



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA



VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO DE FRAGMENTACIÓN SECUNDARIA APLICADO EN FLOWSIM BC

POR

OLAYA MICHELLE CALDERÓN PALOMINOS

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniera Civil de minas

Profesor Guía

René Gómez Puigpinos

Profesional supervisor

Raúl Castro Ruiz

Marzo 2023

Concepción (Chile)

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, que fueron un apoyo fundamental durante todo mi periodo universitario, gracias a ambos por siempre confiar en mí e incentivarme y darme las herramientas para ser una mejor persona cada día.

A mi hermano Rodolfo por su amor incondicional y hacerme reír siempre con sus locuras. A mis familiares en general que siempre tuvieron una palabra de aliento cuando lo necesite.

A mis amigos, en especial a Constanza, Laura, Francisco y Verónica por hacer estos últimos años memorables y más felices. Mención especial a Oscar por acompañarme todo este tiempo y no dejar que me rindiera.

Finalmente quiero agradecer también al profesor René Gómez por guiarme durante todo el proceso y tener siempre disposición y amabilidad.

Resumen

En minería de Block Caving hay diversos factores que influyen en el éxito de la operación, entre ellos la fragmentación, este factor influye tanto en el sistema de manejo de materiales como en el diseño minero. Entre los problemas que se pueden asociar a la fragmentación están las colgaduras en piques, bateas y puntos de extracción, lo que se puede deber a grandes bolos y/ o a la presencia de material cohesivo como finos y humedad. La presencia de grandes tamaños en los puntos de extracción no permite que estos sean tomados por el equipo de carguío. La presencia de material fino tiene estrecha relación con la dilución, estallidos de finos y barro. Por esto es fundamental predecir la fragmentación y así poder enfrentar mejor los problemas que puede generar este factor.

La metodología de este trabajo considera la creación de una base de datos de operaciones de Block Caving que incluye la fragmentación medida, resistencia a la compresión uniaxial, esfuerzo vertical y la distancia que recorren las partículas. La base de datos permite obtener los tamaños característicos d_{20} , d_{50} y d_{80} de cada sector y posteriormente su razón de reducción (R_{20} , R_{50} , R_{80}), conocidos estos valores y las razones de UCS sobre esfuerzo vertical se compara con los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio con el fin de validar los datos minas y se analiza el modelo de fragmentación secundaria incorporado en FlowSim. Finalmente, con los datos mina se ajustan los parámetros del modelo de fragmentación secundaria aplicado en FlowSim BC con la herramienta *solver* de Excel minimizando el error entre la razón de reducción y la determinada por el modelo de fragmentación secundaria.

La comparación realizada arroja como resultado que solo la razón de reducción R_{50} tiene el comportamiento esperado con tres de los cuatro sectores estudiados de forma que en estos sectores se cumple que mientras mayor es el valor de la razón entre UCS y esfuerzo vertical, σ_v , menor es la razón de reducción y viceversa. Para los sectores validados (Diablo Regimiento y Reservas Norte Fw y Hw) se obtuvieron los parámetros de ajuste α y β , el parámetro alfa tiene un promedio de 0.121 y beta obtuvo un valor de 0.001 para los tres sectores, obteniendo un error promedio de 1.724E-08.

Se puede concluir entonces que el modelo permite representar el comportamiento de la fragmentación para el tamaño característico d_{50} , para los tres sectores que fueron validados y que, si bien varios factores pueden influir en la reducción del tamaño de las partículas, el UCS es uno de los principales por sobre el esfuerzo vertical.

Abstract

In Block Caving mining there are several factors that influence the success of the operation, among them fragmentation, this factor influences both the material handling system and the mine design. Problems that can be associated with fragmentation include hang-ups in ore pass, drawbells and drawpoints, which can be due to large boulders and/or the presence of cohesive material such as fines and moisture. The presence of large sizes at the extraction points does not allow them to be picked up by the loading equipment. The presence of fine material is closely related to dilution, rill swell and mudrush. This is why it is essential to predict fragmentation and thus be able to better deal with the problems that this factor can generate.

The methodology of this work considers the creation of a database that includes measured fragmentation, uniaxial compressive strength, vertical stress, and the distance traveled by the particles. The database allows obtaining the characteristic sizes (d_{20} , d_{50} , d_{80}) of each sector and then its reduction ratio (R_{20} , R_{50} , R_{80}). Once these values and the UCS ratios on vertical stress are known, they are compared with the results obtained in laboratory tests to validate the mine data and analyze the secondary fragmentation model incorporated in FlowSim. Finally, with the mine data, the parameters of the secondary fragmentation model applied in FlowSim BC are adjusted with the Excel solver tool, minimizing the error between the reduction ratio and the one determined by the secondary fragmentation model.

The comparison shows that only the reduction rate R_{50} has the expected behavior with three of the four sectors studied, so that in these sectors it is true that the higher the value of the ratio between UCS and vertical stress, σ_v , the lower the reduction rate and vice versa. For the validated sectors (Diablo Regimiento and Reservas Norte Fw and Hw) the fit parameters α and β were obtained, the alpha parameter has an average of 0.121 and beta obtained a value of 0.001 for the three sectors obtaining a mean error of 1.724E-08.

It can be concluded that the model allows representing the fragmentation behavior for the characteristic size d_{50} , for the three sectors that were validated and that although several factors can influence the particle size reduction, the UCS is one of the main ones over the vertical stress.

Tabla de Contenidos

1. Introducción	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
2. Metodología empleada en el estudio.....	4
2.1 Metodología general	4
2.2 Metodología de fragmentación en minería de caving	5
2.3 FlowSim BC	7
2.4 Mecanismo de fragmentación secundaria integrado en FlowSim BC.....	10
3. Antecedentes del caso de estudio.....	13
3.1 Inspección visual en puntos de extracción	14
4. Resultados y Análisis	16
4.1 Análisis individual con respecto a UCS y esfuerzo vertical.....	16
4.2 Análisis del comportamiento de las razones de reducción y la razón UCS/σ_v	18
4.3 Parámetros de ajuste del modelo de fragmentación secundaria	21
5. Conclusiones y recomendaciones	22
5.1 Conclusiones.....	22
5.2 Recomendaciones	23
6. Referencias.....	24
7. Anexos.....	26

Lista de Tablas

Tabla 1. Distribución granulométrica del RMR [15]	5
Tabla 2. Matriz de reducción para la fragmentación primaria [8].	6
Tabla 3. Ecuaciones para determinar los porcentajes máxicos [8].	7
Tabla 4. Resumen de los principales parámetros de flujo de FlowSim [14].	9
Tabla 5. Base de datos con la resistencia a la compresión uniaxial, distancia recorrida [19] y esfuerzo vertical promedio [20] de cada sector estudiado.	14
Tabla 6. Tamaños característicos iniciales y finales utilizados.	16
Tabla 7. Razones de reducción (R_{20} , R_{50} y R_{80}) para cada sector con su valor de UCS y esfuerzo vertical respectivo.	16
Tabla 8. Razones de reducción para cada sector con su razón UCS/σ_v respectivo.	18
Tabla 9. Parámetros de ajuste del mecanismo de fragmentación secundaria (R_x)	21
Tabla 10. Distribución granulométrica según altura de extracción sector RENO Fw [19].	26
Tabla 11. Distribución granulométrica según altura de extracción sector RENO Hw [19].	26
Tabla 12. Distribución granulométrica según altura de extracción sector Diablo Regimiento [19]. .	27
Tabla 13. Distribución granulométrica según altura de extracción sector Teniente 4 Sur [19].	27
Tabla 14. Distribución granulométrica acumulada sector RENO Fw	28
Tabla 15. Distribución granulométrica acumulada sector RENO Hw	28
Tabla 16. Distribución granulométrica acumulada sector Diablo Regimiento	29
Tabla 17. Distribución granulométrica acumulada sector Teniente 4 sur	29
Tabla 18. Tamaños característicos sector RENO Fw	31
Tabla 19. Tamaños característicos sector RENO Hw	31
Tabla 20. Tamaños característicos sector Diablo Regimiento	31
Tabla 21. Tamaños característicos sector Teniente 4 sur	32
Tabla 22. Datos para el cálculo de la razón de reducción.	33
Tabla 23. Razón de reducción R_{20} y UCS/σ_v para cada punto de extracción	35
Tabla 24. Razón de reducción R_{50} y UCS/σ_v para cada punto de extracción	36
Tabla 25. Razón de reducción R_{80} y UCS/σ_v para cada punto de extracción	36

Lista de Figuras

Figura 1. Ejemplo del método de Block Caving [3]	1
Figura 2. Metodología de trabajo.	4
Figura 3. Vista esquemática de los bloques de la vecindad y el movimiento ascendente de la celda vacía. (A) Antes de la extracción; (B) Después de la extracción (14]).	9
Figura 4. Curva que relaciona R_{50} (datos de laboratorio) con la razón UCS/σ_v	11
Figura 5. Sectores en estudio: Reservas Norte Sub-6, Teniente 4 Sur Tonalita y Diablo Regimiento [19].	13
Figura 6. Punto de extracción operativo y personal con Metro de Carpintero [21].	14
Figura 7. Relación entre razón de reducción y UCS	17
Figura 8. Relación entre razón de reducción y esfuerzo vertical (σ_v).	17
Figura 9. Razones de reducción (R_{20} , R_{50} , R_{80}) versus UCS/σ_v	19
Figura 10. Razón de reducción (R_{50}) versus UCS/σ_v	20
Figura 11. Curva obtenida con datos de laboratorio versus Curva obtenida con datos mina.	20
Figura 12. Curva construida con datos de laboratorio versus curva obtenida con datos mina.	34
Figura 13. Razón de reducción R_{20} versus UCS/σ_v	37
Figura 14. Razón de reducción R_{50} versus UCS/σ_v	37
Figura 15. Razón de reducción R_{80} versus UCS/σ_v	38

1. Introducción

El Block Caving (Figura 1) es un método subterráneo de hundimiento gravitacional, que consiste en realizar un corte basal en un cuerpo mineralizado masivo para lograr su desequilibrio y provocar su colapso a causa de la gravedad [1]. Block/Panel caving es el método subterráneo que tiene menores costos operacionales, debido al uso de la gravedad tanto para el hundimiento como para el transporte de material desde su ubicación insitu [2], altos ritmos de producción y la capacidad de automatización. Sin embargo, es un método poco flexible y el capital inicial y tiempo de preparación son altos debido a los requerimientos de inversión en infraestructura y desarrollo antes de que comience la producción [3].

