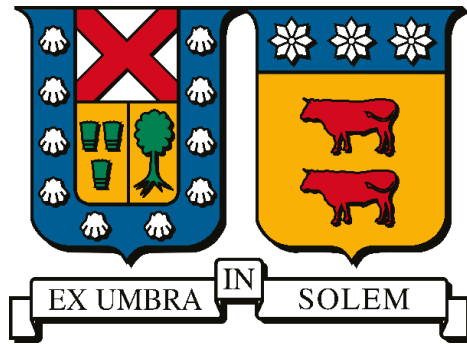


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

SANTIAGO – CHILE



**EVALUACIÓN DE LAS VELOCIDADES DEL AIRE EN
FUNCIÓN DEL ESPESOR DE LA CAPA DE
MATERIAL FRAGMENTADO EN CASOS DE
AIRBLAST EN MINERÍA DE CAVING**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL DE MINAS**

Presentado por:

VALENTINA ANGÉLICA MORALES NAVARRO

Profesor Guía:

Dr. Sergio Palma M.

Profesor Correferente:

Ing. Víctor Encina

AGOSTO 2023

Agradecimientos

Fue un camino largo y difícil donde en un principio me cuestioné si lo que había elegido estudiar era lo que realmente quería y además, si es que lo iba a lograr. Esto se debe principalmente a que en algunos ramos (físicas), no estaba logrando obtener buenos resultados a pesar de todos mis esfuerzos, lo que trajo como consecuencia desconfiar de mis capacidades. Sin embargo, el apoyo constante de mis padres fue fundamental para poder conseguir este objetivo.

Es por esto, que este logro no es únicamente mío, sino que es también de ellos. Porque cuando veían que presentaba dificultades en algún ramo, me comentaban, “¿Cómo podemos ayudarte?”, “¿Necesitas de alguien que te explique?”, y yo agradezco sinceramente que me hayan entregado esas herramientas. Ustedes fueron mi base. Sin ustedes yo no lo hubiera logrado.

Además, quiero agradecer a mi abuela. Ella siempre confió en que lo iba a conseguir, es por eso, que su fe en mi persona fue vital.

Por otro lado, me gustaría agradecer a mi grupo de amigos de la universidad. Cada uno de ellos logró hacer más amena la estancia en la universidad y sé, que me llevo muy buenos lazos de amistad de esta experiencia universitaria.

También, quiero agradecer a mis profesores. En primer lugar, a mi profesor Co-Guía Víctor Encina, por su buena disposición en resolverme dudas, corregirme o tan simplemente darme su opinión acerca de un tema. Sinceramente, para mí es un privilegio haber tenido un profesor como él, y siento una gran admiración.

En segundo lugar, a mi profesor Guía Sergio Palma. Recuerdo que cuando le consulté acerca de un tema de memoria, estaba finalizando el primer semestre de ese año, y el profesor ya contaba con una gran cantidad de memoristas. Otro profesor, me hubiera rechazado y comentado que esperará el inicio del segundo semestre, lo que me hubiera ocasionado que me atrasará aún más. Sin embargo, el profesor no fue así. Me aceptó y me propuso un tema. Es por esto, que le estoy verdaderamente agradecida. Fue un muy buen profesor guía, responsable y preocupado de que consiguiéramos un buen trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a mi hermano. Confío que en un par de años él también estará logrando este objetivo, y así podamos ser colegas.

“La perseverancia es la clave.”

Resumen

En este trabajo se replica el fenómeno de airblast, en situaciones de desplome repentino de la cúpula de cavidades de hundimiento. El airblast representa la irrupción de un flujo de aire que sale a altas velocidades a través de los puntos de extracción. En este caso, se empleó el método de elementos finitos (FEM), utilizado para resolver las ecuaciones gobernantes, tales como la conservación de la masa, momentum y energía. La modelación experimental se dividió en dos partes principales. En la primera, el modelo consistió en una batea con sus dos puntos de extracción, dividida en tres partes, una al centro y una en cada extremo. Para así, ilustrar la relación entre la velocidad del aire y las zonas en que ocurre el desprendimiento respecto de los puntos de extracción. Además, a partir de los datos experimentales, se elaboró un modelo matemático que considera el tamaño de airgap y espesor del material fragmentado, para determinar la velocidad máxima del aire en los puntos de extracción.

En la segunda parte, se realizó el módulo de producción utilizado en la mina El Teniente, con el propósito de determinar la velocidad del aire asociada en distintos casos donde se genera el airblast. Esto permitió establecer una zona de seguridad con relación a ese riesgo.

En ambos modelos, se variaron parámetros tales como, el tamaño del airgap, espesor y diámetro del material fragmentado. La toma de los datos se realizó en los puntos de extracción de las bateas, con el objetivo de obtener los valores de velocidad. Posteriormente, se determinó el caudal para así obtener las velocidades máximas del aire. Por tanto, los resultados obtenidos sirven como guía para desarrollar estrategias para poder mitigar el riesgo de airblast, y así, asegurar la seguridad de las personas, equipos e infraestructura presentes en la mina.

Tabla de contenido

1. Introducción	9
2. Objetivos	13
2.1 Objetivo General.....	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. Metodología	14
3.1 Reproducción del fenómeno de airblast con sus ecuaciones en el modelo numérico.....	14
3.1.1 Modelo Conceptual	14
3.2 Aplicación a un caso con 4 bateas para estudiar la zona de seguridad	15
3.2.1 Configuración del módulo de producción.....	15
3.2.2 Metodología.....	18
4. Ecuaciones de balance	19
5. Casos de estudio.....	22
6. Resultados	23
I. Primer caso de estudio	23
II. Segundo caso de estudio.....	28
6.1 Discusión de resultados	29
6.1.1 Primer caso de estudio.....	29
6.1.2 Segundo caso de estudio	32
6.2 Modelo matemático	36
7. Conclusiones	39
8. Referencias.....	41

Índice de figuras

Figura 1. Principales peligros operativos en minería de Caving. Brown (2002) [1].	9
Figura 2. Representación del peligro operacional denominado airblast. a) Estado inicial del macizo rocoso. b) Realización de las operaciones unitarias de perforación y tronadura en la zona de socavación, para producir el llenado del espacio vacío con material fragmentado desplomado del techo. c) Extracción del material fragmentado de la zona de socavación mediante los puntos de extracción. d) Desprendimiento del Cave Back. e) Caída de las rocas de la zona del Cave back. f) Generación del airblast.	11
Figura 3. Modelo Conceptual. a) La configuración de la malla de extracción y la ubicación del área unitaria en el nivel de producción. b) Dimensiones de la batea y ubicación de los puntos de extracción.	15
Figura 4. Módulo de producción mina Teniente 15 x 17.32 m. El dimensionamiento de las longitudes se encuentra en unidades de metro.	15
Figura 5. Dimensionamiento de batea de extracción en unidades de metro. a) Vista longitudinal. b) Vista transversal.	16
Figura 6. Dimensiones de Gálibo en unidades de metro.	16
Figura 7. Cortes realizados en el módulo de producción de la mina El Teniente. a) Corte longitudinal a lo largo de la zanja para ilustrar el pilar corona (Crown Pillar). Este corresponde a una parte del macizo rocoso que está ubicado entre el nivel de hundimiento y producción [2]. Su altura no puede ser inferior a 18 m debido a condiciones de estabilidad. b) Corte transversal para ilustrar las dimensiones de la batea y del pilar zanja. Además, el dimensionamiento de las longitudes se encuentra en unidades de metro.	17
Figura 8. Modelo Conceptual. a) Dimensiones de la batea y ubicación de la toma de datos en los puntos de extracción. b) Configuración de la malla de extracción y ubicación del área unitaria.	18
Figura 9. Velocidad de entrada del aire al material fragmentado (muckpile) para un fenómeno de airblast. Adaptado de (Oh et al., 2017).	19
Figura 10. Evolución temporal de la velocidad del aire para el caso del desprendimiento del área E1 en dos escenarios de estudio.	23
Figura 11. Perfil de velocidades en función de la distancia medida verticalmente desde la parte superior de los puntos de extracción hasta la base,	

para un caso en el que el airblast se produce únicamente en el área E1 , con valores de parámetros $D = 0.4$ m, $Lag = 60$ m. En la figura, el gráfico interior corresponde al punto de extracción derecho, mientras que el gráfico exterior representa al punto de extracción izquierdo.....24

Figura 12. Caudal de salida en función del tiempo (por unidad de ancho del punto de extracción) para un caso que ocurre el desprendimiento del área E1 , con valores de parámetros iguales a $D = 0.4$ m y $L = 4$ m para el punto de extracción izquierdo. 25

Figura 13. Velocidad máxima del aire en función del tamaño del airgap para distintos casos en el que se produce el fenómeno de airblast. a) Punto de extracción izquierdo. b) Punto de extracción derecho. 26

Figura 14. Caudal de salida en función del tiempo (por unidad de ancho del punto de extracción) para un caso que ocurre el desprendimiento del área E1 , con valores de parámetros iguales a $D = 0.4$ m y $Lag = 16$ m para el punto de extracción izquierdo. 27

Figura 15. Velocidad máxima del aire en función del espesor del material fragmentado (muckpile) para distintos casos en el que se produce el fenómeno de airblast. a) Punto de extracción izquierdo. b) Punto de extracción derecho. 28

Figura 16. Evolución temporal de la velocidad del aire para el caso en el que se produce el fenómeno de airblast en la batea 1 para dos escenarios de estudio. 32

Figura 17. Comparativa entre la velocidad máxima normalizada en los puntos de extracción a partir de las simulaciones numéricas realizadas y el modelo multivariable propuesto con dos variables de estudio. 38

Índice de tablas

Tabla 1. Potencial impacto de un evento de airblast según la magnitud de la velocidad del aire en los puntos de extracción. (Brown, 2002).	12
Tabla 2. Parámetros empleados en el estudio del airblast.	22
Tabla 3. Matriz de riesgo para el segundo caso de estudio.	34

1. Introducción

El aumento de las operaciones subterráneas en los últimos años producto del agotamiento de los yacimientos superficiales, ha llevado a considerar una serie de peligros durante la planificación y explotación de la mina. Uno de ellos son los peligros operativos, tales como ráfagas de aire, estallidos de rocas, irrupciones de barro e irrupciones de agua y lodo [12], tal como se ilustra en la Figura 1. Estos peligros tienen la capacidad de generar daños a la infraestructura y equipo de la mina, así como interrupciones en su operación y lesiones al personal.



Figura 1. Principales peligros operativos en minería de Caving. Brown (2002) [1].

Los peligros operativos ocurren en métodos de explotación del tipo de hundimiento, como el Block Caving y/o Panel Caving. Estos métodos consisten en la socavación de la base del macizo rocoso en el nivel de hundimiento, lo que provoca el colapso natural del bloque de roca y la propagación de su quiebre hacia la superficie [8]. De esta manera, el material fragmentado se extrae en los puntos de extracción ubicados en el nivel de producción, mediante la utilización de equipos de carga y descarga denominados LHD's.

Cabe señalar, que si bien el mecanismo de explotación de ambos métodos es básicamente el mismo, presentan discrepancias en la forma en cómo se realiza la incorporación del nuevo área de producción [9]. En el método de Block Caving es discreta, es decir, el cuerpo mineralizado es subdividido mediante bloques o áreas productivas. En cambio, en el Panel Caving es continua, realizado a través de paneles [14].

Algunos ejemplos de minas de Block y Panel Caving son, Henderson – Colorado, USA, Chuquicamata subterránea – Antofagasta, Chile, División Andina – Valparaíso, Chile, El Teniente – Libertador B. O' Higgins, Chile, Northparkes – New

South Wales, Australia y El Salvador – Atacama, Chile, entre otros. En estas dos últimas minas, se han producidos eventos de airblast.

