UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA Y DE MATERIALES

ACTUALIZACIÓN DE MODELO DE FRAGMENTACION PRIMARIA EN MINERIA DE BLOCK CAVING

Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Civil de Minas

Autor:

Felipe Molina Alvarez

Profesor referente:

Gonzalo Nelis

Profesor co-referente:

Raúl Castro

Santiago de Chile

2023

Resumen

La minería subterránea se presenta como una solución para la extracción de yacimientos que, debido a la profundidad en que se encuentran, la minería a cielo abierto convencional ya no resulta económicamente rentable y en este sentido es que los métodos de minería subterránea se han vuelto más viables y preferidos en el tiempo. Sin embargo, debido a las condiciones de la minería actual, hay cierto grado de incerteza sobre si se pueden llegar a lograr los bajos costos y la productividad características de la minería por hundimiento (Flores, 2014). Las principales dificultades para lograr estos objetivos son yacimientos a mayores profundidades que implica mayores esfuerzos in-situ, menores leyes y rocas más duras (Paredes 2022).

En este contexto, uno de los parámetros clave en la minería de Block/Panel Caving es la fragmentación primaria, la cual tiene un impacto significativo en el desempeño de todo el sistema minero. A pesar de ser un factor importante, su complejidad de ser cuantificada debido a las variables que la rigen y su ocurrencia al interior del macizo rocoso plantea desafíos adicionales. A pesar de su relevancia, actualmente existen pocos softwares o métodos que permiten estimar la fragmentación primaria y algunos de estos no están del todo validados, generando errores en la estimación de la fragmentación.

Es por esto último que en este trabajo se buscará modelar la curva de fragmentación del macizo rocoso basándose en su calidad de roca, específicamente en el RMR de Laubscher incluyendo el preacondicionamiento, a través de una modificación a la matriz de reducción y los ponderadores que influyen en el *stress caving* efectivo propuestos por Laubscher (2000).

Para mejorar la precisión en la predicción de la fragmentación primaria, se propuso una nueva matriz de reducción primaria, cambiando los ponderadores de la matriz de Laubscher y del *stress caving* efectivo a través de una minimización de errores de los porcentajes pasantes para los tamaños característicos d_{100}, d_{80}, d_{50} y d_{20} entre curvas de fragmentación primaria de distintas minas y su respectiva curva de fragmentación primaria propuesta por Laubscher para la clase de roca correspondiente. Por otro lado, para la incorporación del preacondicionamiento se modelaron curvas de fragmentación dependiendo del espaciamiento utilizado para el fracturamiento hidráulico.

De esta manera, se obtuvo una nueva matriz de fragmentación primaria y se modificó el *stress caving* de Laubscher, permitiendo predecir con mayor precisión la fragmentación primaria del macizo rocoso según su RMR, con diferencias menores a 20 cm en la fragmentación gruesa y menores a 10 cm en la fragmentación más fina para los casos de estudio, y curvas de fragmentación empíricas basadas en datos reales de tamaños de roca preacondicionada.

Finalmente, este trabajo presenta una actualización a la metodología de predicción de fragmentación primaria propuesta por Laubscher (2000) considerando ambientes mineros de *caving* actuales, además se presentan curvas de fragmentación primaria que sirven como guía para predecir el tamaño de la roca preacondicionada. Sin embargo, el modelo de predicción no es perfecto y puede seguir mejorando a través de futuras actualizaciones.

Abstract

Underground mining is as the preferred solution for the extraction of deposits that, due to the depth at which conventional open pit mining is located, are no longer profitable. In this sense, underground mining methods have become more viable and preferred when the objectives are low cost and high productivity, which allows large, low-grade deposits to be extracted. However, due to current mining conditions, there is a certain degree of uncertainty about whether the expected low costs and productivity can be achieved (Flores, 2014). The main difficulties in achieving these objectives are deposits at greater depths that imply greater in-situ efforts, lower grades, and harder rocks (Paredes, 2022).

One of the key parameters in Block/Panel Caving mining is primary fragmentation which greatly affects the performance of the entire mining system. However, it is complex to quantify due to the variables that govern it and cannot be observed (since it happens inside the rock mass) which makes it difficult to predict. Despite its relevance, there are few software or methods that allow estimating primary fragmentation and most of these are not fully validated, which produces errors in the estimations.

For this reason, in this work we will model the fragmentation curve of the rock mass based on its rock quality, specifically on the Laubscher RMR and wether preconditioning was applied, through a modification to the reduction matrix and the weights that influence the effective stress caving proposed by Laubscher (2000).

To improve the accuracy in the prediction of primary fragmentation, a new primary reduction matrix is proposed, changing the weights of the Laubscher matrix and the effective caving stress through a minimization of errors of the characteristic sizes d_{100}, d_{80}, d_{50} y d_{20} between the primary fragmentation curve proposed by Laubscher for the corresponding rock class. On the other hand, to incorporate preconditioning, fragmentation curves were modeled depending on the spacing used for hydraulic fracturing.

As a result, a new primary fragmentation matrix was obtained and the Laubscher stress caving was modified, which allows a more accurate prediction of the primary fragmentation of the rock mass according to its RMR, with differences of less than 20 cm in the coarse fragmentation and less than 10 cm in the finest fragmentation for the case studies, and empirical fragmentation curves based on real data of preconditioned rock size.

Finally, this work presents an update to Laubscher (2000) predictive primary fragmentation methodology considering current caving mining environments. In addition, primary fragmentation curves are presented as a guide to predict the size of preconditioned rock. However, the prediction model is not perfect and can continue to improve through future updates.

Tabla de contenidos

1. Introducción 1
1.1. Objetivos del trabajo: 2
1.1.1. **General**: 2
1.1.2. Específicos: 2
1.2. Metodología: 2
2. Revisión bibliográfica: 4
2.1. Block Caving: 4
2.2. Socavación: 5
2.3. Preacondicionamiento: 5
2.4. Mecanismos de propagación del hundimiento: 6
2.5. Fragmentación presente en la minería caving 7
2.6. Fragmentación primaria: 8
2.6.1. Modelos de fragmentación primaria: 9
3. Metodología Experimental: 13
3.1. Metodología General: 13
3.2. Recolección de datos: 13
3.3. Curvas de fragmentación primaria 13
3.3.1. Ponderadores de la matriz de reducción: 13
3.3.2. Ponderadores del stress caving: 14
3.3.3. Efecto del PA 14
3.3.4. Relación entre colgaduras y fragmentación 16
3.3.5. Efecto del preacondicionamiento en la frecuencia de colgaduras 16
4. Antecedentes: 17
4.1. Obtención de datos: 17
4.2. Resumen de base de datos 18
5. Resultados: 19
5.1. Curvas de fragmentación primaria: 19
5.1.1. Ponderadores matriz de reducción: 19
5.1.2. Ponderadores del SC: 21
5.2. Efecto del preacondicionamiento. 23
5.3. Relación entre colgaduras y fragmentación 25

5.4. Efecto del preacondicionamiento en la frecuencia de colgaduras. 26
6. Conclusiones..... 29
7. Recomendaciones 30

Índice de figuras

Figura 1: Esquema método Block Caving (Hamrin, 2001). 4
Figura 2: Ventajas del uso del preacondicionamiento (Catalan et al., 2017). 6
Figura 3: Modelo conceptual del hundimiento (Duplancic & Brady, 1999). 7
Figura 4: Distribución de tamaños de mineral quebrado (Laubscher, 1994). 10
Figura 5: Comparación de curvas granulométricas para minas con y sin PA. 15
Figura 6: Curvas modificadas de fragmentación primaria con a) 100% stress caving y b) 0% stress caving..... 20
Figura 7: Curvas de fragmentación primaria con a) SC de Laubscher y b) SC propuesto para Chuquicamata Subterráneo..... 21
Figura 8: Curvas de fragmentación primaria con a) SC de Laubscher y b) SC propuesto para DOZ.. 21
Figura 9: Curvas de fragmentación primaria con PA para rocas de clase 3A..... 24
Figura 10: Curvas de fragmentación primaria con PA para rocas de clase 3A. 24
Figura 11: Relación entre frecuencia de colgaduras y la razón $Dw/D80$. 25
Figura 12: Comparación de toneladas pasantes por evento de colgadura en roca de RMR clase 3A con y sin preacondicionar. 26
Figura 13: Comparación del comportamiento en las toneladas pasantes por evento de colgadura en roca y sin preacondicionar. 27
Figura 14: Relación entre frecuencia de colgaduras y la razón $Dwd80$ para minas con preacondicionamiento. 27
Figura 15: Dimensiones de la batea de extracción. 37

Índice de tablas

Tabla 1: Matriz de reducción para la fragmentación primaria (Laubscher, 2000). 12
Tabla 2: Ecuaciones para determinar los porcentajes másicos (Laubscher, 2000). 12
Tabla 3: Clasificaciones de roca según su RMR 14
Tabla 4: Comparación de tamaño de roca para los tamaños característicos con y sin PA con la respectiva reducción. 15
Tabla 5: Resumen de minas con su respectivo RMR medio? y clase asociada. 18
Tabla 6: Resumen de minas de estudio con su respectivo porcentaje de roca de cada clase. 18
Tabla 7: Errores comparativos entre ajustes, curva de Laubscher (2000) y datos medidos para roca de RMR clase 3A. 19
Tabla 8: Errores comparativos entre ajustes, curva de Laubscher (2000) y datos medidos para roca de RMR clase 4. 19
Tabla 9: Matriz de reducción para la fragmentación primaria modificada. 20
Tabla 10: Comparación de errores absolutos totales entre fragmentación real y matriz de reducción modificada y de Laubscher. 20
Tabla 11: Comparación de errores absolutos entre SC propuesto y SC de Laubscher para la roca de clase 3B de Chuquicamata Subterráneo. 22
Tabla 12: Comparación de errores absolutos entre SC propuesto y SC de Laubscher para la roca de clase 4 de Chuquicamata Subterráneo. 22
Tabla 13: Comparación de errores absolutos entre SC propuesto y SC de Laubscher para la roca Diorita de DOZ. 22
Tabla 14: Comparación de errores absolutos entre SC propuesto y SC de Laubscher para la roca Frosterita de DOZ. 23
Tabla 15: Tamaño máximo de la roca dependiendo del espaciamiento del FH. 23
Tabla 16: Valores promedio de toneladas pasantes por evento de colgadura en roca de RMR clase 3A con y sin preacondicionar. 26
Tabla 17: Errores absolutos entre curva de fragmentación con matriz de reducción propuesta, matriz de reducción de Laubscher y datos medidos para clase 2. 35
Tabla 18: Errores absolutos entre ajustes, curva de Laubscher (2000) y datos medidos para roca de RMR clase 3A. 35
Tabla 19: Errores absolutos entre ajustes, curva de Laubscher (2000) y datos medidos para roca de RMR clase 3B. 35
Tabla 20: Errores absolutos entre ajustes, curva de Laubscher (2000) y datos medidos para roca de RMR clase 4. 36
Tabla 21: Base de datos de colgaduras. 38
Tabla 22: Errores absolutos entre metodologia propuesta y Laubscher con los datos medidos de Chiquicamata Subterráneo. 40
Tabla 23: Errores absolutos entre metodologia propuesta y estudios de fragmentacion, con los datos medidos de Chuquicamata Subterráneo. 41

1. Introducción

La minería subterránea se encuentra experimentando constantes cambios debido a la disminución de las leyes y una mayor profundización de los yacimientos. Esto ha dado lugar a nuevos desafíos que deben abordarse. En este contexto, el método por block/panel caving ha logrado adaptarse a los cambios de las condiciones naturales, logrando mantener su competitividad a pesar de encontrarse en un entorno cada vez más complejo.

Un parámetro esencial que conocer en este método es el tamaño de la roca, pues en base a la fragmentación se define el diseño de la mina y los equipos que se usarán en la producción, dado que estos deben ser capaces de manipular el material fragmentado que llega a las bateas de extracción para poder transportarlo.

Existen 3 tipos de fragmentación: in situ, primaria y secundaria. La fragmentación in situ es aquella que está presente de manera natural en la roca, definida por las discontinuidades presentes. La fragmentación primaria es que la que se produce inmediatamente después del hundimiento del bloque, producto del quiebre del macizo rocoso por el desprendimiento de la roca desde el *cave back*. Finalmente, la fragmentación secundaria es la que se genera a medida que los bloques se mueven verticalmente hasta los puntos de extracción (Brady & Brown, 2004).

Actualmente, hay varios métodos que permiten determinar la fragmentación in situ y secundaria. Por otro lado, a excepción de unos pocos softwares, esto no ocurre con la fragmentación primaria, dado que no existe una metodología que permita determinar el tamaño del bloque. Aun así, hay autores que coinciden en que la fragmentación primaria dependerá de la calidad del macizo rocoso, esfuerzos inducidos, resistencia de la roca intacta, y distribución y cantidad de estructuras (Brown, 2003).