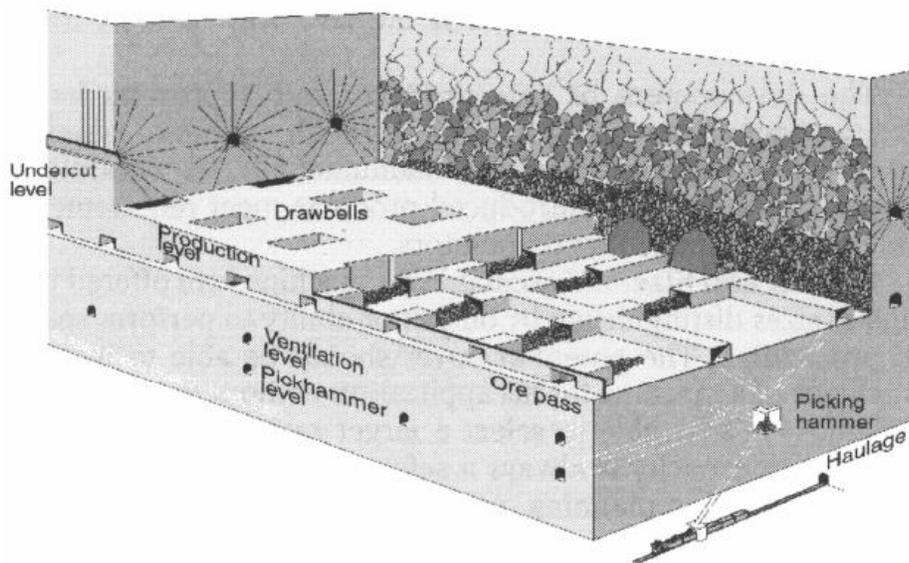


Figura 1. Ejemplo del método de Block Caving [3]

El éxito y rentabilidad de las operaciones de block caving dependen significativamente de la fragmentación producida en el cuerpo mineral durante el proceso de hundimiento (*caving*). Esta fragmentación se genera de manera natural a medida que el mineral va siendo extraído [3]. Se pueden identificar tres tipos de fragmentación en una mina de caving: insitu, primaria y secundaria [3,4]. La fragmentación insitu se encuentra representada por los bloques que están naturalmente en el macizo rocoso antes de toda actividad minera. Luego del inicio del caving, los bloques que se desprenden del cave back corresponden a la fragmentación primaria, la orientación del *cave front o back* con respecto a los sets de juntas y la dirección del esfuerzo principal pueden tener un efecto significativo en esta. Por último, la fragmentación secundaria es generada por el movimiento de los bloques a través de la columna de extracción hasta llegar a los puntos de extracción, esta varía con el régimen de esfuerzos

en el hundimiento, la composición y propiedades mecánicas del yacimiento, la velocidad de extracción, la altura de extracción y el tiempo de residencia en la columna de extracción.

Existen diversos métodos predictivos de fragmentación en minería de caving, tales como: Block Cave Fragmentation [5], Laubscher Chart [4], Core2Frag [5], REBOP [6] y Block caving Comminution [7]. Las desventajas de algunos de estos métodos predictivos es que pueden requerir una gran cantidad de datos de entrada, algunos no consideran inputs relevantes y otros no están validados [8].

Por otro lado, existen diversos métodos para modelar el flujo gravitacional, tales como: Autómatas celulares, DEM [9], PCBC [10] y REBOP [6]. En particular los autómatas celulares (AC) destacan porque corresponde a un modelo matemático que simula un sistema de elementos, el cual evoluciona a pasos discretos. Básicamente un autómata celular consiste en un arreglo regular de celdas del mismo tipo, que tienen un conjunto finito y discreto de estados posibles [11,12]. Entre las principales ventajas que tienen los autómatas celulares esta su fácil implementación, junto con la rapidez de las simulaciones debido a que el sistema es discreto [13].

Entre los autómatas celulares utilizados en minería de Block Caving, en el presente trabajo se utiliza FlowSim BC. Este software es una herramienta numérica que permite modelar el flujo gravitacional para fines de planificación de Block Caving a largo plazo, considerando el macizo rocoso como una discretización regular de bloques que por lo general toman un tamaño de $2 \times 2 \times 2$ [m] y que pueden tener tres estados: granular, sólido y vacío. El movimiento de los bloques esta dado por una regla matemática de probabilidad llamada función de transición [14].

En este trabajo se propone validar y calibrar el modelo de fragmentación secundaria aplicado en FlowSim BC desarrollado para predecir la fragmentación secundaria en block caving [7], la validación se realizará considerando los resultados obtenidos con ensayos de laboratorio y la calibración se realizará encontrando los parámetros que ajusten el modelo de fragmentación. El trabajo será realizado con los datos de fragmentación medidos de un caso de estudio.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Validar y calibrar un modelo para la predicción de la fragmentación secundaria a escala mina considerando el flujo gravitacional.

1.1.2 Objetivos específicos

- Armar una base de datos de fragmentación de datos mina
- Observar una correlación entre la razón de reducción y la razón entre el esfuerzo vertical y la resistencia a la compresión uniaxial.
- Determinar los parámetros que mejor ajustan el mecanismo de fragmentación secundaria (Rx) a la fragmentación medida en caso de estudio.
- Comprender los fundamentos y mecanismos que incorpora FlowSim Bc.

2. Metodología empleada en el estudio

2.1 Metodología general

La metodología para este trabajo consiste en primera instancia en la construcción de una base de datos con la recopilación de los datos de la fragmentación medida por los casos de estudio, la distancia que recorren las partículas, la resistencia a la compresión uniaxial y el esfuerzo vertical.

Una vez construida la base de datos se calcularon los tamaños característicos d_{20} , d_{50} y d_{80} , para aplicar la razón de reducción a los tres tamaños característicos, se consideraron estos tamaños ya que logran representar la fragmentación, fina, media y gruesa del material quebrado. Cada razón de reducción (R_{20} , R_{50} , R_{80}) se asoció a una razón entre UCS y esfuerzo vertical y se analizaron los resultados, finalmente esto se graficó para poder visualizar de mejor manera si el comportamiento de los datos medidos por los casos de estudio era el esperado.

Posteriormente utilizando la herramienta *solver* que posee Excel se encontraron los parámetros de ajuste α y β , que minimizan el error entre la razón de reducción y el mecanismo de fragmentación secundaria (R_x) incorporado en FlowSim BC, ajustando la relación entre el esfuerzo vertical y el UCS para predecir la fragmentación secundaria. En la Figura 2 se esquematiza la metodología implementada en este trabajo.

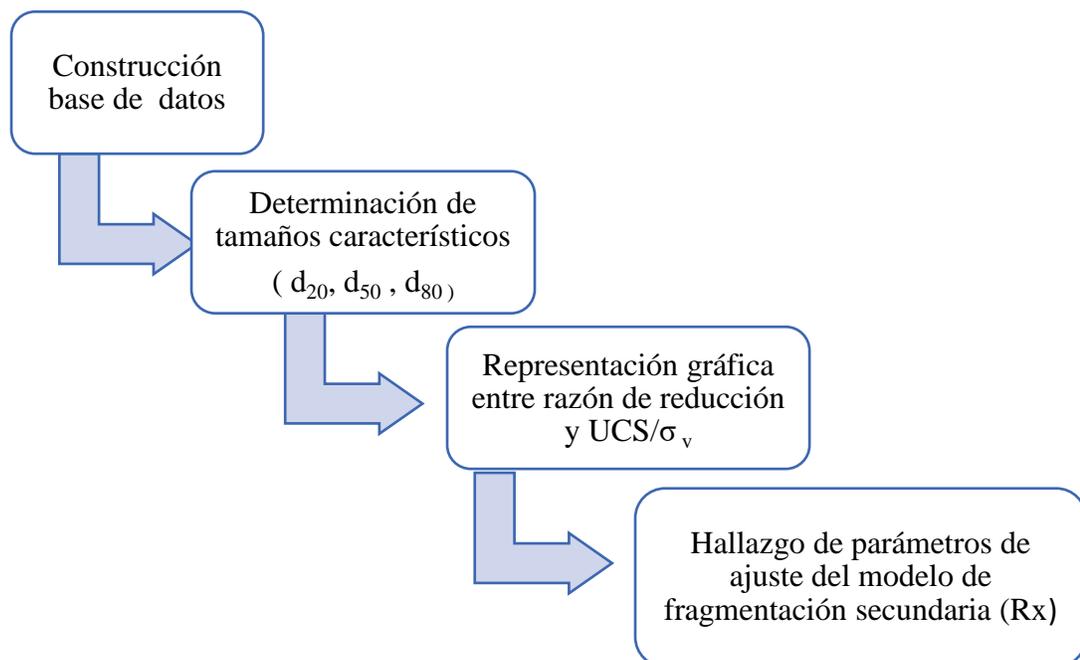


Figura 2. Metodología de trabajo.

2.2 Metodología de fragmentación en minería de caving

La metodología propuesta por Castillo [8] considera la estimación de la fragmentación insitu y primaria en base a una actualización a Laubscher [15], incorporando el efecto de la socavación inicial y el preacondicionamiento. La fragmentación insitu está determinada por la calidad de la roca mediante su RMR y la fragmentación secundaria es estimada con el simulador de flujo FlowSim BC. En la Tabla 1 se señala el porcentaje de roca retenida en cada uno de los intervalos de tamaño para cada clase RMR.

Tabla 1. Distribución granulométrica del RMR [15]

Tamaño	Clasificación (RMR)					
	1	2	3A	3B	4	5
A	0	2.5	7.5	15	27.5	80
B	5	12.5	20	42.5	52.5	15
C	10	27.5	32.5	25	15	5
D	40	35	27.5	12.5	5	0
E	30	15	10	5	0	
F	10	5	2.5	0		
G	5	2.5	0			
Porcentaje > 2 [m ³]	85	58	40	18	5	0

La fragmentación primaria en Laubscher 2000 está en función del stress caving, puesto que si los esfuerzos inducidos en el *cave back* son altos en comparación a la resistencia del macizo rocoso y la resistencia al corte de las estructuras presentes, puede ocurrir el fracturamiento y/o desprendimiento de los bloques de la cavidad. El *stress caving* 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 (1):

$$\beta[\%] = 100\% - 2 * [\%RMR_L(C5)] - [\%RMR_L(C4)] - 0.5 * [\%RMR_L(C3B)] - R \quad (1)$$

Donde:

β [%]: Stress caving efectivo (Si $\beta=100\%$ el *stress caving* es máximo).

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

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

A partir del *stress caving* se genera una matriz de reducción de la fragmentación insitu, la cual se presenta en la Tabla 2 . 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 [8].

Tabla 2. Matriz de reducción para la fragmentación primaria [8].

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

Para cada intervalo se puede determinar los porcentajes máxicos con las ecuaciones indicadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Ecuaciones para determinar los porcentajes máxicos [8].

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

α_i = Porcentaje de material retenido en el intervalo i.