El airblast es una irrupción de un flujo de aire que sale a altas velocidades a través de los puntos de extracción, cuando ocurre el desplome repentino del cave back, provocando la compresión del volumen del aire que se encuentra en la zona del airgap [1].

Para que se produzca este fenómeno, durante la propagación del quiebre del macizo rocoso hacia la superficie, se debe generar una colgadura de un gran bloque de roca. Además, como en el nivel de producción se está extrayendo el material fragmentado a través de los puntos de extracción, se genera una disminución de la altura de este material, lo cual trae consigo la formación de una zona denominada Air Gap [13]. Debido a lo anterior, el bloque de roca que se encontraba colgando, cae encima del material fragmentado (muckpile), provocando la compresión del aire y su posterior irrupción hacia los puntos de extracción, como se visualiza en la Figura 2. Por tanto, una forma de controlar el airgap, es que la velocidad de extracción sea menor o igual que la velocidad de propagación del Caving. De esta manera, se garantiza la existencia de un material quebrado acumulado que funcionaría como una especie de colchón. Esto implicaría que el volumen de aire existente entre el cave back y el material quebrado sería considerablemente menor, por ende, el riesgo también [14].

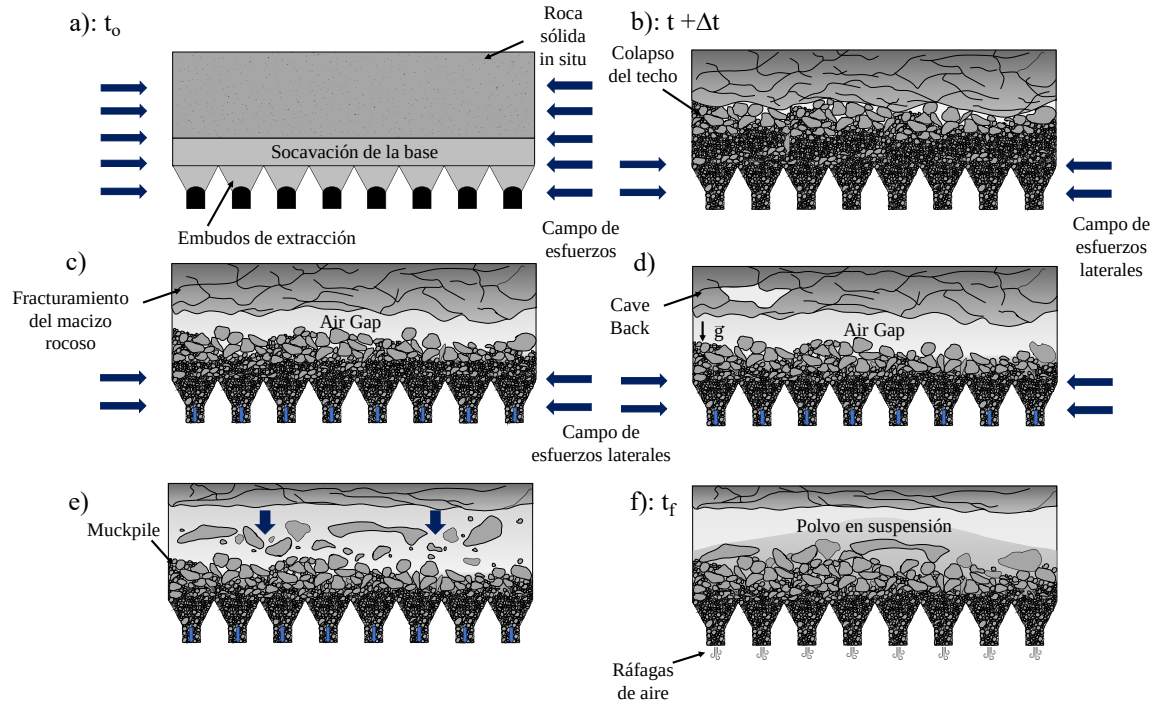


Figura 2. Representación del peligro operacional denominado airblast. a) Estado inicial del macizo rocoso. b) Realización de las operaciones unitarias de perforación y tronadura en la zona de socavación, para producir el llenado del espacio vacío con material fragmentado desplomado del techo. c) Extracción del material fragmentado de la zona de socavación mediante los puntos de extracción. d) Desprendimiento del Cave Back. e) Caída de las rocas de la zona del Cave back. f) Generación del airblast.

Algunos casos en donde se ha producido este peligro, uno de ellos corresponde en la mina Northparkes. El día 24 de noviembre de 1999, 5.5 Mm^3 de roca desplazaron 4.1 Mm^3 de aire, trayendo como consecuencia la muerte de cuatro personas. Además, en el mismo año en Chile, se produjo en la Mina Salvador el día 5 de diciembre el repentino colapso del cave back en la zona de Inca West producto de la formación de un arco estable, el cual provocó el desarrollo de un gran vacío de aire [11]. Para este caso, se estimó que la velocidad del aire producto del colapso en el acceso principal tenía un valor superior a 500 km/h [1].

En consecuencia, debido a los efectos que puede ocasionar, la evaluación de los parámetros que lo involucre, tales como, la velocidad del aire y sobrepresiones es fundamental. Esto, con el objetivo de desarrollar estrategias para poder mitigar el peligro [10] y así, categorizar su impacto. Esto se puede realizar mediante la escala de Beaufort tal como se indica en la Tabla 1, el cual abarca desde un vendaval moderado hasta un ciclón categoría 4 a 5.

Tabla 1. Potencial impacto de un evento de airblast según la magnitud de la velocidad del aire en los puntos de extracción. (Brown, 2002).

Velocidad del aire	Clasificación	Potencial Impacto
< 55 km/h	Vendaval Moderado Escala Beaufort N°7	Dificultad para caminar contra el viento
55-125 km/h	Ciclón, huracán categoría 1 Tornado (F0)	Algunos daños en ventanas, letreros, bolsas de ventilación, tuberías de aire y agua. La persona que no esté preparada puede ser derribada.
125-170 km/h	Ciclón, huracán categoría 2 Tornado moderado (F1)	Daños significativos en letreros, bolsas de ventilación y tuberías. Algunos autos volcados. Pequeños proyectiles (arena).
170-225 km/h	Ciclón, huracán categoría 3 Tornado importante (F2)	Daños importantes en las instalaciones. Los objetos ligeros se convierten en proyectiles.
>225 km/h	Ciclón, huracán categoría 4 a 5 Tornado importante (F3-F6)	Daño severo. Vehículos pesados levantados del suelo y arrojados. Edificios metálicos colapsados o severamente dañados.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

- Determinar la relación entre las magnitudes de las velocidades del aire en caso de airblast a través de los puntos de extracción y el tamaño de airgap, diámetro y espesor del material fragmentado.

2.2 Objetivos específicos

- Implementar un modelo numérico de una mina de Caving para simular el fenómeno de airblast.
- Elaborar un ábaco que exhiba la velocidad máxima alcanzada en los puntos de extracción durante un evento de airblast, en función del tamaño del airgap, espesor y diámetro del material fragmentado.
- Elaborar un modelo matemático que determine las velocidades máximas del aire obtenidas en los puntos de extracción debido a un evento de airblast.
- Determinar una zona de seguridad en relación al peligro de ráfagas de alta intensidad, en función del diámetro del material fragmentado y tamaño de airgap (L_{ag}).
- Determinar el impacto de las velocidades máximas obtenidas en los puntos de extracción, utilizando como referencia la Escala de Fuerza de los Vientos desarrollada por Beaufort.

3. Metodología

3.1 Reproducción del fenómeno de airblast con sus ecuaciones en el modelo numérico

3.1.1 Modelo Conceptual

Con el propósito de representar el fenómeno de airblast, se dividirá el sector colgado entre áreas unitarias, las cuales se encontrarán dispuestas entre dos calles de producción y galerías contiguas. El área unitaria está compuesta por una batea y dos puntos de extracción, los cuales se encontrarán ubicados en su base, como se puede visualizar en la Figura 3.

- I. **Cave back:** Corresponde a la zona en la cual el macizo rocoso se encuentra en suspensión. En este caso, se establece que se encuentra subdividido en tres diferentes áreas (E_1 , E_2 , E_3) para así, poder simular para cada uno de los casos el emplazamiento del volumen de aire que se encuentra en la zona de airgap producto de la caída de cada una de estas áreas.
- II. **Zona de Airgap:** Corresponde a la zona que se encuentra ubicada entre la zona de colgadura y material quebrado (muckpile) que contiene aire. En este caso, se considera que la zona de colgadura comprime la zona de airgap, provocando que el aire contenido en él ingrese al material fragmentado dispuesto por encima de la batea y salga por los puntos de extracción. La existencia de esta zona depende de la velocidad de extracción y, además, de la tasa de propagación del Caving [9].
- III. **Zona de material fragmentado (muckpile):** Corresponde a la zona que contiene el material que se ha desprendido del macizo rocoso producto de su explotación y que se encuentra al interior de la batea, sin embargo, aún no ha sido extraído por un equipo en los puntos de extracción. Además, contiene una columna de material fragmentado de espesor variable que se encuentra dispuesto por encima de la batea, en conjunto con un talud ubicado en los puntos de extracción, el que contiene un ángulo de reposo de 40° . Para el dimensionamiento de esta zona, [4] y [5].

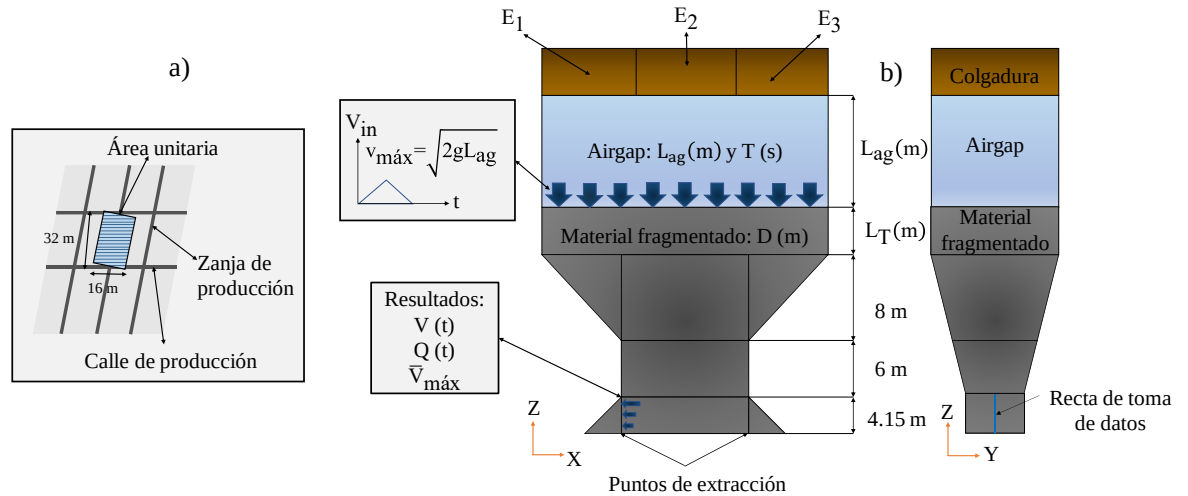


Figura 3. Modelo Conceptual. a) La configuración de la malla de extracción y la ubicación del área unitaria en el nivel de producción. b) Dimensiones de la batea y ubicación de los puntos de extracción.

