

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**ESTUDIO Y APLICACIÓN DE UN MODELO DE FRAGMENTACIÓN  
SECUNDARIA PARA EL PROYECTO MINA CHUQUICAMATA  
SUBTERRÁNEO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**ALFONSO ANDRÉS ABARCA MARTÍNEZ**

**PROFESOR GUÍA:  
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MARIA VALENCIA VERA  
FRANCISCO ARMIJO ALLENDES**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2016**

## RESUMEN

En los últimos años ha tomado fuerza el uso de métodos de hundimiento masivo, como block/panel caving, para explotar cuerpos mineralizados a gran profundidad, pero existe un riesgo asociado a la granulometría del mineral a fragmentarse. El impacto económico que tiene hacer una mala estimación, tanto de la fragmentación primaria como secundaria, es bastante alta, dada la influencia que tienen sobre parámetros de diseño y operación en la mina. Por esta razón, se ha hecho un gran esfuerzo en desarrollar modelos y softwares que permitan estimar de la mejor manera posible la fragmentación.

El objetivo de esta investigación es construir un modelo predictivo de fragmentación secundaria para minería de caving, específicamente el Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo (PMCHS), a partir de estudios anteriores y mediante experimentos de flujo confinado a escala. Además, se estudia la fragmentación secundaria para los dominios geotécnicos seleccionados.

Para cumplir con esto, se propone seguir una metodología experimental, planteada anteriormente por Gómez (2014), en la cual se emplea un modelo físico con escala 1:75. La primera parte consiste en la obtención de una curva experimental de fragmentación secundaria, para cada dominio geotécnico escogido de PMCHS, los cuales son PEK, QES y Q<S, sometidos a un esfuerzo vertical constante de 4 MPa. De la misma forma, se hace un experimento adicional para QES bajo 2 MPa. Estos ensayos se llevan a cabo con una prensa, ubicada en el laboratorio de Block Caving, de la Universidad de Chile.

Posterior a esta etapa, se procede con la construcción del modelo predictivo de fragmentación secundaria para el dominio QES, mediante un proceso de ajuste aplicado a las dos curvas experimentales de esta unidad.

Los resultados indican que, al someter los 3 dominios seleccionados, bajo un mismo esfuerzo, PEK resulta con la distribución granulométrica más gruesa, seguido por QES y finalmente Q<S. Por otro lado, al comparar las dos curvas de QES, queda claro que a medida que aumenta el esfuerzo vertical, mayor es el grado de reducción de las partículas.

Se encuentra el set de parámetros que definen el modelo predictivo, de esta manera es posible estimar el grado y la variación de la fragmentación secundaria para el dominio escogido, variando el esfuerzo vertical.

De este estudio se desprende en primer lugar que las propiedades de los materiales influyen en el proceso de fragmentación secundaria, esto fue demostrado al encontrar una relación directa con la resistencia a la carga puntual, el factor de forma también condiciona la fragmentación, a mayor redondez menor es la disminución de tamaño.

En cuanto al modelo predictivo, se hace una comparación con el software más usado en la industria, BCF. Se analiza el escenario propuesto por este programa para el dominio C2 de PMCHS, en la cual se encuentra la unidad QES, y la estimación por parte del modelo elaborado. Los resultados indican que BCF considera una mayor reducción de tamaño para los gruesos, en cambio, hay un comportamiento más parejo en la estimación de finos. Además, se propone una nueva modalidad de uso para el modelo, que considera los porcentajes de extracción.

# ABSTRACT

In recent years caving methods such as block/panel caving have become more relevant to exploit ore bodies at mayor depth, but there is a risk associated with the resulting granulometry of the mineral after being fragmented. The economic impact of a bad estimation, both primary and secondary fragmentation, is high, considering its influence on design and operating parameters in the mine. For this reason, great efforts have been made to develop models and software, that allow the best estimation of fragmentation.

The objective of this research is to elaborate a predictive model of secondary fragmentation for caving mining, specifically the Chuquicamata Subterranean Mine Project (PMCHS), based on previous studies and through scaled confined flow experiments. In addition, secondary fragmentation is studied for the selected geotechnical domains.

To achieve this, an experimental methodology is proposed, which was previously defined by Gómez (2014), who used a physical model on a scale 1:75. The first part consists in obtaining the experimental secondary fragmentation curves for the geotechnical domains selected from PMCHS, which are PEK, QES and Q <S, under a constant vertical stress of 4 MPa. In the same way, an additional experiment is required for QES with 2 MPa.

Concluded this stage, follows the elaboration of the predictive model of secondary fragmentation for the QES domain, by an adjustment process applied to the two experimental curves of this unit.

The results indicate that, by submitting the 3 selected domains, under the same stress, PEK results with the coarsest particle size distribution, followed by QRS and finally Q <S. On the other hand, when comparing the two curves of QES, it is clear that as the vertical stress increases, the higher is the degree of reduction of the particles.

The set of parameters that define the predictive model is found, by this way it is possible to estimate the degree and the variation of the secondary fragmentation for the chosen domain, when varying the vertical stress.

With this investigation, it is clear that the properties of the materials influence the process of secondary fragmentation, this was demonstrated by finding a direct relation with the resistance to punctual load, the factor form also conditions the fragmentation, greater the roundness, smaller the decrease of size.

As for the predictive model, a comparison is made with the software that is most used in the industry, BCF. The scenario proposed by this program for the C2 domain of PMCS, in which the QES unit is located, is analyzed with regards of the estimation made by the elaborated model. The results indicate that BCF considers a greater reduction of size for coarse fragments, in contrast, there is a more similar behavior in the estimation of fines. In addition, a new modality of use is proposed for the model, which considers the percentages of extraction.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi familia por acompañarme en esta etapa de la vida, especialmente mis padres, que me dieron la oportunidad de estudiar y siempre me apoyaron en todo, y mis hermanos.

También a mi profesor guía Raúl Castro, por darme la oportunidad de hacer la memoria en BCLab, a María Valencia por ser un gran apoyo, tener paciencia y guiarme durante este trabajo y a Francisco Armijo por sus consejos.

Un agradecimiento especial a René, por toda la ayuda que me dio y siempre tener disposición de responder cualquier duda.

A todos los amigos que estuvieron conmigo en estos años, partiendo con Pablo, desde la enseñanza media y que siempre ha estado ahí, en las buenas y las malas, al Héctor y Tito. Los chiquillos de Plan Común: Herny, Freddy, Marcos, Carlos, Pau.

Aquellos que conocí al entrar al departamento de Minas: Criss, Carlos Lama, Galan, Diago, Bonzi, Cami y a los de BCLab: Gerson, Lenon, Seba, Jean, Diego Cortéz, AP7, Molly, Mena, Casafont, Gina, Vane, Liz, Sergio, Asieh, David y por último, a todos los integrantes de Escorintians, aunque jamás ganamos una copa decente, se pasó bien jugando los campeonatos del mineirao y la bundesmina.

# TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Motivación de estudio.....	3
1.3. Objetivos .....	4
1.3.1. Objetivo general .....	4
1.3.2. Objetivos específicos .....	4
1.4. Alcances .....	4
1.5. Contexto .....	5
1.5.1. Proyecto minero .....	5
1.5.2. Características del yacimiento .....	5
1.6. Metodología de investigación .....	8
1.7. Contenidos por capítulo .....	10
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	11
2.1. Introducción .....	11
2.2. Material granular .....	11
2.3. Fragmentación.....	12
2.3.1. Tipos de fragmentación .....	14
2.3.2. Mecanismos de fragmentación .....	14
2.3.3. Monitoreo de la fragmentación .....	16
2.3.4. Modelos predictivos de fragmentación .....	16
2.4. Estudios a escala laboratorio.....	21
2.4.1. Análisis de similitud .....	21
2.4.2. Fuerzas dominantes en el modelo físico.....	22
2.4.3. Estudio fragmentación secundaria con modelo físico .....	23
2.5. Caracterización de material.....	24
2.5.1. Coeficiente de uniformidad y curvatura .....	24
2.5.2. Factor de forma.....	24
2.5.3. Carga puntual.....	26
2.6. Estimación de esfuerzos verticales .....	26
2.7. Modelo de fragmentación secundaria .....	28
2.7.1. Función selección.....	29
2.7.2. Función de quiebre .....	30
2.8. Conclusiones del capítulo .....	33

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	35
3.1. Introducción .....	35
3.2. Descripción modelo físico y equipos .....	35
3.2.1. Modelo físico .....	35
3.2.2. Equipos .....	37
3.3. Procedimiento experimental .....	37
3.3.1. Curvas fragmentación secundaria .....	37
3.3.2. Construcción modelo de conminución .....	39
3.4. Granulometría .....	40
3.5. Plan experimental.....	43
3.6. Conclusiones del capítulo .....	44
RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	45
4.1. Introducción .....	45
4.2. Caracterización material.....	45
4.2.1. Coeficiente de uniformidad y curvatura .....	45
4.2.2. Factor de forma.....	45
4.2.3. Ensayo carga puntual.....	46
4.2.4. Análisis caracterización .....	46
4.3. Curvas experimentales de fragmentación secundaria .....	47
4.3.1. Curvas de fragmentación secundaria Q<S, QES y PEK, 4 MPa.....	47
4.3.2. Análisis curvas de fragmentación secundaria para Q<S, QES y PEK, 4 MPa 48	
4.3.3. Curvas de fragmentación secundaria QES, 2 y 4 MPa .....	49
4.3.4. Análisis curvas de fragmentación secundaria QES, 2 y 4 MPa .....	50
4.4. Análisis resultados trabajos previos .....	52
4.5. Modelo de fragmentación secundaria .....	53
4.5.1. Selección parámetros de ajuste .....	54
4.5.2. Construcción y grado de ajuste modelo de conminución .....	54
4.5.3. Análisis de sensibilidad de los parámetros, modelo de conminución .....	58
4.5.4. Aplicación modelo de conminución .....	59
4.5.5. Modelo de conminución con porcentaje de extracción.....	61
4.5.6. Análisis modelo de conminución a partir de datos de mina.....	64
4.6. Conclusiones del capítulo .....	65
4.6.1. Curvas experimentales de fragmentación secundaria .....	65
4.6.2. Modelo de conminución .....	65

CONCLUSIONES .....	66
5.1. Conclusiones generales.....	66
5.2. Recomendaciones para trabajo futuro .....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXO A.....	72
Diseño equipo experimental.....	72
ANEXO B.....	74
Caracterización material.....	74
ANEXO C.....	82
Modelo de conminución .....	82

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Recursos minerales del yacimiento Chuquicamata (Codelco, 2009) .....	5
Figura 2: Caracterización yacimiento (Codelco, 2009) .....	6
Figura 3: Vista isométrica Chuquicamata, dominios geotécnicos (Codelco, 2009) .....	6
Figura 4: Vista en planta de los dominios estructurales y macro bloques (SRK, 2015) .....	7
Figura 5: Vista en planta, cota 1841, macro bloques N1 y S1 (Codelco, 2009) .....	7
Figura 6: Esquema metodología de investigación .....	9
Figura 7: Distribución de esfuerzos, material granular .....	12
Figura 8: Modelo conceptual de caving (Duplancic y Brady, 1999) .....	13
Figura 9: Distribución de tamaños de material quebrado, Laubscher (1994) .....	17
Figura 10: Curvas de fragmentación ( $d_{50}=8$ mm), Gómez (2014) .....	23
Figura 11: Definición radios en una partícula, esfericidad .....	25
Figura 12: Matriz de clasificación, esfericidad y redondez (Hoz, 2007) .....	25
Figura 13: Esquema general proceso de conminución .....	28
Figura 14: Esquema del proceso de conminución, funciones selección y quiebre, (Casali, 2012) .....	30
Figura 15: Modelo de flujo pistón .....	31
Figura 16: Dimensiones modelo físico (Olivares, 2014) .....	36
Figura 17: Modelo físico con sistema de manejo de materiales .....	36
Figura 18: Esquema metodología experimental .....	38
Figura 19: Montaje modelo físico (Gómez, 2014) .....	39
Figura 20: Diagrama construcción modelo de conminución .....	40
Figura 21: Curva de fragmentación primaria esperada, QES (SRK Consulting, 2015) ....	41
Figura 22: Esquema columna de extracción discretizada .....	61
Figura 23: Secuencia de extracción, columna de 300 m .....	62
Figura 24: Vista isométrica y planta de batea, modelo físico (Olivares, 2014) .....	72
Figura 25: Dimensiones batea, modelo físico (Olivares, 2014) .....	72
Figura 26: Vista isométrica pala escalada, modelo físico .....	73
Figura 27: Vista isométrica y planta pala escalada, Autocad .....	73
Figura 28: Clasificación fragmentos, dominio QES .....	77
Figura 29: Clasificación fragmentos, dominio PEK .....	77
Figura 30: Clasificación fragmentos, dominio $Q<S$ .....	78

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen modelos predictivos de fragmentación secundaria .....	20
Tabla 2: Listado de condiciones de similitud, Pineda M. (2012) .....	22
Tabla 3: Parámetros ecuación de Janssen-Nedderman .....	27
Tabla 4: Características modelo físico .....	35
Tabla 5: Mallas seleccionadas para replicación curva fragmentación primaria .....	42
Tabla 6: Plan experimental .....	43
Tabla 7: Coeficiente de uniformidad y curvatura .....	45
Tabla 8: Factor de forma según dominio .....	45
Tabla 9: Clasificación dominio según matriz de esfericidad y redondez .....	46
Tabla 10: Is(50) según dominio geotécnico .....	46
Tabla 11: Resumen caracterización material .....	46
Tabla 12: Fragmentación secundaria, 3 dominios geotécnicos estudiados (4 MPa) .....	48
Tabla 13: Fragmentación secundaria, dominio QES (2 y 4 MPa) .....	49
Tabla 14: D50 y D80, dominio QES, escala mina .....	51
Tabla 15: Resumen factor de forma, trabajos previos .....	53
Tabla 16: Resumen índice de carga puntual, trabajos previos .....	53
Tabla 17: Combinaciones de parámetros buscados para el modelo de conminución .....	54
Tabla 18: Parámetros de ajuste, modelo de conminución .....	55
Tabla 19: Ajuste por intervalo, QES (2 MPa), modelo de conminución .....	56
Tabla 20: Ajuste por intervalo, QES (4 MPa), modelo de conminución .....	56
Tabla 21: Análisis de sensibilidad, caso 1 a 4 .....	58
Tabla 22: Análisis de sensibilidad, caso 5 a 7 .....	59
Tabla 23: Parámetros BCF para estimación fragmentación secundaria .....	59
Tabla 24: Comparación fragmentación secundaria, SRK (2015) vs modelo de conminución .....	60
Tabla 25: Reducción fragmentos según avance extracción, ejemplo modelo de conminución .....	63
Tabla 26: Reducción según porcentaje extracción .....	64
Tabla 27: Esfericidad y redondez, dominio QES .....	74
Tabla 28: Esfericidad y redondez, dominio PEK .....	75
Tabla 29: Esfericidad y redondez, dominio Q<S .....	76
Tabla 30: Ensayo de carga puntual, dominio PEK .....	79
Tabla 31: Ensayo de carga puntual, dominio QES .....	80
Tabla 32: Ensayo de carga puntual, dominio Q<S .....	81
Tabla 33: EC para los 7 casos, ajuste modelo de conminución .....	82
Tabla 34: ECM para los 7 casos, ajuste modelo de conminución .....	82
Tabla 35: Masa extraída según experimento .....	82