λ_{ij} = Porcentaje de material retenido o cedido del intervalo i al j.

Si $i=j$ significa que el porcentaje es retenido en el intervalo.

Además, se considera una reducción en la fragmentación primaria por la aplicación de preacondicionamiento (PA) mixto, es decir, fracturamiento hidráulico (FH) y fracturamiento con explosivos, o preacondicionamiento solo con explosivos, debido a que la aplicación por si sola de FH no siempre ha reportado una menor fragmentación [1].

2.3 FlowSim BC

FlowSim BC es una herramienta numérica que permite modelar el flujo gravitacional para fines de planificación de Block Caving a largo plazo, que se basa en el enfoque de autómatas celulares.

FlowSim, considera el macizo el material quebrado como una discretización regular de bloques con las siguientes características [14]:

- **Grid/Espacio:** El espacio está representado por bloques de igual tamaño, los cuales se discretizan en bloques que tienen una dimensión de 2x2x2 [m]. Discretizaciones más pequeñas permiten alcanzar un comportamiento más preciso del flujo gravitacional, pero con un consumo de tiempo mucho mayor.
- **Estado:** Cada bloque puede tener uno de estos tres estados: granular, sólido o vacío. En el estado granular, los bloques tienen la capacidad de fluir. En el estado sólido, los bloques no se pueden mover incluso si tuvieran el espacio para hacerlo. Los bloques vacíos tienen densidad

cero y se generan desde los puntos de extracción mediante el proceso de extracción. El estado de un bloque puede cambiar de granular a vacío y de sólido a granular. En FlowSim, un parámetro C_{ijk} representa el estado de cada bloque colocado en una ubicación específica (ijk) dentro de la cuadrícula. C_{ijk} puede obtener el valor de -1, 0 o 1 representando el estado sólido, granular o vacío, respectivamente.

- **Vecindario:** Es la disposición básica de la celda alrededor de una celda vacía donde se aplica la función de transición (Ver Figura 3). La vecindad está conformada por 17 bloques, 9 del nivel $k+1$, y 8 alrededor de la celda en nivel k .
- **Función de transición:** Es la regla matemática local que se aplica durante la simulación para el movimiento de bloques. La función de transición para el flujo gravitacional se define por la probabilidad de flujo usando la siguiente ecuación:

$$P_i = \frac{d_i^{-n} * f_{50k}^{-m}}{\sum_{k=1}^9 d_k^{-n} * f_{50k}^{-m}} \quad (2)$$

Donde:

dk : distancia entre el bloque vacío y los bloques en el nivel superior.

n : constante de ajuste relacionada con el comportamiento general del flujo de la roca. El aumento de este conduce a una zona de extracción/movimiento más estrecho.

m : parámetro de flujo preferencial relacionado con el potencial de migración de finos. Cuanto mayor sea el valor de m , mayor es la probabilidad de migración.

f_{50} : corresponde al tamaño bajo el cual se encuentra el 50% de la muestra.

La Figura 3 ilustra el descenso del material granular a través del intercambio con vacíos que van subiendo a medida que el material va siendo extraído de la base.

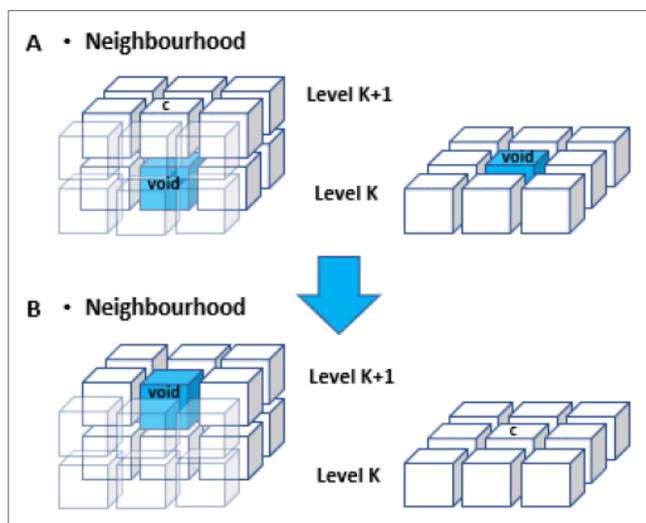


Figura 3. Vista esquemática de los bloques de la vecindad y el movimiento ascendente de la celda vacía. (A) Antes de la extracción; (B) Después de la extracción [14].

Cabe señalar que la función de transición solo se aplica si hay un número mínimo de vacíos ($C_v =$ Condición de vacíos). Este parámetro es ingresado por el usuario y puede tomar un rango de valores entre 0 y 9, permitiendo restringir el proceso de difusión de vacíos. Si $C_v = 0$, los vacíos migrarán hacia arriba sin restricción, en cambio, si $C_v = 9$ los vacíos no podrán ascender a un nivel $k+1$, ya que se está pidiendo la condición de que todos los bloques del nivel $k+1$ sean vacíos. Este mecanismo ha demostrado replicar la evolución de la zona de movimiento y además está relacionado con el factor de esponjamiento y porosidad.

Tabla 4. Resumen de los principales parámetros de flujo de FlowSim [14].

Parámetros de FlowSim BC	Función que cumple en la simulación	Valores típicos que pueden tomar, de acuerdo a calibraciones
n	A medida que n aumenta el diámetro de la zona de extracción se reduce, por lo tanto, n se relaciona con la fragmentación del material.	n (grueso, $d_{80} = 1\text{m}$) = 4 n (fino, $d_{80} < 0.3\text{m}$) = 10-15
m	A medida que aumente el valor de m la probabilidad de una migración de finos o un flujo preferencial aumentará.	m = 0; sin flujo preferencial m = 15; en caso de una clara migración preferencial o presencia de finos.

Cv	Está relacionado con el factor de esponjamiento de la roca hundida. Un pequeño cv significa una pequeña porosidad y un gran potencial para el movimiento horizontal debido al rilling.	Cv se debe ajustar de acuerdo con el factor de esponjamiento (porosidad) y <i>air gap</i> .
-----------	--	---

2.4 Mecanismo de fragmentación secundaria integrado en FlowSim BC

El modelo de conminución propone una metodología para determinar la reducción del tamaño d_{50} asociado a cada celda, con el fin de replicar la fragmentación que sufre el material quebrado cuando fluye hacia los puntos de extracción [15]. Para lograr esto, se define la razón de reducción, R_{50} , con la ecuación (3):

$$R_{50} = \frac{d_{50,i} - d_{50,f}}{d} \quad (3)$$

Donde el R_{50} representa la reducción del tamaño medio que sufre un bloque a medida que recorre una distancia d (medida en metros), $d_{50,i}$ y $d_{50,f}$ corresponden al tamaño medio inicial y final (medidos en cm), así las unidades del R_{50} son cm/m. Conocida la razón de reducción R_{50} para una celda, es posible determinar la fragmentación que sufrirá un bloque a través de la disminución de su d_{50} , cabe mencionar que la razón de reducción se puede aplicar para cualquier tamaño característico [16].

Para este trabajo se considera el modelo de conminución desarrollado para predecir la fragmentación secundaria en Block Caving [7,16], este modelo de conminución esta incorporado en la herramienta FlowSim BC. A escala experimental ha sido posible relacionar el R_{50} con la resistencia y esfuerzos verticales de la roca.

Tal como se mencionó FlowSim BC tiene incorporado un mecanismo de fragmentación secundaria que se basa en la metodología propuesta por Gómez et al. [7] la cual se calibró con experimentos de flujo confinado, de estos experimentos se obtuvo una buena correlación entre la razón de reducción R_{50} y la razón entre la resistencia a la compresión uniaxial y el esfuerzo vertical, esto se puede observar en la Figura 4.

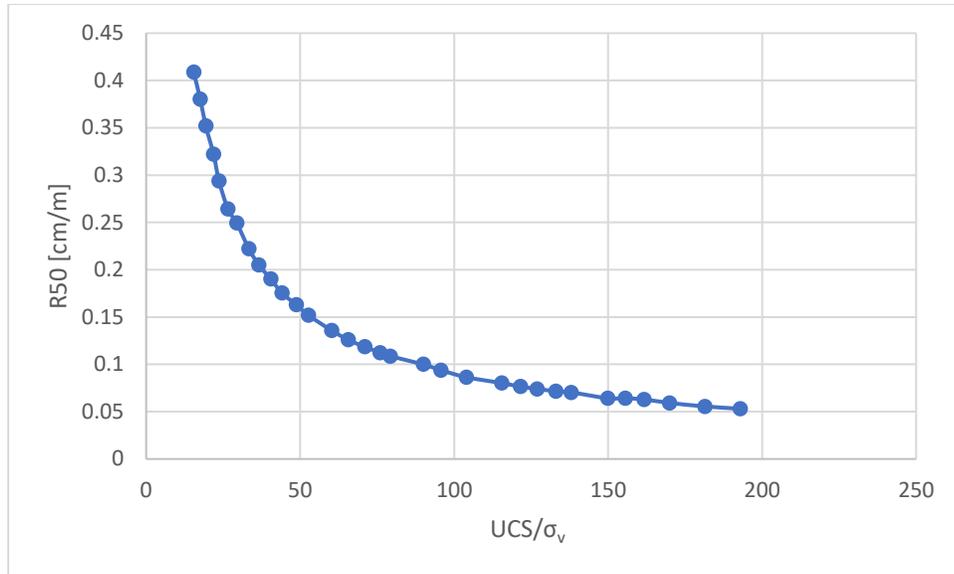


Figura 4. Curva que relaciona R_{50} (datos de laboratorio) con la razón UCS/σ_v .

De la Figura 4 es posible observar, que al disminuir la carga vertical disminuye el R_{50} , disminuyendo la fragmentación de la roca expresada a través del R_{50} . Por otro lado, al aumentar la resistencia de la roca, cuantificada a través del UCS, también disminuye el R_{50} , por lo tanto, se genera menos fragmentación.

Posteriormente y en base a los resultados obtenidos en laboratorio, Gómez [16] propuso una simplificación del modelo de fragmentación secundaria, dada por la ecuación (4), que representa la fragmentación de la partícula a medida que desciende a través de la columna de extracción.

$$Rx = \alpha * \left(\frac{UCS}{\sigma_v}\right)^\beta \quad (4)$$

Dónde

Rx: Razón de reducción [cm/m]

σ_v : Esfuerzo vertical [MPa]

UCS: Resistencia a la compresión uniaxial [MPa]

α, β : Parámetros experimentales

El esfuerzo vertical medio puede ser calculado mediante la ecuación de Janssen [18]:

$$\sigma_v = \frac{Rh * \rho_b * g}{\tan \emptyset_w * k} \left(1 - \exp \frac{-k * \tan \emptyset_w * z}{Rh} \right) \quad (5)$$

Donde:

Rh: Radio hidráulico del área extraíble [m]

ρ_b : Densidad esponjada [ton/m³]

g: Aceleración de gravedad [m/s²]

\emptyset_w : Ángulo de fricción de las paredes de la columna de mineral [°].

z: Profundidad del mineral quebrado desde la superficie al nivel de producción [m]

k: Razón entre esfuerzo horizontal sobre esfuerzo vertical

Al aplicar el R_{50} en el simulador de flujo, va disminuyendo el d_{50} de cada celda, y por ende la probabilidad de fluir de estas. Para optimizar los tiempos de simulación, la fragmentación de cada celda se aplica cuando la celda a recorrido una cierta distancia mínima de activación, d_A , la cual debe ser calibrada.