3.2 Aplicación a un caso con 4 bateas para estudiar la zona de seguridad

3.2.1 Configuración del módulo de producción

En la modelación del fenómeno de airblast, se realiza el dimensionamiento del módulo de producción, tomando como referencia la de la Mina El Teniente. A partir de la Figura 4 a la 7, se describe la configuración minera que se utilizará en la modelación numérica.

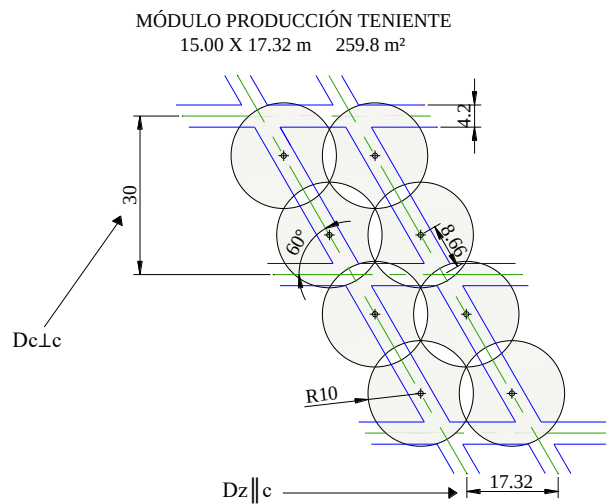


Figura 4. Módulo de producción mina Teniente 15 x 17.32 m. El dimensionamiento de las longitudes se encuentra en unidades de metro.

DIMENSIONES DE BATEA

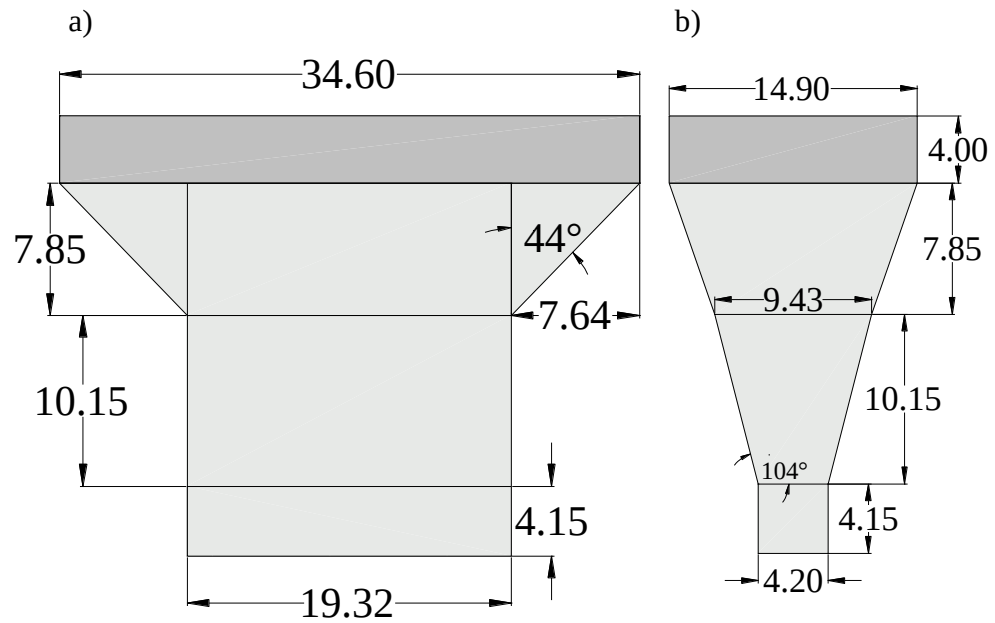


Figura 5. Dimensionamiento de batea de extracción en unidades de metro. a) Vista longitudinal. b) Vista transversal.

SECCIÓN TRANSVERSAL DE GÁLIBO

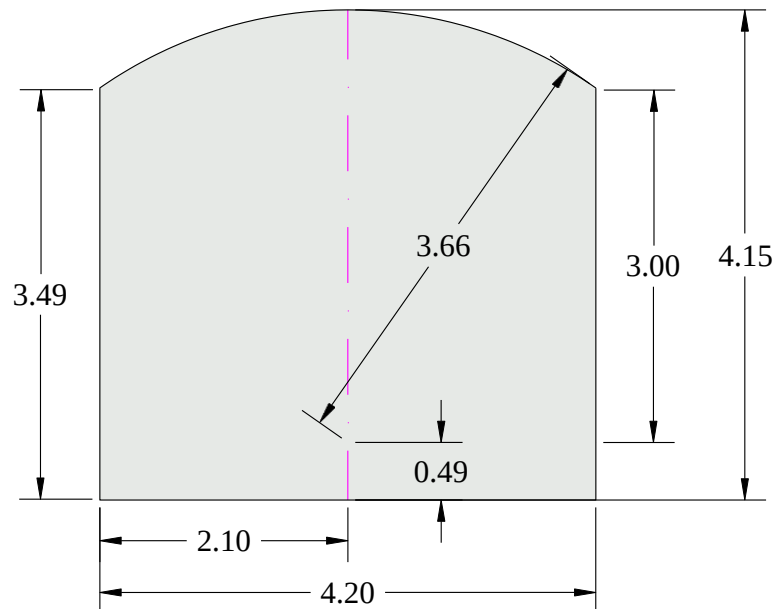


Figura 6. Dimensiones de Gálibo en unidades de metro.

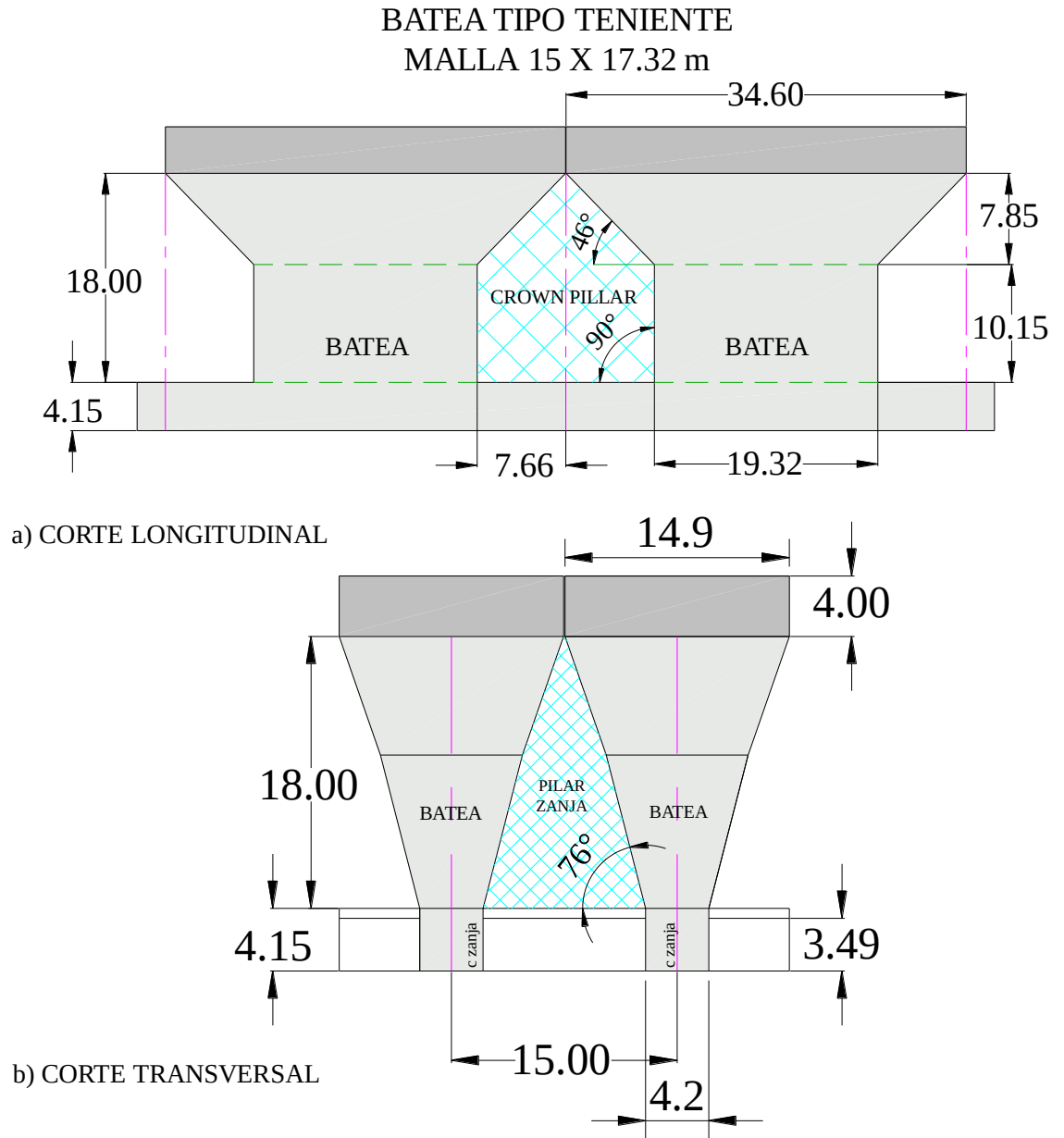


Figura 7. Cortes realizados en el módulo de producción de la mina El Teniente. a) Corte longitudinal a lo largo de la zanja para ilustrar el pilar corona (Crown Pillar). Este corresponde a una parte del macizo rocoso que está ubicado entre el nivel de hundimiento y producción [2]. Su altura no puede ser inferior a 18 m debido a condiciones de estabilidad. b) Corte transversal para ilustrar las dimensiones de la batea y del pilar zanja. Además, el dimensionamiento de las longitudes se encuentra en unidades de metro.

3.2.2 Metodología

En la representación del fenómeno de airblast, se emplearán las dimensiones del módulo de producción de la mina El Teniente, estipuladas en la sección anterior. Además, en este caso, la zona de colgadura no presenta seccionamiento, por tanto, corresponde a un colapso completo de toda la superficie que se encuentra sobre la batea de extracción, tal como se visualiza en la Figura 8.