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Modelo empírico, Bridgewater (2003).....	18
Ecuación 2: Coeficiente de uniformidad.....	24
Ecuación 3: Coeficiente de curvatura .....	24
Ecuación 4: Definición esfericidad partícula (Cho et all., 2006) .....	25
Ecuación 5: Definición redondez partícula (Cho et all., 2006) .....	25
Ecuación 6: Índice de carga puntual no corregido .....	26
Ecuación 7: Índice de carga puntual corregido .....	26
Ecuación 8: Conversión $I_s(50)$ a UCS.....	26
Ecuación 9: Fórmula de Janssen-Nedderman .....	27
Ecuación 10: Función selección .....	29
Ecuación 11: Razón de quiebre original .....	30
Ecuación 12: Nueva razón de quiebre, incluyendo carga vertical .....	30
Ecuación 13: Forma acumulativa, función de quiebre .....	30
Ecuación 14: Expresión general conminución.....	31
Ecuación 15: Ecuación cinética general de la molienda batch .....	32
Ecuación 16: Resolución matricial de la ecuación de conminución.....	32

## ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1: Estimación de esfuerzos según área de flujo y profundidad.....	28
Gráfico 2: Curva de fragmentación primaria, escala laboratorio y mina.....	41
Gráfico 3: Curva de fragmentación primaria replicada, escala laboratorio .....	42
Gráfico 4: Curvas fragmentación secundaria, 3 dominios geotécnicos estudiados (4 MPa) .....	47
Gráfico 5: Curva fragmentación secundaria, dominio QES (2 y 4 MPa) .....	49
Gráfico 6: Curvas experimentales fragmentación secundaria QES, escala mina .....	50
Gráfico 7: Curvas experimentales fragmentación secundaria QES, escala mina con desviación estándar .....	51
Gráfico 8: Comparación D50, resultados actuales con trabajos previos .....	52
Gráfico 9: Comparación D80, resultados actuales con trabajos previos .....	52
Gráfico 10: Ajuste modelo de conminución, curva QES (2 MPa) .....	55
Gráfico 11: Ajuste modelo de conminución, curva QES (4 MPa) .....	56
Gráfico 12: Evolución D80 y D50, estimado por el modelo de conminución para QES, escala laboratorio .....	57
Gráfico 13: Reducción porcentual D80 y D50, estimado por el modelo de conminución para QES, escala mina.....	58
Gráfico 14: Comparación fragmentación secundaria, SRK (2015) vs modelo de conminución.....	60
Gráfico 15: Fragmentación secundaria final según avance de extracción, ejemplo modelo de conminución .....	62
Gráfico 16: Modelo de conminución con porcentajes extracción vs BCF .....	63
Gráfico 17: Curvas granulométricas de muestras, QES (2 MPa).....	83
Gráfico 18: Curvas granulométricas de muestras, QES (4 MPa) .....	83
Gráfico 19: Curvas granulométricas de muestras, $Q < S$ (4 MPa).....	84

Gráfico 20: Curvas granulométricas de muestras, PEK (4 MPa).....	84
Gráfico 21: Fragmentación secundaria bajo un rango de esfuerzos, QES, modelo de conminución.....	85
Gráfico 22: Evolución D80 y D50, estimado por el modelo de conminución para QES, escala mina .....	85
Gráfico 23: 33% extracción columna, avance bloque I.....	86
Gráfico 24: 66% extracción columna, avance bloque II.....	86
Gráfico 25: 100% extracción columna, avance bloque III.....	87
Gráfico 26: 25% extracción columna, avance bloque I.....	87
Gráfico 27: 50% extracción columna, avance bloque II .....	88
Gráfico 28: 75% extracción columna, avance bloque III.....	88
Gráfico 29: 100% extracción columna, avance bloque IV .....	89

# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Introducción

La minería es una actividad económica que se ha llevado a cabo durante miles de años, mediante la explotación de yacimientos principalmente superficiales. Con el paso de los años, estas se han ido agotando, obligando a explorar y trabajar a mayores profundidades, implicando serios cambios en la forma de explotar, costos asociados, impacto medioambiental, etc. La minería está en un proceso continuo de evolución y como consecuencia existe la necesidad de estudiar y aprender de todos los procesos involucrados para poder enfrentar los desafíos actuales y futuros.

Chile, al ser un país minero, no está exento de esta situación, en los últimos años ha ido en aumento la explotación subterránea, incluso yacimientos que por muchos años han sido explotados con el método de cielo abierto están en la etapa de transición a subterránea, como es el caso de Chuquicamata (Arancibia y Flores, 2004). El proceso es complejo ya que hay diversas variables a considerar, para llevar a cabo el proyecto con la mayor seguridad posible (Stacey y Terbrugge, 2000).

La minería subterránea también ha sufrido cambios desde sus inicios, de acuerdo al avance tecnológico, han ido variando los métodos de explotación, incrementando cada vez más la capacidad de movimiento de mineral. Esto ha permitido manejar el costo de mina, haciendo económicamente viable la explotación de cuerpos masivos a menores leyes, como es el caso de pórfidos de cobre.

El método de explotación llamado caving ha resultado muy útil para estas situaciones, en la cual se aprovecha la gravedad para hundir el cuerpo mineralizado o una sección de ella, siendo el block y el panel caving sus máximos representantes.

Estos métodos han sido uno de los más populares en el pasado, presente y futuro para explotar cuerpos masivos. Sus bajos costos por tonelaje de mineral extraído, comparado con otros métodos hacen que sea muy atractivo. Esto es posible dado que hace una combinación interesante de parámetros de diseño, que usan las ventajas de los factores naturales de la masa rocosa (Merino, 1986).

El procedimiento de caving consiste en hacer un corte basal desde la zona de hundimiento, perforando y tronando progresivamente. Este material inicial quebrado es extraído para generar el espacio, en el cual se irá depositando el resto de la columna mineralizada. A medida que avanza el proceso de extracción, el hundimiento se propaga verticalmente a través del cuerpo hasta alcanzar la superficie, generando subsidencia. El mineral es extraído en el nivel de producción, ubicado debajo del nivel de hundimiento, estos dos están conectados mediante bateas, a través de los cuales ocurre el flujo gravitacional del mineral quebrado, permitiendo la salida en los puntos de extracción (Brown, 2007).

Para la aplicación de los métodos de caving, hay una serie de preguntas que hay que responder, de las cuales dos destacan:

- ¿El macizo rocoso hundirá?
- ¿Qué fragmentación se puede esperar?

En el segundo caso, resulta ser fundamental comprender y cuantificar esta, dado el impacto que tiene sobre el diseño y la operación en la mina.

Con el tiempo, se han definido 3 tipos de fragmentación: in situ, primaria y secundaria. La fragmentación in situ corresponde a los bloques rocosos formados por sets de discontinuidades, previos a cualquier intervención humana. Una vez iniciado el proceso del caving, se empieza a generar la fragmentación primaria. Finalmente, a medida que avanza el proceso de extracción del mineral, se obtiene un material más fino, por la interacción entre partículas al momento de descender por la columna quebrada, llamada fragmentación secundaria.

Es complejo poder predecir la fragmentación ya que no es posible observar como sucede este proceso al interior de la columna. Esta limitante se ha replicado parcialmente, mediante el diseño de modelos empíricos y softwares, que intentan emular y estimar la fragmentación primaria y secundaria esperada. A pesar de esto, no se ha logrado diseñar un programa que entregue resultados completamente fidedignos.

Por lo tanto, hasta el día de hoy, existe un marco en el cual es posible encontrar y aportar con conocimientos nuevos, con el fin de poder comprender y predecir de mejor manera la fragmentación en la mina, tanto primaria como secundaria. En los últimos años ha habido acercamientos a este tema, pero desde otras áreas de la minería como es el de la conminución. Esta investigación apunta justamente a lo recién mencionado.

## 1.2. Motivación de estudio

La fragmentación es uno de los factores claves a considerar en el diseño de un proyecto minero. Durante el proceso de quiebre, se inicia con una fragmentación primaria que irá variando a medida que progresa la extracción, esto debido a que las partículas al descender por la columna de material quebrado interactúan entre ellas, esto es la fragmentación secundaria. Un material granular más fino o grueso implica:

- Elipsoides de extracción más esbeltas y con mayor excentricidad, afectando la interacción y recuperación de mineral.
- Un mal manejo de la tasa de extracción o un tiraje disparejo puede hacer que ingrese antes la dilución o el barro.
- Puede afectar la generación de colgaduras, el proceso de reducción secundaria en los puntos de extracción y en los piques de traspaso.
- Un impacto sobre el consumo energético durante la etapa de chancado y molienda.

Existe evidencia del incremento en la profundidad de los yacimientos explotados, esto tiene como consecuencia que el tipo de roca con que se ha trabajado cambió, siendo actualmente más dura y competente; el régimen de esfuerzos ha aumentado y también la altura de las columnas de extracción, incrementando la distancia a recorrer por las partículas, desde su posición inicial hasta su salida en los puntos de extracción. Cada uno de estos casos condiciona la fragmentación secundaria y por lo tanto deben ser tomadas en cuenta.

Este tema ha sido abordado en la industria mediante software como Block Cave Fragmentation (BCF) o JKFrag, que tratan de predecir las distribuciones granulométricas que se puedan ir dado a medida que avanza la extracción.

Dada la importancia que ha demostrado tener la fragmentación secundaria, se decide estudiar este tema, para un caso en particular, desde una perspectiva distinta. Esto es mediante la aplicación de un modelo de conminución ya propuesto y definido, basado en un set de ecuaciones que van describiendo el proceso de quiebre de las partículas, complementando de esta manera la información existente sobre la aplicación de esta metodología al estudio de la fragmentación secundaria.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo es construir un modelo predictivo de fragmentación secundaria para minería de caving, a partir de estudios anteriores y mediante experimentos de flujo confinado a escala.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

Para poder cumplir con el objetivo general, se deben llevar a cabo los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión del estado de arte de fragmentación secundaria en minería de caving.
- Diseñar un set experimental para llevar a cabo los ensayos.
- Definir la metodología experimental.
- Obtener las curvas de fragmentación secundaria para los dominios geotécnicos escogidos, bajo confinamiento y a escala laboratorio.
- Construir el modelo predictivo de fragmentación secundaria para un dominio, en base a dos curvas experimentales con distintas cargas verticales.
- Comparar los resultados de esta investigación con trabajos previos, con el propósito de determinar relaciones.
- Proponer una nueva modalidad de uso para el modelo predictivo.

## **1.4. Alcances**

Los alcances considerados para esta investigación son:

- El modelo físico está construido a una escala de 1:75 y considera la extracción de mineral desde una batea, con 2 puntos de extracción.
- Los experimentos a realizar consideran solo la aplicación de una carga vertical constante, descartando los efectos de esfuerzos horizontales.
- Los ensayos son realizados en condición seca, no se considera el impacto de finos.
- No se considera pre acondicionamiento.
- Los experimentos se realizarán con mineral proveniente del Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo (PMCHS), las unidades geotécnicas son PEK, QES y Q<S.
- Se contempla un ejemplo para explicar la nueva modalidad de uso del modelo predictivo.

## 1.5. Contexto

Esta investigación está orientada al Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) y se presentan las características más importantes del yacimiento.

### 1.5.1. Proyecto minero

Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS) está ubicada en la II región de Chile, provincia El Loa, 16 km al norte de la ciudad de Calama y 1.650 km de Santiago, Chile. Pertenece a la División Codelco Norte, Codelco y corresponde a la transición de minería cielo abierto a subterránea.

Los recursos minerales emplazados en profundidad están reconocidos hasta la elevación 1.200 msnm, aproximadamente 750 m bajo el fondo del pit final de Chuquicamata, figura 1. El proyecto cuenta con reservas de 1.700 millones de toneladas de mineral, ley media de 0,71% Cu, 499 ppm de Mo y 460 ppm de As. La extracción se llevará a cabo mediante block caving, usando macro bloques como unidades de explotación y el ritmo de la mina será de 140.000 tpd, en régimen.

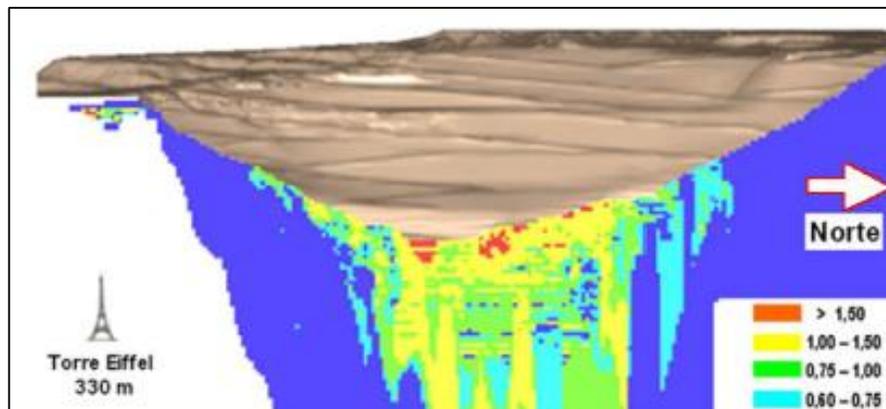


Figura 1: Recursos minerales del yacimiento Chuquicamata (Codelco, 2009)

### 1.5.2. Características del yacimiento

El yacimiento está delimitado por una falla regional denominada Falla Oeste, presentando una secuencia de alteración de las rocas en el sentido Oeste-Este. La presencia de mineralización es más intensa en aquellas con mayor alteración, con una gradación hacia el Este, figura 2.

Dentro del cuerpo mineralizado se encuentran diversos dominios geotécnicos, siendo las más importantes: PEK, PES, QES, QMS y QMES, figura 3. Las unidades de explotación, es decir, las columnas mineralizadas a extraer, están compuestas ya sea total o parcialmente por alguna de estas unidades recién mencionadas.

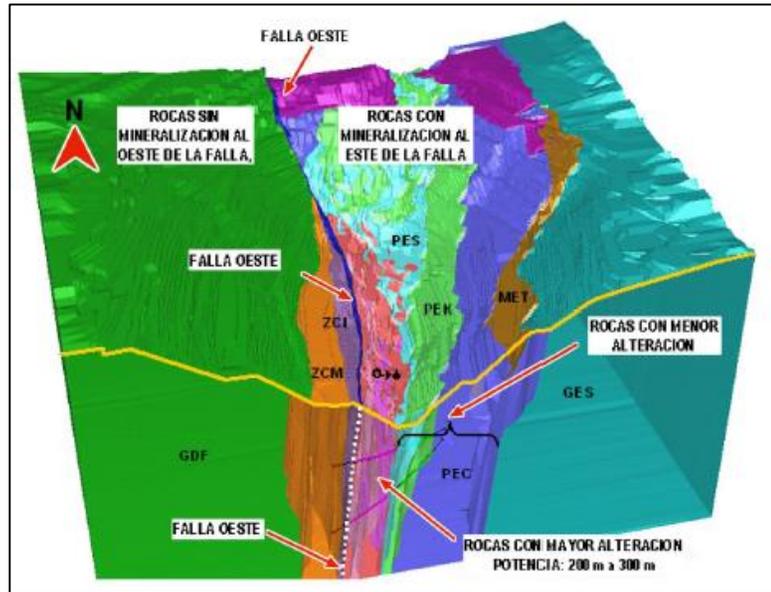


Figura 2: Caracterización yacimiento (Codelco, 2009)

Esta combinación de dominios, presentes en los macro bloques, puede tener un impacto importante, desde la etapa de diseño hasta el proceso de extracción, ya que, al tener diversos tipos de materiales con características propias, los elipsoides que se generan pueden variar en su comportamiento, especialmente al momento de definir la tasa de tiraje. Cada dominio responde de una manera distinta, resultando en una fragmentación secundaria más gruesa o fina, dependiendo de sus propiedades geotécnicas.