Los modelos actuales de fragmentación primaria son más bien predictivos y requieren de validación. Por ejemplo, en *Cadia East Panel Cave* se llevaron a cabo pruebas de fragmentación con *BCF* y, a pesar de obtener buenos resultados modelando la fragmentación primaria, se subestimó considerablemente la fragmentación secundaria (Brunton et al., 2016). Además, el mismo estudio se realizó basado en *Discrete Fracture Network*, en donde los resultados de la predicción de fragmentación fueron considerablemente más gruesos en comparación a la fragmentación medida. Análogamente, el software Core2Frag subestimo el contenido de finos para la roca *skarn fosterite* en la operación *Deep Ore Zone block cave* (Srikant et al., 2004).

Las metodologías anteriormente mencionadas requieren de una gran cantidad de información geotécnica, lo cual muchas veces es difícil de obtener o que a menudo no está disponible en las etapas iniciales de un proyecto. Sin embargo, la metodología de predicción de fragmentación primaria de Laubscher es bastante simple de usar y solo requiere como *input* el porcentaje de cada clase de RMR del macizo rocoso. El problema con esta metodología es la falta de validación y que puede considerarse como desactualizada, ya que fue propuesta hace más de 20 años y no considera los ambientes mineros subterráneos actuales ni la aplicación de preacondicionamiento en el macizo rocoso.

Es por esto por lo que en este trabajo se pretende realizar un modelo que permita relacionar las variables geomecánicas del macizo rocoso y de esta manera poder determinar el tamaño de rocas generadas en la fragmentación primaria.

1.1. Objetivos del trabajo

1.1.1. General

Actualizar la metodología de cálculo de fragmentación primaria propuesto por Laubscher (2000) con datos mina más actualizados e incluyendo el efecto del preacondicionamiento.

1.1.2. Específicos

- *Recolectar información proveniente de la literatura sobre el estado del arte actual del block caving y las herramientas actuales que permiten predecir la fragmentación primaria.*
- *Proponer una metodología actualizada que permita estimar el tamaño y distribución de la fragmentación primaria del macizo rocoso.*
- *Cuantificar el efecto que tiene el preacondicionamiento sobre la fragmentación.*
- *Proponer una metodología que permita correlacionar la fragmentación con las colgaduras.*

1.2. Metodología

Para lograr los objetivos planteados, se seguirán los siguientes pasos:

- *Revisión exhausta sobre el actual estado del arte de la fragmentación primaria en Block caving.*
  - *i) Tener una comprensión general de la problemática en la cual se desarrollará la investigación, identificando las variables que influyen en la fragmentación primaria.*
  - *ii) Obtener una comprensión del desarrollo de una mina que opera por el método de block caving.*
  - *iii) Realizar una recopilación bibliográfica de las principales herramientas de predicción de fragmentación primaria.*
- *Recolección de datos de fragmentación y propiedades geomecánicas de roca proveniente de la literatura.*
  - *i) Construir una base de datos de fragmentación primaria y su RMR asociado*
  - *ii) Construir una base de datos con frecuencia de colgaduras incluyendo preacondicionamiento.*
- *Desarrollo de modelo de curvas de fragmentación primaria con datos medidos.*
  - *i) Revisión de la metodología de Laubscher (2000) y comparar con datos más recientes de minas.*
  - *ii) Actualizar la metodología de Laubscher proponiendo una nueva matriz de reducción mediante una minimización de errores de los porcentajes pasantes para los tamaños característicos d_{100}, d_{80}, d_{50} y d_{20} entre los datos reales y los propuestos por Laubscher.*
- *Cuantificar el efecto que tiene el preacondicionamiento sobre la fragmentación primaria*
  - *i) Comparar la fragmentación obtenida en roca con y sin preacondicionamiento y ver cuán efectivo es el preacondicionamiento en la mejora de la fragmentación en función de disminución de sobretamaños y colgaduras.*

- *Validación y análisis de los resultados obtenidos.*
  i) Analizar curvas granulométricas experimentales y las obtenidas con el modelo.
- *Conclusiones y recomendaciones.*
  i) Recomendar a quienes implementen este método, enfatizando en los factores que no fueron abordados durante la investigación.

2. Revisión bibliográfica

2.1. Block Caving

El block caving es un método de explotación de yacimientos que se caracteriza por altas tasas de productividad y bajos costos operacionales. Consiste en inducir el hundimiento natural del cuerpo rocoso tras haber iniciado el quiebre de este desde el nivel de hundimiento. La principal desventaja de este método es el alto costo de la inversión inicial y la baja flexibilidad del diseño de la mina una vez iniciada la operación (Laubscher, 1994).

Ya realizado el corte en el nivel de hundimiento, se produce una redistribución de esfuerzos en el macizo rocoso, generando que este colapse debido a su propio peso. De esta manera se propaga el hundimiento a los niveles superiores a medida que se extrae el mineral, hasta llegar a superficie. El material extraído en los puntos de extracción es recolectado por los equipos de carguío para ser llevados al área de reducción de tamaño y ser transportados (Laubscher, 1994).

El método de block caving cuenta con cuatro niveles (*Figura 1*) detallados a continuación:

- **Nivel de hundimiento:** Es el nivel donde se produce la socavación, que se logra mediante perforaciones formando un abanico. En las perforaciones se introducen explosivos que al ser tronados producen el quiebre de la roca. La parte superior del macizo rocoso queda colgando hasta que producto de su propio peso se comienza a disgregar, produciéndose el hundimiento.
- **Nivel de producción:** Es el nivel de las galerías desde las cuales es captado el mineral quebrado. Mediante piques, en forma de embudo, captan el mineral desde el nivel de hundimiento y es llevado al nivel inferior, el nivel de transporte.
- **Nivel de transporte:** Es el nivel en que circulan los equipos de transporte que se encargan de llevar el mineral hacia la planta.
- **Nivel de ventilación:** La finalidad de este nivel es dar aire fresco y extraer el contaminado desde el interior de la mina.

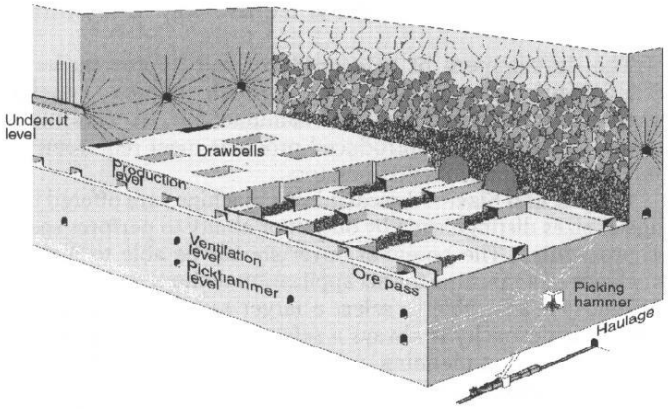


Figura 1: Esquema método Block Caving (Hamrin, 2001).

2.2. Socavación

La socavación es la manera en que se induce el inicio del hundimiento del macizo rocoso. Aunque la manera más común de realizarlo es mediante perforación y tronadura, existen otros métodos los cuales consisten excavaciones del tipo *slot* y el preacondicionamiento.

Con la socavación se espera lograr una excavación de dimensiones suficientes de manera que se genere el hundimiento, minimizando el daño a las cercanías del macizo rocoso y alcanzar el radio hidráulico para iniciar el hundimiento (Butcher, 2000).

Existen distintas geometrías de socavación, correspondientes al diagrama de perforaciones para realizar el corte basal, entre las cuales podemos encontrar tres principales: socavación alta, socavación angosta y plana y angosta e inclinada (Flores, 2014). Además, se pueden encontrar 3 estrategias de socavación que hacen referencia a la secuencia en que se llevan a cabo las labores de producción con la tronadura para la socavación, estas estrategias son hundimiento convencional, hundimiento previo y avanzado (Brown, 2007).

2.3. Preacondicionamiento

El objetivo del preacondicionamiento es la disminución de la competencia mecánica del macizo rocoso, mediante la creación de nuevas fracturas o extender las ya existentes en la roca, de esta manera mejorando el hundimiento y la fragmentación (Catalan et al., 2017). En la minería se pueden encontrar tres tipos de preacondicionamiento: fracturamiento hidráulico (FH), voladura confinada (VC) y mixto.

Descripción de las técnicas mencionadas anteriormente:

- **Fracturamiento hidráulico:** Consiste en presurizar un sector de una perforación comúnmente con agua para producir una fractura por tensión o extender una fractura preexistente.
- **Voladura confinada:** También conocido como debilitamiento dinámico con explosivos. Consiste en agrupar de tres a cuatro pozos por modulo y mediante una voladura parcial se daña al macizo rocoso favoreciendo el quiebre natural de la roca en el proceso del hundimiento.
- **Mixto**: Se utilizan ambos métodos, comenzando con FH para generar nuevos planos de debilidad que servirán para reflejar las ondas de choque de la posterior voladura.

Actualmente, el preacondicionamiento es cada vez más utilizado, debido a la serie de mejoras que implica su uso, listadas en la siguiente figura:

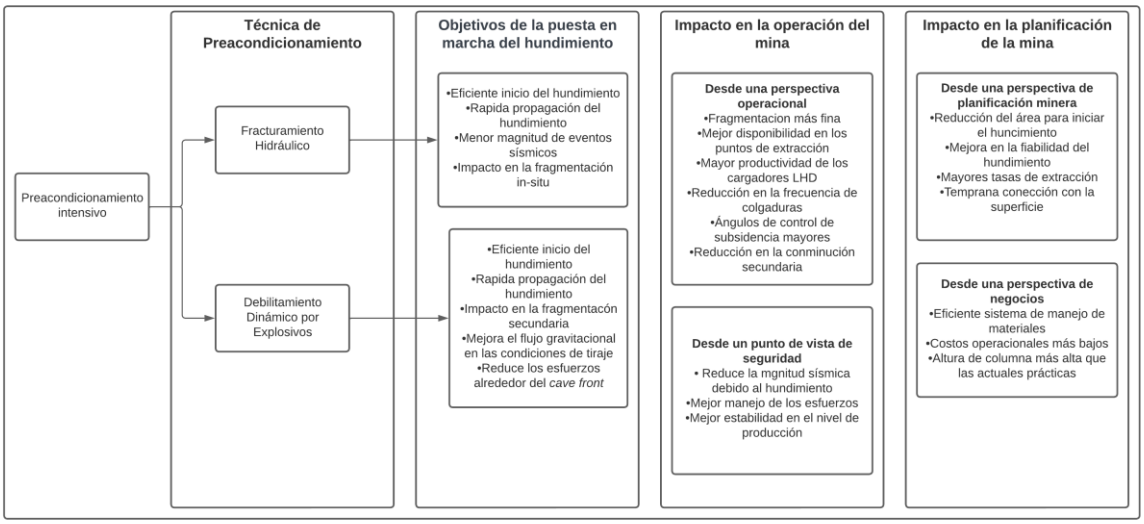


Figura 2: Ventajas del uso del preacondicionamiento (Catalan et al., 2017).

De esta manera, se puede ver que el uso de preacondicionamiento es una técnica favorable que permite no solo obtener una mejor fragmentación y hundibilidad y respuesta sísmica favorable, sino que también al liberar esfuerzos del macizo rocoso disminuye la probabilidad de generar estallidos de roca, teniendo un impacto significativo no solo en la fragmentación primaria, sino que además en la productividad de la mina (He et al., 2016).

2.4. Mecanismos de propagación del hundimiento:

El hundimiento (o *caving*) es la manera en que se desmorona el macizo rocoso, debido a los esfuerzos inducidos en el techo de la cavidad. Brown (2003) señala que existen tres tipos de mecanismos en la propagación del hundimiento que dependerán de los esfuerzos inducidos y de la resistencia del macizo rocoso.

- ***Gravity or stress release caving*:** La ocurrencia de este mecanismo se ve favorecida en cuerpos mineralizados más débiles, con varias discontinuidades y sometidos a bajos esfuerzos. La orientación y resistencia de las discontinuidades del macizo rocoso benefician la caída de los bloques o que estos se deslicen desde el cave-back.
- ***Stress Caving*:** Al contrario que con el método anterior, este mecanismo sucede en roca competente con altos esfuerzos. La orientación y resistencia de las discontinuidades deben estar dispuesta de manera que los bloques caigan o se deslicen desde el cave-back.
- ***Subsidence caving*:** Produce que una gran masa de roca hunda rápidamente como el resultado de una falla de cizalle en los bordes verticales del bloque.

Adicionalmente a los mecanismos de hundimiento podemos encontrar cinco regiones dentro de la columna del macizo rocoso en las primeras fases del hundimiento (*ver Figura 3*), descubiertas por Duplancic & Brady (1999) mediante monitoreo sísmico en la mina de *Northparkes*, Australia. Estas regiones son:

- **Zona elástica:** El macizo rocoso presenta un comportamiento elástico por delante del frente sísmico y alrededor de la zona excavada.
- **Zona sísmica:** En esta zona se concentra la actividad sísmica debido al deslizamiento de fallas y al inicio de nuevas fracturas. Esto se debe a los esfuerzos cambiantes a causa del avance del hundimiento.
- **Zona de fluencia:** Esta región no entrega un apoyo a la masa de roca superpuesta ya que el macizo rocoso está muy fracturado y ha perdido gran parte de su resistencia, lo que genera la desintegración del macizo rocoso.
- **Espacio de aire:** Vacío de aire que puede existir debido al avance continuo del hundimiento y la tasa a la que se desmorona el macizo rocoso.
- **Zona hundida:** Aquí se encuentran los bloques de roca que han llegado a los puntos de extracción y que además otorgan soporte a las paredes de la cueva.