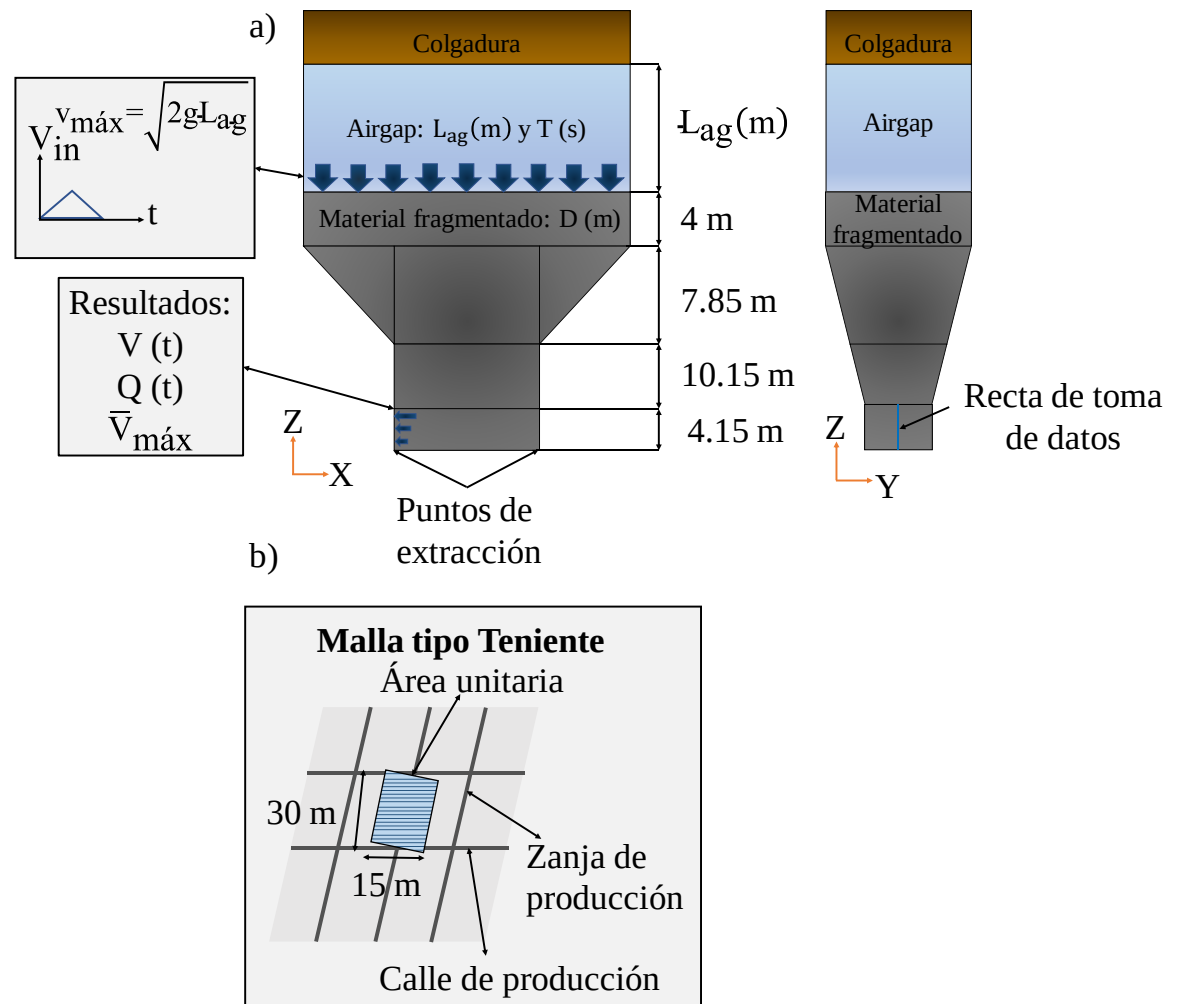


Figura 8. Modelo Conceptual. a) Dimensiones de la batea y ubicación de la toma de datos en los puntos de extracción. b) Configuración de la malla de extracción y ubicación del área unitaria.

4. Ecuaciones de balance

Ecuaciones anteriores tales como Oh et al., (2017) [10]; Galindo-Torres et al., (2018) [7] y Palma et al., (2019) [11] han demostrado el comportamiento de las ráfagas de aire en un evento de airblast. Uno de los resultados que se destaca, corresponde a que la velocidad del aire con la que ingresa a la zona de material fragmentado (muckpile) en las simulaciones tiene una forma similar a un pulso cuasi-triangular, tal como se observa en la Figura 9.

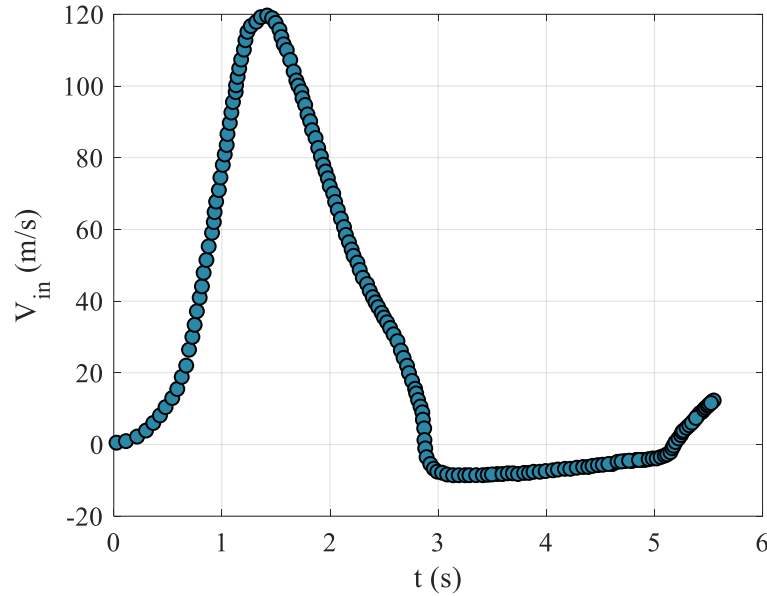


Figura 9. Velocidad de entrada del aire al material fragmentado (muckpile) para un fenómeno de airblast. Adaptado de (Oh et al., 2017).

La velocidad de entrada del aire puede ser descrita mediante la ecuación (1), donde g corresponde a la aceleración de gravedad y L_{ag} el tamaño del airgap.

$$V_{int} = \sqrt{2gL_{ag}} \quad (1)$$

De este modo, considerando un valor de tamaño de airgap de 14 m y reemplazándolo en ecuación (1), se obtiene un valor de velocidad aproximado de 17 m/s.

En primer lugar, para el estudio del fenómeno de airblast, se emplearán las ecuaciones de conservación de la masa, momentum y de energía. La primera ecuación estipula que en un volumen de fluido con una densidad ρ , viscosidad μ , la

conservación de la masa se encuentra determinada por la ecuación de continuidad. En ella, es necesario incluir el término de porosidad e , debido a que el aire se encuentra en un medio poroso. Por tanto, el volumen del fluido solo corresponde a una parte del volumen total. Así, la ecuación de conservación de la masa queda formulada de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(ep)}{\partial t} + \nabla \cdot (ep\vec{v}) = 0 \quad (2)$$

Donde, $\vec{v}$ corresponde a la velocidad del fluido dentro los poros de la roca fracturada.

Ergun estableció que la caída de presión total se debe a pérdidas de energía viscosa y cinética, las cuales se encuentran representadas mediante el primer y segundo término de la ecuación (3) respectivamente [6]. Además, esta ecuación es aplicable para un gran rango de número de Reynolds tanto para flujos turbulentos como también flujos laminares [10], donde el término cuadrático con respecto a la velocidad corresponde para un flujo turbulento y el término lineal para un flujo laminar.

$$(\nabla P + \rho \vec{g}) = -\frac{150(1-e)^2}{e^3 d^2} \mu \vec{v} - \frac{1.75(1-e)}{e^3 d} \rho |\vec{v}| \vec{v} \quad (3)$$

En el que d corresponde al diámetro de partícula del medio poroso, $\vec{g}$ la aceleración de gravedad y μ viscosidad dinámica del aire. Por tanto, reordenando la ecuación (3) se obtiene:

$$0 = -\nabla P - \rho \vec{g} - \frac{1.75(1-e)}{e^3 d} \left[1 + \frac{\mu}{\rho} \frac{150(1-e)}{1.75 d |\vec{v}|} \right] \rho |\vec{v}| \vec{v} \quad (4)$$

El término de la ecuación (4) que se encuentra entre corchete es del orden de la unidad cuando la contribución laminar frente a la turbulenta es ínfima. Considerando el valor de velocidad $\vec{v} = 17$ m/s, viscosidad cinemática del aire $\frac{\mu}{\rho} \approx 13$ mm²/s, diámetro de partícula del medio poroso $d \approx 1$ m y una porosidad $e \approx 0.3$, se obtiene:

$$\frac{\mu}{\rho} \frac{150(1-e)}{1.75 d |\vec{v}|} \sim 5 \cdot 10^{-5} \ll 1 \quad (5)$$

Por tanto, con relación al resultado obtenido de la ecuación (5), se puede despreciar la contribución del flujo laminar y simplificar la ecuación (4) para obtener de manera explícita en la ecuación (6) el valor de la velocidad del aire:

$$\rho \vec{u} = - \frac{(\nabla P + \rho \vec{g})}{\sqrt{\frac{1.75 (1 - e)}{e^3 d \rho} |\nabla P + \rho \vec{g}|}} \quad (6)$$

Por otra parte, aplicando las leyes de los gases ideales para el caso del aire, la densidad puede ser descrita mediante la ecuación (7) y la velocidad del sonido mediante la ecuación (8). Asumiendo que la compresión del aire se está produciendo sin adicción de calor, por lo que corresponde a un proceso adiabático [3][13].

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (7)$$

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (8)$$

Donde, tanto para la ecuación (7) y (8), ρ , P , R y T corresponden a la densidad, presión absoluta, constante universal de los gases y temperatura absoluta respectivamente. Por lo que al igualar ambas ecuaciones en términos de la constante universal de los gases, se obtiene:

$$\rho = \frac{\gamma P}{c^2} \quad (9)$$

En el caso del aire, el valor de la constante adiabática γ corresponde a 1.4. El modelo matemático es elaborado a partir de las ecuaciones (2), (6) y (9). La solución de estas ecuaciones se obtuvo utilizando el método de elementos finitos (FEM), empleando la formulación débil en la ecuación (2). Para el primer caso de estudio, las condiciones de borde estipuladas en el modelo implican que hay velocidad únicamente en la superficie de contacto entre el airgap y el material fragmentado (muckpile), así como en los puntos de extracción. En cambio, para el segundo caso de estudio, además de la contribución en la zona airgap - muckpile, se estipuló que en las entradas de las galerías había una contribución débil. Esto se debe a que, por impedimentos del programa COMSOL en donde se está desarrollando las

simulaciones, no se puede estipular de manera directa la velocidad del aire en los puntos de extracción.

Además, en los puntos de extracción y galerías para el primer y segundo caso, respectivamente, se determinó que la presión de aire sería equivalente al peso de la columna inicial.

5. Casos de estudio

En la realización de ambos estudios se llevaron a cabo un total de 420 simulaciones numéricas, obteniendo 1200 datos. Esto con el propósito de analizar cómo los valores de la velocidad del aire en los puntos de extracción se ven afectados al variar diferentes parámetros, tales como el tamaño del airgap (L_{ag}), espesor (L_T) y diámetro de partícula del material fragmentado (d). Por lo que se emplearon los valores que se ilustran en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros empleados en el estudio del airblast.

Parámetros		Primer Estudio: 1 Batea	Segundo Estudio: 4 Bateas	Valores
Velocidad del sonido	c	340		(m/s)
Índice de vacíos	e	0.31		(-)
Densidad del aire	ρ	1		$\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$
Constante adiabática	γ	1.4		(-)
Presión	P	0		(Pa)
Periodo pulso	T	3		(s)
Tamaño airgap	L_{ag}	[4:4:60]	[4:6:58]	(m)
Diámetro de partícula	d	[0.1:0.1:0.4]	[0.6:0.6:1.2]	(m)
Espesor material fragmentado	L_T	[2:2:30]	4	(m)

6. Resultados

I. Primer caso de estudio

En la Figura 10 se ilustra para dos casos distintos la evolución temporal de la velocidad del aire al momento de ingresar en el material fragmentado, el cual, se encuentra dispuesto por encima de la batea. También se expone el aumento de los valores de velocidad en los dos puntos de extracción y en el área E_1 a medida que transcurre el tiempo.