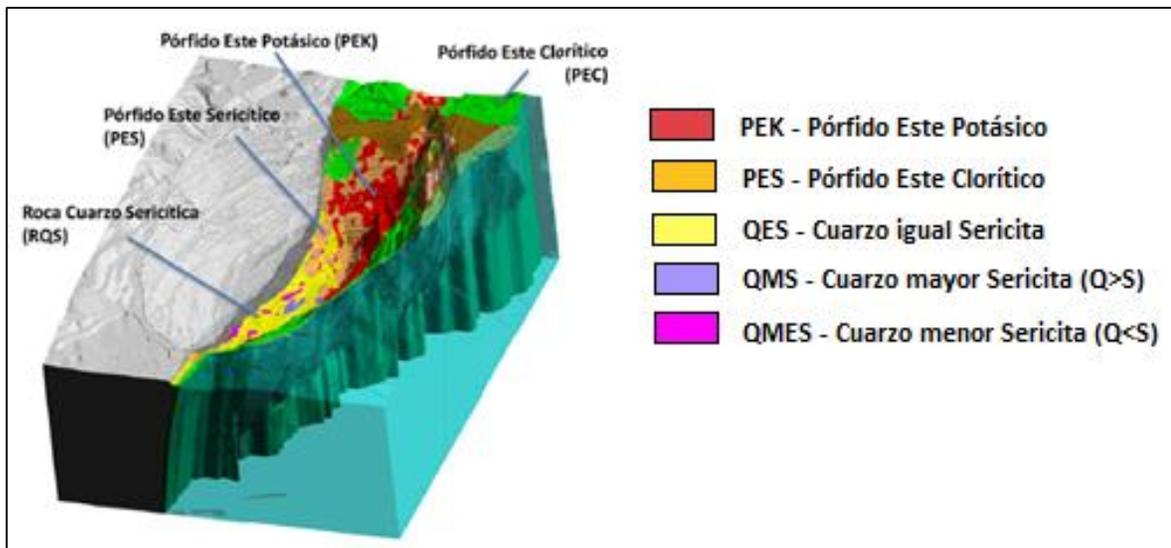


Figura 3: Vista isométrica Chuquicamata, dominios geotécnicos (Codelco, 2009)

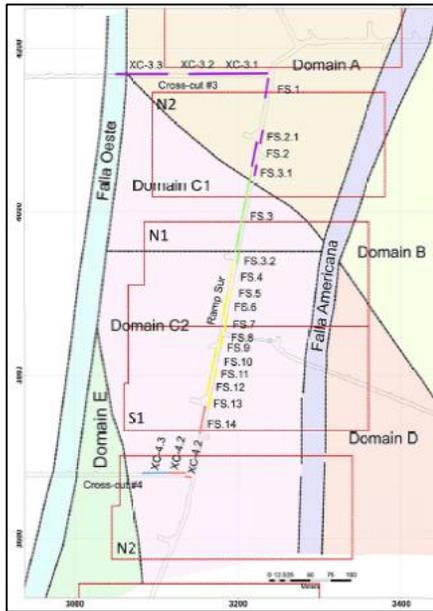


Figura 4: Vista en planta de los dominios estructurales y macro bloques (SRK, 2015)

En este trabajo, se van a estudiar 3 unidades geotécnicas: PEK, QES y QMES, las cuales conforman el macro bloque N1, emplazado en el dominio C2, figura 4, en la cual predomina principalmente el segundo, figura 5. Se desea ver cuánto varía la fragmentación secundaria de estos dominios, al simular la etapa de extracción y someterlos bajo una misma presión de confinamiento. Además, por su mayor presencia, se escoge a QES para elaborar el modelo predictivo.

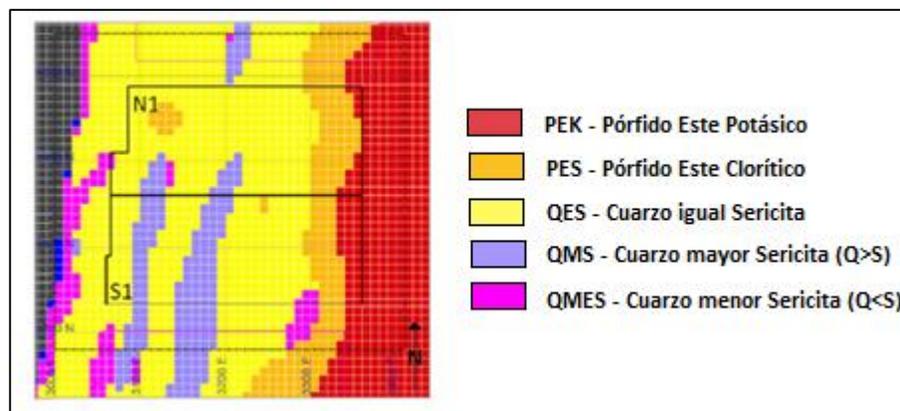


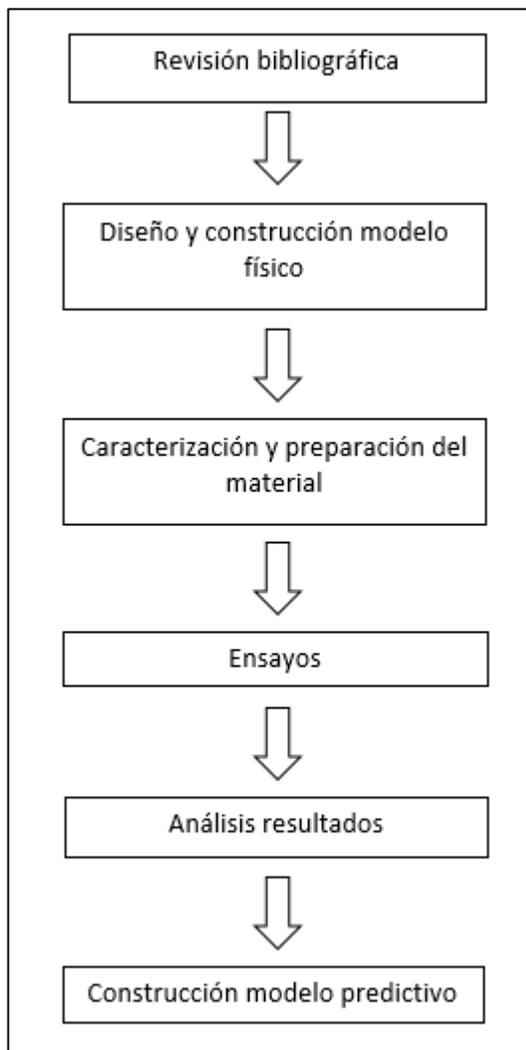
Figura 5: Vista en planta, cota 1841, macro bloques N1 y S1 (Codelco, 2009)

## **1.6. Metodología de investigación**

Para poder cumplir con los objetivos planteados, general como específicos, se establece la siguiente metodología de investigación:

1. **Revisión bibliográfica:** Para identificar todas las variables y los mecanismos involucradas en el proceso de fragmentación secundaria es necesario hacer una recopilación y analizar la información existente sobre este tema.
2. **Diseño y construcción modelo físico:** Dado que los experimentos se llevan a cabo en el laboratorio de Block Caving, se debe diseñar y construir el modelo físico a la escala que corresponde.
3. **Caracterización y preparación del material:** Lo primero que se hace es caracterizar el material de estudio, dado que se usan distintas unidades geotécnicas, en base a los siguientes indicadores: factor de forma, coeficiente de uniformidad y curvatura y carga puntual. Posterior a esto, a partir de una curva de fragmentación primaria definida, se preparan las muestras.
4. **Ensayos:** Se llevan a cabo los experimentos, siguiendo un mismo protocolo experimental, que consiste en aplicar una presión de confinamiento constante sobre las muestras ubicadas al interior del modelo físico.
5. **Análisis resultados:** Posterior a la realización de los experimentos, se hace un proceso de análisis para registrar las variaciones sufridas por parte del material de estudio.
6. **Construcción modelo predictivo:** A partir de los resultados obtenidos es posible elaborar el modelo predictivo de fragmentación secundaria para una de las unidades geotécnicas estudiadas. Además, se propone una nueva modalidad de uso para este.

En la figura 6 se presenta un esquema de la metodología de investigación planteada para esta investigación:



*Figura 6: Esquema metodología de investigación*

## 1.7. Contenidos por capítulo

Este trabajo se divide en los siguientes capítulos:

**Capítulo 1:** Corresponde a la introducción del trabajo, en el cual se expone la motivación, los objetivos generales y específicos, los alcances, el contexto del caso de estudio y la metodología de investigación.

**Capítulo 2:** Se presentan los antecedentes sobre la fragmentación secundaria, partiendo con el material granular y sus características, los tipos y mecanismos de fragmentación, modelos predictivos existentes, uso de modelo físico, autores previos que han usado estos, los parámetros que permiten caracterizar el material de estudio, estimación de esfuerzos verticales y finalmente la base teórica del modelo de fragmentación secundaria escogida para esta investigación.

**Capítulo 3:** Se describe el set experimental, los equipos de laboratorio y el modelo físico escalado; la metodología definida para llevar a cabo los ensayos y finalmente el plan experimental.

**Capítulo 4:** Se muestran los resultados y análisis respectivos de la caracterización del material, las curvas experimentales de fragmentación secundaria, el modelo de conminución elaborado y una serie de estudios relacionados a este, como: test de sensibilidad, propuesta de una nueva modalidad de uso, aplicación directa a partir de datos de mina.

**Capítulo 5:** Finalmente se hace entrega de las conclusiones generales del trabajo y recomendaciones para futuro trabajo, relacionado a este tema de estudio.

# CAPÍTULO 2

---

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Introducción

Como se menciona antes, el área de la minería va pasando por etapas de cambio. Con respecto a la forma de explotación, ha habido una transición desde el método cielo abierto y subterráneos más limitados a una explotación masivo de cuerpos mineralizados, mediante el hundimiento o caving. En estos casos, se trabaja con un flujo gravitacional, la cual consiste en el movimiento de material granular o quebrado de su posición in-situ hacia los puntos de extracción, ubicados en el nivel de producción. Este flujo tiene un impacto directo sobre la recuperación y dilución, por lo mismo es un factor importante a considerar durante el diseño del nivel de producción y la definición de estrategias de tiraje del material. A pesar de su importancia, falta conocimiento sobre los mecanismos principales asociados al flujo gravitacional (Brown, 2007).

Por lo mismo, se han llevado a cabo diversas investigaciones para poder entender mejor este fenómeno, tanto a nivel mina como a laboratorio, usando modelos físicos escalados. Se han logrado avances importantes, pero aún hay temas en las cuales falta profundizar como es la fragmentación y más específico aun, la fragmentación secundaria, que puede condicionar bastante el comportamiento del flujo gravitacional. Esta revisión bibliográfica se hace con respecto al último tema mencionado, que servirá como base para la siguiente investigación, partiendo con la pregunta más básica: ¿Qué es material granular?

### 2.2. Material granular

Los materiales granulares juegan un rol importante en muchos procesos productivos, no solo en la minería sino en la agricultura, la industria farmacéutica, etc. El gran problema es la manipulación y el control de estos, afectando claramente la producción. Por lo mismo, el flujo granular, que está en la frontera entre la mecánica y física, ha sido el foco de varias investigaciones.

Jaeger et al. (1996), define y describe material granular de la siguiente manera: es un conglomerado de partículas discretas macroscópicas, en el caso de no ser cohesivos, entonces las fuerzas que interactúan entre ellas son estrictamente repulsivas, de modo que cualquier forma que adopte el material está determinada por las condiciones de borde impuestas y la gravedad. A pesar de esta simplicidad, el material granular se comporta de una manera muy distinta comparado con otras formas de estado como lo son los sólidos, líquidos y gases. Tiene dos características únicas, la primera es que a temperaturas ordinarias no hay incidencia sobre el material y la segunda es que la interacción entre partículas es disipativa, dada la fricción estática y la inelasticidad de las colisiones.

Pouliquen y Chevoir (2002), complementan esto proponiendo que si las partículas son lo suficientemente grandes (tamaño diámetro sobre 100 micrones) y la viscosidad del fluido intersticial es lo suficientemente bajo entonces se pueden ignorar las fuerzas

electrostáticas, aerodinámicas y capilares, y uno puede hablar de un material granular seco.

Si llevamos esto a la mina, en la mayoría de los casos hay un manejo constante de humedad debido a la percolación de agua, ya sea desde superficie o napas, y la presencia de material fino. Combinando estos dos últimos factores, ya no se cuenta con un material granular seco y se ven involucrados las fuerzas anteriormente mencionadas, haciendo más complejo la manipulación y el control del flujo del material granular. Sumado a esto, también hay una sensibilidad hacia parámetros como: geometría del flujo, rugosidad de la pared, la tasa del flujo, forma de las partículas, granulometría, etc.

Otro tema importante a considerar es el comportamiento del material granular bajo esfuerzos, debido a la sobrecarga de su propio peso. Las partículas no son compresibles pero la estructura completa sí lo es en cierto sentido, dada la facilidad que tienen los fragmentos de acomodarse, tomando nuevas posiciones (Craig, 2007). La forma de transmitir y distribuir los esfuerzos es mediante los puntos de contactos entre partículas como se puede ver en la figura 7, en los cuales se generan esfuerzos normales y tangentes, estos definen los mecanismos de fragmentación que se explicarán más adelante.

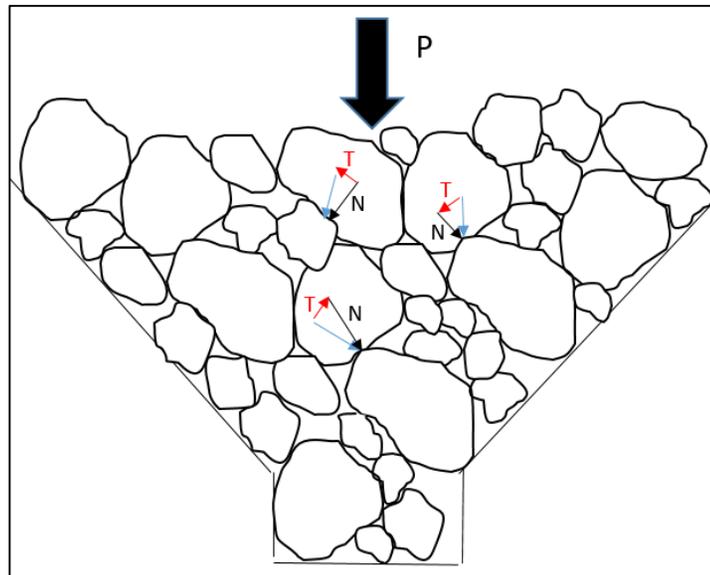


Figura 7: Distribución de esfuerzos, material granular

### 2.3. Fragmentación

El éxito de los métodos de hundimiento depende en gran medida de la distribución granulométrica resultante durante el proceso de caving. Los parámetros de diseño y operación incluyen (Laubscher, 1994, 2000):

- Dimensiones del punto de extracción y su espaciamiento respectivo
- Selección de los equipos
- Control del tiraje
- Tasa de producción

- Entrada de dilución
- Colgaduras y reducción secundaria
- Procesos de conminución posteriores

Por lo anterior, se hace imprescindible una correcta estimación de la distribución de tamaño de las partículas. La predicción de la fragmentación durante un block/panel caving requiere entender dos cosas, el estado inicial del macizo rocoso y los procesos de ruptura ocurridos a través de la columna de extracción.