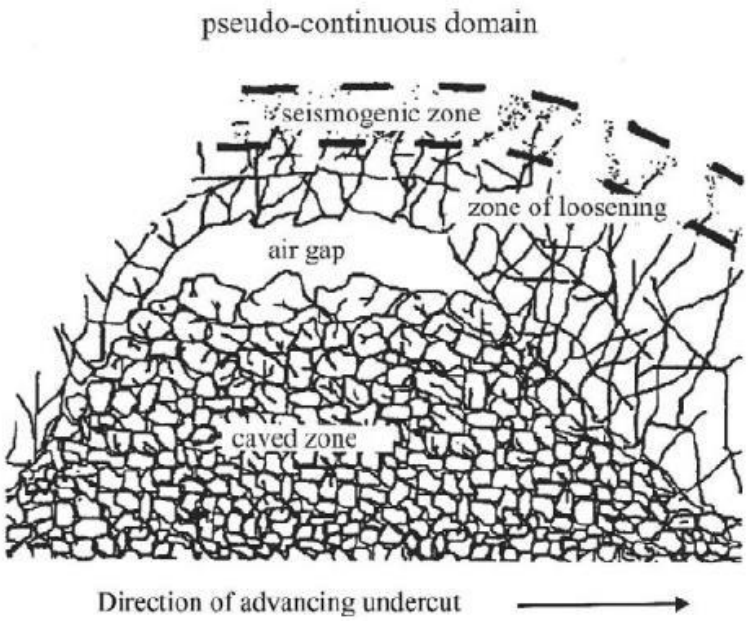


Figura 3: Modelo conceptual del hundimiento (Duplancic & Brady, 1999).

2.5. Fragmentación presente en la minería caving

La literatura señala que es posible identificar tres tipos de fragmentación en una mina del tipo *caving*. La fragmentación in-situ, que se encuentra presente antes de cualquier actividad minera, representada por las estructuras presentes en el macizo rocoso. La fragmentación primaria, que ocurre una vez iniciado el precorte y el inicio del hundimiento, correspondiente a los bloques que se desprenden del *cave back*. Finalmente, la fragmentación secundaria que es generada por el movimiento de los bloques a través de la columna de extracción hasta llegar a los puntos de extracción (Laubscher, 1994).

La fragmentación de la roca es un factor clave, pues de ella dependerán de los parámetros de diseño y de operación de la mina. Laubscher (1994) señala que estos parámetros son:

- *Espaciamiento entre puntos de extracción.*

- *Entrada de dilución en la columna de extracción.*
- *Control de tiraje.*
- *Productividad en los puntos de extracción.*
- *Voladura secundaria.*
- *Daño por voladura secundaria.*

A pesar de que la fragmentación in-situ estará determinada por las estructuras presentes en el macizo rocoso, las discontinuidades con relleno que otorguen resistencia de corte y tracción no proporcionan caras libres para los bloques in-situ. Sin embargo, al ser planos de debilidad, sobre estos puede ocurrir una separación en las etapas de fragmentación primaria o secundaria (Brown, 2007).

Posterior al inicio del hundimiento, la fragmentación primaria será el resultado de los esfuerzos cambiantes en las cercanías del *cave back*. Se espera que las mayores fallas sean por los planos de debilidad, aunque también se pueden presentar fallas si la roca está sometida a altos niveles de esfuerzos. La extensión de estas fallas dependerá tanto de las discontinuidades como de los bloques nuevos en relación con la magnitud y orientación de los esfuerzos existentes. Así, los bloques correspondientes a la fragmentación primaria quedarían definidos solo si la condición entre las discontinuidades y su resistencia al corte es adecuada. De lo anterior se tiene que, para la misma roca, se tendrá una distribución de tamaños más fina que en el caso de *subsidence caving* donde la gravedad, en lugar de los esfuerzos inducidos, provoca el desmoronamiento del bloque desde el *cave back* (Brown, 2007).

2.6. Fragmentación primaria:

La fragmentación in-situ tiene un gran impacto en la fragmentación primaria, en la secundaria y en la resistencia del macizo rocoso, por lo que también define el método de *caving* una vez iniciado el hundimiento. La fragmentación primaria esta influenciada fuertemente por el mecanismo de propagación del hundimiento, y este depende de la tensión en el *cave back* de la columna, de la fragmentación in-situ y de las propiedades geomecánicas de la roca intacta (Ladinig, 2015).

Laubscher (1994) señala que entre las variables que influyen en la fragmentación primaria podemos encontrar:

- *Número y espaciamiento de las uniones.*
- *Estructuras geológicas.*
- *Esfuerzos inducidos.*
- *Orientación del derrumbe.*
- *Variación en MRMR*

2.6.1. Modelos de fragmentación primaria:

Existen varios autores que han desarrollado modelos de predicción de la fragmentación primaria, algunos de carácter empírico y otras más sofisticados como softwares. Algunos de estos métodos son los siguientes:

- **Q de Barton:** Barton et al. (1974) definió el tamaño del bloque usando la relación RQD/Jn. Esta relación proviene de la fórmula de Q (Ecuación 1), que entrega un rango de la calidad del macizo rocoso.

$$\boldsymbol{Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}} \quad (1)$$

En donde:

- $\boldsymbol{RQD}$*: Rock Quality Designation (Deere et al, 1967).*
- J_n*: Factor de numero de sets de discontinuidades.*
- J_r*: Factor de rugosidad de discontinuidades.*
- J_a*: Factor de alteración de discontinuidades.*
- J_w*: Factor de agua en discontinuidades.*
- SRF*: Factor de reducción de esfuerzos*

El problema con este método es que es bastante cuestionado ya que no entrega información con respecto al rango y distribución de los tamaños de los bloques presentes (Barton et al., 1994).

- **Laubscher (1994):** Laubscher estableció un gráfico que relaciona la variación de los fragmentos de roca en base a la altura de extracción de la columna y el tipo de material (grueso, intermedio y fino). El problema de este modelo es que no explica la influencia de los esfuerzos de compresión y cizalle sobre la fragmentación (Laubscher, 1994).

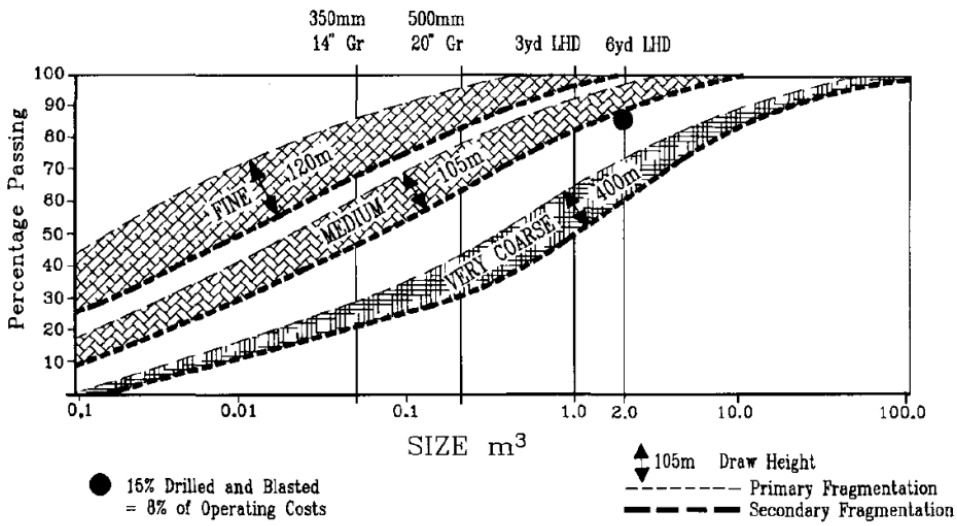


Figura 4: Distribución de tamaños de mineral quebrado (Laubscher, 1994).

- **Block Caving Fragmentation (BCF):** Es un programa que combina tanto reglas empíricas como analíticas, describiendo los procesos y factores que influyen en la fragmentación. Muchas de estas reglas están basadas en la experiencia de Laubscher. Actualmente es el más usado para evaluar la fragmentación en minería. El programa cuenta con tres módulos:
  - **Fragmentación primaria:** Calcula la fragmentación primaria basándose en la resistencia de la roca, geometría y espaciamiento de las discontinuidades y el campo de esfuerzos existente.
  - **Fragmentación secundaria:** Estima la fragmentación secundaria tomando en cuenta la relación de aspecto de los bloques, la resistencia de la roca, presión generada por el hundimiento, esfuerzos inducidos por el arqueamiento de la columna y altura de extracción, la tasa y la altura de extracción.
  - **Potencial de colgaduras:** Es modulo considera el potencial de colgaduras que se pueden generar en la batea usando la fragmentación secundaria como input.

  En resumen, BCF entrega una distribución de tamaño de partículas en las distintas etapas de la extracción (Esterhuizen, 1999).

- **Size:** Merino (1986) presenta un método de predicción de distribución de la fragmentación en minería del tipo caving. Primero se define la fragmentación in-situ mediante la frecuencia de fracturas por metro de los sets principales de discontinuidades, posteriormente se analiza el tamaño posible de los bloques mediante el método de Montecarlo. El método no considera información relevante como la condición de los esfuerzos o el estado del relleno de las discontinuidades (Merino, 1986).
- **JKFrag:** Metodología que permite identificar bloques in situ y predecir la fragmentación primaria. La particularidad de este método es que utiliza “Hierarchical Rock Mass Model” para determinar el inicio y el termino de las discontinuidades en el tiempo y su interrelación con sus vecindades. Utiliza un modelo matemático de triangulaciones para crear cuadriculas que dividen la región en vecindades de discontinuidades. Como datos de entrada considera

la información de cada set de discontinuidades, la condición de los esfuerzos y propiedades del macizo rocoso (Eadie, B. A., 2003).

- **Core2Frag:** Este programa plantea que los bloques de roca se rompen a una razón constate, considerando la altura de la columna de extracción para calcular el número de veces que se fragmentan los bloques, además, cada vez que un bloque se divide se genera una cierta cantidad de fino. Es también utilizado para medir la fragmentación en pozos de tronadura, por lo que generalmente se encuentra desde las etapas iniciales de exploración hasta el desarrollo (E. C. Wellman et al., 2012).
- **Synthetic Rock Mass (SRM):** Es un modelo que permite estudiar el comportamiento mecánico de las discontinuidades presentes en la roca a gran escala (10-100 m). Esta técnica utiliza el modelo de partículas enlazadas para representar el estado in situ del macizo rocoso y el modelo de contacto *smooth-joint* para representar las discontinuidades. Esto se realiza mediante la creación de Discrete Fracture Network (DFN). El comportamiento del macizo rocoso dependerá tanto de la creación de nuevas fracturas como la extensión de las ya existentes (Mas Ivars et al., 2011).
- **Metodología de Castillo (2021):** La metodología propuesta por Castillo considera la estimación de la fragmentación in-situ y primaria en base al método de Laubscher (2000), incorporando el efecto de la socavación inicial y el preacondicionamiento. La fragmentación in-situ está determinada por la calidad de la roca mediante su RMR y la fragmentación secundaria es estimada con el simulador de flujo FlowSim BC. La fragmentación primaria depende de la efectividad del stress caving. Esta efectividad dependerá de:

  - **Clase RMR:** El *stress caving* tiene un efecto mayor en las clases RMR más altas, ya que en las clases de menor calidad el material se desprende del *cave back* antes de que se puedan acumular los esfuerzos.
  - **Dirección e interacción de las estructuras:** Estructuras planas tenderán a provocar el desprendimiento de los bloques del techo, en lugar de permitir que se acumulen esfuerzos.

El stress caving se ve afectado por las tres peores clases de RMR y se considera un porcentaje de reducción ante la presencia de estructuras geológicas, esto queda definido por la Ecuación (2):

$$\boldsymbol{\beta}[\%] = \mathbf{100} - \mathbf{2} * \%\boldsymbol{RMR_L}(\boldsymbol{C5}) - \%\boldsymbol{RMR_L}(\boldsymbol{C4}) - \mathbf{0.5} * \%\boldsymbol{RMR_L}(\boldsymbol{C3B}) - \boldsymbol{R} \quad \textbf{(2)}$$

Donde:

$\beta[\%]$: *Stress caving* efectivo.

$\%RMR_L(C_k)$: Porcentaje de roca in situ de la clase respectiva, según la clasificación RMR de Laubscher.

R: porcentaje de reducción por estructuras (5%).

Posterior al stress caving efectivo se genera una matriz de reducción in situ (Tabla 1). El producto entre el stress caving y los ponderadores queda representado por λ_{ij} que corresponde al porcentaje de roca retenida o cedida en cada tamaño. En verde se representa

la fracción de material retenido en el intervalo y en azul la fracción de material cedido desde un intervalo a otro menor.

Tabla 1: Matriz de reducción para la fragmentación primaria (Laubscher, 2000).