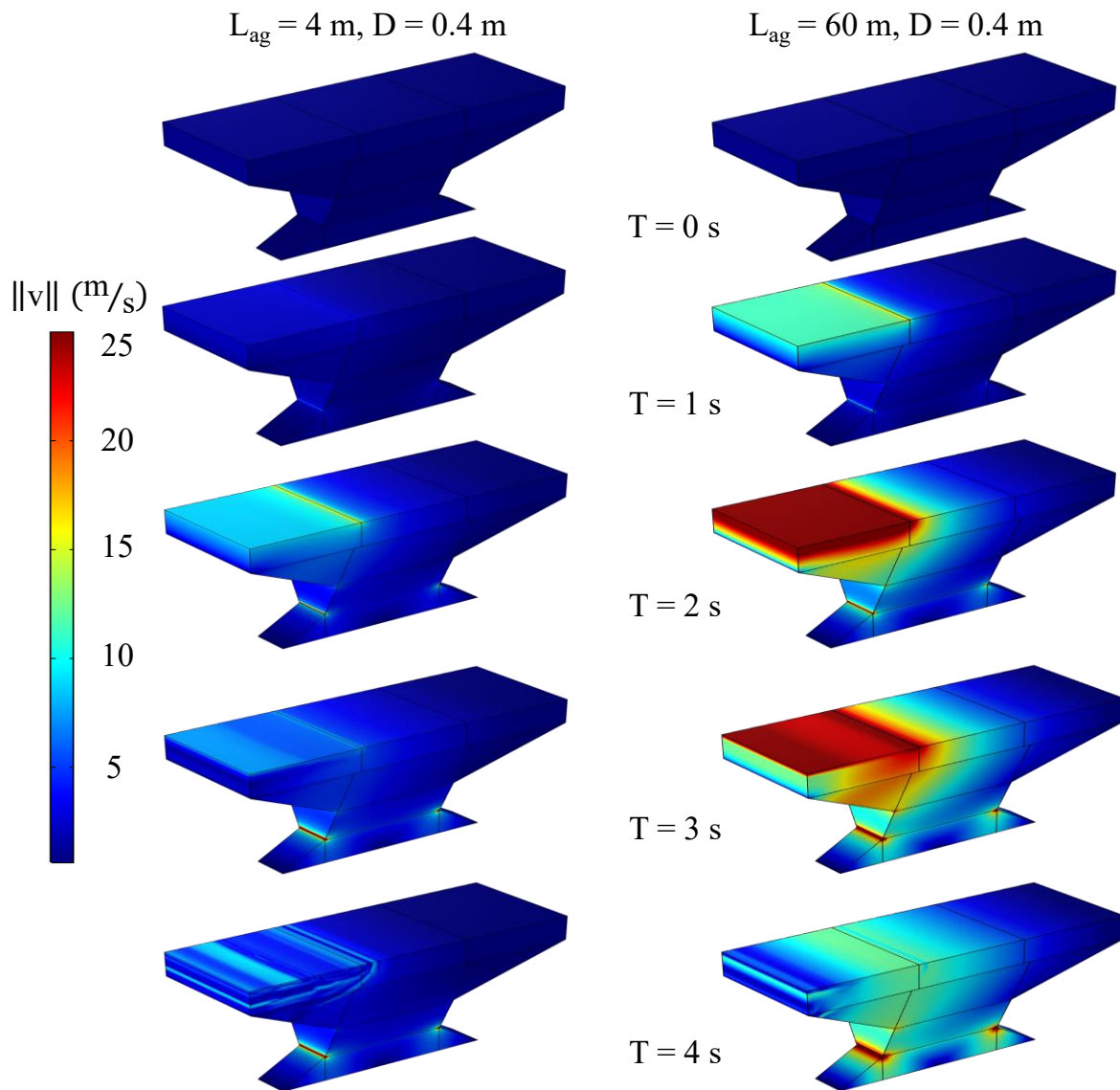


Figura 10. Evolución temporal de la velocidad del aire para el caso del desprendimiento del área E_1 en dos escenarios de estudio.

Posteriormente, en la Figura 11 se observa el comportamiento de la velocidad del aire obtenido en los puntos de extracción en función de la componente del eje z , la cual fue medida desde la parte superior del punto de extracción hasta la parte inferior de la batea. Se ilustra, que los mayores valores de velocidad se obtienen en el cambio de geometría (cuña), los cuales corresponden a datos no representativos, por lo que no fueron considerados dentro del estudio.

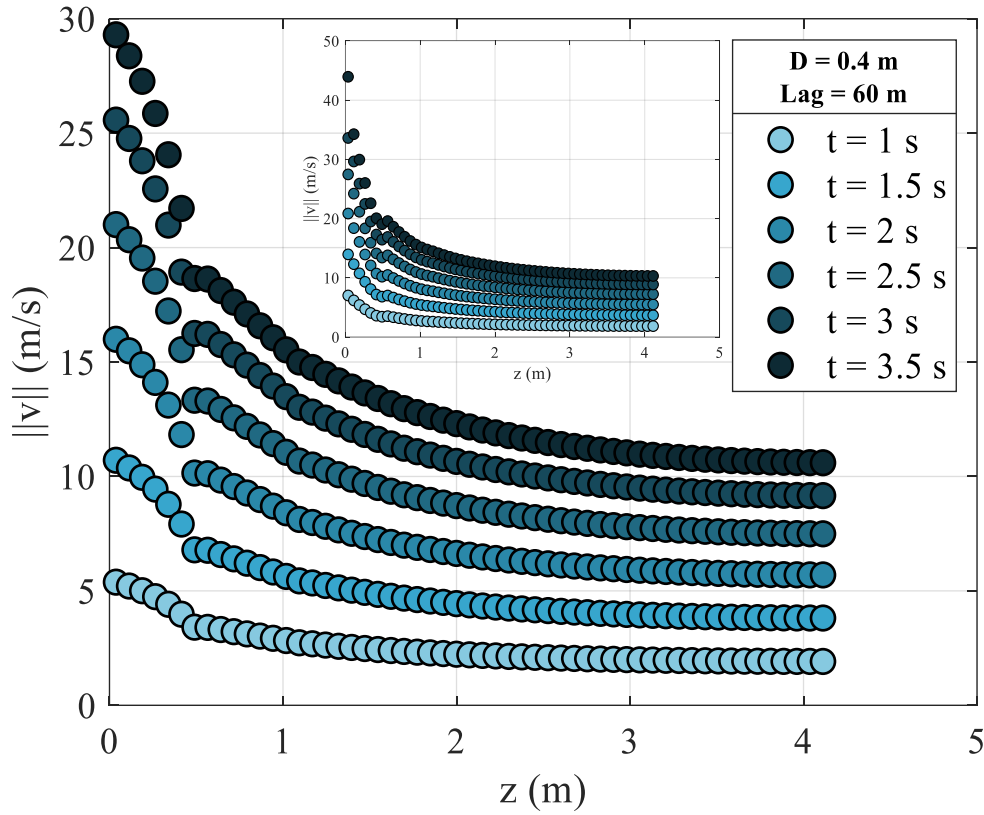


Figura 11. Perfil de velocidades en función de la distancia medida verticalmente desde la parte superior de los puntos de extracción hasta la base, para un caso en el que el airblast se produce únicamente en el área E_1 , con valores de parámetros $D = 0.4$ m, $L_{ag} = 60$ m. En la figura, el gráfico interior corresponde al punto de extracción derecho, mientras que el gráfico exterior representa al punto de extracción izquierdo.

Así, a partir de la integración de la evolución temporal de las velocidades, se obtiene los valores de caudales por unidad de ancho del punto de extracción, tal como se muestra en la Figura 12. En ella, se expone un caso donde se produce únicamente el desprendimiento del área E_1 con valores de parámetros tales como $D = 0.4$ m y $L = 4$ m. Esto, con el propósito de analizar la incidencia del tamaño del airgap en los valores de caudales, donde se puede

observar que a medida que transcurre el tiempo, dichos valores tienden a aumentar.

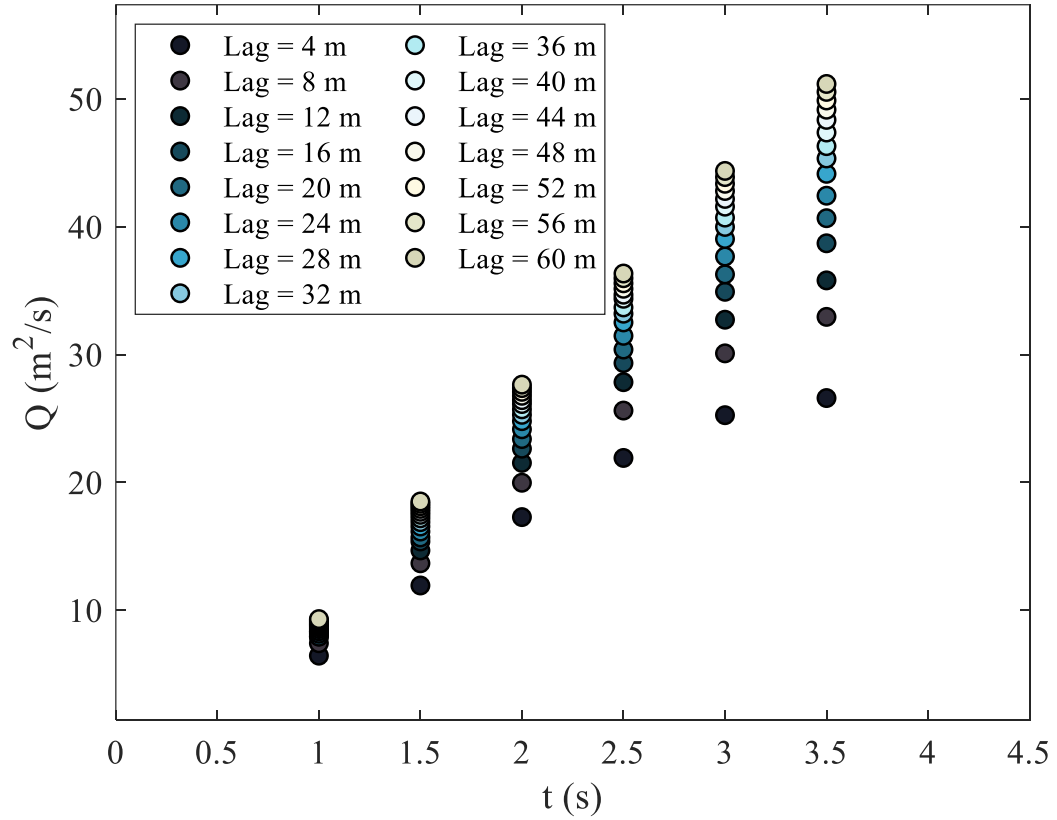


Figura 12. Caudal de salida en función del tiempo (por unidad de ancho del punto de extracción) para un caso que ocurre el desprendimiento del área E_1 , con valores de parámetros iguales a $D = 0.4$ m y $L = 4$ m para el punto de extracción izquierdo.

Una vez obtenidos los distintos valores de caudales para los diferentes tamaños de airgap, se procede a extraer el valor máximo de caudal correspondiente a cada uno de ellos. Este máximo valor se alcanza en el tiempo $t = 3.5$ s. De esta manera, es posible determinar la velocidad promedio máxima para cada uno de los diferentes tamaños de airgap, tal como se muestra en la Figura 13. En ella, se ilustra la directa incidencia tanto del diámetro de partícula del material fragmentado (muckpile) como del tamaño del airgap para distintos casos.

Por otro lado, en el estudio de la incidencia del espesor del material fragmentado en los valores de velocidad del aire en los puntos de extracción, se empleó el mismo procedimiento mencionado anteriormente para obtener los valores de caudales presentados en la Figura 14. En ella se expone un caso

donde se produce el desprendimiento del área E_1 , utilizando valores de parámetros tales como $D = 0.4$ m y $L_{ag} = 16$ m. Esto, con el propósito de ilustrar el decaimiento de los valores de caudales al aumentar el espesor del material fragmentado.