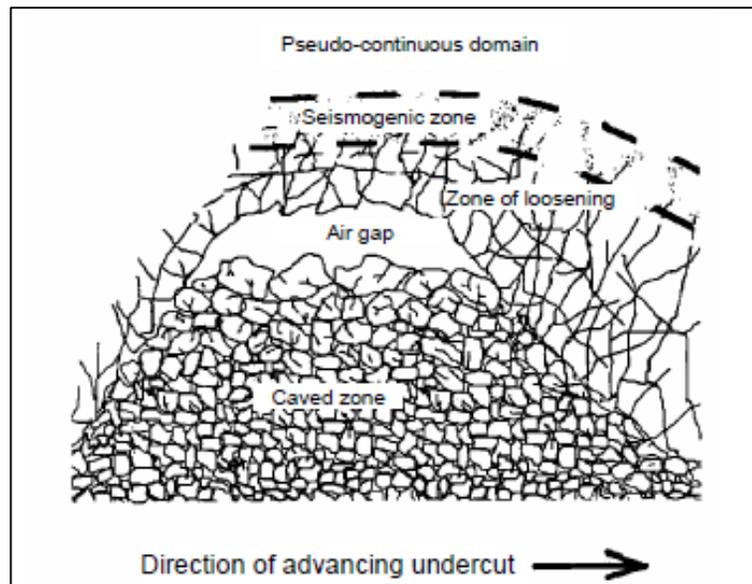


Figura 8: Modelo conceptual de caving (Duplancic y Brady, 1999)

El modelo conceptual propuesto por Duplancic y Brady (1999), indica cómo se desarrolla el fenómeno del caving y a su vez la fragmentación del macizo rocoso, figura 8. Esto fue posible gracias a la aplicación de un sistema de monitoreo sísmico en las etapas tempranas del proceso de hundimiento en la mina Northparkes, Australia. A partir de la información recolectada, dedujeron que existen 5 zonas:

1. Caved zone: Esta región contiene el material quebrado que se desprendió del cave back y entrega soporte a las paredes.
2. Air gap: Es el espacio de vacío generado como resultado de la diferencia entre la tasa de extracción y el proceso de quiebre del macizo.
3. Zone of discontinuos deformation o loosening: En esta zona ocurre la desintegración del macizo rocoso, en esta zona no se registra sismicidad.
4. Seismogenic zone: Presencia de actividad sísmica debido a deslizamiento de fracturas y falla de la roca, la causa de esto es la variación de esfuerzos.
5. Surrounding rock mass: La parte del macizo rocoso que se deforma elásticamente, sobre la zona sismogénica y que rodea las zonas anteriores.

### **2.3.1. Tipos de fragmentación**

Con el paso del tiempo se han ido caracterizando y separando los tipos de fragmentación observados, esta generalmente aceptado la existencia de 3 niveles (Brown, 2007).

La primera consiste en la fragmentación in-situ, en la cual los bloques rocosos están completamente determinados por una red de discontinuidades preexistentes en el macizo. El tamaño y la forma de estos bloques son un resultado directo de la geometría de las discontinuidades abiertas presentes en el macizo rocoso. Las discontinuidades que no se encuentran completamente abiertas y que tienen resistencia a la tracción y corte, no presentan caras libres de bloques in-situ, pero son planos de debilidad

Una vez que el caving ha iniciado, la fragmentación primaria resultará de las condiciones de carga impuestas sobre el macizo rocoso en la vecindad del cave back. En esta etapa, la mayoría de las fallas se pueden esperar en planos de debilidad existentes, como se mencionó antes, pero al estar sometido a altas tasas de estrés, puede ocurrir la ruptura de la roca intacta. La extensión de estas fallas va depender de la resistencia de las discontinuidades como de los bloques rocosos afectados, relativos a la magnitud y orientación de los esfuerzos impuestos. Para un macizo rocoso, la distribución granulométrica resultante será más gruesa en el caso de un estado tensional de esfuerzos de tracción, donde la gravedad causa el desprendimiento de los bloques del cave back.

La última etapa es la fragmentación secundaria, esta se obtiene durante el tiempo de residencia de la roca hundida en la columna de extracción. La naturaleza y el grado de reducción pueden esperarse que varíen de acuerdo al régimen de esfuerzos presentes en el caving, la composición y propiedades mecánicas de la roca, la tasa de extracción y la altura a la que el material está siendo extraído (Fuenzalida, 2012).

### **2.3.2. Mecanismos de fragmentación**

En la literatura se habían considerado al menos 2 mecanismos principales para la generación de la fragmentación secundaria, pero se agregó un tercero (Pierce, 2010):

- Fragmentación por compresión, dentro de las zonas estáticas.
- Fragmentación por cizalle, en las zonas de movimiento.
- Fragmentación por impacto, por la caída a través del air gap desde el cave back.

Estarían asociados a dos modos de ruptura:

- Fracturamiento de bloques, debido a altos esfuerzos normales y bajos esfuerzos de corte.
- Redondeo de las esquinas de los bloques, debido a bajos esfuerzos normales y altos esfuerzos de corte.

Para el caso de la fragmentación por compresión, la fractura ocurre cuando la energía aplicada es suficiente para cargar una región del bloque y llegar al punto de ruptura, resultando una pequeña cantidad de partículas gruesas, en esta situación es menor la generación de finos.

Hay ciertos factores que pueden condicionar este proceso, ya sea propios del material o por la forma de la distribución granulométrica inicial. La tenacidad es clave, dado que es el indicador de cuanta energía puede absorber la partícula antes de quebrarse, por otro lado, la distribución de partículas también juega un rol importante, hay evidencia que indica que, en materiales bien distribuidos, los fragmentos de mayor tamaño son menos susceptibles a sufrir ruptura debido al número de coordinación o contacto entre los fragmentos (Pierce, 2010).

Es sabido que la resistencia a la trituración de una partícula está en función de su tamaño. Es más, si una partícula tiene un número alto de coordinación, es decir, el número de contactos con partículas vecinas, la carga sobre esta se distribuye de mejor forma y por lo tanto la probabilidad de fractura es menor que en el caso de partículas con un menor número de coordinación (Mcdowell et al, 1996; Fuenzalida, 2012).

En el segundo caso, fragmentación por cizalle, la energía aplicada no es suficiente para lograr la ruptura del bloque, generando esfuerzos localizados en ciertas zonas y de esta manera un quiebre local, por lo tanto, la cantidad de partículas finas que se desprende es mayor que el caso anterior. Esta es la principal causa de generación de material fino y los factores que influyen en este mecanismo se asocian a propiedades del material (abrasividad, factor de forma, resistencia) (Gómez, 2014).

Es importante identificar los mecanismos que condicionan el tipo de fragmentación de las partículas, ya sea más gruesa o fina, dado que puede afectar el flujo gravitacional del material granular. El material fino tiende a desplazarse con mayor rapidez y otro efecto importante que tiene es que puede servir como amortiguación de los bloques mayores, disminuyendo el desgaste de esto.

El tercer tipo de fragmentación se basa principalmente en el impacto generado al caer de una cierta altura, que es el cave back, aunque para esta investigación no se va a considerar este mecanismo dado que no ocurre esta situación. Solamente se darían los dos primeros casos. Es muy común de que ocurran de manera simultánea, cuando hay compresión en los puntos de contacto, se dé también el fenómeno de abrasión por los esfuerzos localizados.

Resumiendo, los factores principales que afectan la fragmentación de partículas son (Pierce, 2010; Fuenzalida, 2012):

- Distribución granulométrica.
- Forma de los fragmentos.
- Estado de estrés.
- Distribución efectiva de las trayectorias de esfuerzos.
- Índice de vacíos.
- Dureza de las partículas.
- Presencia de agua.

### **2.3.3. Monitoreo de la fragmentación**

Es un requisito fundamental, para la etapa de diseño, saber la fragmentación con la cual se trabajará durante la vida de la mina, tanto primaria como secundaria. En respuesta a esto, se han generado diversos modelos predictivos a lo largo de los años, los cuales se presentarán más adelante, pero para que estos sean realmente confiables es necesario validarlos con datos reales, existiendo métodos que miden la fragmentación en los puntos de extracción. Estos son: tamizaje, mediciones físicas, análisis de la tasa de producción, estudio de sobre tamaños, métodos de observación y procesamiento digital de imágenes (DIP).

DIP es un método práctico y robusto, para medir la fragmentación a gran escala, en la cual se analizan fotografías o imágenes de video, mediante técnicas computacionales que permiten el procesamiento de estos, obteniendo la distribución de tamaño de partículas. La gran diferencia entre el método de procesamiento digital de imágenes y los demás son: no requieren interrumpir el proceso de extracción, hay una mayor velocidad de muestreo, es de bajo costo y fácil aplicación. Su principal desventaja es que solo capta la superficie de un volumen y asume que es representativo. Algunos ejemplos del procesamiento digital de imágenes (DIP) son FracScan, WipFrag y Split.

El método está en general compuesto por 3 etapas: muestreo (obtención de imágenes representativas del material a analizar), adquisición (selección de imágenes representativas) y análisis mediante un software (se identifica la distribución de tamaños de las imágenes). Los errores que se pueden dar durante estas etapas son: de muestreo (sesgo en la toma de imágenes), errores durante el procesamiento, deficiente delimitación (presencia de sombras) y pérdida de finos (Montecino, 2011). Al suceder esto, se ve afectado el proceso de validación con respecto a los modelos predictivos ya que la fragmentación medida en terreno no sería confiable.

### **2.3.4. Modelos predictivos de fragmentación**

En la búsqueda de entender mejor la fragmentación, diversos autores han elaborado modelos predictivos, estos van desde modelos empíricos hasta software utilizado hoy en día en la minería. A continuación, se hará una revisión de los más relevantes, además se mencionarán autores que han hecho aportes importantes al estudio de la fragmentación.

#### **A. Merino, 1986, “Predicting the size distribution of ore fragments in block caving mines”**

La metodología de Merino permite estimar la fragmentación primaria y secundaria. Para el segundo caso, el autor estableció el uso del “Matrix model” para estudiar el proceso de conminución generado en la columna de extracción, dado su generalidad y simplicidad se puede aplicar a cualquier proceso de “quiebre”. Esta consta de dos funciones: ruptura y de selección. El primero lo que hace es establecer la probabilidad de quiebre y que el producto final contenga partículas de todo tamaño y por otro lado la selección indica que proporción sufre el quiebre de sus partículas. Una crítica que se le puede hacer a este modelo es que no considera la condición de esfuerzos.

## B. Laubscher, 1994, “Cave mining – the state of art”

La fragmentación es un factor importante en la viabilidad de la minería del caving, más aún en cuerpos mineralizados competentes y extensos, dado que determina la productividad en los puntos de extracción. Laubscher estableció el siguiente gráfico, figura 9, en el cual relaciona la variación o la disminución de los fragmentos en base a la altura de extracción de la columna y el tipo de material que se trata (grueso, intermedio y fino).

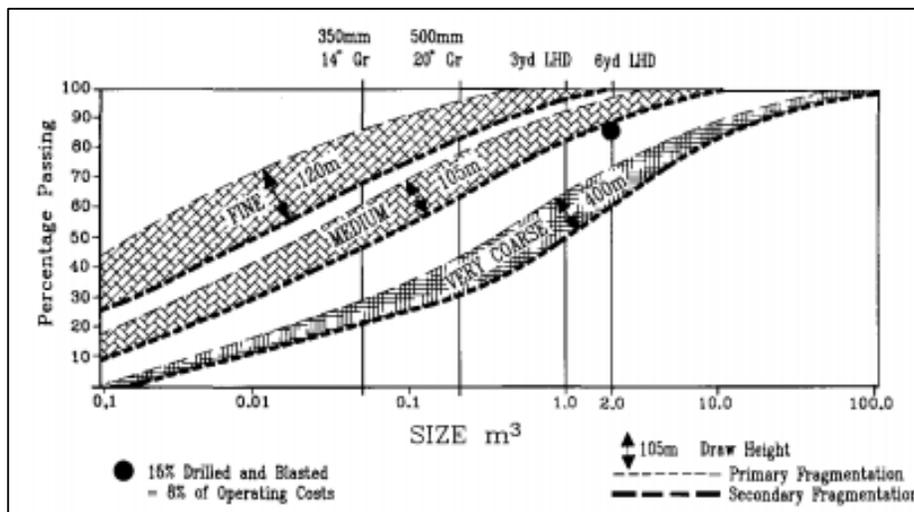


Figura 9: Distribución de tamaños de material quebrado, Laubscher (1994)

Este modelo tampoco explica la influencia de los esfuerzos de compresión y cizalle sobre la fragmentación.

## C. Esterhuizen, 1994-1999, “Block Caving Fragmentation (BCF)”

BCF es un programa que incorpora reglas empíricas y analíticas, describiendo los procesos y factores que influyen sobre la fragmentación. Muchas de estas reglas están basadas en la experiencia de Laubscher. El programa consiste de 3 módulos:

- El primero calcula la fragmentación primaria basada en la resistencia de la roca, geometría y espaciamiento de las discontinuidades y el estado de esfuerzos.
- El segundo módulo estima la fragmentación secundaria tomando en consideración la relación de aspecto de los bloques rocosos, la resistencia de la roca, presión generado por el cave, esfuerzos inducidos por arqueamiento de la columna y altura de extracción, la tasa y la altura de extracción.
- El tercero considera el potencial de colgaduras que se puede tener en la batea usando la fragmentación secundaria como input.

Considerando todo lo anterior, BCF entrega un set de gráficos que muestran la distribución de tamaño de partículas en cualquier etapa de la extracción. Este programa es actualmente el más usado para evaluar la fragmentación en la minería.

#### **D. Bridgewater, 2003, “Particle attrition due to shearing – the effects of stress, strain and particle shape”**

Bridgewater estableció un modelo empírico, que fue relacionado con el estudio de la fragmentación secundaria, inducida por esfuerzos de corte presentes en la minería del caving. La base de su trabajo fue analizar el desgaste del material de prueba, considerando una tensión normal y de cizalle, obteniendo la siguiente relación.

$$W = K_N \cdot \left( \frac{\sigma_N \cdot \Gamma^\Phi}{\sigma_{scs}} \right)^\beta$$

*Ecuación 1: Modelo empírico, Bridgewater (2003)*

Lo que entrega este modelo es la fracción de masa conminuida (W), en base a una relación establecida entre la tensión normal ( $\sigma_N$ ), la tensión de cizalle ( $\Gamma$ ), la resistencia a la tracción ( $\sigma_{scs}$ ) y las constantes empíricamente obtenidas son  $K_N$ ,  $\Phi$  y  $\beta$ . El aporte más importante de este trabajo es que la fragmentación secundaria, bajo cizalle, está fuertemente controlado por el esfuerzo y la deformación por corte, relativo a la resistencia de las partículas.

#### **E. Pierce et al, 2010, “A Hybrid Methodology for Secondary Fragmentation Prediction in Cave Mines”**

Pierce et al. desarrollaron una metodología híbrida para el modelamiento de la fragmentación secundaria. La hipótesis planteada, es que esta fragmentación en block y panel caving, ocurre mediante 3 formas:

- Fragmentación por impacto, por la caída a través del air gap desde el cave back
- Fragmentación por compresión, dentro de las zonas estáticas
- Fragmentación por cizalle, en las zonas de movimiento.

