.

7.2. Recomendaciones

Se sugiere realizar análisis de los esfuerzos máximos obtenidos, desplazamientos y factor de seguridad dentro de la cavidad a medida que se va propagando el caving en el software Flac3D para analizar el potencial riesgo de colapso de la parte superior de la cavidad, para un plan de producción previamente establecido con la metodología de Sainsbury, con el fin de estudiar la parte del efecto pistón. Esto permitiría saber que parte de la cavidad colapsaría y aplicando la metodología propuesta en esta investigación obtener un estudio completo sobre el estallido de aire, tanto de riesgo de colapso como intensidad que se percibiría en los puntos de extracción.

Para una mejor implementación de esta metodología, se sugiere realizar una validación en base a casos de estallidos de aires previamente ocurridos en minas alrededor del mundo (NorthParkes E26 y El Salvador), con el fin de recrear estos eventos y comprobar que esta metodología es útil para prevenir problemas geomecánicos relacionados con los estallidos de aires en minería de caving.

8. REFERENCIAS

- [1] De Nicola, R., & Fishwick, M. (2000). An underground air blast–Codelco-Chile–Division Salvador. Proceedings of MassMin 2000, 279-288.
- [2] E. Brown, «Block Caving Geomechanics,» Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, Australia, 2007.
- [3] H. Hamrim, «Underground mining methods and applications,» de Underground Mining Method, In: Huttrulid, W.A and bullock,R.L, 2001, pp. 3-14.
- [4] R. Gómez y E. Labbé, «Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: la actual metodología aplicada en Chile "block caving", » Boletín Geológico y Minero, vol. 1, n° 130, pp. 181-198, 2019.
- [5] Laubscher, D. (2000). A practical manual on Block Caving. pp 47-73.
- [6] Trueman, R. and Mawdesley, C. (2003) Predicting cave initiation and propagation, CIM Bulletin; May 2003; 96, 1071; ProQuest Science Journals, p. 54.
- [7] Sainsbury, Bre-Anne & Sainsbury, David & Pierce, Matthew. (2011). A historical review of the development of numerical cave propagation simulations.
- [8] Fuenzalida, MA, Pierce, ME & Katsaga, T 2018, 'REBOP–FLAC3D hybrid approach to cave modelling', in Y Potvin & J Jakubec (eds), Caving 2018: Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 297-312, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1815_20_Pierce
- [9] Guzmán Cano, D. (2018). Análisis de la propagación del Caving y modelamiento mediante FlowSim BC. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/169999>
- [10] Olivares Brûlé, D. (2014). Influencia de fino y humedad en flujo gravitacional confinado. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/131776>
- [11] R. Kvapil, «Gravity flow of granular material in hoppers and bins,» Int. J. Rock Mech. Mining Sci, vol. 2, pp. 35-41, 1965.

- [12] R. Gómez, M. Loyola, S. Palma y C. Valdés, «Experimental study of the inrush of fines events in caving mining, » *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, n° 169, 2023.
- [13] Butcher R., Joughin W. and Stacey T. R., 2000. *Methods of Combating Mudrushes in Diamond and Base Metal Mines*. Safety in Mines Research Advisory Committee: Braamfontein, South Africa.
- [14] Pérez Lara, Á. (2017). Cuantificación del riesgo de ingreso de Agua-Barro en El Teniente. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/147129>.
- [15] Palma, S., Galindo-Torres, S. A., Delonca, A., Ruest, M., Scheuermann, A., & Finn, D. (2019). Universal laws for air velocities in airblast events during block caving. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 113, 303-309.
- [16] Rojas, M., Morales, R., Delonca, A., Rojas, E., Farias, E., & Palma, S. (2023). A novel model for air velocities in airblast events in block caving mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 170, 105559.
- [17] Brown ET. *Block caving geomechanics*. 2002.
- [18] Vejrazka, C., Carr, C., & Chitombo, G. (2016). Northparkes mines current air blast risk assessment practices for block caving operations. *Proceedings of MassMin*, 2016, 257-264.
- [19] Lickfold, V., Cooke, D.R., Smith, S.G. and Ullrich, T.D., 2003 - Endeavour Copper-Gold Porphyry Deposits, Northparkes, New South Wales: Intrusive History and Fluid Evolution: in *Econ. Geol.* v.98, pp. 1607-1636.
- [20] Eric Strom. (08 de Junio 2013). Northparkes Mines Airblast - Module 2: The Northparkes Event. [Archivo de video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=Qni0NhxWS3Y&t=1s>
- [21] Bailey, J. (2003). *NorthParkes Coronal*. Australia.
- [22] Pierce, M., Cundall, P. Mas Ivars, D., Darcel, C., Young, R.P., Reyes-Montes, J. and Pettitt, W. (2006) *Six Monthly Technical Report, Caving Mechanics, Sub-Project No. 4.2: Research and Methodology Improvement, and Sub-Project 4.3, Case Study Application*, Itasca Consulting Group Inc, Report to Mass Mining Technology Project, 2004-2007, ICG06-2292-1-Tasks 2-3-14, March.