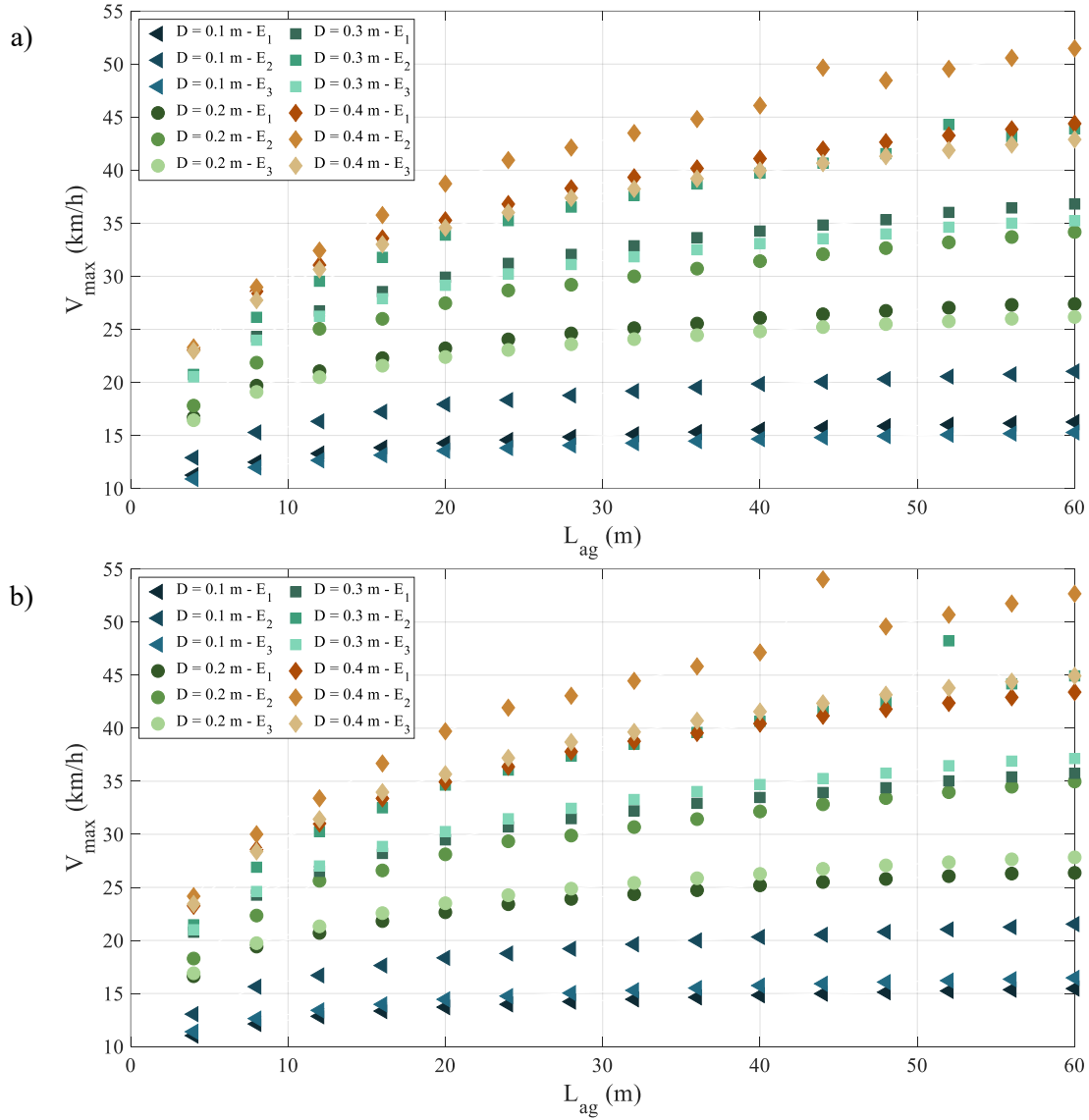


Figura 13. Velocidad máxima del aire en función del tamaño del airgap para distintos casos en el que se produce el fenómeno de airblast. a) Punto de extracción izquierdo. b) Punto de extracción derecho.

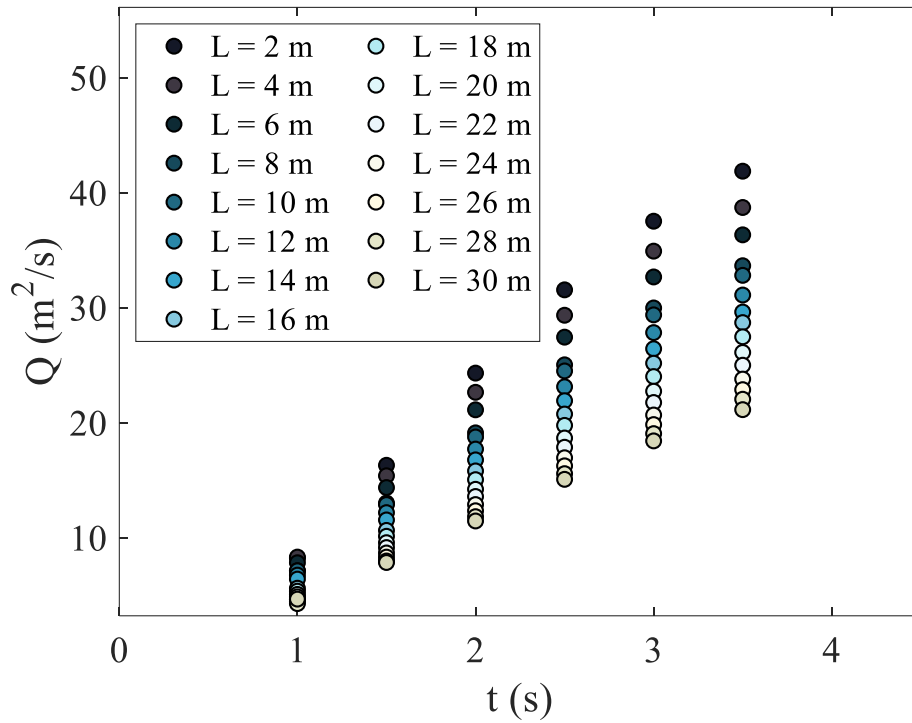


Figura 14. Caudal de salida en función del tiempo (por unidad de ancho del punto de extracción) para un caso que ocurre el desprendimiento del área E_1 , con valores de parámetros iguales a $D = 0.4$ m y $L_{ag} = 16$ m para el punto de extracción izquierdo.

Posteriormente, se determinan los valores de velocidad promedio máxima para cada uno de los distintos espesores de material fragmentado, tal como se expone en la Figura 15. En ella, se muestra la relación directa entre el tamaño del airgap y las velocidades del aire, así como la relación indirecta entre el espesor de material fragmentado y las velocidades del aire.

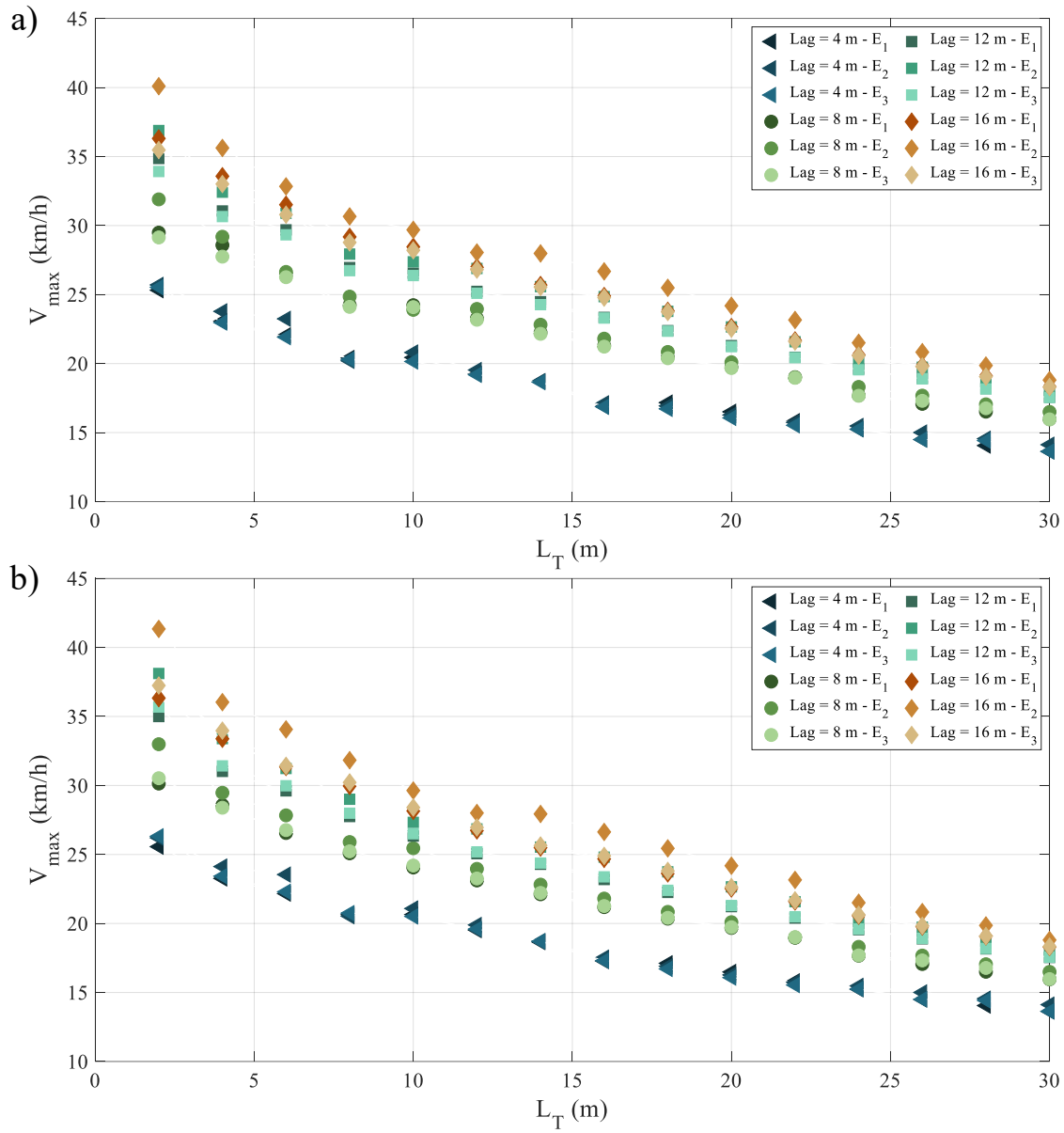


Figura 15. Velocidad máxima del aire en función del espesor del material fragmentado (muckpile) para distintos casos en el que se produce el fenómeno de airblast. a) Punto de extracción izquierdo. b) Punto de extracción derecho.

II. Segundo caso de estudio

En la Figura 16 se muestra la evolución temporal de la velocidad del aire al momento de ingresar en el material fragmentado para dos casos distintos. Se observa que en un tiempo igual $t = 2$ s se alcanzan los máximos valores de velocidad del aire en los puntos de extracción, así como en las galerías.

De igual manera que el primer caso de estudio, se realizó el mismo procedimiento para obtener los valores de caudales y, posteriormente, las de velocidades. Esto se hizo con el propósito de crear una matriz de riesgo en función del diámetro de partícula y del tamaño del airgap, tal como se muestra en la Tabla 3.