El modelo de ruptura por cizalle se ha incorporado al software de simulación, REBOP, de esta manera se puede llevar a cabo automáticamente el estudio y el análisis de la fragmentación secundaria, como parte de las simulaciones de tiraje (Chitombo, 2010).

#### **F. Castro et al, 2014, “Experimental study of gravity flow under confined conditions”**

En este trabajo, se presenta el diseño y los resultados de una metodología experimental, a nivel de laboratorio, para estudiar el flujo gravitacional confinado, extrayendo material desde un punto de extracción, con el fin de ver el impacto sobre la fragmentación secundaria y el flujo de material quebrado. Lo interesante de esto es que hace uso de un modelo físico escalado para estudiar el fenómeno de la fragmentación. A partir de los resultados, se observa que la fragmentación secundaria está fuertemente influenciada por la carga vertical y la distribución de tamaño de partículas de la masa quebrada.

## **G. Gómez 2014, “Modelo de fragmentación secundaria y coladuras en minería de caving”**

Continuando con la línea anterior, mediante el uso de modelos físicos escalados y estudio del flujo gravitacional confinado a nivel de laboratorio, se presenta un nuevo modelo de fragmentación secundaria, cuyo fundamento es un set de ecuaciones basadas en las características del material y las condiciones de operación. La analogía que se plantea, para la implementación de este modelo, es que se puede asociar la fragmentación secundaria a un proceso de molienda continua, bajo un flujo pistón, al cual se la ha incorporado el efecto de la carga vertical. Este modelo es capaz de predecir la distribución de tamaños de partículas, variando el esfuerzo vertical.

En la tabla 1 se presenta un resumen de los modelos predictivos de fragmentación secundaria.

Tabla 1: Resumen modelos predictivos de fragmentación secundaria

Modelos				Fragmentación secundaria		
Autor	Año	Modo de estudio	Fragmentación	Input	Estudio esfuerzos	Conclusiones
Merino	1986	Modelo matemático	Primaria y secundaria	Funciones de quiebre y selección	X	Uso del matrix model para describir proceso de fragmentación
Laubscher	1994	Gráfico	Primaria y secundaria	Altura de extracción, tipo de material, manejo de materiales	X	Relaciona 3 variables que condicionan la fragmentación secundaria
Esterhuizen	1994-1999	Software (BCF)	Primaria y secundaria	Relación de aspecto, resistencia de roca, tasa y altura de extracción	Presión generada por el cave	Entrega gráficos de distribución de tamaño de partículas en cualquier etapa de extracción
Bridgewater	2003	Modelo empírico	Secundaria	Tensión normal y de cizalle, tamaño y resistencia de la partícula	Esfuerzos de corte	Predice la fracción másica desgastada bajo cizalle
Pierce	2010	Modelo numérico	Secundaria	Tensión normal y de cizalle, tamaño y resistencia de la partícula	Esfuerzos de corte	Modelo de ruptura por cizalle, incorporado a REBOP
Castro	2014	Modelo físico	Secundaria	Curva fragmentación primaria, esfuerzo vertical	Confinamiento (vertical)	Metodología experimental, a escala laboratorio. Influencia de la carga vertical y la distribución granulométrica de la masa quebrada.
Gómez	2014	Modelo físico	Secundaria	Curva fragmentación primaria escalada, esfuerzo vertical	Confinamiento (vertical)	Modelo predictivo de fragmentación secundaria, con variación de esfuerzo vertical

## **2.4. Estudios a escala laboratorio**

Los modelos físicos se presentan como una herramienta de ingeniería, que tiene la ventaja de tener un menor costo asociado, evitando las dificultades propias de la experimentación a escala mina, dado que obtener mediciones in-situ es complejo y además de larga data. Estos sistemas son construidos para cumplir con dos tipos de funciones (Pineda, 2012):

- a) Modelar una situación específica de una mina
- b) Modelar situaciones genéricas para investigar reglas físicas que definen fenómenos específicos

Sin embargo, para poder validar los modelos físicos, es necesario desarrollar una metodología apropiada teniendo en cuenta los efectos de escala y las limitaciones propias que derivan de estos sistemas. Por lo mismo, se debe considerar esto al momento de analizar y escalar los resultados experimentales obtenidos. Es importante acotar que la efectividad de estos modelos depende del grado de similitud que posee con su respectivo prototipo (Castro, 2006).

Con prototipo se hace referencia a una forma de estudiar un cierto fenómeno, incluyendo la mayor cantidad de variables, en cambio, el modelo físico es una representación simplificada del prototipo, que considera las variables esenciales, para poder replicar el fenómeno (López, 2016).

Diversos autores han hecho uso de esta modalidad para poder estudiar fenómenos físicos como: flujo gravitacional (Pineda, 2012; Fuenzalida, 2012; Olivares, 2014), generación de colgaduras (López, 2016), fragmentación secundaria (Gómez, 2014), etc.

Por lo tanto, considerando estos antecedentes, se decide que el estudio de la fragmentación y elaboración de un modelo de conminución se realiza a través de un modelo físico escalado.

### **2.4.1. Análisis de similitud**

Se debe llevar a cabo un análisis de similitud con el fin de establecer cuáles son los factores de escala que deben ser utilizados al momento de definir las variables importantes para los experimentos.

La similitud implica el concepto de homología entre dos sistemas, un prototipo y el modelo. Para que un fenómeno en un modelo físico sea similar al de un prototipo, se requiere que exista similitud geométrica, cinemática y dinámica (Mery H, 1972):

- Similitud geométrica: Dos sistemas son geoméricamente similares cuando la distancia entre dos puntos homólogos dados, está regida por un factor de escala constante.
- Similitud cinemática: Dos sistemas son cinematicamente similares cuando dos eventos homólogos están regidos por un factor de escala de tiempo constante.

- Similitud dinámica: Dos sistemas son dinámicamente similares con respecto a dos puntos homólogos cuando la tasa entre la inercia y cualquier fuerza externa es constante, entre el modelo y el prototipo.

Cumpliendo con cada uno los requisitos recién mencionados, se alcanzaría una similitud dinámica completa para el modelo físico, esto es imposible para sistemas reducidos que usan material granular (Pöschel et al., 2001). Para el caso de la fragmentación secundaria sucede lo mismo, hay variables y condiciones que jamás podrán ser replicados, pero a pesar de esto, si existen factores que puede ser escalados y permiten estudiar el fenómeno físico, tabla 2.

Tabla 2: Listado de condiciones de similitud, Pineda M. (2012)

Variable	Factor	Scale Factor
Length	$\lambda_L$	$\lambda_L$
Area	$\lambda_A$	$\lambda_L^2$
Volume	$\lambda_{Vol}$	$\lambda_L^3$
Velocity	$\lambda_V$	$\lambda_L^{1/2}$
Time	$\lambda_T$	$\lambda_L^{1/2}$
Friction Angle	$\lambda_{\tan(\phi)}$	1

#### 2.4.2. Fuerzas dominantes en el modelo físico

El flujo de material granular grueso esta principalmente sujeto a dos tipos de fuerzas, gravedad y fricción. La fuerza gravitacional es un fenómeno natural, gracias al cual los cuerpos físicos son atraídos por una fuerza proporcional a su masa. En cambio, la fricción es una fuerza ejercida entre granos, ya sea por contacto puntual o superficial (Castro, 2001).

Sin embargo, al trabajar con un modelo físico, es necesario escalar las partículas y al disminuir el tamaño de estos, pueden aparecer otro tipo de fuerzas, afectando el flujo granular:

- Fuerzas Van der Waals
- Fuerzas capilares
- Fuerzas cohesivas
- Fuerzas electrostáticas
- Fuerzas magnéticas

En este caso, para el factor de escala escogido (1:75), las partículas más pequeñas no caerían dentro del rango que pueden generar estas fuerzas adicionales y por lo tanto se estaría trabajando con la gravedad y fricción, además de la carga adicional que se le aplicará dado que es un flujo granular confinado.

### 2.4.3. Estudio fragmentación secundaria con modelo físico

En el capítulo “modelos predictivos de fragmentación”, se hizo referencia a algunos autores que han usado un modelo físico para estudiar la fragmentación secundaria mediante la manipulación de un flujo gravitacional confinado. En esta sección se presentan los trabajos que establecieron la base de la metodología a usar para esta investigación.

El primer autor es Fuenzalida (2012), quien se propuso como objetivo mejorar el entendimiento sobre los mecanismos físicos en un flujo gravitacional confinado. Hasta ese momento, no existía un equipo de laboratorio estándar para estudiar este tema, por ello diseñó un set experimental y planteó una metodología que incluye la preparación del material de estudio, la estimación de esfuerzos verticales a aplicar, mediante la aproximación de Janssen-Nedderman, y la realización de los ensayos con una prensa semi-asistida.

A pesar de que estableció una base importante, había formas de mejorar esto, modificando el equipo experimental, que en este caso consistía principalmente en el cilindro de acero, usado como contenedor, incorporando una batea para replicar de mejor manera la extracción de material.

Gómez (2014) también se dedicó a estudiar la fragmentación secundaria, usando un modelo físico similar. La diferencia fue la incorporación de una batea y un sistema de manejo de materiales con palas manuales. Para los ensayos, procedió según la metodología general planteada por Fuenzalida. El segundo hecho importante fue la propuesta de un modelo de fragmentación secundaria a partir de un set de ecuaciones del área de la molienda, las cuales serán explicadas en la siguiente sección. En la figura 10, se pueden ver los resultados del trabajo de Gómez.

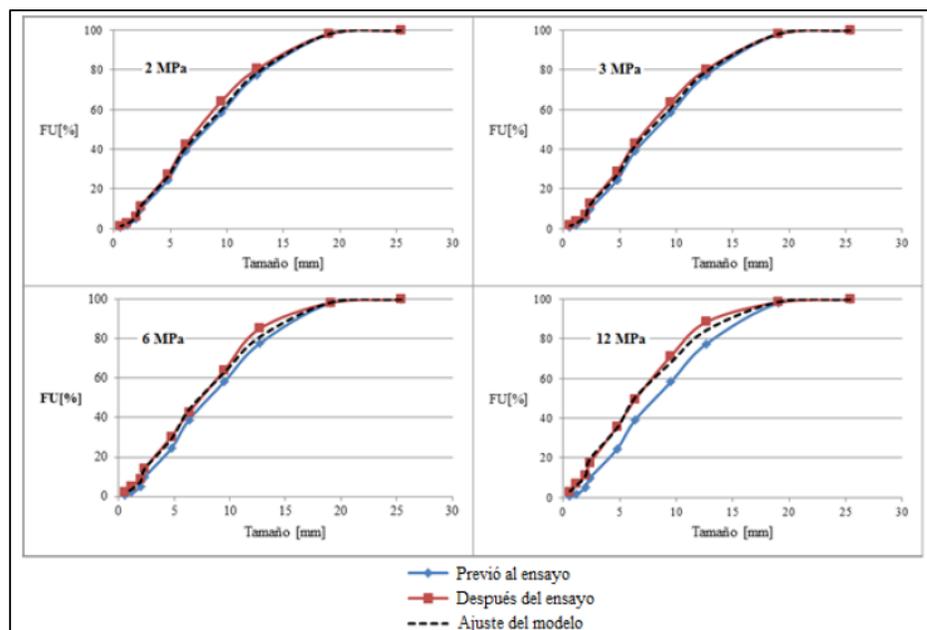


Figura 10: Curvas de fragmentación ( $d_{50}=8$  mm), Gómez (2014)

Gracias a estos autores, es posible proponer los experimentos para este trabajo de investigación. Lo mismo sucede para la metodología experimental, se decide usar esta misma, pero agregando un cambio en el sistema de manejo de materiales, pasando de una extracción manual a una mecanizada, mediante dos palas.

## 2.5. Caracterización de material

Es importante caracterizar el material de estudio dado que se van a considerar 3 dominios geotécnicos distintos, y los resultados finales pueden estar condicionados por las propiedades de cada una de ellas. Por lo tanto, forma parte de este trabajo de investigación.

### 2.5.1. Coeficiente de uniformidad y curvatura

La forma y pendiente general de una curva de distribución granulométrica puede ser descrita mediante el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y el coeficiente de curvatura ( $C_z$ ), definidos de la siguiente manera, ecuaciones 2 y 3:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

*Ecuación 2: Coeficiente de uniformidad*

Mientras mayor sea el valor del coeficiente de uniformidad, mayor es el rango de tamaño de partículas.

$$C_z = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

*Ecuación 3: Coeficiente de curvatura*

Una muestra que posee un coeficiente de curvatura entre 1 y 3 posee una buena gradación de partículas (Craig, 2004). Para ambas ecuaciones se tiene que  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{60}$  corresponden al porcentaje pasante de 10%, 30% y 60% de la muestra respectiva, estas se estiman a partir de la curva granulométrica original.

### 2.5.2. Factor de forma

El factor de forma de una partícula se puede definir en base a dos escalas, la esfericidad y la redondez (Cho et al, 2006).

1. La esfericidad hace referencia a la forma global de la partícula y refleja la semejanza entre el largo, alto y ancho. Esta se puede cuantificar como el radio del círculo inscrito más grande ( $r_{\max-in}$ ) con respecto al radio del círculo circunscrito más pequeño ( $r_{\min-cir}$ ), figura 11.

$$S = \frac{r_{\max-in}}{r_{\min-cir}}$$

Ecuación 4: Definición esfericidad partícula (Cho et all., 2006)

- La redondez es cuantificada como el radio de curvatura medio de las características superficiales y el radio del círculo inscrito más grande ( $r_{\max-in}$ ) en la partícula, ecuación 5.

$$R = \frac{\sum r_i / N}{r_{\max-in}}$$

Ecuación 5: Definición redondez partícula (Cho et all., 2006)

En la figura 12 se presenta la matriz que permite obtener la clasificación del material estudiado, basado en la esfericidad y la redondez.

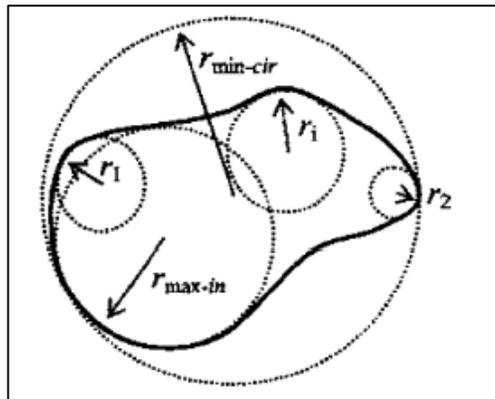


Figura 11: Definición radios en una partícula, esfericidad

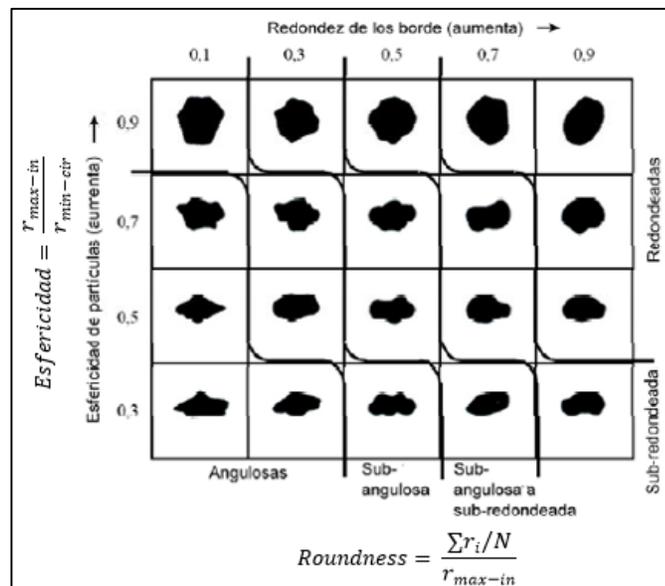


Figura 12: Matriz de clasificación, esfericidad y redondez (Hoz, 2007)

### 2.5.3. Carga puntual

El test de carga puntual es una forma rápida y económica para estimar de manera indirecta la resistencia a la compresión uniaxial (ISRM Commission, 1985). Esta prueba consiste en romper las muestras, aplicando una carga concentrada “ $P$ ”. Con este valor se calcula un índice de carga puntual no corregido, ecuación 6.

$$I_s = \frac{P}{De^2}$$

*Ecuación 6: Índice de carga puntual no corregido*

Con  $D_e$  el diámetro equivalente de la muestra,  $I_s$  varía con el diámetro equivalente, por lo tanto, se debe aplicar una corrección para obtener un índice de resistencia única a la carga puntual. Si es posible, es preferible llevar a cabo pruebas diametrales con muestras de 50 a 55 mm de diámetro, el índice de resistencia a la carga puntual  $I_{s(50)}$ , se define como el valor de  $I_s$  que se hubiese obtenido en un ensayo diametral con un  $D=50$  mm.