3. Antecedentes del caso de estudio

Para este trabajo se consideraron cuatro sectores de la mina El Teniente que son explotados por el método de panel caving los cuales son Diablo Regimiento en la que se reconoce la unidad litológica correspondiente al Complejo Máfico El Teniente (CMET), RENO (Reservas Norte) que se divide en dos sectores, RENO HW y RENO FW sectores que tiene una litología compuesta por intrusivos básicos, pórfido dacítico y diorítico, brecha hidrotermal del anhidrita y por último Teniente 4 Sur litología tonalita [19]. En la Figura 5 se observa la ubicación de los sectores de estudio.

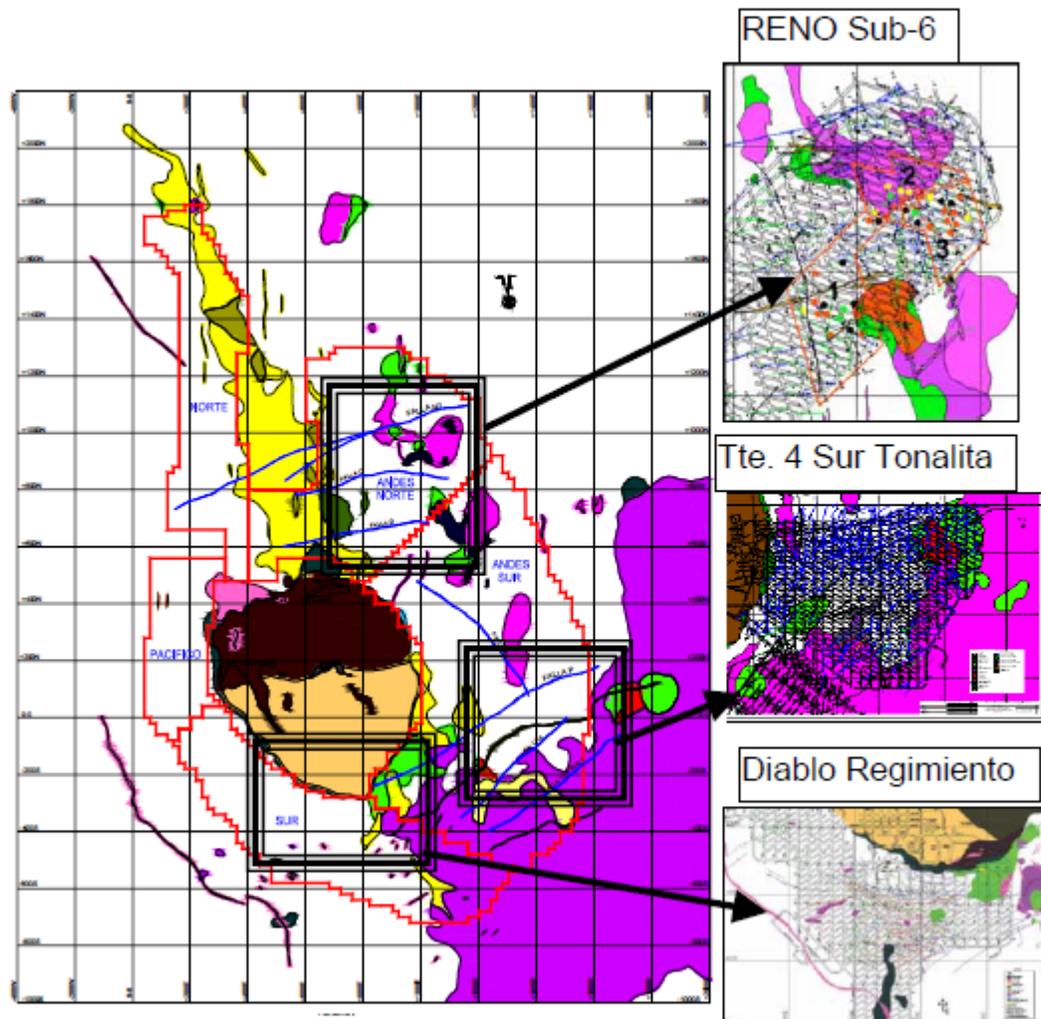


Figura 5. Sectores en estudio: Reservas Norte Sub-6, Teniente 4 Sur Tonalita y Diablo Regimiento [19].

Para cada sector se recopiló la información necesaria para llevar a cabo el trabajo, en la Tabla 5 se detalla la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), el esfuerzo vertical promedio y la distancia recorrida por las partículas. Las distancias detalladas en la tabla se utilizaron por sobre otras distancias

debido a que con estos valores se obtenían las mayores diferencias entre el tamaño inicial y final de la partícula, es decir, las partículas al recorrer estas distancias mayor reducción sufrieron en su tamaño.

Tabla 5. Base de datos con la resistencia a la compresión uniaxial, distancia recorrida [19] y esfuerzo vertical promedio [20] de cada sector estudiado.

Mina	UCS [MPa]	Esfuerzo vertical promedio [MPa]	Distancia recorrida [m]
Diablo Regimiento	116	2.0	90
Reno FW	110	2.5	400
Reno HW	115	2.5	375
Teniente 4 Sur	125	4.4	250

3.1 Inspección visual en puntos de extracción

La inspección visual que permitió las mediciones de fragmentación se realizó solo en los puntos que se encontraban operativos, en la inspección se recogió la distribución porcentual de tamaños de colpas con la ayuda de un Metro de Carpintero que sirve como referencia grafica de los tamaños (Figura 6) [19]. De esta forma se consideran cuatro rangos de tamaños de clasificación para el eje mayor de cada colpa:

- % < 25 [cm]
- % entre 25 [cm] y 1 [m]
- % entre 1 y 1.5 [m]
- % > 1.5 [m]



Figura 6. Punto de extracción operativo y personal con Metro de Carpintero [21].

Los datos de fragmentación medida necesarios para calcular los tamaños característicos (d_{20} , d_{50} y d_{80}) según la distancia requerida se encuentran detallados en el Anexo A. Los tamaños característicos fueron calculados mediante interpolación lineal (Anexo C) y estos se encuentran detallados en el Anexo D.

4. Resultados y Análisis

4.1 Análisis individual con respecto a UCS y esfuerzo vertical

Con la base de datos recopilada para cada sector, se calcularon los tamaños característicos iniciales y finales de cada sector. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Tamaños característicos iniciales y finales utilizados.

Sector	Tamaños característicos iniciales y finales [cm]					
	d _{20i}	d _{20f}	d _{50i}	d _{50f}	d _{80i}	d _{80f}
RENO Fw	21.83	10.22	78.63	27.05	136.23	82.88
RENO Hw	19.17	6.93	62.07	17.34	131.87	46.24
Diablo Regimiento	18.05	14.29	67.56	57.14	137.36	116.67
Teniente 4 Sur	23.70	17.54	71.22	65.93	165.97	162.66

En la Tabla 6 se puede observar que el sector RENO Fw es el que mayor reducción tienen en el d₅₀ con una diferencia de 51.58 [cm] entre d₅₀ inicial y final, mientras que el sector RENO Hw es el que mayor reducción tiene en el d₂₀ y d₈₀ con una diferencia de 12.24 [cm] y 85.62 [cm] respectivamente entre los tamaños iniciales y finales.

Posteriormente y con los tamaños característicos obtenidos se obtuvieron las razones de reducción R₂₀, R₅₀ y R₈₀ lo que permitió realizar el análisis con respecto al comportamiento de estas razones según UCS y esfuerzo vertical presente en cada sector.

El comportamiento esperado con respecto al valor de la resistencia a la compresión uniaxial es que mientras mayor sea este, menor es la reducción del tamaño de las partículas. La Tabla 7 muestra los resultados de la razón de reducción obtenida para cada sector con su respectivo valor de UCS y esfuerzo vertical, σ_v .

Tabla 7. Razones de reducción (R₂₀, R₅₀ y R₈₀) para cada sector con su valor de UCS y esfuerzo vertical respectivo.

Sector	R ₂₀ [cm/m]	R ₅₀ [cm/m]	R ₈₀ [cm/m]	UCS [MPa]	σ_v [MPa]
RENO Fw	0.029	0.129	0.133	110	2.5
RENO Hw	0.033	0.119	0.228	115	2.5
Diablo Regimiento	0.042	0.116	0.230	116	2
Teniente 4 Sur	0.025	0.021	0.013	125	4.4

Los datos de la tabla muestran que en el sector con un mayor UCS (125 [MPa]) se tiene la menor reducción del tamaño de las partículas. Pero por el contrario el sector con un menor UCS no tiene la mayor reducción de tamaño en las partículas como era de esperarse. Esto se puede observar claramente en la Figura 7.

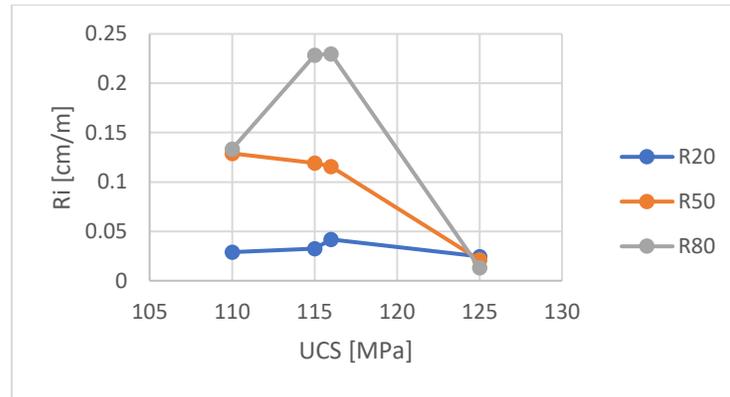


Figura 7. Relación entre razón de reducción y UCS

Por otra parte, el comportamiento esperado con respecto al esfuerzo vertical consiste en que a mayor valor de esfuerzo vertical mayor es la reducción del tamaño de las partículas, sin embargo, ocurre que en el sector con un mayor esfuerzo vertical de 4.4 [MPa] se tienen las menores reducciones de tamaño en vez de las mayores. La Figura 8 representa esta información mostrando que no hay una correlación clara entre los esfuerzos verticales y la reducción de tamaño de las partículas.