6.1 Discusión de resultados

6.1.1 Primer caso de estudio

La Figura 13 ilustra un resumen de las diferentes velocidades promedios máximas en función del diámetro de partícula del material fragmentado y el tamaño del airgap. Donde, se puede observar que al incrementar ambos parámetros, los valores de velocidad del aire en los puntos de extracción también aumentan, independientemente del caso que se esté desarrollando. No obstante, en el caso donde se produce el desplome en el área del medio (E_2) se obtienen valores de velocidades mayores en comparación con los casos E_1 y E_3 , tanto en el punto de extracción izquierdo como en el derecho. Esta diferencia se debe a la condición de borde establecida, que especifica que la velocidad es igual a cero, lo que indica la existencia de fricción. En consecuencia, cuando se produce el desplome de una de las áreas cercanas al borde del modelo, el flujo de aire entra en contacto con él, generando una disminución de los valores de velocidad del aire que salen por los puntos de extracción.

La Figura 15 muestra un resumen de las velocidades del aire obtenidas en los puntos de extracción, en función del espesor del material fragmentado y el tamaño del airgap. Donde, se puede observar que a medida que aumenta el tamaño del airgap, se obtienen valores de velocidades más elevadas en cada uno de los puntos de extracción.

Sin embargo, cuando se aumenta el espesor del material fragmentado, se observa una disminución de los valores de velocidad del aire. Esta situación se debe a que, a medida que se incrementa el espesor del material fragmentado, el aire encuentra una mayor resistencia al fluir de acuerdo con la ley de Darcy, lo que a su vez provoca un aumento en la caída de presión. Por lo tanto, esto afecta en

los valores de velocidad obtenidos en los puntos de extracción. También se observa que en el caso E_2 , donde ocurre el desprendimiento del área de al medio, se alcanzan las mayores velocidades en cada uno de los puntos de extracción.

Con relación a las simulaciones realizadas para este caso de estudio, se ha establecido que la duración del pulso de aire posee un valor constante de $T = 3$ s. Este parámetro tiene relación con el momento en el que se produce la caída de las rocas provenientes del cave back, las cuales provocan el desplazamiento del aire presente en la zona de airgap. Esto conlleva a que la velocidad del aire comience a aumentar gradualmente su valor hasta alcanzar un máximo, el cual corresponde al instante en el que entra en contacto con el material fragmentado. Sin embargo, a medida que el aire atraviesa dicho medio, su valor comienza a disminuir.

Por otro lado, el tamaño del material fragmentado influye directamente en la magnitud de la velocidad del aire obtenida en los puntos de extracción. Esta correlación se debe al hecho de que un gran valor de diámetro de partículas en el material fragmentado resulta en la generación de mayores espacios entre cada una de ellas. Por tanto, estos espacios proveen una vía por la cual el aire puede fluir y, por ende, salir hacia los puntos de extracción.

Con respecto a la porosidad del material fragmentado, se ha obtenido un valor aproximado de 0.31. Este valor indica que el volumen de espacios vacíos presentes en el material fragmentado es relativamente bajo. Esta condición influye directamente en la caída de presión, provocando un aumento de su valor. Como consecuencia, se obtienen menores valores de velocidad del aire en los puntos de extracción.

La ecuación de Ergun incorpora explícitamente los términos de porosidad y diámetro del material fragmentado mencionados

anteriormente. En contraste, la ecuación de Navier – Stokes, si bien proporcionaría una mejor descripción del fenómeno para un fluido incompresible, como es el caso, presenta desventajas. Estas corresponden al alto costo computacional y la incorporación de ecuaciones complejas de resolver.

Además, la ecuación de Ergun considera tanto las pérdidas de energía viscosa como los efectos inerciales. Asimismo, abarca todos los tipos de fluido, desde un fluido laminar descrito por la ecuación de Darcy hasta un fluido turbulento. Por tanto, se puede afirmar que la ecuación de Ergun describe bien el comportamiento del aire a través del medio poroso (muckpile) en un caso en el que se desarrolla un fenómeno de airblast en minería de Caving.

6.1.2 Segundo caso de estudio

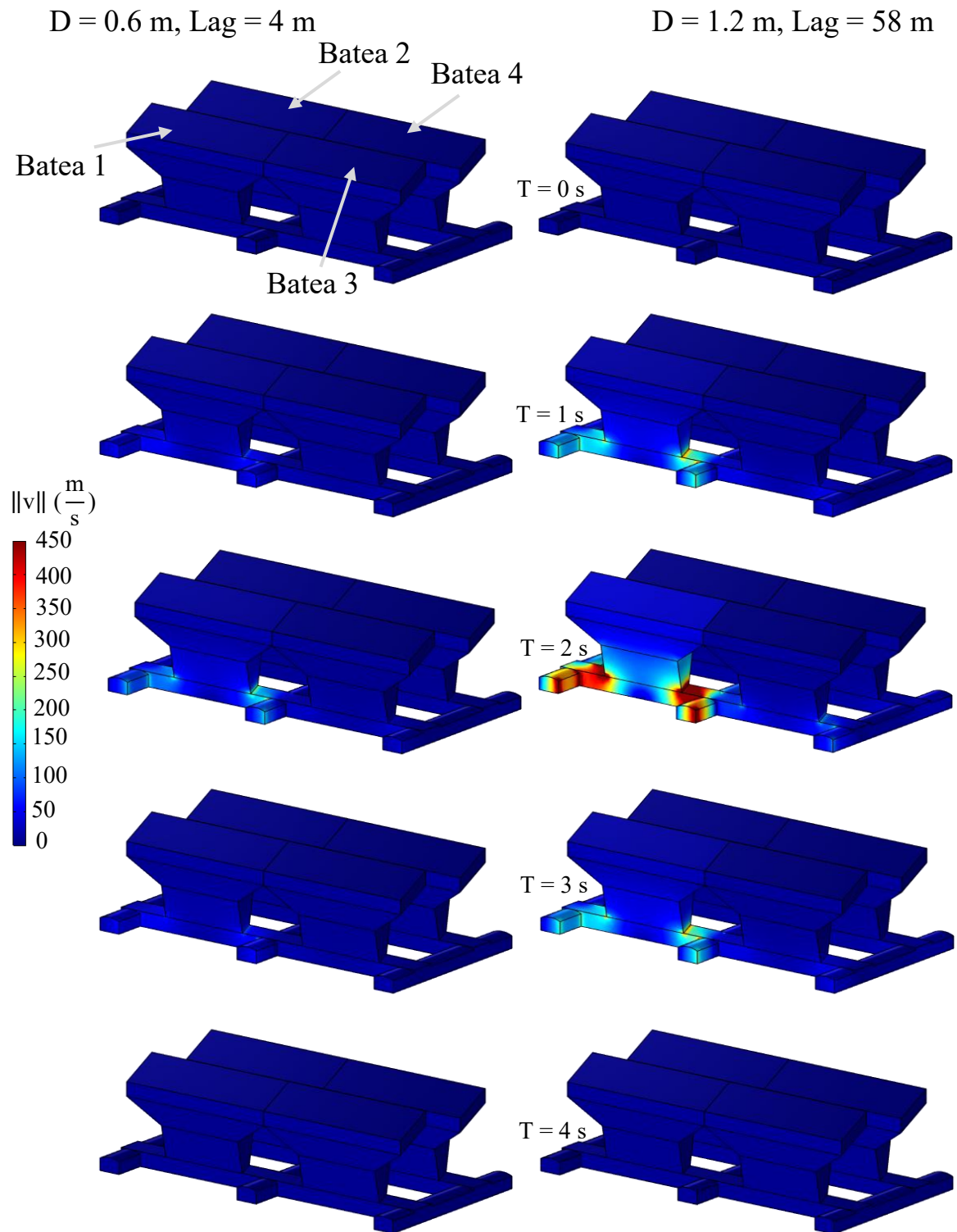


Figura 16. Evolución temporal de la velocidad del aire para el caso en el que se produce el fenómeno de airblast en la batea 1 para dos escenarios de estudio.

A partir de la Tabla 3, se puede observar que donde se produce el fenómeno de airblast es donde se obtienen mayores velocidades. Asimismo, a medida que se aumenta la distancia entre foco – batea, se observa una disminución de los valores de las velocidades en los puntos de extracción. Además, se aprecia que el parámetro más influyente para este caso de estudio corresponde al tamaño del airgap, ya que al incrementar este valor, se produce un aumento considerable de la magnitud del aire. Este resultado concuerda con la relación obtenida en el primer caso de estudio.

Sin embargo, a partir de la Tabla 3 se puede observar que en algunas columnas para un $D = 0.6$ m se obtienen mayores velocidades del aire en comparación con un $D = 1.2$ m, lo cual, no concuerda con la relación obtenida en el primer caso de estudio. Esto se atribuye a que una de las condiciones físicas estipuladas en las simulaciones no es la correcta. En particular, se definió que había una contribución débil en las entradas de las galerías, en lugar de hacerlo directamente en el talud de material fragmentado como se hizo en el primer caso. Esto se debe a restricciones en el programa en el cual se realizaron las simulaciones, ya que no permitía colocar esa estructura.

Esto implica que se está considerando que en las galerías de conexión entre las distintas bateas hay material granular. Por tanto, los valores de velocidades del aire obtenidos en los puntos de extracción son valores subestimados, es decir, menores a los reales. Debido a esto, los valores obtenidos de velocidades del aire deben ser amplificados por un factor superior a 1.

Tabla 3. Matriz de riesgo para el segundo caso de estudio.

		Velocidad (km/h)											
		L = 4 m											
		Lag = 4 m						Lag = 58 m					
Ocurrencia de airblast		Sólo Batea 1		Batea 1 y 2		Batea 1, 2, 3, 4		Sólo Batea 1		Batea 1 y 2		Batea 1, 2, 3, 4	
Punto de extracción	N° Batea	D= 0.6 m	D= 1.2 m	D= 0.6 m	D= 1.2 m	D= 0.6 m	D= 1.2 m	D= 0.6 m	D= 1.2 m	D= 0.6 m	D= 1.2 m	D= 0.6 m	D= 1.2 m
Izquierdo	1	387	410	425	429	447	466	1660	1530	1440	1646	1825	1689
	2	8	8	450	454	490	512	33	31	1522	1741	2003	1853
	3	62	66	98	99	305	318	265	246	335	381	1246	1153
	4	16	17	73	74	371	387	66	63	250	283	1515	1402
Derecho	1	418	443	478	482	367	383	1792	1653	1618	1849	1500	1387
	2	7	8	436	440	304	317	30	29	1477	1688	1242	1149
	3	62	66	98	99	488	509	265	246	335	381	1993	1843
	4	16	17	73	73	425	444	66	62	248	281	1737	1607

Se verificaron los valores que presentan discrepancias con la teoría expuesta. En primer lugar, se realizaron varias simulaciones con distintos tamaños de mallas para un mismo punto, con el objetivo de determinar un tamaño de airgap promedio y compararlo con el punto errático. En el caso de un Lag = 58 m y D = 1.2 m, se obtuvieron diferencias que oscilan entre un 0.5% a 5.0% cuando se produce el fenómeno de airblast solo en la batea 1. Además, en el escenario donde se produce el fenómeno de airblast en todas las bateas, con valores de Lag = 58 m y D = 0.6 m, se obtuvieron diferencias que oscilan entre un 0.2% y 4.5%.

En segundo lugar, se realizaron distintas simulaciones con un mismo tamaño de malla, utilizando valores de tamaño de airgap cercanos al punto errático. El objetivo de estas simulaciones era verificar que el punto errático se encuentra dentro de ese rango. En el caso de un Lag = 58 m y valores de D = 1.2 m y D = 0.6 m, respectivamente, para los escenarios donde se produce el fenómeno de airblast solo en la batea 1 y en todas las bateas 1, 2, 3, 4, se obtuvo que todos los puntos se encuentran dentro del rango.