Diversos autores, llevando a cabo múltiples ensayos, demostraron que para pasar de  $I_s$  a  $I_{s(50)}$ , se puede usar la siguiente ecuación 7.

$$I_{s(50)} = I_s \times \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45}$$

*Ecuación 7: Índice de carga puntual corregido*

Otra relación que se encontró fue la conversión del índice de carga puntual corregido a la resistencia de compresión uniaxial, multiplicando un factor a este primer dato obtenido. Estudios llevados a cabo por Broch y Franklin (1972), establecieron un rango que varía entre 22 a 24 (Brown, 2007), ecuación 8.

$$\sigma_c = (22 - 24) \times I_{s(50)}$$

*Ecuación 8: Conversión  $I_{s(50)}$  a UCS*

## 2.6. Estimación de esfuerzos verticales

Los esfuerzos verticales en materiales granulares no son iguales al esfuerzo litostático (proporcional a la profundidad), si no, más bien provocan una carga asintótica con un valor máximo acotado, como lo refleja la solución de Janssen para modelación de esfuerzos en silos (Fuenzalida, 2012). En el caso de la fragmentación secundaria, se trabaja con una columna de material quebrado y por lo tanto clasifica como un material granular, justificando de esta manera la aproximación Janssen-Nedderman (1992) para estimar los esfuerzos verticales a aplicar.

Como fue establecido en los alcances, solamente se considera la aplicación de una carga vertical constante, no tomando en cuenta efectos de esfuerzos horizontales. Para esto es necesario definir los parámetros que requiere la fórmula de Janssen-Nedderman, ecuación 9.

$$\sigma_v = \frac{Rh \cdot p_b \cdot g}{\tan(\theta_w) \cdot k} \left(1 - \exp\left(\frac{-k \cdot \tan(\theta_w) \cdot z}{Rh}\right)\right)$$

Ecuación 9: Fórmula de Janssen-Nedderman

Con:

- Rh: Radio hidráulico del área de flujo [m]
- P<sub>b</sub>: Densidad aparente [ton/m<sup>3</sup>]
- g: Gravedad [m/s<sup>2</sup>]
- k: Razón entre esfuerzos horizontales y verticales
- θ: Ángulo de fricción interno [°]
- θ<sub>w</sub>: Ángulo de fricción entre el mineral y los bordes del contenedor [°]
- z: Profundidad [m]

Se emula el macro bloque N1, del Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo, tomando como supuesto que el caving ya se propagó y conectó a superficie. Para estos parámetros se van a considerar los siguientes valores, presentados en la tabla 3:

Tabla 3: Parámetros ecuación de Janssen-Nedderman

Parámetros	
K	0,4
Densidad aparente [ton/m <sup>3</sup> ]	2,1
Gravedad [m/s <sup>2</sup> ]	9,8
Ángulo fricción [°]	31
Ángulo fricción interno [°]	31

El planteamiento original de Janssen estaba enfocado en el estudio de material granular en silos, por esa misma razón hace diferencia entre un ángulo de fricción interno del material y un ángulo de fricción con los bordes del contenedor. En este caso al emular un macro bloque, estos ángulos son iguales dado que el bloque está rodeado por el mismo material.

Por otro lado, el ángulo de fricción interno se obtiene a partir del ángulo de reposo, para el caso de materiales no cohesivos, estos ángulos son iguales, si se da el supuesto en que se dispone de materiales ideales de Coulomb no cohesivos (Orellana, 2012, Craig, 2004), lo cual se asume para esta investigación.

Para cualquier material, medir el talud empinado más estable es el método comúnmente más conveniente para determinar el ángulo de fricción. Este consiste en llenar un recipiente, en este caso un balde, con material granular lo más suelto posible, levantarlo verticalmente y medir el ángulo formado en la base del montículo

Lo que faltaría por determinar es el radio hidráulico y la profundidad, a la cual se encuentran las columnas de extracción, a pesar de que se tiene conocimiento del área de flujo del macro bloque N1 (35.000 m<sup>2</sup>), se decide variar este valor para mostrar los posibles rangos de esfuerzos, gráfico 1.

La altura promedio de columna es de 230 a 240 m, esto se traduce en una carga vertical entre 2 a 3 MPa, para el bloque N1. Pero para asegurar una reducción diferenciable de los fragmentos, según esfuerzo aplicado, se decide usar 2 y 4 MPa para los ensayos.

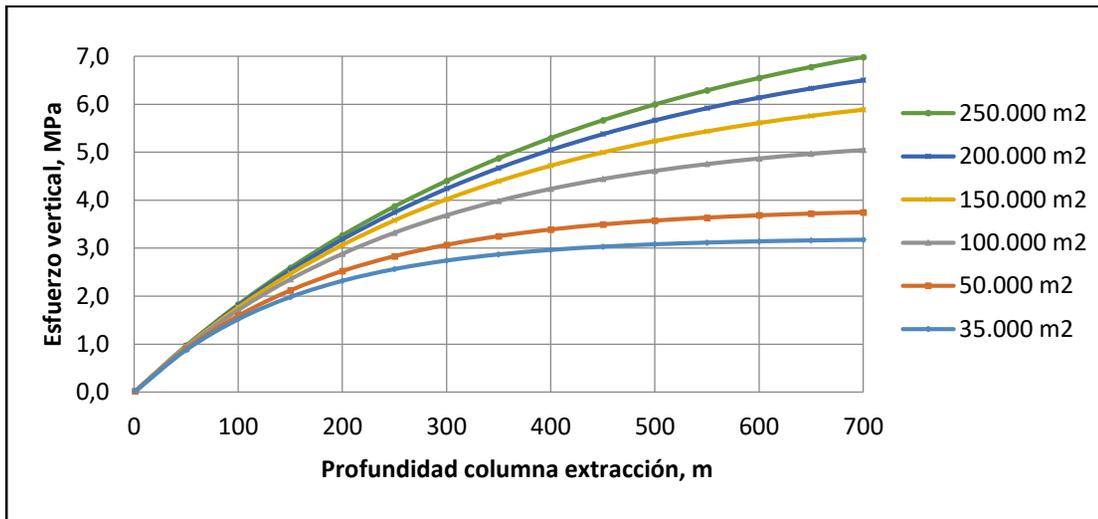


Gráfico 1: Estimación de esfuerzos según área de flujo y profundidad

## 2.7. Modelo de fragmentación secundaria

El modelo de fragmentación secundaria que se usa es aquella propuesta por Gómez (2014). Para poder comprenderlo, es necesario entender de donde proviene su base teórica. La fragmentación secundaria se puede asociar a un proceso de conminución, semi-autógena o autógena, en el cual la columna de extracción representa la máquina de conminución. La estructura del modelo tiene su base en un balance de masa, expresado en figura 13, la cual es ampliamente utilizado y aceptado para muchos sistemas de conminución (Castro, 2016).

Mientras más alta sea la columna de extracción, mayor es la probabilidad de que los bloques se puedan reducir por la distancia a recorrer, una partícula individual al disminuir de tamaño genera nuevos fragmentos, estos a su vez sirven como alimento para que suceda el mismo proceso y así sucesivamente. Por esta razón se le puede asociar a un proceso de moliendo autógena (Merino, 1986).

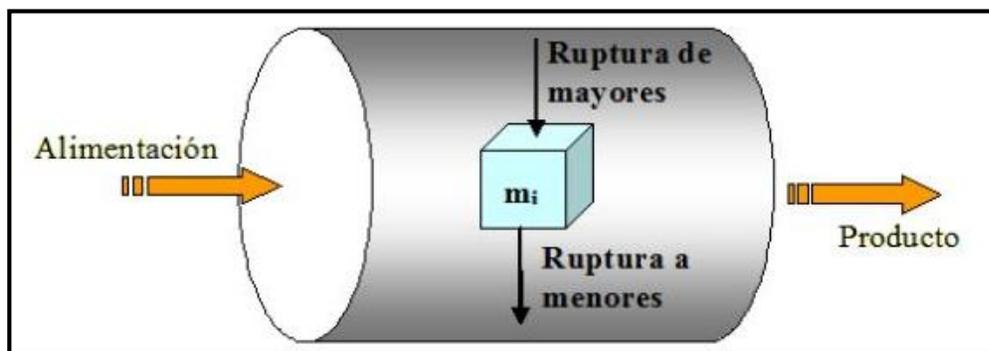


Figura 13: Esquema general proceso de conminución

Este modelo de conminución fue construido en base a una línea continua de trabajos previos, que partió en los años 40 con Epstein (1948), quien tomó como supuesto que el proceso de quiebre de partículas se puede dividir en etapas, es decir, la variación que sufre la distribución de tamaños puede ser estudiada como una secuencia de eventos discretos. Además, asoció dos funciones importantes a este supuesto, la probabilidad de quiebre de una partícula de tamaño “y” en el paso “n” del proceso ( $P_n(y)$ ) y la distribución acumulativa ( $F(x,y)$ ), en peso, de partículas de tamaño “ $x < y$ ”, resultantes de la ruptura de una unidad de masa “y”.

Posteriormente, Broadbent y Callcot (1956) continuaron con el estudio de la reducción de tamaños de partículas, aplicado al caso de moliendo, considerando la ruptura como dos procesos, el primero consiste en la selección de una proporción de partículas a reducir, dejando la otra parte intacta y el segundo hace referencia a la descripción de las proporciones de partículas generadas por el quiebre, mediante una función o matriz de ruptura. Esta aproximación matricial o matrix model, propuesta por los autores, permitió representar de buena forma ambas funciones mencionados y además una manipulación simple y flexible.

Sin embargo, para este trabajo se considera el modelo cinético de ruptura, que es muy similar al modelo matricial con la excepción de que la función selección es reemplazada por la tasa de ruptura de las partículas.

Por lo tanto, para describir la fragmentación que ocurre en una operación de reducción de tamaño se requiere introducir dos sets de parámetros, en función del tamaño de partícula. Estos son los ya mencionados: función selección y quiebre.

### 2.7.1. Función selección

Esta función tiene por objetivo seleccionar que parte de la fracción másica “ $m_i$ ” sufre quiebre, por lo tanto, trabaja por intervalos de tamaño “i”. Para el modelo se expresa de la siguiente manera, ecuación 10 (Austin et al, 1984):

$$S_i^E = S_{E1} \cdot \exp \left\{ z_1 \cdot \ln \left( \frac{d_i}{d_1} \right) + z_2 \cdot \left[ \ln \left( \frac{d_i}{d_1} \right) \right]^2 \right\}$$

*Ecuación 10: Función selección*

Con:

- $Z_1, Z_2, S_{E1}$  = Parámetros propias del modelo, estas deben ser ajustadas con datos experimentales
- $d_i$  = Media geométrica del intervalo de tamaño “i”
- $S_i^E$  = Razón de quiebre específica de las partículas “i”, invariante para cada material bajo el mismo mecanismo de fragmentación

Para estudiar la fragmentación secundaria bajo confinamiento, se debe incluir la carga vertical. Gómez (2014) trabajó con la siguiente relación, que incluye la tasa de quiebre y el cociente entre la potencia aplicada y el hold-up de mineral, recordando que esta fórmula es usada para estudiar la molienda en el área de la conminución, por lo mismo debe ser modificada para poder incluir esta variable, ecuación 11:

$$S_i = S_i^E \cdot \left(\frac{P}{H}\right)$$

Ecuación 11: Razón de quiebre original

Con:

- P = Potencia aplicada [KW]
- H = Hold-up mineral [ton]
- $S_i^E$  = Razón de quiebre específica de las partículas “i”

La expresión anterior puede ser escrita como presión/constante, quedando de la siguiente forma:

$$S_i = S_i^E \cdot \sigma_v$$

Ecuación 12: Nueva razón de quiebre, incluyendo carga vertical

Con  $\sigma_v$  como el esfuerzo vertical aplicado (MPa).

### 2.7.2. Función de quiebre

Como se había mencionado antes, la función de quiebre define la probabilidad con la cual una fracción de partículas de tamaño “i” termine en un tamaño “j”, con  $i < j$ , es decir al igual que el caso de la selección, trabajo con intervalos de tamaño. La ecuación 13 representa esta función (Austin et al, 1984):

$$B_{i1} = a_1 \cdot \left(\frac{x_i}{x_2}\right)^{\alpha_2} + (1 - a_1) \cdot \left(\frac{x_i}{x_2}\right)^{\alpha_3}$$

Ecuación 13: Forma acumulativa, función de quiebre

Con:

- $B_{ij}$  = Forma acumulativa de las funciones de quiebre por intervalo ( $b_{ij}$ )
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  = Parámetros del modelo que representan la forma de los fragmentos de la curva granulométrica, definen la distribución granulométrica
- $X_i$  = Abertura de la malla para un intervalo de tamaño “i”

La figura 14 ilustra como ocurre un proceso de conminución, considerando ambas funciones:

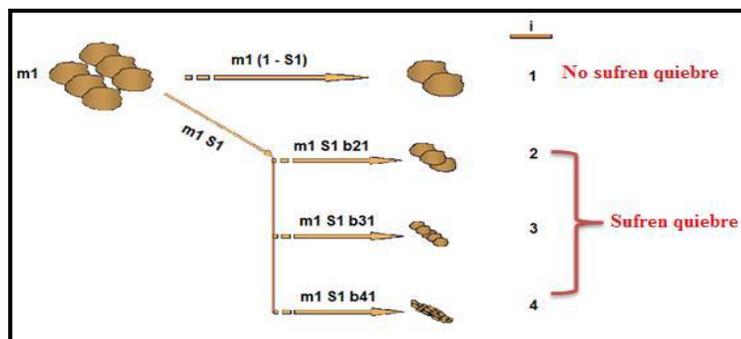


Figura 14: Esquema del proceso de conminución, funciones selección y quiebre, (Casali, 2012)

Tomando un típico balance de masa, la expresión general de conminución se describe de la siguiente manera, ecuación 14:

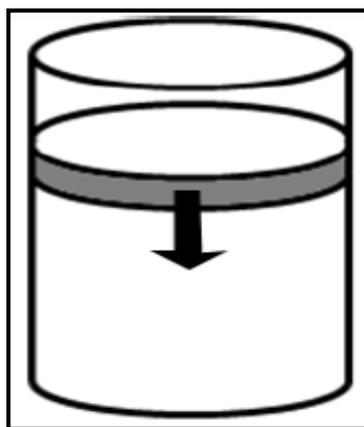
$$p_i = \int_0^{\infty} f_i(t) \cdot E(t) dt$$

*Ecuación 14: Expresión general conminución*

Donde “ $p_i$ ” es la fracción másica resultante en el intervalo del tamaño “ $i$ ”, “ $f_i$ ” es la fracción másica de mineral del material que se está fragmentado en el tiempo  $t$ , y “ $E(t)$ ” es la esperanza de la distribución del tiempo de residencia del material.