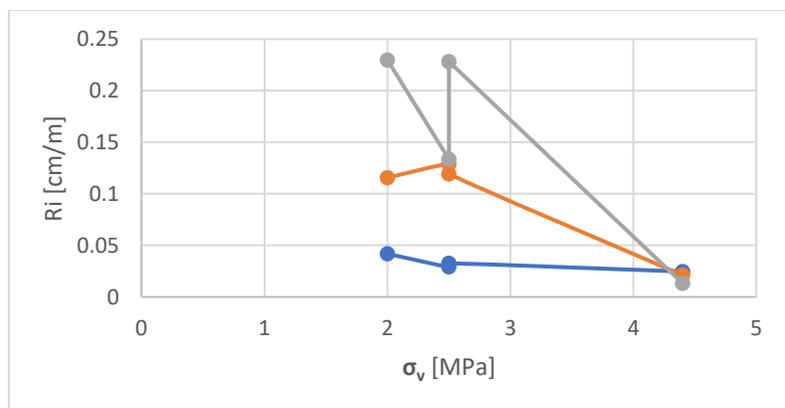


Figura 8. Relación entre razón de reducción y esfuerzo vertical (σ_v).

4.2 Análisis del comportamiento de las razones de reducción y la razón UCS/ σ_v

Para el siguiente análisis se determinó la razón entre la resistencia a la compresión uniaxial y el esfuerzo vertical para cada sector estudiado. El comportamiento esperado de ambos parámetros en conjunto es que mientras mayor es la razón UCS/ σ_v menor es la razón de reducción, los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8. Razones de reducción para cada sector con su razón UCS/ σ_v respectivo.

Sector	R₂₀ [cm/m]	R₅₀ [cm/m]	R₈₀ [cm/m]	UCS/σ_v
Diablo Regimiento	0.042	0.116	0.230	58
RENO FW	0.029	0.129	0.133	44
RENO HW	0.033	0.119	0.228	46
Teniente 4 Sur	0.025	0.021	0.013	28

Se deduce de la Tabla 8 que el comportamiento esperado no se cumple para todas las razones de reducción (R₂₀, R₅₀, R₈₀). Los datos muestran que el sector Teniente 4 Sur tiene la menor razón entre UCS y esfuerzo vertical y así mismo la menor razón de reducción tanto en R₂₀, R₅₀ y R₈₀, esto se debe a que el sector Teniente 4 Sur a pesar de tener el mayor valor de UCS también tiene el mayor valor esfuerzo vertical, considerando que el valor del esfuerzo vertical puede estar sobreestimado se prefirió descartar el sector Teniente 4 Sur y analizar el resto de los sectores.

En cuanto al R₂₀ y R₈₀ del resto de los sectores se tiene que no cumplen el comportamiento esperado ya que por ejemplo Diablo Regimiento teniendo el mayor valor en la razón UCS/ σ_v no tiene la menor reducción que es lo esperado al tener el mayor valor de UCS. En el caso contrario el sector RENO Fw que tiene el menor valor en la razón UCS/ σ_v no tiene la mayor reducción a pesar de tener el menor valor de UCS. Los resultados resumidos en la Tabla 8 se pueden observar en la Figura 9.

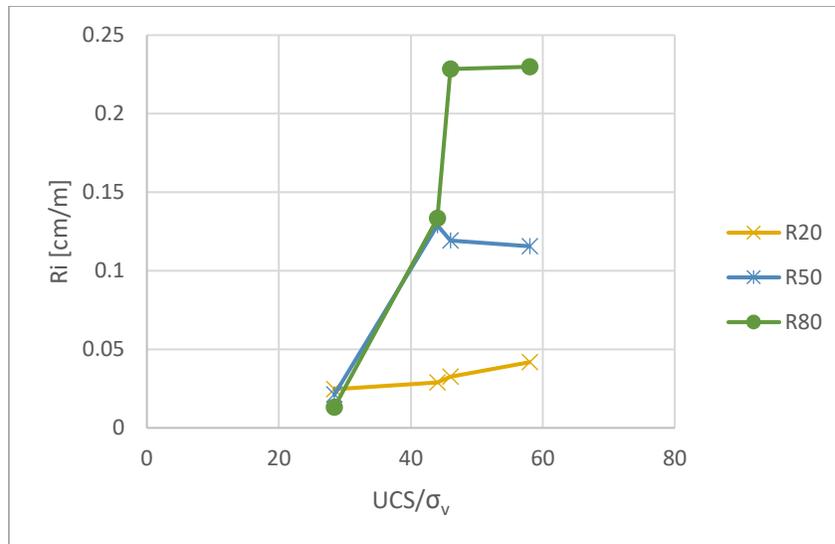


Figura 9. Razones de reducción (R_{20} , R_{50} , R_{80}) versus UCS/σ_v .

En la Figura 9 se observa claramente que a menor valor de la razón UCS/σ_v menor valor de la razón de reducción, comportamiento que corresponde al sector Teniente 4 Sur que fue descartado del estudio.

Sin embargo, cabe destacar que los valores obtenidos para R_{20} , R_{50} , R_{80} si son los esperados para cada sector por individual en cuanto al tamaño de las partículas, es decir, el R_{20} tiene un valor menor que el R_{50} y este a su vez tiene un valor menor que el R_{80} , esto tiene sentido ya que se espera que las partículas más grandes sean las que más se reduzcan en tamaño.

Una vez eliminado este sector se trabajó con los sectores restantes, con los que se obtuvo el comportamiento esperado solo para la razón de reducción correspondiente al tamaño característico d_{50} , obteniéndose la Figura 10, donde se observa claramente que mientras mayor es el valor de la razón UCS/σ_v menor es el valor de la razón de reducción.

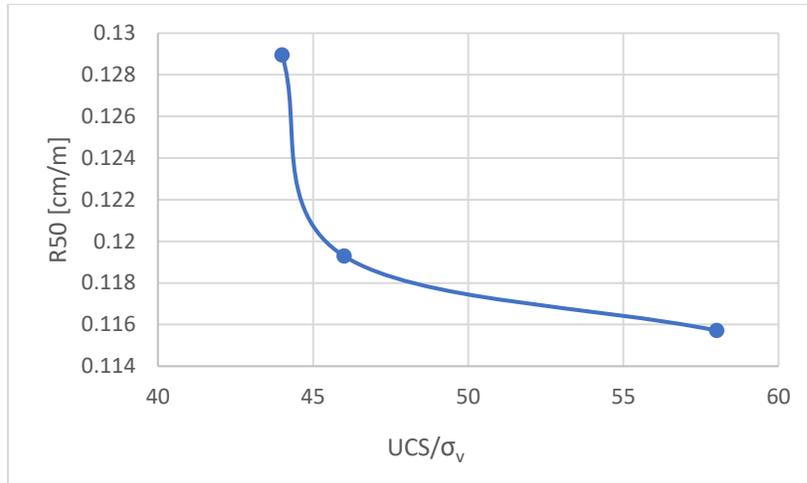


Figura 10. Razón de reducción (R₅₀) versus UCS/σ_v

Cabe destacar que la menor reducción de R₅₀ corresponde al sector donde las partículas han recorrido una menor distancia, 90 [m], correspondiente a la mina Diablo Regimiento y que a pesar de que en los otros sectores las partículas recorren distancias casi iguales (400 y 375 [m]), si tiene más relevancia el valor de UCS ya que el sector que mayor reducción tiene corresponde al sector RENO Fw que tiene el menor valor de UCS (110 [MPa]).

El grafico de la Figura 10 fue comparado con el obtenido con los ensayos de laboratorio (Figura 4) dando como resultado la Figura 11, donde si bien el resultado obtenido solo comprende un rango de los valores probados en laboratorio, se obtiene que a una menor razón entre UCS y esfuerzo vertical se tiene una mayor reducción en el tamaño de las partículas.

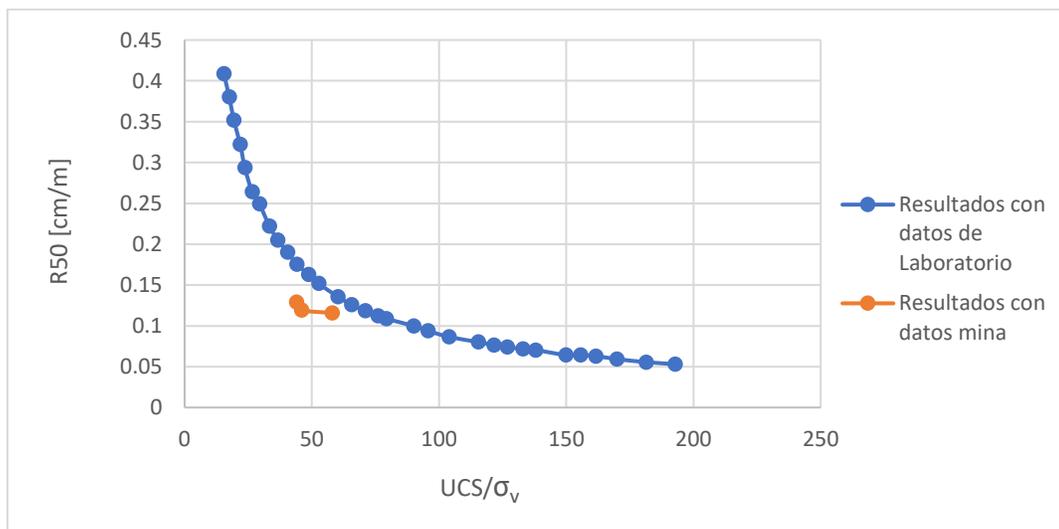


Figura 11. Curva obtenida con datos de laboratorio versus Curva obtenida con datos mina.