Tamaño	Porcentaje de roca retenida o cedida producto del Stress Caving (λij)						
	A	B	C	D	E	F	G
A	100%						
B	10β	100% - 10β					
C		25β	100% - 25β				
D		10β	50β	100% - 60β			
E			30β	60β	100% - 90β		
F				50β	50β	100% - 100β	
G					70β	30β	100% - 100β

Para cada intervalo se puede determinar los porcentajes másicos con las ecuaciones indicadas en la Tabla 2.

Tabla 2: Ecuaciones para determinar los porcentajes másicos (Laubscher, 2000).

Tamaño	Distribución in situ (%)	Distribución primaria (%)
A	α_A	$\alpha_A + \lambda_{BA} * \alpha_B$
B	α_B	$(1 - \lambda_{BA}) * \alpha_B + \lambda_{CB} * \alpha_C + \lambda_{DB} * \alpha_D$
C	α_C	$(1 - \lambda_{CB}) * \alpha_C + \lambda_{DC} * \alpha_D + \lambda_{EC} * \alpha_E$
D	α_D	$(1 - \lambda_{DB} - \lambda_{DC}) * \alpha_D + \lambda_{ED} * \alpha_E + \lambda_{FD} * \alpha_F$
E	α_E	$(1 - \lambda_{EC} - \lambda_{ED}) * \alpha_E + \lambda_{FE} * \alpha_F + \lambda_{GE} * \alpha_G$
F	α_F	$(1 - \lambda_{FD} - \lambda_{FE}) * \alpha_F + \lambda_{GF} * \alpha_G$
G	α_G	$(1 - \lambda_{GE} - \lambda_{GF}) * \alpha_G$
Total	$\alpha_A + \alpha_B + \ \ldots + \alpha_G = 100\%$	$\alpha_A + \lambda_{BA} * \alpha_B + \ \ldots = 100\%$

donde:

α_i: Porcentaje de material retenido en el intervalo i
λ_{ij}: Porcentaje del materia retenido o cedido del intervalo i al j
Si i=j significa que el porcentaje es retenido en el intervalo

3. Metodología Experimental:

En este capítulo se detallará cómo se actualizó la metodología de predicción de fragmentación primaria de Laubscher y el desarrollo de un método que permite relacionar la frecuencia de colgaduras con la fragmentación de la roca.

3.1. Metodología General:

La actualización de la metodología de predicción de fragmentación primaria de Laubscher considero tanto modificar los ponderadores de la matriz de reducción como los ponderadores del SC efectivo, sin embargo, no modifico la matriz de fragmentación in-situ ni los tamaños que el define en su metodología, de esta manera los porcentajes pasantes para los tamaños son los que se ven afectados. Adicionalmente, modelando los datos a través de modelos granulométricos conocidos, se desarrollaron curvas granulométricas que permiten modelar la fragmentación primaria en roca preacondicionada con distintos espaciamientos de FH.

Por otro lado, se desarrolló una metodología que permite estimar las toneladas por evento de colgadura según el tamaño característico d_{80} y el ancho del punto de extracción D_w (Anexo B). Inversamente se puede estimar el d_{80} sabiendo las toneladas pasantes por colgadura y el ancho del punto de extracción, evitando realizar medidas de fragmentación en terreno o en caso de que no se tengan disponibles.

3.2. Recolección de datos:

La recolección de datos consto de dos partes, la creación de una base de datos de fragmentación primaria de minas de caving y otra base de datos que contenga información sobre la fragmentación y la frecuencia de colgaduras asociada.

La base de datos de fragmentación primaria contiene la información de la fragmentación reportada en los primeros metros de extracción de la columna (la altura de extracción reportada depende de cada mina), la calidad de la roca y si la roca tenía o no preacondicionamiento y de qué tipo. Por otro lado, la base de datos que asocia la fragmentación con las colgaduras contiene la información del ancho del punto de extracción, la fragmentación reportada a distintas alturas de la columna de extracción y la frecuencia de colgaduras asociada.

3.3. Curvas de fragmentación primaria

3.3.1. Ponderadores de la matriz de reducción:

La curvas de fragmentación primaria obtenidas se separaron en clases según la calidad de la roca. Las clases son las mismas definidas originalmente por Laubscher en su metodología (2000), como se muestran en la Tabla 3:

Tabla 3: Clasificaciones de roca según su RMR

Rango RMR	Clase
1-20	5
21-40	4
41-50	3B
51-60	3A
61-80	2
81-100	1

Para las clases de roca 3A y 4 se poseía más de una curva de fragmentación, por lo que, con el fin de simplificar y facilitar el ajuste posterior se realizaron ajustes granulométricos de los datos, usando el modelo de Gates Gaudin Schumann (GGS) y el modelo de Rosin-Rammler (RR) para tener solo una curva representativa de ambas clases de calidad de la roca. Para cada clase se eligió el ajuste que presentara el menor error en la suma de las diferencias absolutas entre, el tamaño de roca promedio de los datos medidos y el estimado por cada modelo, para los tamaños característicos d_{100}, d_{80}, d_{50} y d_{20}. Con el fin de asegurar que los modelos tuvieran menor error que la metodología que se propone mejorar, también se compararon los errores producidos por la metodología de Laubscher, utilizando un *stress caving* efectivo de 50%, esto debido a que, en algunos casos, solo se poseía la información de la calidad de la roca en general y no del porcentaje detallado de cada clase de roca que se pueden encontrar en el macizo rocoso, además de presentar el valor medio en que varían las curvas de fragmentación primaria propuestas por Laubscher, siendo 50% un valor arbitrario.

Luego, los ponderadores de la matriz de reducción propuesta por Laubscher fueron modificados mediante una minimización de errores absolutos de los porcentajes pasantes entre el ajuste de cada clase y la metodología de Laubscher usando un SC de 50%, para los tamaños de la matriz de fragmentación primaria de Laubscher (24, 12, 6, 3, 1.5, 0.75 y 0.25 metros)

3.3.2. Ponderadores del stress caving:

Con el fin de mejorar la precisión de la predicción de la fragmentación primaria, junto con modificar la matriz de reducción de la metodología de Laubscher también se modificó el SC efectivo. A diferencia del ejercicio anterior, esta vez se usaron curvas de fragmentación de las que se conocían los porcentajes de cada clase de roca presentes en el macizo rocoso. Los ponderadores del SC efectivo fueron modificados mediante una minimización de errores absolutos de los porcentajes pasantes entre el ajuste de cada clase y la metodología de Laubscher usando un SC de 50%, para los tamaños de la matriz de fragmentación primaria de Laubscher.

3.4. Efecto del PA

El objetivo del preacondicionamiento es reducir la competencia mecánica del macizo rocoso y una relajación de esfuerzos en la zona preacondicionada mediante la creación de nuevas fracturas para mejorar la capacidad del hundimiento, sismicidad y la fragmentación gruesa resultante. En la Figura 8 se muestran curvas de fragmentación de rocas pertenecientes a la clase 3A, donde se puede ver la diferencia de la fragmentación entre roca con y sin PA, habiendo una diferencia más notable

en la parte más gruesa de la curva de fragmentación. La variación promedio del tamaño de roca para los tamaños característicos d_{100}, d_{80}, d_{50} y d_{20} están detallados en la Tabla 4.

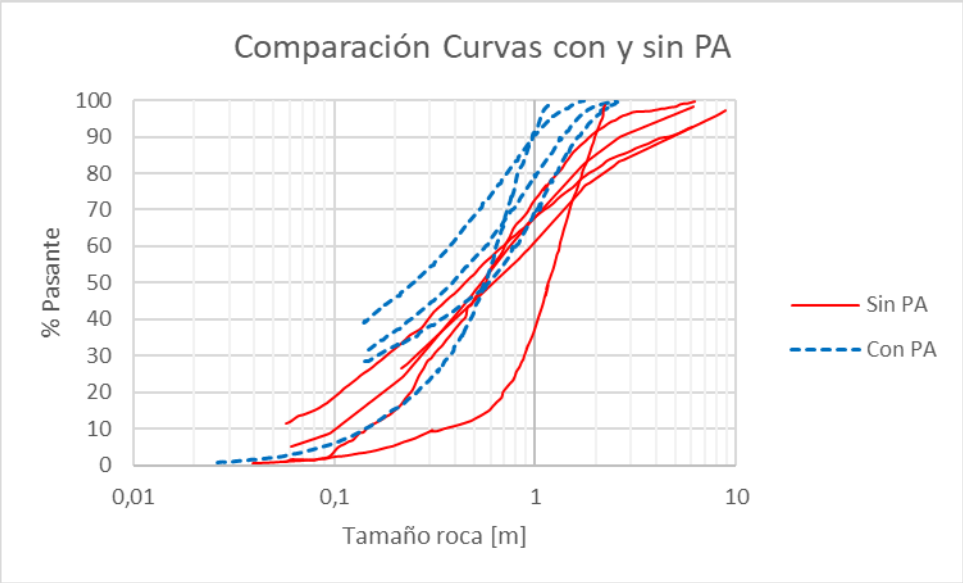


Figura 5: Comparación de curvas granulométricas para minas con y sin PA.

Tabla 4: Comparación de tamaño de roca para los tamaños característicos con y sin PA con la respectiva reducción.

	Sin PA	**Con PA**	**Reducción**
d100 [m]	5,89	2,03	3,86
d80 [m]	1,72	0,89	0,83
d50 [m]	0,62	0,45	0,17

Uno de los problemas con la metodología propuesta por Laubscher es que no incorpora el efecto del preacondicionamiento para la predicción de la fragmentación primaria y los tamaños de roca de su matriz de reducción son muy grandes para intentar predecir la curva de fragmentación que presenta la roca preacondicionada. Castillo (2021) propuso un factor de reducción empírico de un 30% en el tamaño de la roca, si bien obtuvo mejores resultados, el método no tiene validación. Debido a esto, se proponen curvas de fragmentación primaria que dependen del espaciamiento utilizado en el FH.

Al igual que la construcción de las curva granulométrica representativas para la fragmentación primaria de cada clase de roca, para la construcción de las curvas de fragmentación primaria de roca con preacondicionamiento se seleccionó el ajuste que presentara el menor error de la suma de las diferencias absolutas entre los modelos GGS y RR y los datos medidos para los tamaños característicos d_{80}, d_{50} y d_{20}. Esta vez, a diferencia del ejercicio anterior, dado que la aplicación del preacondicionamiento reduce el *top size* de la roca, se definió un tamaño máximo de roca que dependerá del espaciamiento utilizado en el FH usando la fórmula de tamaño de roca de una mina de los casos de estudio y el diámetro característico definido por Ibarra (2014) (Ecuación 3).

$$d_e = 1.24 * \left(\frac{V_e}{1.12}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

3.5. Relación entre colgaduras y fragmentación

En la industria es poco habitual o frecuente medir la fragmentación en terreno, por lo que una manera indirecta de estimar la fragmentación es por medio de la frecuencia de colgaduras. Trabajos anteriores han mostrado que la frecuencia de colgaduras dependerá tanto del tamaño de roca como de las dimensiones de la batea y el punto de extracción (Araya, 2022 & Castro, Gómez and Hekmat, 2016). En este trabajo se decidió por trabajar con la razón del ancho del punto de extracción Dw (Anexo B) y el diámetro característico d_{80} de la roca, $\frac{Dw}{d_{80}}$, ya que se poseían más datos.

Para relacionar la frecuencia de colgaduras con el tamaño de la roca se graficaron los datos de toneladas pasantes por evento de colgadura correspondientes a la fragmentación medida y se creó una línea de tendencia que permite predecir las toneladas pasantes por evento de colgadura con la fragmentación y el ancho del punto de extracción. Además, de manera análoga, también se puede obtener la fragmentación d_{80} sabiendo la frecuencia de colgaduras y el ancho del punto de extracción.

3.6. Efecto del preacondicionamiento en la frecuencia de colgaduras

Como se mostró anteriormente, la aplicación de preacondicionamiento en el macizo rocoso tiene un impacto en la fragmentación más gruesa de la roca, haciendo que la relación entre frecuencia de colgaduras y la razón $\frac{Dw}{d_{80}}$ tuviera un comportamiento diferente al presentado en roca sin preacondicionar. Debido a esto es que se hizo una línea de tendencia considerando solo los datos de roca preacondicionada.

4. Antecedentes:

4.1. Obtención de datos:

La obtención de datos provino de distintas minas. La creación de la base de datos de fragmentación cuenta con la curva de fragmentación, el RMR de la roca y la altura de columna al momento de medir los datos de fragmentación. Por otro lado, la base de datos de colgaduras cuenta con las toneladas pasantes entre evento de colgadura, la altura de columna al momento de la medición, el d80 característico para cada altura de columna y el ancho del punto de extracción.