Para este trabajo, se considera la aplicación de una carga vertical en la parte superior del modelo físico, similar a la figura 15. Por lo tanto, se puede asumir un flujo estilo pistón, hacer esto implica los siguientes supuestos:

- No hay un mezclamiento vertical y si existe, es despreciable el efecto generado por este.
- Se condiciona el valor asignado para el tiempo de residencia.



*Figura 15: Modelo de flujo pistón*

Por otro lado, la molienda continua es equivalente a un promedio de moliendas batch, ponderadas según la distribución de tiempos de residencia en el molino (Casali, 2012), ecuación 14.

$$p_i = \int_0^{\infty} f_i(t)^{batch} \cdot E(t) dt = f_i(\tau)$$

*Ecuación 14: Ecuación molienda continua*

Pero aplicando el segundo supuesto, el término  $E(t)$  tiene un valor de 1 para un tiempo  $\tau$  de residencia fija y 0 para el resto del tiempo. Esto tiene como consecuencia que la resolución de un flujo tipo pistón es igual a la de un modelo cinético de molienda batch (Austin et al, 1984), ecuación 15.

$$\frac{d[H \cdot f_i(t)]}{dt} = -S_i \cdot H \cdot f_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} \cdot S_j \cdot H \cdot f_j(t)$$

*Ecuación 15: Ecuación cinética general de la molienda batch*

Con H el holdup de mineral, es la masa total a ser fragmentada,  $S_i$  corresponde a la función selección, que indica la tasa a la cual las partículas se rompen y “ $b_{ij}$ ” es la función de ruptura.

Considerando H lo suficientemente grande, esta ecuación anterior ha sido resuelta analíticamente por Reid (1965). La resolución del conjunto de “N” ecuaciones diferenciales de primer orden y de coeficientes constantes, se realiza en forma secuencial (para  $i = 1$  hasta  $i = N$ ,  $t = \tau$ ) o en forma matricial, ecuación 16:

$$p_i = \sum_{j=1}^i A_{ij} \cdot e^{-S_j \tau}$$

*Ecuación 16: Resolución matricial de la ecuación de conminución*

Esta matriz triangular se compone de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} A_{ij} &= 0 && \text{if } i < j \\ A_{ij} &= f_{io} - \sum_{k=1}^{i-1} A_{ik} && \text{if } i = j \\ A_{ij} &= \sum_{k=j}^{i-1} \frac{b_{ik} \cdot S_k}{S_i - S_j} \cdot A_{kj} && \text{if } i > j \end{aligned}$$

Siendo “ $f_{io}$ ” la distribución de las partículas iniciales, de esta manera se construyó el modelo de conminución propuesto por Gómez (2014), que permite estudiar la fragmentación secundaria a escala de laboratorio, ajustando el conjunto de parámetros ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \tau, Z_1, Z_2$  y  $S_i^E$ ) mediante ensayos de laboratorio.

## **2.8. Conclusiones del capítulo**

Para los métodos de hundimiento es importante la predicción de la fragmentación durante el proceso de caving, dado el impacto que tiene sobre los parámetros de diseño y operación.

Es posible diferenciar 3 tipos de ruptura del macizo rocoso: natural o in-situ, primaria y secundaria; siendo esta última el tema de investigación. La fragmentación secundaria se obtiene al momento de extraer la roca hundida que reside dentro de la columna de extracción y tiene asociado principalmente 2 mecanismos de quiebre que son: compresión y abrasión. Es importante destacar que en esta etapa se trabaja con un material granular bajo un régimen de esfuerzos y junto con las propiedades de la roca, definen el grado de reducción que sufren las partículas.

A partir de la revisión bibliográfica se identificaron las variables que condicionan este proceso: el régimen de esfuerzo debido a la sobrecarga del peso, coeficiente de uniformidad y curvatura, factor de forma, resistencia a la carga puntual, la distribución granulométrica inicial, el ángulo de fricción y aunque en este trabajo no se van a considerar: el fino y presencia de humedad.

A lo largo de los años, se han llevado a cabo diversos estudios para poder entender mejor el tema de la fragmentación, tanto primaria como secundaria, proponiendo distintos modelos predictivos, cada vez incluyendo una mayor cantidad de variables que condicionan estos procesos. Una observación importante es la introducción del uso de modelos físicos para estudiar fenómenos como la fragmentación secundaria.

Estos sistemas resultan ser herramientas útiles al momento de querer estudiar tendencias, a bajos costos y evitando las dificultades que se puedan dar al momento de experimentar a escala mina, pero es imperativo indicar que también presentan ciertas limitaciones, especialmente al escalar resultados experimentales, por lo mismo se debe desarrollar y seguir una metodología apropiada. A pesar de que hay variables y condiciones que jamás podrán ser replicados, si existen factores que pueden ser escalados y permiten estudiar la fragmentación secundaria, por ello se decide usar un modelo escalado.

Como es necesario establecer una metodología rigurosa para poder llevar cabo los experimentos, se hace una revisión de autores que han usado sistemas físicos para estudiar la fragmentación secundaria, mediante la manipulación de un flujo gravitacional confinado. A pesar de los grandes avances, partiendo con el diseño de un set experimental y el planteamiento de una metodología para la preparación de material de estudio, la aplicación de un confinamiento vertical y la posterior incorporación de una batea; aún existe un margen para seguir implementando cosas nuevas, mejorando la replicación a nivel de laboratorio. La adición de un sistema de manejo de materiales mecanizado, escalando dos palas y dejando atrás la manipulación manual, experimentar con distintas unidades geotécnicas permite complementar la información existente. Gracias a estos autores es posible proponer los experimentos para este trabajo, dando continuidad a la investigación que iniciaron, y definir la metodología experimental a seguir.

La segunda parte del trabajo, consiste en la elaboración de un modelo predictivo de fragmentación secundaria, a partir de los experimentos de flujo confinado, para un dominio geotécnico seleccionado. En este caso, se decide continuar con los estudios llevados a cabo por Gómez (2014), cuya base radica en la utilización del matrix modelo, empleando las funciones de selección y quiebre, para describir el proceso de conminución

dentro de la columna de extracción. El hecho de que sea tan reciente este modelo, implica que no existe mucha información sobre su construcción y uso, haciendo interesante seguir con esta línea de investigación, por lo mismo, al igual que en el caso anterior, se plantea seguir la metodología propuesta por este autor.

# CAPÍTULO 3

---

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 3.1. Introducción

En este capítulo se explica la metodología experimental a seguir para poder cumplir con el objetivo principal, partiendo con la descripción de los equipos a utilizar hasta la definición de la cantidad experimentos a realizar. A grandes rasgos se compone de una descripción de los equipos involucrados, el procedimiento para obtener las curvas de fragmentación secundaria de los dominios geotécnicos escogidos, la granulometría y el plan experimental. El fin de todo esto es que el lector sea capaz de comprender en su totalidad el procedimiento, de inicio a fin.

### 3.2. Descripción modelo físico y equipos

#### 3.2.1. Modelo físico

El modelo físico se compone principalmente de un cilindro de acero, cuya forma está diseñada de tal manera de evitar concentraciones de esfuerzos durante la aplicación del confinamiento. La capacidad y dimensiones del equipo son las siguientes, tabla 4:

*Tabla 4: Características modelo físico*

Modelo físico	
Diámetro interno [m]	0,34
Altura [m]	0,70
Capacidad [kg]	75 - 80
Máxima presión [MPa]	30

El cilindro fue fabricado con estas dimensiones para poder compatibilizar con la prensa semi-asistida, ubicada en el laboratorio de Block Caving, con la cual se llevan a cabo los experimentos, figura 16.

Una característica importante es que el modelo posee en su base una batea tipo Andina, se decide usar este dado que en comparación con otras alternativas resulta ser la mejor para efectos de escalamiento y compatibilización con un sistema de extracción adecuado (Olivares, 2014). Este autor analizó 3 posibles escalas; 1:50, 1:75 y 1:100, concluyendo finalmente que la más adecuada es la segunda, por lo mismo se escoge la razón 1:75 para este trabajo. Con esto es posible la emulación de dos puntos de extracción mediante palas de 14 yd<sup>3</sup>. Las imágenes de las dimensiones de la batea y la pala se presentan en las figuras 24, 25, 26 y 27, en Anexo A.

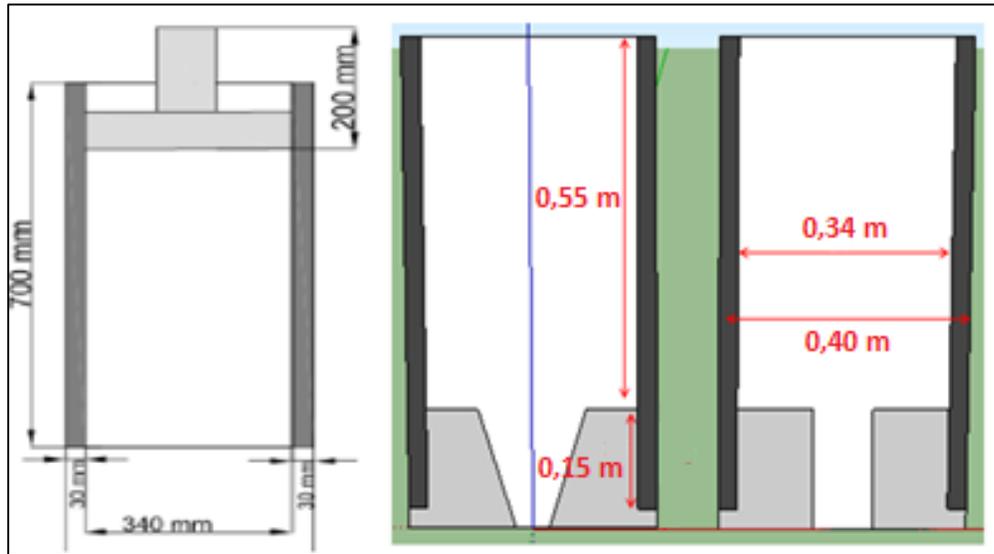


Figura 16: Dimensiones modelo físico (Olivares, 2014)

Con respecto al sistema de manejo de materiales, se desea que la extracción del mineral sea lo más parecido al caso mina, por lo tanto, se hace un diseño a escala tanto del recorrido (zanja) como las palas, la diferencia con autores previos que han trabajado con este modelo físico es que las palas son mecanizadas, figura 17. Esta zanja es representada mediante una canaleta con dimensiones 6 x 6 cm, escalado a mina (1:75) serían aproximadamente 4,5 x 4,5 m.



Figura 17: Modelo físico con sistema de manejo de materiales

### **3.2.2. Equipos**

Los equipos que se usaron para llevar a cabo los experimentos y obtener los resultados fueron:

- Prensa hidráulica semi-asistida
- Harneros y tamices
- Tambor rotatorio

### **3.3. Procedimiento experimental**

El procedimiento experimental se divide en 2 etapas, el primero hace referencia a la obtención de las curvas experimentales de fragmentación secundaria para los 3 dominios geotécnicos, la segunda en cambio, explica cómo construir el modelo de conminución.

#### **3.3.1. Curvas fragmentación secundaria**

Para obtener las curvas de fragmentación secundarias se considera el siguiente procedimiento:

1. Preparación del material de estudio:
  - Selección de set de tamices para recrear la curva de fragmentación primaria, con la cual se elaboran las distribuciones granulométricas para cada dominio.
  - Preparación de 75 kg de muestra, cumpliendo con la distribución granulométrica establecida y asegurando que el material este homogenizado (tambor rotatorio).
2. Montaje equipo y carguío material:
  - Se instala el modelo físico en la prensa, posterior a esto, se rellena el cilindro con el material, dejando 3 cm libre para la ubicación del pistón, figura 19.
3. Ensayos:
  - Al momento de aplicar la presión de confinamiento, esta se mantiene constante mediante la manipulación de la prensa.
  - Cada experimento tiene una duración de 3 a 4 horas, dependiendo de cuando se genere una colgadura alta, al suceder esto no hay forma de poder descolgar, dada la compactación del material.
  - La extracción se realiza mediante 2 palas de 14 yd<sup>3</sup> a escala 1:75, emulando dos puntos de extracción.
  - Se toma registro de la masa que se va extrayendo, los ciclos de extracción son entre 50 a 100 para cada pala.
  - Una vez terminado el experimento, se mezcla el material extraído y el remanente al interior del cilindro, homogenizando estos.
  - Se extraen 2 muestras de 15 kg para cada experimento, con el tambor rotatorio, para asegurar representatividad, luego pasan por la etapa de tamizado para obtener la curva de distribución de tamaños resultante.

#### 4. Resultados:

- Con esta nueva curva post ensayo y la original, se cuantifica la reducción de los fragmentos según carga vertical aplicada.
- Posterior al ensayo, el material usado es desechado, no es posible reciclarlo para otro experimento.

En la figura 18 se presenta un esquema de la metodología experimental:

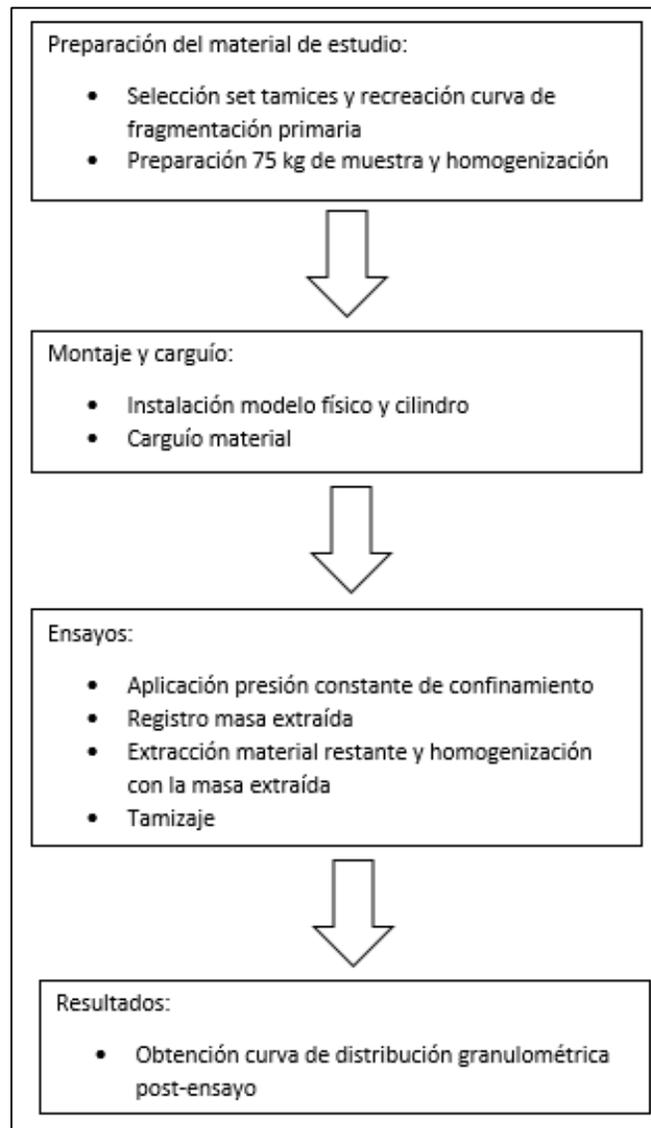


Figura 18: Esquema metodología experimental



*Figura 19: Montaje modelo físico (Gómez, 2014)*

### **3.3.2. Construcción modelo de conminución**

Para la elaboración del modelo predictivo de fragmentación secundaria se deben seguir los siguientes pasos, presentados en un diagrama, figura 20. Esta metodología fue propuesta por Gómez (2014):

- El modelo requiere como input la curva de fragmentación primaria escalada, en este caso es la misma que se usa para obtener las curvas de fragmentación secundaria en la sección anterior.
- Selección del set de tamices con las cuales se replica la curva primaria y las distribuciones granulométricas del dominio geotécnico escogido, los mismos que fueron elegidos en el caso anterior.
- Se estiman los esfuerzos verticales a las cuales se verán sometidos las muestras, siguiendo la aproximación Janssen-Nedderman.
- Se requieren las curvas de fragmentación secundaria experimentales con los porcentajes pasantes de masa para cada tamaño o intervalo de tamices.
- Construcción del modelo de conminución, en base a la curva de fragmentación primaria y las funciones selección y quiebre.
- Se minimiza el error cuadrático del porcentaje pasante ( $F_u$ , %), entre los valores experimentales y teóricos entregados por el modelo, usando Solver.
- Con todos los pasos anteriores se obtienen los parámetros de ajuste del modelo de conminución.