4.3 Parámetros de ajuste del modelo de fragmentación secundaria

Una vez obtenida la correlación requerida se obtienen los valores que ajustan el modelo de fragmentación secundaria incorporado en FlowSim, para obtener el menor error entre la razón de reducción R50 y el modelo de fragmentación secundaria aplicado en FlowSim, estos parámetros se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros de ajuste del mecanismo de fragmentación secundaria (Rx)

Sector	α	β	Error [cm/m]
Diablo Regimiento	0.11524659	0.001	2.4249E-09
RENO Fw	0.12846498	0.001	2.121E-08
RENO Hw	0.11883584	0.001	2.8089E-08

Se tiene que beta toma el menor valor posible de 0.001 para los tres sectores estudiados y por lo tanto el valor alfa toma valores muy próximos a los obtenidos con la razón de reducción R₅₀ por ende el error entre la razón de reducción y el modelo de fragmentación incorporado en FlowSim es bajo en los tres sectores logrando un promedio de 1.724E-08.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Tras el análisis realizado se puede concluir que este cumple con los objetivos generales y específicos del trabajo. Se construyó una base de datos que permitió obtener parámetros fundamentales para la realización de este trabajo y con el análisis realizado se concluye que la correlación entre la razón de reducción y la razón entre UCS y esfuerzo vertical de los datos minas, muestra el mismo comportamiento que se obtuvo con los ensayos de laboratorio, si bien no se obtuvo el comportamiento esperado para todas las razones de reducción, si se obtuvo para la razón de R_{50} , con tres de los cuatros sectores estudiados. Este factor permite conocer la fragmentación que sufrirá una partícula a través de la disminución en el tamaño característico d_{50} que a su vez influye directamente en la función de transición que rige a FlowSim BC. Validándose así el modelo de fragmentación secundaria para los datos considerados.

Hay factores como la distancia que recorren las partículas, o la estimación del esfuerzo vertical que pueden impactar más los resultados obtenidos, sin embargo, de este trabajo se puede concluir que el valor de UCS tiene una mayor relevancia que la distancia recorrida en la reducción del tamaño de las partículas, como fue el caso en el sector RENO Fw y Hw ya que las partículas recorrían distancia casi iguales y tenían el mismo valor de esfuerzo vertical, pero diferían en su valor de UCS y por ende el sector con un menor UCS obtuvo una mayor reducción en el tamaño de las partículas.

En cuanto a los parámetros de ajuste del modelo de fragmentación obtenidos para estos casos de estudio se puede concluir que beta toma el menor valor posible, logrando así que el parámetro alfa tome valores muy cercanos a los obtenidos con la razón de reducción minimizando el error entre ambos.

Finalmente, se puede concluir entonces que el modelo permite representar el comportamiento de la fragmentación para el tamaño característico d_{50} , para los tres sectores que fueron validados y que, si bien varios factores pueden influir en la reducción del tamaño de las partículas, el UCS es uno de los principales.

5.2 Recomendaciones

Si bien en el presente trabajo logró validarse el modelo de fragmentación secundaria para un caso de estudio se tienen las siguientes recomendaciones:

- Llevar a cabo el análisis con datos de minas que tengan otras condiciones, tipos de roca y una amplia base de datos de fragmentación medida que contenga tanto información de partículas finas como de partículas gruesas con el fin de hacer la validación para los tamaños característicos d_{20} y d_{80} .
- Como se mencionó anteriormente el esfuerzo vertical puede influir en los resultados del análisis es por esto por lo que se recomienda contar con información confiable para determinar los esfuerzos verticales de los casos de estudio de forma más precisa.

6. Referencias

- [1] Codelco, “*Preacondicionamiento del macizo rocoso*”. 2010.
- [2] R. Castro, R. Trueman, A. Halim, “A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model”, 2007.
- [3] E. T. Brown, “Block Caving Geomechanics,” Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Australia, 2002.
- [4] D. Laubscher, “Cave Mining – The state of the art,” International Journal of Geomechanics and Mining Sciences, 1994.
- [5] E. C. Wellman, S. Annavarapu, R. W. Pratt, and D. E. Nicholas, “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., 2012.
- [6] M. E. Pierce, “A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines,” University of Queensland, 2009.
- [7] R. Gómez, R. Castro, A. Casali, S. Palma, and A. Hekmat, “A comminution model for secondary fragmentation assessment for block caving,” Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017.
- [8] J. Castillo, “Desarrollo de metodología de fragmentación en minería de caving,” Universidad de Concepción, 2021.
- [9] E. Oñate *et al*, "Avances en el desarrollo de los Métodos de Elementos Discretos y de Elementos Finitos para el análisis de problemas de fractura." *Anales de Mecánica de la Fractura*. Vol. 22. 2005.
- [10] D. Systèmes, “PCBC Computer software.” 2018. [Online]. Available:
<https://www.3ds.com/products-services/geovia/products/pcbc/>
- [11] M. Valencia,” Desarrollo e implementación de flowsim para su aplicación en minería de Block/panel caving”, Universidad de Chile, 2013.
- [12] R. Castro,” Study of the mechanism of gravity flow for block caving” Ph. D thesis, University of Queensland, Australia, 2006.
- [13] J. Kozicki, J. Tejchman, “Application of a cellular automaton to simulations of granular flow in

silos”, *Granular Matter* 7, 45–54, 2005.

- [14] R. Castro, L. Arancibia, D. Guzmán, and J. Henriquez, “Experiments and simulation of gravity flow in Block Caving through FlowSim,” *Presented at Caving 2018, Vancouver, Canada, October 15-18, 2018*.
- [15] D. H. Laubscher, “Secondary fragmentation,” in *Block cave manual*, 2000.
- [16] R. Gómez, “Gravity flow and fragmentation modelling in block caving”, Universidad de Chile, 2022.
- [17] R. Gómez, E. Labbé. “Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: La actual metodología aplicada en Chile del “block caving”. *Bol. Inst. Geol*, 2019, vol. 130, p. 181-198.
- [18] Janssen, A. Getreidedruck in Silozellen, *Z. Ver. Dt. Ing.* 39, pp. 1045–1049, 1895.
- [19] J. P. Hurtado, J. Pereira, R. Campos, “Informe final Backanalysis de fragmentación minas: Diablo Regimiento, Reno y Teniente 4 sur Tonalita”, CODELCO, 2007.
- [20] V. Sanhueza, “Estudio de colgaduras en minería de block caving” Universidad de Concepción, 2022.

7. Anexos

Anexo A: Distribución granulométrica según altura de extracción de cada sector

Tabla 10. Distribución granulométrica según altura de extracción sector RENO Fw [19].

Tamaño [m]	Altura de extracción [m]															
	0-25m	25-50	50-75	75-100	100-125	125-150	150-175	175-200	200-225	225-250	250-275	275-300	300-325	325-350	350-375	375-400
2.5	12.7	8	13.3	7.3	4	12.4	9.7	7	2.3	3.2	10.7	4	2	2.2	1.6	1.1
1.5	26.5	25.1	24	23.9	16.7	18.2	17.6	17	17.5	8.2	15	10.4	18.5	11.7	6.1	9.7
1	37.9	43	42.3	44.2	41.8	42.9	49.5	56	50.2	51.8	48.6	44.5	50	48.5	38.9	40.3
0.25	22.9	23.9	20.4	24.6	37.5	26.5	23.2	20	30	36.8	25.7	41.1	29.5	37.6	53.4	48.9

Tabla 11. Distribución granulométrica según altura de extracción sector RENO Hw [19].

Tamaño [m]	Altura de extracción [m]															
	0-25m	25-50	50-75	75-100	100-125	125-150	150-175	175-200	200-225	225-250	250-275	275-300	300-325	325-350	350-375	
2.5	13.1	12.6	8.3	6.5	5.8	7.1	3.4	3.8	3.2	2	2.5	1.4	0	0	0	
1.5	19.3	21.7	14.4	15.8	14.2	15.1	9	15.7	9.5	7.8	6.2	4.6	1.9	0	0	
1	35	38.8	38.8	39.8	39.8	40.5	32.7	42	39.3	40.1	30.4	29.9	23.8	26.4	27.9	
0.25	32.6	26.9	38.5	37.9	40.2	37.3	54.9	38.5	48	50.1	60.9	64.1	74.3	73.6	72.1	

Tabla 12. Distribución granulométrica según altura de extracción sector Diablo Regimiento [19].

Tamaño [m]	Altura de extracción [m]																		
	0-5m	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	60-65	65-70	70-75	75-80	80-85	85-90	90-95
2.5	13	15.6	24.5	27.8	24.2	26.7	27.1	26.7	22.3	21.7	20.8	19	16.3	18.1	11.3	12.8	8.1	16.4	0
1.5	12.9	17.4	18.7	19.3	20.2	20.9	20.7	18.7	17.7	18.3	17.3	16.6	19.2	19.9	15.9	16.2	16.4	19.4	30
1	33.9	39.3	29.4	27	31.2	31.7	27	30.8	37.1	36.6	36.3	41.7	41.3	43.9	52.2	49.3	52.9	44.6	35
0.25	40.2	27.7	27.4	25.9	24.4	20.7	25.2	23.8	22.9	23.4	25.6	22.7	23.2	18.1	20.6	21.7	22.6	19.6	35

Tabla 13. Distribución granulométrica según altura de extracción sector Teniente 4 Sur [19].

Tamaño [m]	Altura de extracción [m]					
	0-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
2.5	19.6	23.8	26	15.6	15	22.9
1.5	7	8.2	8.8	10.3	5	9.2
1	42.7	46.9	41.7	42.6	33.8	39.4
0.25	30.7	21.1	23.5	31.5	46.2	28.5

Anexo B: Distribución granulométrica acumulada de cada sector

Tabla 14. Distribución granulométrica acumulada sector RENO Fw

Tamaño [m]	Altura de extracción [m]															
	0-25	25-50	50-75	75-100	100-125	125-150	150-175	175-200	200-225	225-250	250-275	275-300	300-325	325-350	350-375	375-400
2.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1.5	87.3	92	86.7	92.7	96	87.6	90.3	93	97.7	96.8	89.3	96	98	97.8	98.4	98.9
1	60.8	66.9	62.7	68.8	79.3	69.4	72.7	76	80.2	88.6	74.3	85.6	79.5	86.1	92.3	89.2
0.25	22.9	23.9	20.4	24.6	37.5	26.5	23.2	20	30	36.8	25.7	41.1	29.5	37.6	53.4	48.9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 15. Distribución granulométrica acumulada sector RENO Hw

Tamaño [m]	Altura de extracción [m]															
	0-25m	25-50	50-75	75-100	100-125	125-150	150-175	175-200	200-225	225-250	250-275	275-300	300-325	325-350	350-375	
2.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
1.5	86.9	87.4	91.7	93.5	94.2	92.9	96.6	96.2	96.8	98	97.5	98.6	100	100	100	
1	67.6	65.7	77.3	77.7	80	77.8	87.6	80.5	87.3	90.2	91.3	94	98.1	100	100	
0.25	32.6	26.9	38.5	37.9	40.2	37.3	54.9	38.5	48	50.1	60.9	64.1	74.3	73.6	72.1	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla 16. Distribución granulométrica acumulada sector Diablo Regimiento

Tamaño [m]	Altura de extracción [m]																		
	0-5m	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	60-65	65-70	70-75	75-80	80-85	85-90	90-95
2.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1.5	87	84.4	75.5	72.2	75.8	73.3	72.9	73.3	77.7	78.3	79.2	81	83.7	81.9	88.7	87.2	91.9	83.6	100
1	74.1	67	56.8	52.9	55.6	52.4	52.2	54.6	60	60	61.9	64.4	64.5	62	72.8	71	75.5	64.2	70
0.25	40.2	27.7	27.4	25.9	24.4	20.7	25.2	23.8	22.9	23.4	25.6	22.7	23.2	18.1	20.6	21.7	22.6	19.6	35
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 17. Distribución granulométrica acumulada sector Teniente 4 sur

Tamaño [m]	Altura de extracción [m]					
	0-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
2.5	100	100	100	100	100	100
1.5	80.4	76.2	74	84.4	85	77.1
1	73.4	68	65.2	74.1	80	67.9
0.25	30.7	21.1	23.5	31.5	46.2	28.5
0	0	0	0	0	0	0

Anexo C: Cálculo para la obtención de tamaños característicos

Para la determinación de los tamaños característicos se utilizó interpolación lineal, método que utiliza dos puntos conocidos (x_1, y_1) y (x_2, y_2) para aproximar el valor de un punto que se encuentra entre los dos puntos conocidos, la interpolación está dada por la siguiente ecuación:

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad (6)$$

Para ejemplificar el cálculo de d_{50} se consideran los puntos: $(22.9, 0.25)$ y $(60.8, 1)$ correspondientes al sector RENO Fw y por ende la ecuación (6) queda como sigue:

$$y = 0.25 + \frac{1 - 0.25}{60.8 - 22.9} (50 - 22.9) = 0.78 [m]$$

Del mismo modo se calculan los tamaños característicos d_{20} y d_{80} para cada sector.