- **El Teniente:** Ubicada en Machalí, a 50 km de Rancagua, Chile. La mina El Teniente es propiedad en un 100% de la empresa estatal Codelco. Sus yacimientos son principalmente de cobre y opera mediante el método de panel caving. El año 2022 produjo 405.000 toneladas métricas de cobre fino.
- **Deep Ore Zone:** Ubicada a 58 km al noreste de Timika, Indonesia. Pertenece en un 100% PT-FI, compañía limitada bajo las leyes de la Republica de Indonesia, es compartido en un 48.76% por Freeport-McMoRan y en 51.24% por PT Indonesia Asahan Aluminium. Los cuerpos de mineral se presentan como vetas y diseminaciones de sulfuros de cobre, dominado por calcopirita y en menor medida bornita. El depósito de DOZ inicialmente fue extraído como una mina a rajo abierto, siendo suspendido en 1991, retomando la producción en el año 2000 usando el método de block caving. Actualmente se encuentra cerrada.
- **New Afton:** Ubicada a 10 km al este de Kamloops, British Columbia, Canadá. Las operaciones pertenecientes a la mina de New Afton corresponden en un 100% a New Gold Inc. New Afton posee un depósito cuprífero aurífero situado en el complejo batolítico “Iron Mask”. Actualmente opera por medio del método block caving, si bien no fue el único método a considerar, producto de ser usado para minas a gran escala y de bajo costo operacional fue elegido.
- **Andina:** Ubicada en Los Andes, Región de Valparaíso, Chile. La mina Andina es propiedad en un 100% de la empresa estatal Codelco. Su yacimiento subterráneo, Río Blanco es principalmente cuprífero y opera mediante el método de panel caving. El año 2022 produjo 177.000 toneladas métricas de cobre fino.
- **Cadia Valley:** Ubicada a 22 km al sur de Orange, New South Wales, Australia. Cadia pertenece en un 100% a Newcrest Minning Ltd., que opera a través de su propia subsidiaria Cadia Holdings Ltd. Cadia posee un depósito porfídico de cobre y oro, distribuidos en cuatro depósitos porfídicos y dos depósitos skarn de hierro. Las operaciones de Cadia incluyen Cadia Hill a rajo abierto y Cadia East y Ridgeway que operan por panel/sub-panel caving.
- **Palabora:** Ubicada en Palabora, Sudáfrica, la mina pertenece en un 100% a Palabora Copper Limited. El depósito de Cu-Fe de Palabora forma parte del complejo ígneo de la zona, principalmente mineralizado en cobre. Inicialmente siendo una mina a rajo abierto alcanzando los 800 metros de profundidad, en el 2000 comenzaron las operaciones bajo tierra a través del método de block caving, logrando una productividad de 50.000 toneladas de cobre por año.
- **Salvador:** Ubicada en la comuna de Diego de Almagro, Región de Atacama, Chile. La mina Salvador es propiedad en un 100% de la empresa estatal Codelco. Su yacimiento

subterráneo, Inca es principalmente cuprífero y opera mediante el método de panel caving. El año 2022 produjo 32.065 toneladas métricas de cobre fino.

4.2. Resumen de base de datos

La construcción de las curvas de fragmentación fue en base a los datos disponibles para distintas clases de RMR (Tabla 5). Los valores de fragmentación utilizados para los casos de estudio se tomaron considerando la menor altura de extracción disponible, en ningún caso superando los 60 metros.

Tabla 5: Resumen de minas con su respectivo RMR medio? y clase asociada.

Mina	RMR	Clase
Tonalita 4 Sur (El Teniente)	60,5	3A
Diablo Regimiento (El Teniente)	56,5	3A
RENO Fw (El Teniente)	55,0	3A
RENO Hw (El Teniente)	59,0	3A
Río Blanco (Andina)	55,0	3A
Deep Ore Zone [diorite]	87,5	1
Deep Ore Zone [fosterite]	50,0	3B
B1 (New Afton)	40,0	4
B2 (New Afton)	40,0	4

Los ponderadores del SC fueron modificados con minas de las que se poseían a detalle los porcentajes de cada clase de roca presentes en el macizo rocoso, los cuales se detallen en la Tabla 6.

Tabla 6: Resumen de minas de estudio con su respectivo porcentaje de roca de cada clase.

	%	
Clase	**Chuqui Subte**	**DOZ**
Clase 1	0	60
Clase 2	0	0
Clase 3A	0	0
Clase 3B	91	33
Clase 4	9	7
Clase 5	0	0

Los gráficos que relacionan la fragmentación de la roca con la frecuencia de colgaduras están hechos con datos de fragmentación a distintas alturas de extracción de la columna, por lo que a medida que aumenta la altura de extracción, se presenta una disminución en el tamaño de roca. Se puede ver la tabla con los datos en el Anexo C.

5. Resultados:

En este capítulo se presentarán los resultados de la modificación a la metodología de predicción de fragmentación primaria de Laubscher junto con comparaciones directas entre la metodología de Laubscher y la propuesta para los casos de estudio. Además, se presenta una ecuación que permite relacionar la fragmentación de la roca con la frecuencia de colgaduras.

5.1. Curvas de fragmentación primaria:

5.1.1. Ponderadores matriz de reducción:

Los resultados del modelamiento de los datos para obtener una sola curva representativa se pueden ver en la Tabla 7 y la Tabla 8, donde el color verde claro indica el menor error absoluto entre los modelos para cada tamaño característico y el verde más oscuro indica la menor entre las sumas de los errores absolutos para cada modelo, además del promedio del error y la varianza. En todos los casos el modelo que mejor se ajusta a los datos es el de RR, presentando un menor error absoluto total en la predicción del tamaño de roca que el modelo GGS y la metodología de Laubscher.

Tabla 7: Errores comparativos entre ajustes, curva de Laubscher (2000) y datos medidos para roca de RMR clase 3A.

		RR		GGS		Laubscher	
	Real	**Fragmentación**	**Error**	**Fragmentación**	**Error**	**Fragmentación**	**Error**
d100 [m]	6,80	6,00	0,80	4,00	2,80	11,99	5,19
d80 [m]	1,76	1,75	0,01	2,55	0,79	2,08	0,32
d50 [m]	0,55	0,75	0,20	0,95	0,40	1,12	0,57
d20 [m]	0,17	0,24	0,07	0,14	0,04	0,45	0,28
Suma			**1,08**		**4,03**		**6,35**
Promedio			0,27		1,01		1,59
Varianza			0,13		1,53		5,77

Tabla 8: Errores comparativos entre ajustes, curva de Laubscher (2000) y datos medidos para roca de RMR clase 4.

		RR		GGS		Laubscher	
	Real	**Fragmentación**	**Error**	**Fragmentación**	**Error**	**Fragmentación**	**Error**
d100 [m]	0,65	0,60	0,05	0,60	0,05	3,00	2,35
d80 [m]	0,22	0,27	0,05	0,32	0,10	0,72	0,51
d50 [m]	0,12	0,12	0,00	0,09	0,03	0,40	0,28
d20 [m]	-	-	-	-	-	-	-
Suma			**0,11**		**0,18**		**3,14**
Promedio			0,04		0,06		1,05
Varianza			0,00		0,00		1,29

Antes de modificar los ponderadores de la matriz de reducción de Laubscher fue necesario considerar algunas restricciones, estas fueron: los valores de los ponderadores no debían ser negativos y que la suma de los valores de cada fila debía ser 100. De esta manera se obtuvo una nueva matriz de reducción primaria (Tabla 9).

Tabla 9: Matriz de reducción para la fragmentación primaria modificada.

Tamaño	Porcentaje de roca retenida o cedida producto del Stress Caving (λij)						
	A*j*	**B*j***	**C*j***	**D*j***	**E*j***	**F*j***	**G*j***
A*i*	100%						
B*i*	100β	100%-100β					
C*i*		100β	100%-100β				
D*i*		50β	50β	100%-100β			
E*i*			100β	0β	100%-100β		
F*i*				84β	16β	100%-100β	
G*i*					13β	87β	100%-100β

Para validar la nueva matriz propuesta, se compararon los tamaños de roca para los tamaños característicos d_{100}, d_{80}, d_{50} y d_{20} entre los datos medidos, la nueva matriz y la matriz de la metodología de Laubscher, mostrando la suma de los errores absolutos en la Tabla 10 (detalles en Anexo A).

Tabla 10: Comparación de errores absolutos totales entre fragmentación real y matriz de reducción modificada y de Laubscher.

	Error total [m]	
	Modificada	**Laubscher**
Clase 4	0,30	1,79
Clase 3B	0,63	0,49
Clase 3A	0,16	0,26
Clase 2	1,31	1,44

De las tabla anterior se puede ver que la predicción de tamaños resultantes con la nueva matriz de reducción propuesta presenta, en general, un mejor acierto en la fragmentación para las clases 2, 3A y 4, sin embargo, para la clase 3B la metodología propuesta por Laubscher logra mejores aciertos. Finalmente, las curvas de fragmentación para cada clase de roca, con un *stress caving* efectivo de 100% y 0% se pueden ver en la Figura 5 a) y Figura 5 b), respectivamente.

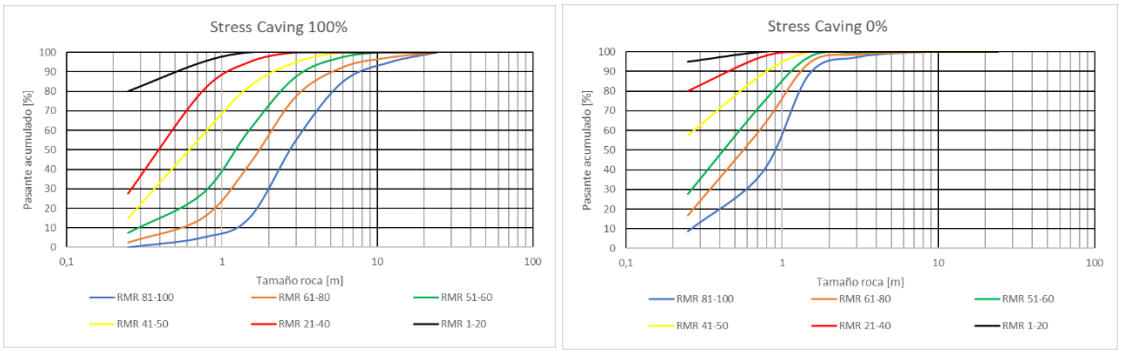


Figura 6: Curvas modificadas de fragmentación primaria con a) 100% stress caving y b) 0% stress caving.

5.1.2. Ponderadores del SC:

Posterior a la modificación de los ponderadores de la matriz de reducción, con el fin de mejorar la predicción de la metodología de Laubscher, se realizó una modificación a los ponderadores del *stress caving* efectivo a través de minimización de errores de dos casos de estudio. De la minimización realizada se obtuvieron los nuevos valores para los ponderadores del *stress caving*, como se muestran en la Ecuación 4:

$$\beta = 100\% - 2 * \%C_5 - 10 * \%C_4 - 0.01 * \%C_{3B} - R \quad (4)$$

Dado que no se tenían casos de estudio que tuvieran roca de calidad de clase 5, el ponderador de esa clase se mantuvo intacto.

Sabiendo los porcentajes de cada clase de roca para los casos de estudio, para validar la metodología propuesta se comparan los errores absolutos de los tamaños de roca obtenidos a través de la matriz de reducción propuesta usando el SC propuesto y SC de la metodología de Laubscher con los valores medidos de los casos de estudio, para los tamaños característicos d_{100}, d_{80}, d_{50} y d_{20}.

Las curvas de fragmentación primaria obtenidas para los sectores de estudio, los macrobloques N02N03 y S02S03 de Chuquicamata Subterráneo se puede ver en la Figura 6 a), donde se tiene un SC de Laubscher de 40.5% y en la Figura 6 b) con un SC propuesto de 5.0%, pertenecientes las clases de roca presente. Por otro lado, las curvas de fragmentación primaria correspondientes a los sectores de DOZ se pueden observar en la Figura 7 a), con un SC de Laubscher de 71.5% y en la Figura 7 b) con un SC propuesto de 25.0%.

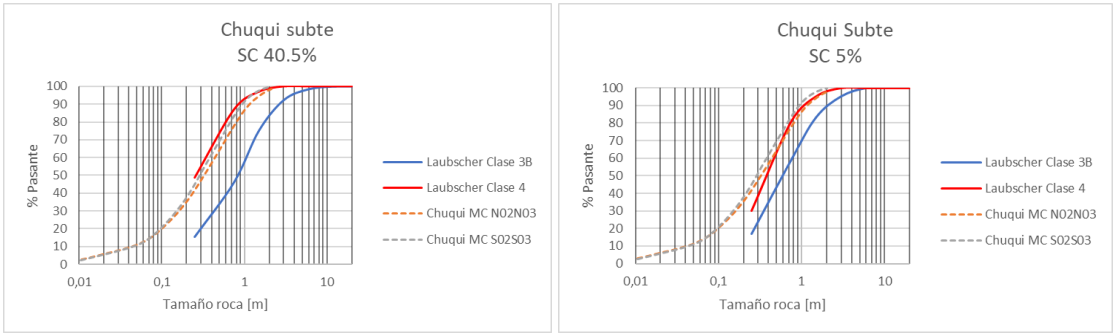


Figura 7: Curvas de fragmentación primaria con a) SC de Laubscher y b) SC propuesto para Chuquicamata Subterráneo.