En tercer lugar, se compararon los valores promedios de tamaño de airgap con los valores expuestos en la Tabla 3 para cada uno de los casos. Los resultados indican que en el caso de Lag = 58 m, donde ocurre el

fenómeno de airblast en la batea 1, así como en todas las bateas 1, 2, 3 y 4, se obtienen valores mayores con un $D = 0.6$ m.

Además, en la Tabla 3 se realizaron distinciones en las magnitudes de las velocidades del aire obtenidas en los puntos de extracción con relación a la clasificación estipulada en la Tabla 1. Donde, se puede visualizar que los menores valores de velocidad del aire poseen un color verde oscuro, encontrándose clasificados como ‘Vendaval Moderado’. Por otro lado, los valores de velocidad que poseen un color verde claro se encuentran en la categoría de ‘Ciclón, huracán categoría 1 Tornado (F0)’. Finalmente, aquellos datos de velocidad del aire que tienen un color rojo se encuentran dentro de la categoría ‘Ciclón, huracán categoría 4 a 5 Tornado importante (F3-F6)’. Siendo estas magnitudes de velocidad del aire, las que generan mayores impactos.

Por tanto, para efectos de generar una zona de seguridad, el modelo numérico cumple parcialmente su objetivo, ya que se debe amplificar los valores de velocidades del aire obtenidas en los puntos de extracción por un factor superior a 1. Por otro lado, desde el punto de vista del estudio del fenómeno de airblast, no es concluyente. Esto se debe a que las magnitudes de las velocidades del aire obtenidas en los puntos de extracción, en algunos casos, son variables y contradicen la teoría expuesta.

6.2 Modelo matemático

En esta sección, se presentará el modelo propuesto para describir la velocidad máxima del aire en los puntos de extracción en función de dos parámetros. El principal objetivo es encontrar un modelo general que pueda describir el fenómeno de airblast. Para lograrlo, se aplicará el teorema de II-Buckingham.

En este modelo se emplea la velocidad máxima del aire normalizada por la velocidad de entrada V_o , la cual depende del espesor del material fragmentado y del tamaño del airgap, como se describe en la ecuación (10).

$$\frac{V_{\max}}{V_o} = f(L_T, L_{ag}) \quad (10)$$

La velocidad de entrada se encuentra definida mediante la siguiente ecuación:

$$V_o = \sqrt{2gH_{dp}} \quad (11)$$

Donde, g corresponde a la aceleración de gravedad y H_{dp} representa la altura del punto de extracción.

Empleando el espesor del material fragmentado y el tamaño del airgap normalizados, se obtiene:

$$L_T \equiv \frac{L_T}{D_{dp}} ; L_{ag} \equiv \frac{L_{ag}}{D_{dp}} \quad (12)$$

Por tanto, reemplazando la ecuación (12) en la ecuación (10), se obtiene:

$$\frac{V_{\max}}{V_o} = \alpha_1 \left(\frac{L_T}{D_{dp}} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{L_{ag}}{D_{dp}} \right)^{\alpha_3} \quad (13)$$

Asumiendo que la función f es un producto de monomios con parámetros de ajustes α_1 , α_2 y α_3 , se obtiene el siguiente modelo:

$$\frac{V_{\max}}{V_o} = \alpha_1 L_T^{\alpha_2} L_{ag}^{\alpha_3} \quad (14)$$

Finalmente, reemplazando la ecuación (11) en (14), se obtiene:

$$V_{\max} = \alpha_1 \sqrt{2gH_{dp}} L_T^{\alpha_2} L_{ag}^{\alpha_3} \quad (15)$$

A partir del método de mínimos cuadrados, se pudieron obtener los valores de los coeficientes α_1 , α_2 y α_3 , que corresponden aproximadamente a $\alpha_1 = 0.72$, $\alpha_2 = -0.23$ y $\alpha_3 = 0.26$, respectivamente. Por tanto, al reemplazar estos valores en la ecuación (15), se obtiene:

$$V_{\max} = 0.72 \sqrt{2gH_{dp}} L_T^{-0.23} L_{ag}^{0.26} \quad (16)$$

En la Figura 17 se muestra la correlación entre el modelo matemático propuesto y los datos experimentales, lo que resulta en el colapso de los datos en una línea recta.

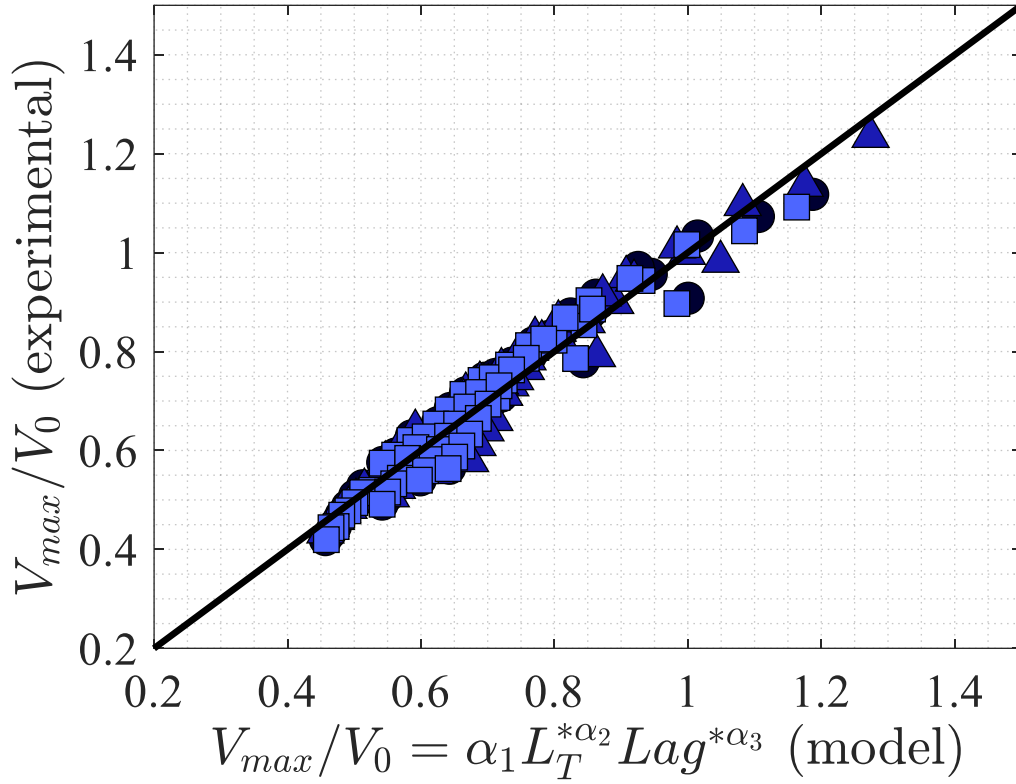


Figura 17. Comparativa entre la velocidad máxima normalizada en los puntos de extracción a partir de las simulaciones numéricas realizadas y el modelo multivariable propuesto con dos variables de estudio.

Estos resultados indican que el modelo matemático propuesto es capaz de predecir el comportamiento de los datos experimentales. Al comparar el modelo experimental con el modelo matemático, se observa un colapso igual a 1. Si el modelo matemático fuera incorrecto, los datos experimentales se encontrarían dispersos.

7. Conclusiones

En este trabajo se han replicado los eventos de airblast cuando se utiliza los métodos de Panel o Block Caving en minería subterránea. Se ha utilizado el método de elementos finitos (FEM) para resolver las ecuaciones de conservación de la masa, energía y momentum. Esta última ecuación, toma en consideración los parámetros del material fragmentado (muckpile) y además, es apta para todo tipos de fluidos. En este caso, se ha descartado la contribución del flujo laminar, predominando netamente uno turbulento.

Se propone una novedosa expresión matemática formada por el tamaño del airgap y el espesor del material fragmentado, para así determinar la velocidad máxima del aire en los puntos de extracción cuando se origina un evento de airblast. Al utilizar la ecuación (16) con valores de $L = 30$ m y $L_{ag} = 4$ m para el área E_1 , se obtiene una velocidad máxima de aproximadamente 16 km/h. Este valor presenta una diferencia de un 14% con relación al valor obtenido de las simulaciones numéricas, el cual corresponde a 14 km/h.

Con relación a las simulaciones realizadas para el primer caso de estudio, se determinó que los valores de velocidad del aire en los puntos de extracción, independiente del área y variable de estudio, corresponden a valores inferiores a 55 km/h. En consecuencia, según la Tabla 1, se clasifican como vendavales moderados. Esto se debe a que, en cada una de las simulaciones, únicamente se está evaluando el desprendimiento de una porción del área del cave back.

Por otro lado, con relación al segundo caso de estudio, los resultados muestran que a mayor distancia del lugar donde ocurre el fenómeno de airblast, las magnitudes de las velocidades del aire que se registran en los puntos de extracción son menores. Esta relación se puede observar en los datos de la batea 4, cuando ocurre el airblast únicamente en la batea 1.

Estos resultados facilitan el procedimiento de hundimiento del macizo rocoso. Esto debido a que cuando se programa el inicio del hundimiento y posteriormente se origina el desplome, se realiza evacuando a todo el personal que se encuentra en el interior de la mina. Por tanto, conociendo parámetros como el tamaño del airgap, se evacua solamente a aquellas zonas que sean propensas a recibir un gran impacto. Es decir, se obtiene una zona de seguridad.

Finalmente, tras el análisis de ambos casos de estudio, se desprende que el parámetro más incidente en los valores de velocidad del aire obtenidos en los puntos de extracción corresponde al tamaño del airgap.

8. Referencias

- [1] Brown, E. (2002). *Block Caving Geomechanics*. Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre.
- [2] Cavieres, P., Contreras, E., & Arce, J. (s.f.). Dimensionamiento de Mallas de Extracción, bateas recolectoras y pilar corona para metodo panel caving en roca primaria, Mina El Teniente. 14.
- [3] Chin, D. (2017). *Fluid Mechanics for Engineers in SI Units*. Pearson.
- [4] CODELCO DCH. (2016). *Modelamiento Geotécnico 3D UGTB Salas de Chancado, Macro Bloques Centrales N1 y S1. Doc. SUP-GEOT N°015/2016*.
- [5] CODELCO VP. (2019). *Evaluación Geomecánica y Análisis de Estabilidad Malla de Extracción Macrobloques N01-S01, Doc. N14MS03-II-N14MS03-20000-EVTGE02-2000-001-0*.
- [6] Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, 89-94.
- [7] Galindo-Torres, S., Palma, S., Quintero, S., Scheuermann, A., Zhang, X., Krabbenhoft, K., . . . Finn, D. (2018). An airblast hazard simulation engine for block caving sites. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.
- [8] Gómez, R., & Labbé, E. (2019). Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: la actual metodología aplicada en Chile del "block caving". *Boletín Geológico y Minero*, 186.
- [9] Guzmán Caro, D. (2018). *Análisis de la propagación del Caving y Modelamiento mediante Flowsim BC*. Santiago.
- [10] Oh, J., Bahaaddini, M., Sharifzadeh, M., & Chen, Z. (2017). Evaluation of air blast parameters in block cave mining using particle flow code. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 3,5.
- [11] Palma, S., Galindo-Torres, S., 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*, 1.
- [12] Pardo Mella, C. (2015). *Back Analysis of Intensive Rock Mass Damage at the El Teniente Mine*. Faculty of Science and Engineering.

- [13] 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*, 2,3.
- [14] Vergara Pérez, Y. (2014). *Altura de Columna en Block/Panel Caving*. Santiago.