Anexo D: Tamaños característicos a partir de distribución granulométrica

Tabla 18. Tamaños característicos sector RENO Fw

Tamaño característico [m]	Altura de extracción [m]															
	0-25	25-50	50-75	75-100	100-125	125-150	150-175	175-200	200-225	225-250	250-275	275-300	300-325	325-350	350-375	375-400
d ₂₀	0.22	0.21	0.25	0.20	0.13	0.19	0.22	0.25	0.17	0.14	0.19	0.12	0.17	0.13	0.09	0.10
d ₅₀	0.79	0.71	0.77	0.68	0.47	0.66	0.66	0.65	0.55	0.44	0.63	0.40	0.56	0.44	0.23	0.27
d ₈₀	1.36	1.26	1.36	1.23	1.02	1.29	1.21	1.12	1.00	0.88	1.19	0.91	1.01	0.74	0.76	0.83

Tabla 19. Tamaños característicos sector RENO Hw

Tamaño característico [m]	Altura de extracción [m]															
	0-25	25-50	50-75	75-100	100-125	125-150	150-175	175-200	200-225	225-250	250-275	275-300	300-325	325-350	350-375	
d ₂₀	0.19	0.19	0.13	0.09	0.12	0.13	0.09	0.08	0.10	0.10	0.15	0.08	0.07	0.07	0.07	
d ₅₀	0.62	0.70	0.47	0.48	0.43	0.49	0.23	0.46	0.29	0.25	0.20	0.20	0.17	0.17	0.17	
d ₈₀	1.32	1.33	1.09	1.07	1.00	1.07	0.83	0.99	0.86	0.81	0.72	0.65	0.43	0.43	0.46	

Tabla 20. Tamaños característicos sector Diablo Regimiento

Tamaño característico [m]	Altura de extracción [m]																		
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	60-65	65-70	70-75	75-80	80-85	85-90	90-95
d ₂₀	0.12	0.18	0.18	0.19	0.20	0.24	0.20	0.21	0.22	0.21	0.20	0.21	0.22	0.28	0.24	0.23	0.22	0.25	0.14
d ₅₀	0.47	0.68	0.83	0.92	0.87	0.94	0.94	0.89	0.80	0.80	0.75	0.73	0.74	0.79	0.67	0.68	0.64	0.76	0.57
d ₈₀	1.23	1.37	1.68	1.78	1.67	1.75	1.76	1.75	1.60	1.58	1.54	1.47	1.40	1.45	1.23	1.28	1.14	1.41	1.17

Tabla 21. Tamaños característicos sector Teniente 4 sur

Tamaño característico [m]	Altura de extracción [m]					
	0-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300
d ₂₀	0.16	0.24	0.21	0.16	0.11	0.18
d ₅₀	0.59	0.71	0.73	0.57	0.33	0.66
d ₈₀	1.47	1.66	1.73	1.28	1.00	1.63

Anexo E: Ejemplo de cálculo de la razón de reducción

La razón de reducción en este trabajo está dada por la ecuación (3), para el cálculo de este parámetro se toma como dato el tamaño característico d_{50} del sector RENO Fw, el cual se detalla en la Tabla 22 junto con la distancia que recorre la partícula.

Tabla 22. Datos para el cálculo de la razón de reducción.

d_{50i} [cm]	d_{50f} [cm]	HOD
78.63	27.05	400

Finalmente, la ecuación (3) queda como sigue:

$$R_{50} = \frac{78.63 - 27.05}{400} = 0.13 \left[\frac{cm}{m} \right]$$

Este procedimiento se repite para cada caso de estudio, así como también para los tamaños característicos d_{20} y d_{80} .

Anexo F: Comparación entre curva con datos de laboratorio y curva con datos mina

Considerando los resultados obtenidos del análisis de los cuatro sectores estudiados se obtiene la Figura 12, donde se observa que si al considerar el sector Teniente 4 Sur no se cumple el comportamiento esperado ya que con la menor razón de UCS/ σ_v no se obtiene la mayor razón de reducción.

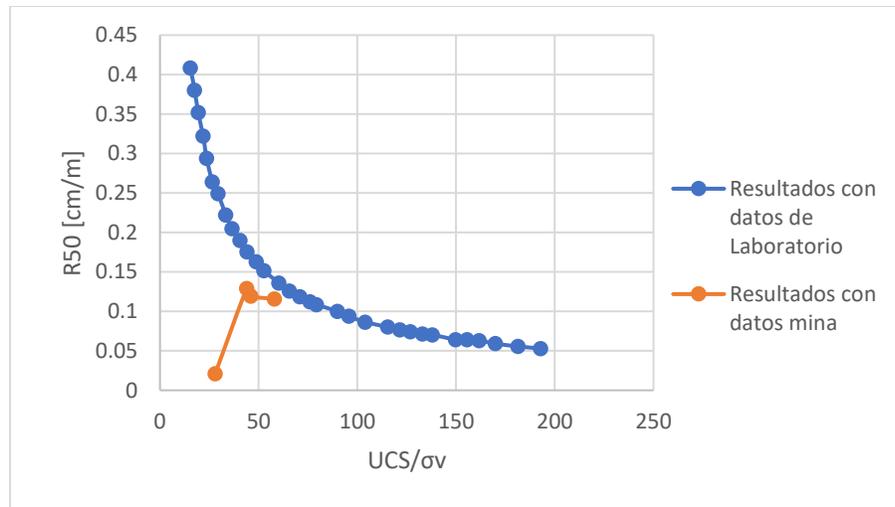


Figura 12. Curva construida con datos de laboratorio versus curva obtenida con datos mina.

Anexo G: Resultados obtenidos con otro caso de estudio

Se realizó el análisis para otro caso de estudio, considerando la fragmentación medida en puntos de extracción de una mina se calcularon los tamaños característicos d_{20} , d_{50} y d_{80} para posteriormente calcular la razón de reducción (R_{20} , R_{50} y R_{80}). El sector analizado de la mina posee un UCS de 146 [MPa] y el esfuerzo vertical se calculó mediante la ecuación (7):

$$\sigma_v = \gamma * Z_i * 10^{-6} \quad (7)$$

Donde:

γ : Peso específico (N/m³)

Z_i : Profundidad que depende de la posición de cada bloque en la simulación de flujo en el periodo “i” (m).

En las Tablas 22, 23 y 24 se detallan los tamaños característicos iniciales y finales, la distancia que recorren las partículas, el UCS y esfuerzo vertical para cada punto de extracción, lo que permite tener las razones de reducción y la razón UCS/ σ_v .

Tabla 23. Razón de reducción R_{20} y UCS/ σ_v para cada punto de extracción

Punto de extracción	d_{20} Inicial [mm]	d_{20} Final [mm]	$d_{20i}-d_{20f}$ [cm]	HOD [m]	R_{20} [cm/m]	UCS [MPa]	σ_v [MPa]	UCS/ σ_v
1	44.93	7.62	3.73	186.6	0.02	146	32.20	4.53
2	84.06	44.67	3.94	136.9	0.03	146	32.01	4.56
3	45.99	26.17	1.98	81.73	0.02	146	32.30	4.52
4	144.08	36.88	10.72	139.3	0.08	146	31.81	4.59
5	40.21	20.79	1.94	35.90	0.05	146	32.08	4.55
6	32.63	6.26	2.64	35.39	0.07	146	32.17	4.54
7	43.72	34.11	0.96	46.24	0.02	146	32.23	4.53
8	35.86	30.53	0.53	127.7	0.004	146	32.16	4.54
9	23.88	18.26	0.56	104.2	0.01	146	28.99	5.04
10	33.75	19.16	1.46	58.01	0.03	146	31.68	4.61
11	32.80	4.06	2.87	58.33	0.05	146	31.66	4.61
12	25.65	23.36	0.23	104.2	0.00	146	30.01	4.86
13	31.33	21.40	0.99	151.0	0.01	146	31.15	4.69
14	34.32	19.53	1.48	127.6	0.01	146	31.81	4.59
15	37.10	28.61	0.85	150.4	0.01	146	30.49	4.79
16	22.59	7.99	1.46	150.0	0.01	146	30.57	4.78
17	35.17	26.25	0.89	150.0	0.01	146	29.79	4.90

Tabla 24. Razón de reducción R_{50} y UCS/ σ_v para cada punto de extracción

Punto de extracción	d_{50} Inicial [mm]	d_{50} Final [mm]	$d_{50i}-d_{50f}$	HOD	R_{50} [cm/m]	UCS [MPa]	σ_v [MPa]	UCS/ σ_v
18	296.04	125.56	17.05	47.07	0.36	146	32.20	4.53
19	777.58	67.89	70.97	186.16	0.38	146	32.20	4.53
20	122.93	47.86	7.51	81.90	0.09	146	32.27	4.52
2	548.05	128.31	41.97	136.69	0.31	146	32.01	4.56
4	797.40	177.46	61.99	139.23	0.45	146	31.81	4.59
6	131.90	111.20	2.07	35.39	0.06	146	32.17	4.54
7	151.22	124.68	2.65	46.24	0.06	146	32.23	4.53
8	247.04	94.52	15.25	127.47	0.12	146	32.16	4.54
10	163.28	136.10	2.72	58.01	0.05	146	31.68	4.61
11	106.66	103.82	0.28	58.33	0.00	146	31.66	4.61
21	143.61	105.39	3.82	57.61	0.07	146	31.85	4.58
22	133.83	60.66	7.32	150.78	0.05	146	28.79	5.07
23	632.56	168.69	46.39	104.40	0.44	146	30.83	4.74
12	124.40	112.91	1.15	104.22	0.01	146	30.01	4.86
14	441.83	140.00	30.18	127.66	0.24	146	31.81	4.59
15	194.11	78.03	11.61	150.54	0.08	146	30.49	4.79
25	259.61	176.24	8.34	139.13	0.06	146	30.62	4.77