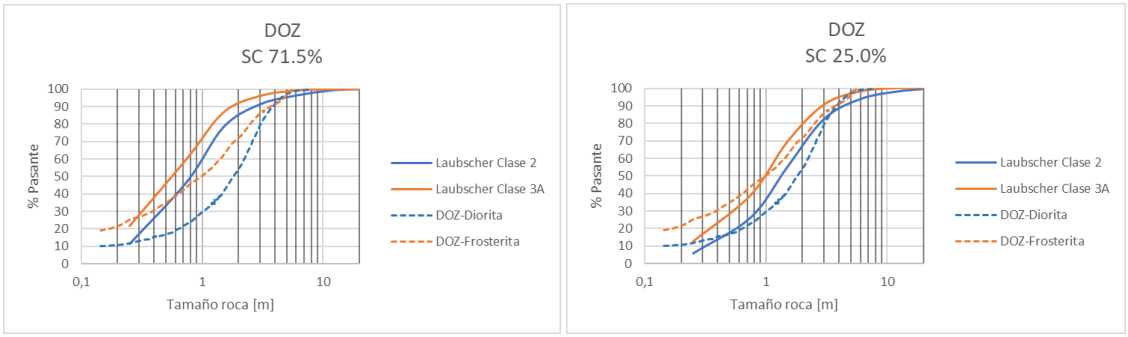


Figura 8: Curvas de fragmentación primaria con a) SC de Laubscher y b) SC propuesto para DOZ.

Para validar la metodología propuesta se comparan los errores para los casos de estudio. En el caso de Chuquicamata Subterráneo se muestran los promedios de los errores absolutos con respecto a la roca de clase 3A en la Tabla 11 y a la roca de clase 4 en la Tabla 12, mientras que en el caso de DOZ, se muestran los errores absolutos para los tipos de roca Diorita y Frosterita en la Tabla 13 y Tabla 14, respectivamente.

Tabla 11: Comparación de errores absolutos entre SC propuesto y SC de Laubscher para la roca de clase 3B de Chuquicamata Subterráneo.

		Modificada		Laubscher	
	Real	**Tamaño**	**Error**	**Tamaño**	**Error**
d100 [m]	2,07	5,00	2,94	6,00	3,94
d80 [m]	0,72	1,40	0,68	1,80	1,08
d50 [m]	0,30	0,60	0,30	0,80	0,50
d20 [m]	0,10	0,28	0,18	0,30	0,20
Total			4,10		5,72

Tabla 12: Comparación de errores absolutos entre SC propuesto y SC de Laubscher para la roca de clase 4 de Chuquicamata Subterráneo.

		Modificada		Laubscher	
	Real	**Tamaño**	**Error**	**Tamaño**	**Error**
d100 [m]	2,07	2,80	0,74	2,80	0,74
d80 [m]	0,72	0,70	0,02	0,60	0,12
d50 [m]	0,30	0,35	0,05	0,25	0,05
d20 [m]	0,10	0,20	0,10	0,15	0,05
Total			0,91		0,96

Tabla 13: Comparación de errores absolutos entre SC propuesto y SC de Laubscher para la roca Diorita de DOZ.

		Modificada		Laubscher	
	Real	**Tamaño**	**Error**	**Tamaño**	**Error**
d100 [m]	7,62	12,00	4,38	12,00	4,38
d80 [m]	3,07	2,80	0,27	1,50	1,57
d50 [m]	1,81	1,40	0,41	0,80	1,01
d20 [m]	0,64	0,55	0,09	0,32	0,32
Total			5,15		7,28

Tabla 14: Comparación de errores absolutos entre SC propuesto y SC de Laubscher para la roca Frosterita de DOZ.

		Modificada		Laubscher	
	Real	**Tamaño**	**Error**	**Tamaño**	**Error**
d100 [m]	5,63	12,00	6,37	12,00	6,37
d80 [m]	2,49	2,00	0,49	1,20	1,29
d50 [m]	0,99	0,90	0,09	0,55	0,44
d20 [m]	0,17	0,35	0,18	0,15	0,02
Total			7,13		8,12

5.2. Efecto del preacondicionamiento.

Debido a las fracturas creadas por el FH, si consideramos el espaciamiento de estas fracturas como el tamaño mínimo que puede presentar una roca se puede definir un tamaño máximo de roca. Utilizando la fórmula de tamaño de roca (Ecuación 5) de uno de los casos de estudio y luego obtener el tamaño característico por medio de la función de Ibarra (2014) (Ecuación 3) de tamaño equivalente en función del volumen se puede cuantificar este tamaño máximo, como se muestra en la Tabla 15.

$$d_e = 1.24 * \left(\frac{V_e}{1.12}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{3}$$

$$\frac{S}{0.518} * \frac{S}{0.731} * S\ [m^3] \tag{5}$$

Tabla 15: Tamaño máximo de la roca dependiendo del espaciamiento del FH.

Impacto del FH en *top size*		
Espaciamiento m	**Factor de forma EL Teniente m^3**	**Tamaño (Ibarra S., 2014) m**
1	2,6	1,7
1,5	8,9	2,5
2	21,1	3,3
2,5	41,3	4,1
3	71,3	5,0

Definido el tamaño máximo de la roca dependiendo del espaciamiento del FH, el resto de la curva granulométrica fue creada usando datos de fragmentación primaria de casos de estudio de minas con preacondicionamiento, todas con calidad de roca perteneciente a la clase 3A. Al tener más de un dato para distintos espaciamientos, para tener solo una curva representativa se modelaron los datos con el ajuste granulométrico de RR ya que modelaba mejor el comportamiento de una curva de fragmentación primaria. Las curvas resultantes se pueden observar en la Figura 9.

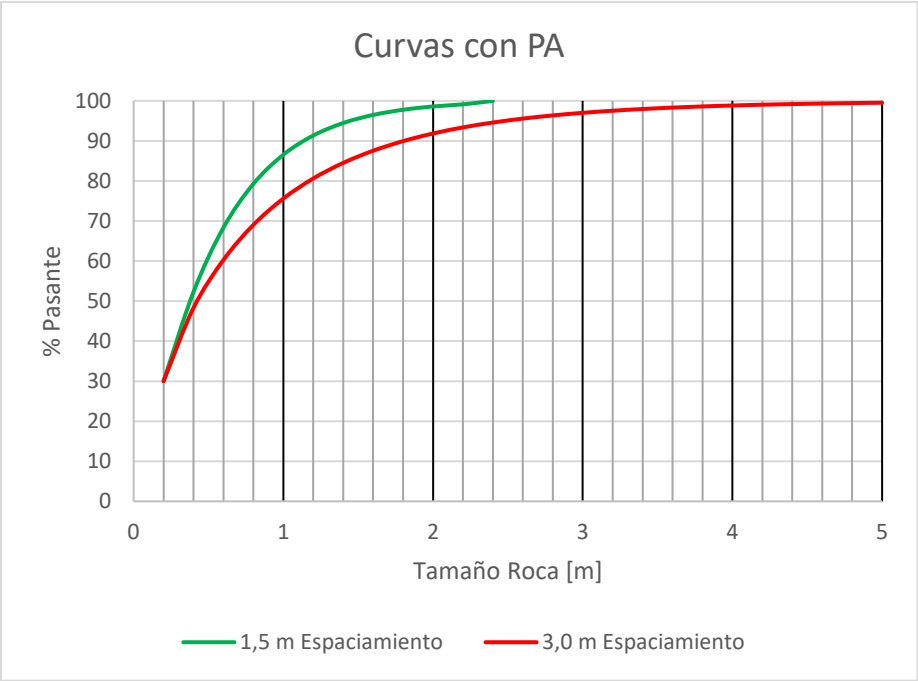


Figura 9: Curvas de fragmentación primaria con PA para rocas de clase 3A.

Luego, por medio de una interpolación lineal entre los porcentajes pasantes y tamaño de roca usando los datos conocidos se hicieron las curvas de fragmentación correspondientes a espaciamientos de 1.0, 2.0, 2.5 metros, como se muestra en la Figura 10:

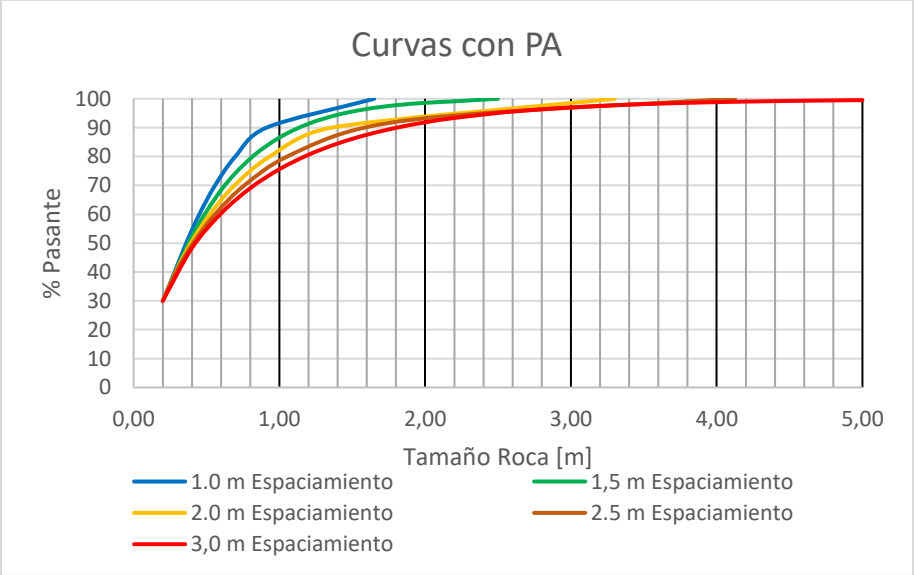


Figura 10: Curvas de fragmentación primaria con PA para rocas de clase 3A.

5.3. Relación entre colgaduras y fragmentación

A partir de la relación entre las toneladas pasantes por evento de colgadura y la razón $\frac{Dw}{d_{80}}$ se puede crear una línea de tendencia que permita estimar las toneladas pasantes por evento de colgadura para un diámetro de punto de extracción definido y un d80 que dependerá de la calidad de la roca (ver Figura 11).

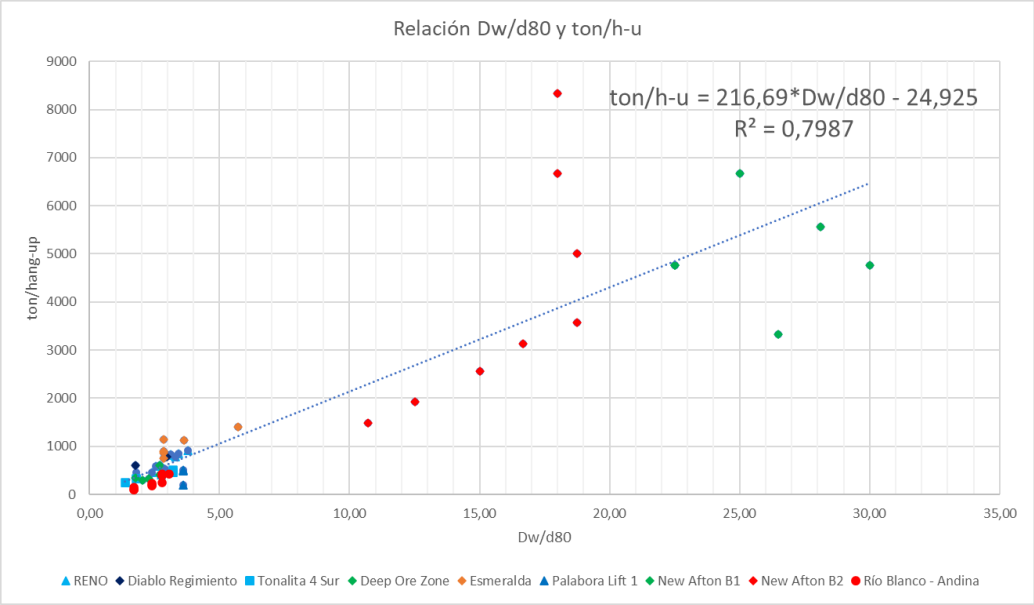


Figura 11: Relación entre frecuencia de colgaduras y la razón D_w/D_{80}.

A partir de la línea de tendencia, podemos predecir las toneladas de colgaduras pasantes para un cierto d_{80} y un ancho de diámetro de punto de extracción dado, según la forma:

$$\frac{ton}{colgadura} = 294.93 * \frac{Dw}{d_{80}} - 110.49 \quad (6)$$

De la formula anterior, despejando el d80 se puede predecir la fragmentación si se tienen mediciones de colgaduras y se sabe el ancho del punto de extracción.

$$d_{80} = 294.93 * \frac{Dw}{\frac{ton}{colgadura}+110.49}\ [m] \quad (7)$$

De la Figura 11 se puede ver que los datos presentan mayor dispersión mientras más alta sea la razón $\frac{Dw}{d_{80}}$, haciendo que el ajuste pierda precisión. Sin embargo, se comporta bien a valores bajos de $\frac{Dw}{d_{80}}$, teniendo errores menores de 500 toneladas por colgadura. Por otro lado, la estimación del d_{80} tiene un error promedio de 0.76 ± 1.63 m. El gran valor de la desviación estándar se debe a que sobrestimaba en gran medida el valor de d_{80} para bajos valores de toneladas por colgadura.