- [23] Sainsbury, B., Pierce, M. E., & Mas Ivars, D. (2008, September). Analysis of Caving Behaviour Using a Synthetic Rock Mass ,Ä Ubiquitous Joint Rock Mass Modelling Technique. In SHIRMS 2008: Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium (pp. 243-253). Australian Centre for Geomechanics.
- [24] Sainsbury, BL 2010, 'Sensitivities in the numerical assessment of cave propagation', in Y Potvin (ed.), Caving 2010: Proceedings of the Second International Symposium on Block and Sublevel Caving, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 523-535, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1002_36_Bsainsbury
- [25] B.-A. Sainsbury, “A MODEL FOR CAVE PROPAGATION AND SUBSIDENCE ASSESSMENT IN JOINTED ROCK MASSES,” The University of New South Wales, 2012.
- [26] B.-A. Sainsbury, D. Sainsbury, and D. Carroll, “Back-analysis of PC1 cave propagation and subsidence behaviour at the Cadia East mine,” no. October, pp. 167–178, 2018, doi: 10.36487/acg_rep/1815_10_sainsbury.
- [27] Sainsbury, B, Pierce, ME & Mas Ivars, D 2008, 'Analysis of Caving Behaviour Using a Synthetic Rock Mass — Ubiquitous Joint Rock Mass Modelling Technique', in Y Potvin, J Carter, A Dyskin & R Jeffrey (eds), SHIRMS 2008: Proceedings of the First Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 243-253, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/808_136
- [28] B. A. L. Sainsbury, “A Sub-Level Caving Algorithm for Large-Scale, Small-Strain, Numerical Simulations,” Rock Mech Rock Eng, vol. 52, no. 1, pp. 289–295, 2018, doi: 10.1007/s00603 018-1561-7.
- [29] D. Oyarzo, R Castro, R Gómez y K Suzuki. Coupling geomechanical and gravity flow models to obtain more representative flow simulations in caving mining. Concepción, Chile. Universidad de Concepción. 2024.
- [30] Manual de Flac3D, modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, <https://docs.itascacg.com/flac3d700/common/models/mohr/doc/modelmohr.html>

[31] Pereira, Matías, 2020, 'SIMULACIÓN DE ALTURAS DE INTERACCIÓN ENTRE PUNTOS DE EXTRACCIÓN A TRAVÉS DE AUTOMATAS CELULARES ', Concepción (Chile), Universidad de Concepción, 2020.

[32] Díaz, Tylor, 2024, 'ESTUDIO EXPERIMENTAL DE MIGRACIÓN LATERAL DE FINOS EN MINERIA DE CAVING', Concepción (Chile), Universidad de concepción, 2020.

[33] Manual de FlowSim v6.3.

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

Título: Determinación de la intensidad de estallido de aire en Minería de Block Caving		
Nombre Memorista: Miguel Ángel Gabriel Cifuentes López		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	7.0	 Prof. René Gómez P.
Calificación	EXCELENTE	
Fecha	22.01.2025	
  Prof. Ramón Díaz N.		Ingeniero Supervisor:
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof^a. Asieh Hekmat		Prof. Raúl Castro R.
Resumen		
Debido al agotamiento de los yacimientos de minerales cercanos a superficie, hay una mayor tendencia a la minería subterránea para poder seguir extrayendo estos yacimientos. Existen diversos métodos de extracción subterráneos, tanto auto soportados, como de rellenos o hundimientos, donde estos últimos suelen ser más atractivos en yacimientos masivos debido a las ventajas en términos de costos operacionales y productividad. Sin embargo, están sujetos a diversos problemas geomecánicos y operacionales como los estallidos de aire. Por este motivo, esta investigación se centra en desarrollar una metodología con el objetivo de prevenir o identificar el volumen de airgap y la intensidad de estallidos de aires en la minería de caving. Para esto, primero se realiza una revisión de casos de estudios, identificando que los parámetros más importantes y decisivos en la generación de estallidos de aires son la velocidad de extracción y la formación de arcos en la parte superior de la cavidad. Para estudiar este fenómeno se recurre al acople de los softwares Flac3D y FlowSim BC para la obtención del volumen del airgap. El primer software entrega la geometría de la cavidad que se formaría y el segundo los datos correspondientes al volumen de airgap generado para un plan de producción predeterminado.		

Luego, de la literatura se utiliza una fórmula para calcular la velocidad máxima promedio de aire que se esperaría percibir en los puntos de extracción.

En el primer caso simulado se aprecia como el volumen de airgap que se genera aumenta producto de que la velocidad de extracción es mayor a la velocidad de propagación del mientras que la simulación del segundo caso se genera la no propagación del caving en el tercer mes de extracción aumentando en gran medida el airgap dentro de la cavidad debido a que no se detiene la extracción de material.

Principalmente se concluye que la metodología propuesta resulta útil para la obtención de volúmenes de airgaps y velocidades de estallidos de aires, donde velocidades de extracción mayores a velocidades de propagación genera un aumento en el volumen de airgap dentro de la cavidad mientras que la no detección de problemas en la propagación del caving aumenta drásticamente este volumen obteniendo alturas de Airgap que van en aumento incrementando la intensidad del estallido de aire que se apreciaría en los puntos de extracción.