Tabla 25. Razón de reducción R_{80} y UCS/ σ_v para cada punto de extracción

Punto de extracción	d_{80} Inicial [mm]	d_{80} Final [mm]	$d_{80i}-d_{80f}$ [cm]	HOD [m]	R_{80} [cm/m]	UCS [MPa]	σ_v [MPa]	UCS/ σ_v
18	751.19	677.73	7.35	47.07	0.16	146	32.20	4.53
19	1148.92	254.31	89.46	186.16	0.48	146	32.20	4.53
20	528.68	228.68	30.00	81.90	0.37	146	32.27	4.52
2	823.06	264.84	55.82	136.69	0.41	146	32.01	4.56
4	1217.22	460.30	75.69	139.23	0.54	146	31.81	4.59
7	347.02	315.48	3.15	46.24	0.07	146	32.23	4.53
8	483.63	211.05	27.26	127.47	0.21	146	32.16	4.54
21	827.95	300.57	52.74	57.61	0.92	146	31.85	4.58
22	1020.64	154.66	86.60	150.78	0.57	146	28.79	5.07
23	1284.90	553.55	73.14	104.40	0.70	146	30.83	4.74
12	290.11	236.47	5.36	104.22	0.05	146	30.01	4.86
24	677.06	646.39	3.07	127.49	0.02	146	31.19	4.68
14	815.41	712.06	10.34	127.66	0.08	146	31.81	4.59
15	567.34	170.84	39.65	150.54	0.26	146	30.49	4.79
25	1222.73	416.74	80.60	139.13	0.58	146	30.62	4.77

Con los resultados obtenidos se construyeron los grafico 13, 14 y 15, donde se puede observar que no hay una correlación entre las razones de reducción y la razón UCS/ σ_v .

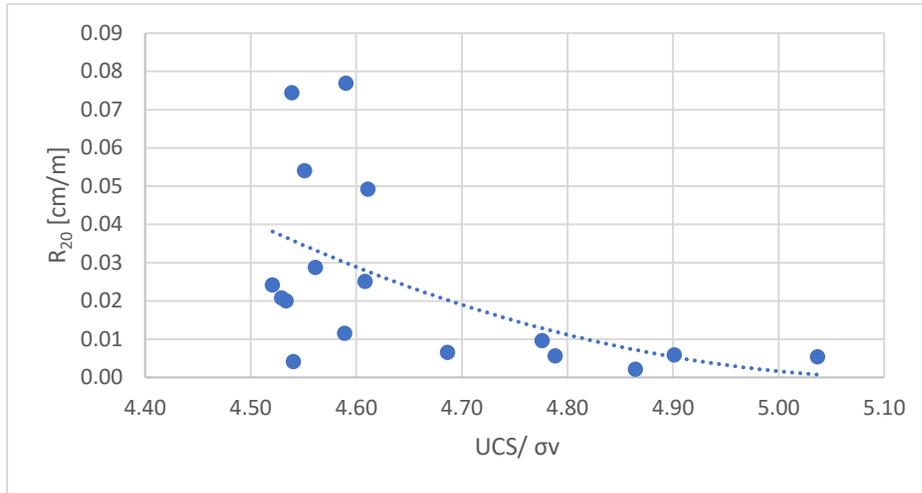


Figura 13. Razón de reducción R_{20} versus UCS/σ_v

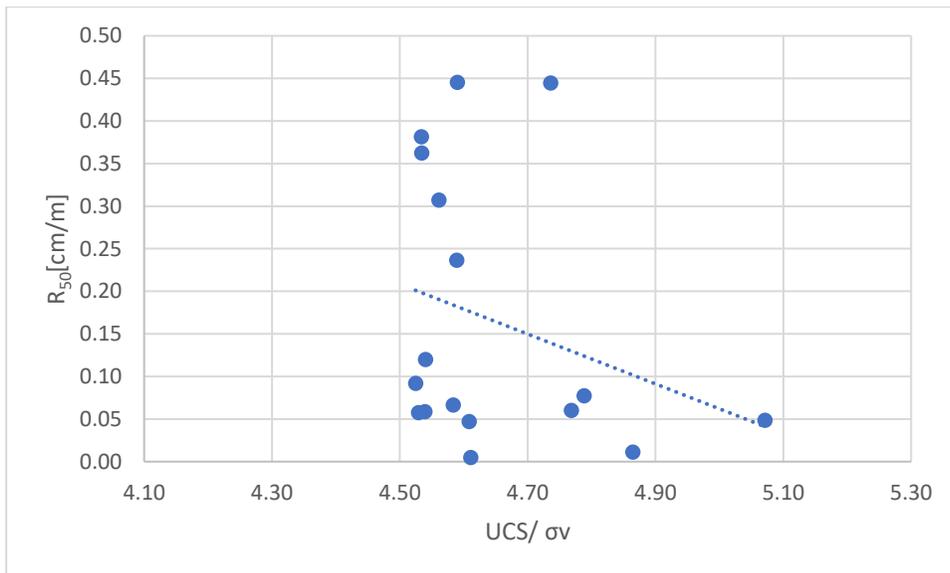


Figura 14. Razón de reducción R_{50} versus UCS/σ_v

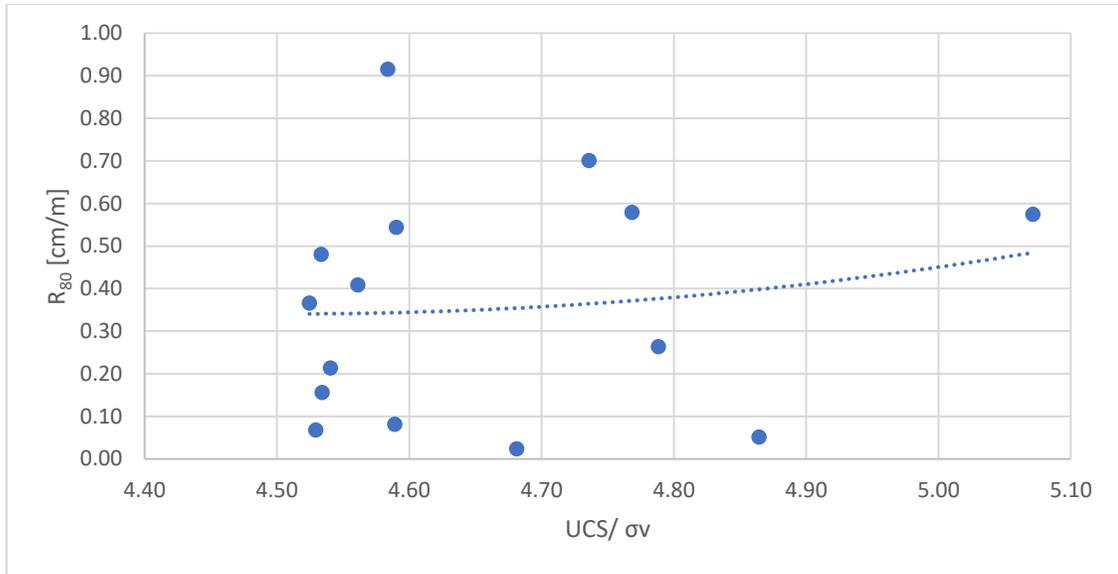


Figura 15. Razón de reducción R_{80} versus UCS/σ_v

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

Título: Validación y calibración del modelo de fragmentación secundaria aplicada en FlowSim BC		
Nombre Memorista: OLAYA MICHELLE CALDERÓN PALOMINOS		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	MUY BUENO	 Prof. René Gómez
Calificación	6.5	
Fecha	31.03.2023	
 Prof^a. Asieh Hekmat		
		Ingeniero Supervisor: Raúl Castro
		Institución: Universidad de Chile
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Roberto Fustos		Prof. Raúl Castro
Resumen		
<p>En minería de Block Caving hay diversos factores que influyen en el éxito de la operación, entre ellos la fragmentación, este factor influye tanto en el sistema de manejo de materiales como en el diseño minero. Entre los problemas que se pueden asociar a la fragmentación están las colgaduras en piques, bateas y puntos de extracción, lo que se puede deber a grandes bolos y/ o a la presencia de material cohesivo como finos y humedad. La presencia de grandes tamaños en los puntos de extracción no permite que estos sean tomados por el equipo de carguío. La presencia de material fino tiene estrecha relación con la dilución, estallidos de finos y barro. Por esto es fundamental predecir la fragmentación y así poder enfrentar mejor los problemas que puede generar este factor.</p> <p>La metodología de este trabajo considera la construcción de una base de datos de operaciones de Block Caving que incluye la fragmentación medida, resistencia a la compresión uniaxial, esfuerzo vertical y la distancia que recorren las partículas. La base de datos permite obtener los tamaños característicos d_{20}, d_{50} y d_{80} de cada sector y posteriormente su razón de reducción (R_{20}, R_{50}, R_{80}), conocidos estos valores y las razones de UCS sobre esfuerzo vertical se compara con los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio con el fin de validar los datos minas y se analiza el modelo de fragmentación secundaria incorporado en FlowSim. Finalmente, con los datos mina se ajustan los</p>		

parámetros del modelo de fragmentación secundaria aplicado en FlowSim BC con la herramienta *solver* de Excel minimizando el error entre la razón de reducción y la determinada por el modelo de fragmentación secundaria.

La comparación realizada arroja como resultado que solo la razón de reducción R_{50} tiene el comportamiento esperado con tres de los cuatro sectores estudiados de forma que en estos sectores se cumple que mientras mayor es el valor de la razón entre UCS y esfuerzo vertical, σ_v , menor es la razón de reducción y viceversa. Para los sectores validados (Diablo Regimiento y Reservas Norte Fw y Hw) se obtuvieron los parámetros de ajuste α y β , el parámetro alfa tiene un promedio de 0.121 y beta obtuvo un valor de 0.001 para los tres sectores, obteniendo un error promedio de 1.724E-08.

Se puede concluir entonces que el modelo permite representar el comportamiento de la fragmentación para el tamaño característico d_{50} , para los tres sectores que fueron validados y que, si bien varios factores pueden influir en la reducción del tamaño de las partículas, el UCS es uno de los principales por sobre el esfuerzo vertical.