5.4. Efecto del preacondicionamiento en la frecuencia de colgaduras.

Como se mostró anteriormente, la aplicación de preacondicionamiento en el macizo rocoso tiene un impacto en la fragmentación más gruesa de la roca, y esto tiene un impacto en la frecuencia de colgaduras. En el gráfico de la Figura 12 se muestran varios casos de estudio, todos con roca de clase 3A, se puede observar que los valores de toneladas por evento de colgadura de minas sin PA no superan las 1000 [ton/h-u] mientras que los valores de las minas PC1 y PC2 de Cadia, con preacondicionamiento intensivo y FH, respectivamente, superan ampliamente las 1000 [ton/h-u].

Tomando los valores promedio de toneladas por evento de colgadura para los casos con y sin preacondicionamiento, se observa que la aplicación de preacondicionamiento en rocas de clase de RMR 3A aumenta significativamente las toneladas pasantes por evento de colgadura, aumentando en promedio unas 10 veces (Tabla 16).

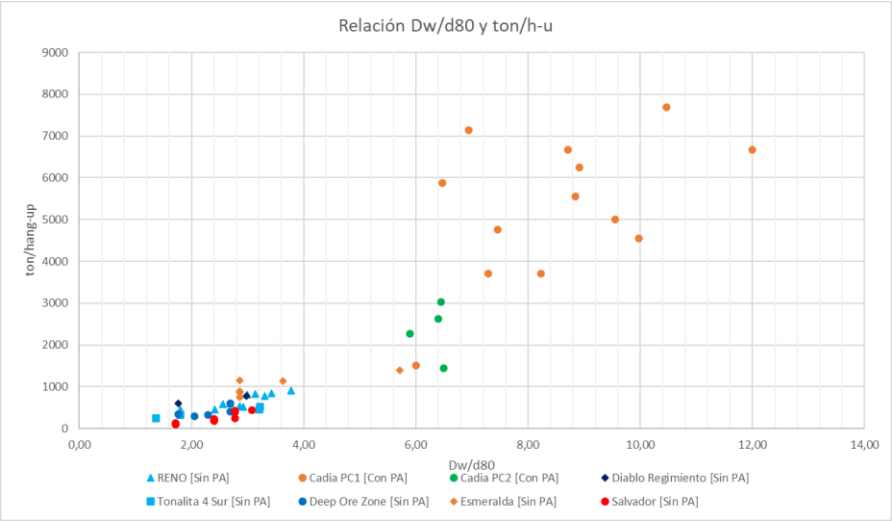


Figura 12: Comparación de toneladas pasantes por evento de colgadura en roca de RMR clase 3A con y sin preacondicionar.

Tabla 16: Valores promedio de toneladas pasantes por evento de colgadura en roca de RMR clase 3A con y sin preacondicionar.

Promedio de toneladas por colgadura	
Sin PA	Con PA
452,9	4615,9

Además, se observó que las toneladas pasantes por evento de colgadura en roca preacondicionada presenta un comportamiento distinto a roca sin preacondicionar, como se puede ver en la Figura 13, donde no se acerca a la línea de tendencia.

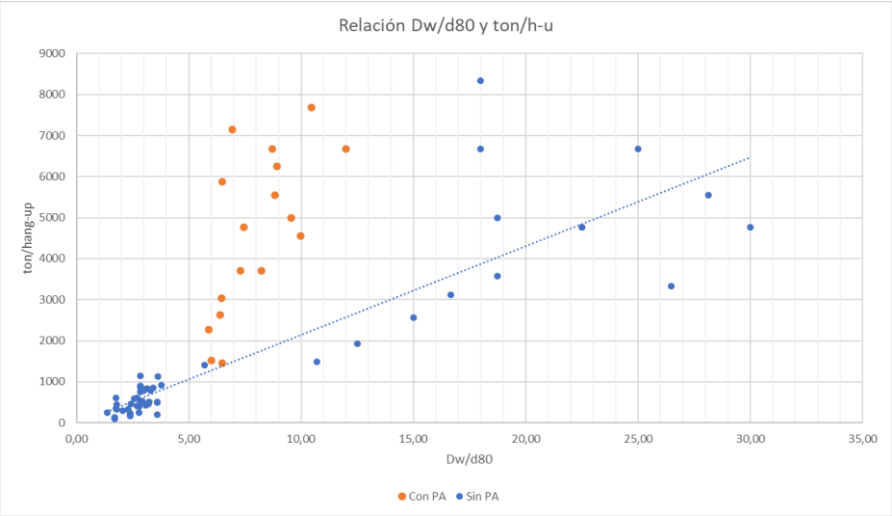


Figura 13: Comparación del comportamiento en las toneladas pasantes por evento de colgadura en roca y sin preacondicionar.

Debido a esto, se decidió por crear una correlación que permitiera calcular las toneladas pasantes por evento de colgadura entre el ancho del punto de extracción, Dw, y el diámetro característico d_{80} de la roca, $\frac{Dw}{d_{80}}$, para roca con preacondicionamiento. La relación se puede observar a partir de la línea de tendencia que se muestra en la Figura 14:

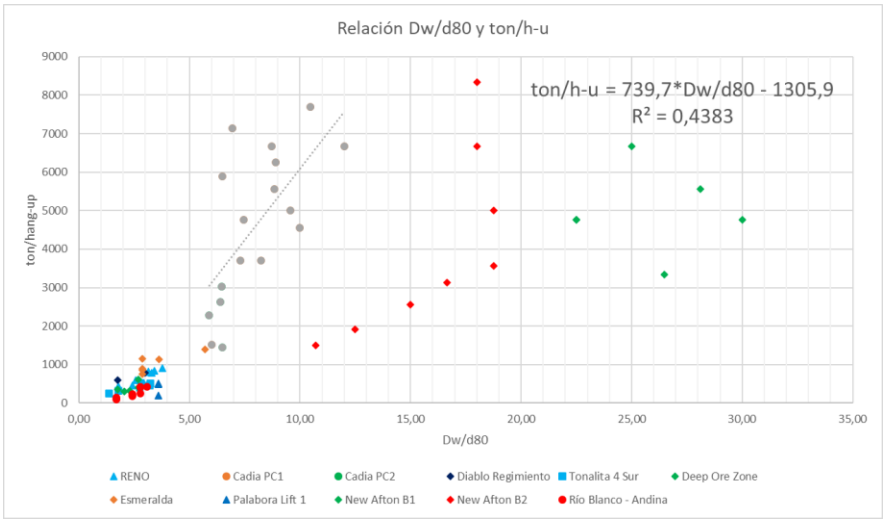


Figura 14: Relación entre frecuencia de colgaduras y la razón $\frac{Dw}{d_{80}}$ para minas con preacondicionamiento.

A partir de la línea de tendencia, podemos predecir las toneladas de colgaduras pasantes para un cierto d_{80} y un ancho de diámetro de punto de extracción dado, según la forma:

$$\frac{ton}{colgadura} = 711.12 * \frac{Dw}{d_{80}} - 1024.3 \quad (8)$$

De la formula anterior, despejando el d80 se puede predecir la fragmentación si se tienen mediciones de colgaduras y se sabe el ancho del punto de extracción.

$$d_{80} = 711.12 * \frac{Dw}{\frac{ton}{colgadura}+1024.3} \ [m] \ ] \quad (9)$$

Este modelo presenta un bajo coeficiente de correlación, llegando a tener errores de hasta 3000 [ton/h-u]. Por otro lado, la estimación del d_{80} tiene un error promedio de 18 ± 16 cm, con un máximo y un mínimo de 4 y 60 cm, respectivamente.

6. Conclusiones

Del estudio realizado se puede concluir que se pudo cumplir con los objetivos generales y específicos, logrando modificar la matriz de reducción de Laubscher, la cual permite predecir la fragmentación primaria de una mina de *caving* sin PA en base a la calidad de la roca.

Dado que entre los casos de estudio con que se desarrolló el modelo se encontraban minas de Block y Panel Caving, la metodología propuesta puede ser implementada para ambos tipos de minas. La implicancia de usar este método de estimación de fragmentación primaria radica en que puede ser utilizada en los primeros niveles de ingeniería de un proyecto, ayudando a definir el tamaño de equipos y la malla de extracción u optar por realizar preacondicionamiento a la roca para logar la fragmentación deseada.

El modelo presenta una sobreestimación para el d_{100} mientras que para el d_{80} los errores en promedio son menores a los 50 cm. Por otro lado, para la fragmentación más fina se ajusta mejor, teniendo para los tamaños d_{50} y d_{20} errores menores a los 30 cm.

En general el ajuste tuvo mejores resultados que la metodología de Laubscher, a excepción de la clase 3B, sin embargo, al realizar el ejercicio completo incluyendo el SC, el ajuste desarrollado en este trabajo tuvo menores errores en comparación a la metodología de Laubscher (Anexo D). Si la comparación se hace con otros programas, en caso del estudio publicado en 2016 de la fragmentación de Chuquicamata Subterráneo (Altamirano et al., 2016) los errores producidos por el software BCF y la metodología propuesta, BCF predice mejor el d_{100}, en parte debido a los tamaños con los que trabaja la metodología propuesta, y el d_{80}. Por otro lado, para los tamaños d_{50} y d_{20} la metodología propuesta presenta mejores resultados (Anexo E).

Se mostró que la aplicación de PA reduce la parte más gruesa de la fragmentación, disminuyendo significativamente el d80 y el *top size* para roca de clase 3A.

A pesar de que las curvas de fragmentación primaria con PA solo fueron hechas con datos de minas con roca de clase 3A, la metodología para definir el *top size* es válida para cualquier clase de roca.

Es posible relacionar la fragmentación con las toneladas pasantes por evento de colgadura de minas de *caving* con y sin PA, relacionando el tamaño de roca d_{80} y el ancho del punto de extracción. De manera inversa, ya que cada vez es menos habitual medir la fragmentación en terreno, se puede estimar el tamaño d_{80} sabiendo las toneladas pasantes por evento de colgadura y el ancho del punto de extracción. A pesar de que la relación encontrada para minas con PA no es muy buena, si se ajusta bien para minas sin PA.

7. Recomendaciones

Si bien en los ejemplos propuestos se logró validar la metodología de predicción de fragmentación primaria en minas de *block/panel caving*, se plantean las siguientes recomendaciones:

- La metodología de fragmentación desarrollada es solo aplicable a fragmentación primaria, entiéndase como tal a la fragmentación producida por la extracción de los primeros 100 metros de la columna. Posterior a eso, se debería considerar un modelo de fragmentación secundaria.
- El modelo propuesto no fue calibrado con todas las clases de roca debido a falta de datos, por lo que en futuros trabajos deberían ser implementados datos de fragmentación de rocas de las clases faltantes.
- Las curvas de fragmentación con PA se crearon solo considerando datos de fragmentación de minas con roca correspondiente a la clase 3A, por lo que no es recomendable usarlas para minas con distinta calidad de roca.
- Para la estimación de las toneladas pasantes por evento de colgadura solo se consideró la granulometría y el ancho del punto de extracción, sin embargo, están dependerán de la granulometría y de la geometría de la batea, por lo que puede haber mejor relación entre granulometría y alguna otra dimensión de la batea.

Referencias

Aguayo, A., & Villegas, D. (2014). Chuquicamata Underground Project subsidence analysis. *Caving*, 611–622.

Altamirano, A., Castro, R., Donoso, J., & Abarca, A. (2016). Estimación de la fragmentación secundaria para el proyecto Chuquicamata Subterráneo. *Uminning*.

Annavarapu, S. (2006). Fragment Size Estimation and Measurement in the DOZ Block Cave. *Mining Engineering*, *58*, 43.

Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (s. f.). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, *1974*.

Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*.

Brunton, I., Lett, J., & Thornhill, T. (2016). *Fragmentation prediction and assessment at the ridgeway deeps and Cadia east cave operations.*

Castro, R., & Cuello, D. (2018). *Hang-up analysis and modelling for Cadia East PC1-S1 and PC2-S1* (Y. Potvin, J. Jakubec, Y. Potvin, & J. Jakubec, Eds.). Australian Centre for Geomechanics. https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1815_15_Castro/

Castro, R., Gómez, R., & Hekmat, A. (2016). Experimental quantification of hang-up for block caving applications. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *85*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.02.005

Catalan, A., Onederra, I., & Chitombo, G. (2017). Evaluation of intensive preconditioning in block and panel caving – part II, quantifying the effect on seismicity and draw rates. *Mining Technology*, *126*, 1–19. https://doi.org/10.1080/14749009.2017.1319527

Chacon, E.; Barrera, V.; Jeffrey, R.; van As, A. (2004). *Hydraulic fracturing used to precondition ore and reduce fragment size for block caving.* 529-534.

Cuello, D., & Newcombe, G. (2018). Key geotechnical knowledge and practical mine planning guidelines in deep, high-stress, hard rock conditions for block and panel cave mining. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*, 17–36. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1815_0.2_Cuello

Díaz, S. A. L. (s. f.). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE COLGADURAS*.

Duplancic, P., & Brady, B. H. (1999). *Characterisation of Caving Mechanisms By Analysis of Seismicity And Rock Stress*. ISRM-9CONGRESS-1999-208.

E. C. Wellman, S. Annavarapu, R.W. Pratt, & D. E. Nicholas. (2012). *Prediction of fragmentation in block cave mine design – an update of the Core2Frag program*. 6th International Conference & Exhibition in Mass Mining: MassMin 2012, Sudbury, Canada.

Eadie, B. A. (2003). *A framework for modelling fragmentation in block caving* [PhD Thesis]. The University of Queensland.

Flores, G. (2014). *Future challenges and why cave mining must change*. 3rd International symposium on block and sublevel caving: Caving 2014, Santiago, Chile.

Gomez, R., Castro, R., Suzuki, Kimie., Brzovic, Andrés., Dorador, Leonardo., & Orellana, L. F. (s. f.). *TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA DE MINAS*.

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*, *130*(1), 181–198. https://doi.org/10.21701/bolgeomin.130.1.011

He, Q., Suorineni, F. T., & Oh, J. (2016). Review of Hydraulic Fracturing for Preconditioning in Cave Mining. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *49*(12), 4893–4910. https://doi.org/10.1007/s00603-016-1075-0

Hermosilla, J. C. (s. f.). *DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE FRAGMENTACIÓN EN MINERÍA DE CAVING*.

Hurtado, J. P., Pereira, J., & Campos, R. (2007). *Informe final Backanlysis de fragmentación minas: Diablo Regimiento, Reno y Teniente 4 sur Tonalita*. CODELCO.

Kang, H., Lv, H., Gao, F., Meng, X., & Feng, Y. (2018). Understanding mechanisms of destressing mining-induced stresses using hydraulic fracturing. *International Journal of Coal Geology*, *196*, 19–28. https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.06.023

Laubscher, D. (1994). *Cave Mining—The state of the art*. Internartional Journal of Geomechanics and Mining Sciences.

Laubscher, D. (2000). *A practical manual on block caving*. Prepared for the International Caving Study, JKRMC and Itasca Consulting Group, Brisbane.

Mas Ivars, D., Pierce, M. E., Darcel, C., Reyes-Montes, J., Potyondy, D. O., Paul Young, R., & Cundall, P. A. (2011). The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *48*(2), 219–244. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.11.014

Ngidi, N., & Pretorius, D. (2010). Impact of poor fragmentation on cave management. *Proceedings of the Second International Symposium on Block and Sublevel Caving*, 593–601. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1002_41_Ngidi

Paredes, P. (2022). Evaluation of the effect of wider-spaced layouts in recovery for high column block caves. *Caving 2022: Fifth International Conference on Block and Sublevel Caving*, 393–416. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2205_27

Pereira, J., Divasto, C., & Barindelli, G. (2023). *Evaluación Comparativa Metodologías Mapeo Presencial Granulométrico v/s Procesamiento Digital de Imágenes: Casos de Estudio Mina Subterránea.* Simin.

Rogers, S., Elmo, D., Webb, G., & Catalan, A. (2015). Volumetric Fracture Intensity Measurement for Improved Rock Mass Characterisation and Fragmentation Assessment in Block Caving

Operations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *48*(2), 633–649. https://doi.org/10.1007/s00603-014-0592-y

Sanhueza, V. (2022). *Estudio de Colgaduras en Minería de Block Caving* [Pregrado]. Universidad de Concepción.

Srikant, A., Nicholas, D. E., & Rachmad, L. (2004). *Visual estimation of fragment size distributions in the DOZ block cave*. 4th International Conference and Exhibition on Mass Mining. August 22-25., Santiago, Chile.

Anexos

Anexo A: Errores comparativos entre los casos de estudio, matriz modificada y matriz de Laubscher.

Se presentan las tablas de los errores para los tamaños característicos entre los casos de estudio, la matriz modificada y la matriz de reducción de Laubscher.

Tabla 17: Errores absolutos entre curva de fragmentación con matriz de reducción propuesta, matriz de reducción de Laubscher y datos medidos para clase 2.

		Modificada		Laubscher	
	Real	**Tamaño**	**Error**	**Tamaño**	**Error**
d100 [m]	7,63	12,06	4,44	12,06	4,44
d80 [m]	3,07	3,50	0,43	3,60	0,53
d50 [m]	1,81	1,50	0,31	1,40	0,41
d20 [m]	0,64	0,95	0,31	1,20	0,56
Total			**1,37**		**1,48**

Tabla 18: Errores absolutos entre ajustes, curva de Laubscher (2000) y datos medidos para roca de RMR clase 3A.

		Modificada		Laubscher	
	Real	**Tamaño**	**Error**	**Tamaño**	**Error**
d100 [m]	5,89	6,00	0,11	6,00	0,11
d80 [m]	1,75	1,50	0,25	2,00	0,25
d50 [m]	0,67	0,90	0,23	1,10	0,43
d20 [m]	0,20	0,26	0,06	0,43	0,23
Total			**0,16**		**0,26**

Tabla 19: Errores absolutos entre ajustes, curva de Laubscher (2000) y datos medidos para roca de RMR clase 3B.

		Modificada		Laubscher	
	Real	**Tamaño**	**Error**	**Tamaño**	**Error**
d100 [m]	5,63	6,00	0,37	6,00	0,37
d80 [m]	2,49	1,00	1,49	1,40	1,09
d50 [m]	1,00	0,40	0,60	0,60	0,40
d20 [m]	0,17	0,10	0,07	0,27	0,10
Total			**0,63**		**0,49**

Tabla 20: Errores absolutos entre ajustes, curva de Laubscher (2000) y datos medidos para roca de RMR clase 4.

		Modificada		Laubscher	
	Real	**Tamaño**	**Error**	**Tamaño**	**Error**
d100 [m]	0,65	1,10	0,45	1,10	0,69
d80 [m]	0,22	0,58	0,37	0,72	2,35
d50 [m]	0,12	0,20	0,08	0,40	2,33
d20 [m]					
Total			**0,30**		**1,79**

Anexo B: Ancho del punto de extracción.

El ancho del punto de extracción es desde el que se extrae el mineral que cae de la columna de extracción. Se puede observar en la Figura siendo Dw.

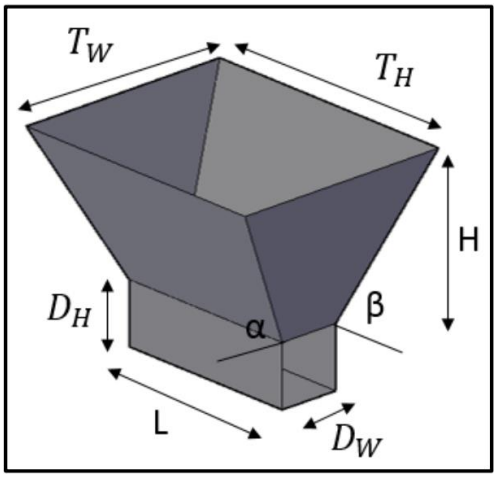


Figura 15: Dimensiones de la batea de extracción.

Anexo C: Base de datos de fragmentación y toneladas pasantes por evento de colgadura.

Se presenta la base de datos de la fragmentación y la frecuencia de colgadura asociada para los casos de estudio.

Tabla 21: Base de datos de colgaduras.

Mina	Altura de Columna [m]	Frecuencia de Colgadura [ton/h-u]	Ancho del Punto de Extracción [m]	d80 [m]	Dw/d80
DR	0-45	605,0	4,5	2,27	1,76
	0-93	784,0	4,5	1,34	2,98
Fw	0-50	403,0	3,6	1,31	2,75
	0-100	531,0	3,6	1,26	2,86
	0-200	522,0	3,6	1,23	2,92
	0-400	782,0	3,6	1,09	3,30
Hw	0-50	458,0	3,6	1,49	2,41
	0-100	596,0	3,6	1,34	2,69
	0-200	830,0	3,6	1,15	3,14
	0-400	914,0	3,6	0,95	3,77
Hw'	0-50	450,0	3,6	2,00	1,80
	0-100	593,0	3,6	1,40	2,56
	0-200	811,0	3,6	1,20	3,00
	0-400	844,0	3,6	1,05	3,42
Teniente 4 Sur	0-50	251,0	3,6	2,64	1,36
	0-100	327,0	3,6	2,00	1,80
	0-200	461,0	3,6	1,12	3,21
	0-300	514,0	3,6	1,12	3,22
DOZ	0-60	348,2	4	2,27	1,76
	60-120	294,2	4	1,95	2,05
	120-180	321,4	4	1,75	2,29
	180-240	408,6	4	1,48	2,69
	>240	609,0	4	1,48	2,69
Esmeralda	10-20	750,0	4	1,40	2,86
		860,0	4	1,40	2,86
		900,0	4	1,40	2,86
	20-30	1150,0	4	1,40	2,86
	30-40	1130,0	4	1,10	3,64
	40-50	1400,0	4	0,70	5,71
Palabora East	0-60	200,0	4,5	1,25	3,60
Palabora West	0-60	491,0	4,5	1,25	3,60
Palabora Central	0-60	509,0	4,5	1,25	3,60
New Afton B1	0-14		4,5	0,15	30,00
	14-28	4761,9	4,5	0,15	30,00
	28-42	4761,9	4,5	0,20	22,50
	42-56	4761,9	4,5	0,20	22,50
	56-74	5555,6	4,5	0,16	28,13
	74-99	3333,3	4,5	0,17	26,47
	99-122	11111,1	4,5	0,17	26,47
	122-132	6666,7	4,5	0,18	25,00

Mina	Altura de Columna [m]	Frecuencia de Colgadura [ton/h-u]	Ancho del Punto de Extracción [m]	d80 [m]	Dw/d80
New Afton B2	0-11	20000,0	4,5	0,28	16,07
	11-29.	1492,5	4,5	0,42	10,71
	29-54	1923,1	4,5	0,36	12,50
	54-85	2564,1	4,5	0,30	15,00
	85-112	3125,0	4,5	0,27	16,67
	112-136	3571,4	4,5	0,24	18,75
	136-162	5000,0	4,5	0,24	18,75
	162-188	6666,7	4,5	0,25	18,00
	188-211	8333,3	4,5	0,25	18,00
	211-241	12500,0	4,5	0,25	18,00
Salvador	0-20	102,0	3,5	2,05	1,71
	20-40	106,0	3,5	2,05	1,71
	40-60	139,0	3,5	2,05	1,71
	60-80	173,0	3,5	1,46	2,40
	80-100	198,0	3,5	1,46	2,40
	100-120	226,0	3,5	1,46	2,40
	120-140	252,0	3,5	1,26	2,78
	140-160	399,0	3,5	1,26	2,78
	160-180	421,0	3,5	1,26	2,78
	180-200	432,0	3,5	1,14	3,07
Cadia Valley PC1	40-60	1515,2	4,5	0,75	6,00
	60-80	5882,4	4,5	0,69	6,48
	80-100	3703,7	4,5	0,62	7,29
	100-120	4761,9	4,5	0,60	7,46
	120-140	7142,9	4,5	0,65	6,94
	140-160	3703,7	4,5	0,55	8,23
	160-180	6250,0	4,5	0,50	8,92
	180-200	6666,7	4,5	0,52	8,71
	200-220	5555,6	4,5	0,51	8,84
	220-240	5000,0	4,5	0,47	9,55
	240-260	4545,5	4,5	0,45	9,97
	260-280	6666,7	4,5	0,38	12,00
	280-300	7692,3	4,5	0,43	10,46
	300-320	16666,7	4,5	0,45	9,91
	320-340	14285,7	4,5	0,48	9,42
Cadia Valley PC2	20	2272,7	4,5	0,76	5,89
	40	1449,3	4,5	0,69	6,50
	60	3030,3	4,5	0,70	6,45
	80	2631,6	4,5	0,70	6,40

Anexo D: Comparación entre la metodología propuesta y la de Laubscher.

En la Tabla 21 se pueden ver los errores entre la metodología propuesta y la metodología de Laubscher para la mina Chuquicamata Subterránea. Se puede ver que los errores con la metodología propuesta, incorporando la modificación al SC, presenta errores menores para la predicción de tamaño de roca.

Tabla 22: Errores absolutos entre metodologia propuesta y Laubscher con los datos medidos de Chiquicamata Subterráneo.

		Propuesta		**Laubscher**	
	Promedio Chuqui Subte	**Tamaño**	**Error**	**Tamaño**	**Error**
d100 [m]	2,05	5,00	2,95	5,00	2,95
d80 [m]	0,75	1,23	0,48	1,25	0,50
d50 [m]	0,31	0,50	0,19	0,60	0,29
d20 [m]	0,10	0,20	0,10	0,28	0,18
Total			3,72		3,92

Anexo E: Comparación entre la metodología propuesta y la de Laubscher.

En la Tabla 23 se pueden ver los errores de la metodología propuesta y los errores del estudio realizado para predecir la fragmentación de la mina Chuquicamata Subterránea con el software BCF.

Tabla 23: Errores absolutos entre metodologia propuesta y estudios de fragmentacion, con los datos medidos de Chuquicamata Subterráneo.

		Propuesta		**BCF**	
	Promedio Chuqui Subte	**Tamaño**	**Error**	**Tamaño**	**Error**
d100 [m]	2,05	5,00	2,95	1,90	0,15
d80 [m]	0,75	1,23	0,48	0,95	0,20
d50 [m]	0,31	0,50	0,19	0,63	0,32
d20 [m]	0,10	0,20	0,10	0,41	0,31
Total			3,72		0,98