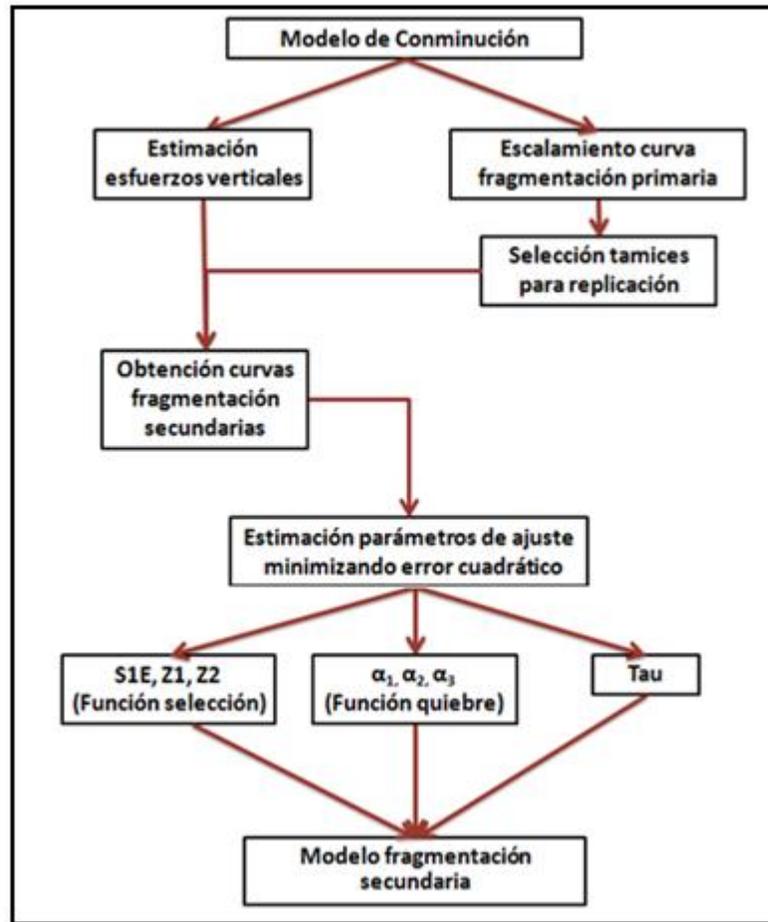


Figura 20: Diagrama construcción modelo de conminución

### 3.4. Granulometría

El material que se dispone para realizar los experimentos proviene de PMCHS, Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo, y son 3 los dominios geotécnicos que se van a evaluar (Q<S, Q=S y PEK), estos conforman el macro bloque N1. Se cuenta para esto con la curva de fragmentación primaria esperada para QES (SRK Consulting, 2015), figura 21. Como se desea estudiar la fragmentación secundaria y comparar los resultados, se utiliza la curva de fragmentación primaria de QES como referencia para los 3 dominios.

Para poder trabajar con esta curva, fue necesario pasar de volumen a longitud, posterior a esto se hace el escalamiento a laboratorio, mediante un factor geométrico de 1:75, gráficos 2 y 3. La primera etapa de esto proceso fue llevado a cabo por Sotomayor (2016).

Un problema que se presenta es que se puede ver afectada la fragmentación de las partículas de mayor tamaño por el efecto escala, ya que estas presentan más planos de debilidad o discontinuidades, pero a medida que disminuye el tamaño de los fragmentos estos tienden a disminuir o desaparecer. Ahora bien, este inconveniente puede disminuir al generar fracturas por compresión, las cuales usualmente generan fracturas secundarias en el material (Gómez, 2014).

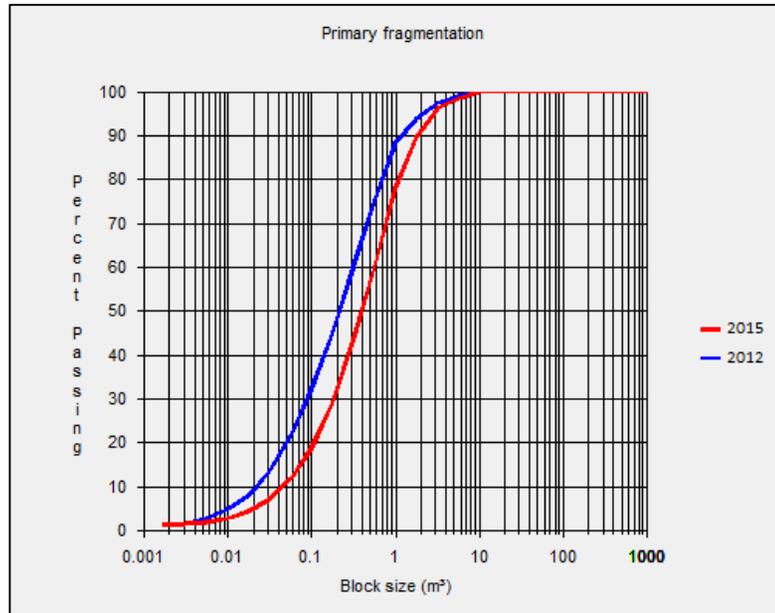


Figura 21: Curva de fragmentación primaria esperada, QES (SRK Consulting, 2015)

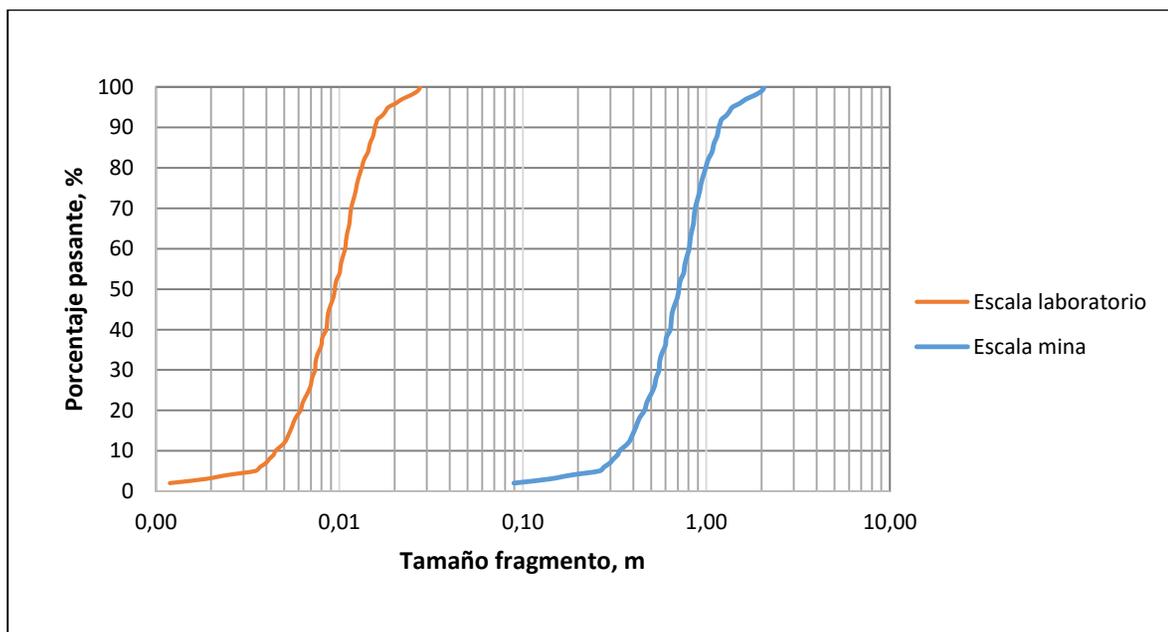


Gráfico 2: Curva de fragmentación primaria, escala laboratorio y mina

El segundo proceso consiste en replicar esta nueva curva con el set de tamices seleccionados, permitiendo la mejor representación posible de esta distribución granulométrica, tabla 5. Además, se entrega el porcentaje retenido y la masa por rango para la preparación del material, sumando en total 75 kg por experimento.

Tabla 5: Mallas seleccionadas para replicación curva fragmentación primaria

Malla	Tamaño [mm]	Material pasante [%]	Porcentaje retenido [%]	Masa [kg]
-16#	1,19	0		
6#-16#	3,35	5	5	3,75
1/4 - 6#	6,35	22	17	12,75
1/2 - 1/4	12,70	78	56	42
5/8 - 1/2	15,88	91	13	9,75
1 1/8 - 5/8	28,58	100	9	6,75
		Total	100	75

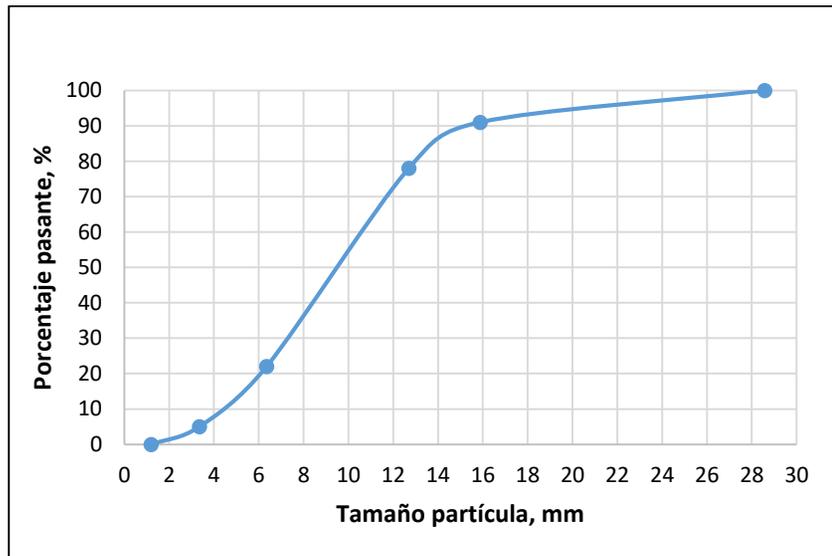


Gráfico 3: Curva de fragmentación primaria replicada, escala laboratorio

### 3.5. Plan experimental

Dentro de los objetivos específicos se plantea por un lado estudiar la fragmentación secundaria de los 3 dominios geotécnicos y, por otro lado, construir el modelo de conminución. En la tabla 6 se indica la cantidad de experimentos a realizar y sus objetivos de estudio, siendo QES el escogido para cumplir con ambas funciones, por esta razón se decide llevar a cabo un experimento adicional con una carga vertical de 2 MPa, el cambio de esfuerzo corresponde a una variación en la profundidad a la cual se encuentran las columnas mineralizadas. Por disponibilidad de material, se descartan repeticiones.

Tabla 6: Plan experimental

Experimento	Dominio	Carga vertical [MPa]	Objetivo estudio
1	PEK	4	Fragmentación secundaria
2	Q<S	4	Fragmentación secundaria
3	QES	4	Fragmentación secundaria y modelo conminución
4	QES	2	Fragmentación secundaria y modelo conminución

### **3.6. Conclusiones del capítulo**

Se han llevado a cabo diversos estudios, relacionados al flujo gravitacional confinado, usando modelos físicos a escala y abordando temas como: impacto de humedad y finos, colgaduras, etc. A pesar de que la fragmentación secundaria tiene un impacto importante en los métodos de explotación de caving, falta profundizar y complementar la información existente.

En la metodología experimental se explica en primer lugar, el modelo como los equipos de laboratorio a usar, esto es importante dado que no existe un equipo estándar para realizar estos experimentos y por ello fue necesario diseñar un sistema de extracción que combinara con el cilindro de acero, que contiene el material.

En segundo lugar, se presenta el procedimiento experimental para llevar a cabo los ensayos y para construir el modelo de conminución. En este caso, el trabajo de investigación es una continuación de los estudios que inició Gómez (2014 y 2015), con respecto a la fragmentación secundaria. Por ello, se decide aplicar la metodología planteada por este autor, principalmente para la elaboración del modelo.

La replicación de los esfuerzos también es un tema importante, dado que en la mina se trabaja con columnas de mineral quebrado, la forma de abordar esto fue mediante la aproximación de Janssen-Nedderman, para material granular. Además, para los experimentos se va a considerar la aplicación de una carga vertical constante, mediante la prensa hidráulica.

A medida que pasa el tiempo, el material usado en las investigaciones, usando modelos físicos, ha evolucionado de arena y grava a mineral proveniente de la mina. En este trabajo se dispone de 3 dominios geotécnicos del Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo, ofreciendo una buena oportunidad para poder comparar la fragmentación secundaria de estos tres.

Finalmente, se presenta el plan experimental, indicando la cantidad de experimentos por dominio y su respectivo objetivo. Los resultados y análisis de cada uno se muestran en el siguiente capítulo.

# CAPÍTULO 4

---

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados y análisis con respecto a: la caracterización del material, las curvas experimentales de fragmentación secundaria, la comparación de resultados con trabajos previos, el modelo de conminución para QES y la propuesta de una nueva modalidad de uso para este último.

### 4.2. Caracterización material

#### 4.2.1. Coeficiente de uniformidad y curvatura

Como se considera la curva de fragmentación primaria de QES para los 3 dominios geotécnicos, hay solamente un coeficiente de uniformidad y curvatura, tabla 7.

*Tabla 7: Coeficiente de uniformidad y curvatura*

Coeficiente de uniformidad	Coeficiente de curvatura
2,39	1,15

#### 4.2.2. Factor de forma

La esfericidad y redondez se obtienen mediante la evaluación de 30 muestras de cada dominio. El resumen se presenta en la tabla 8:

*Tabla 8: Factor de forma según dominio*

Dominio geotécnico	Esfericidad		Redondez	
	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
PEK	0,63	0,08	0,22	0,06
QES	0,68	0,06	0,20	0,07
Q<S	0,68	0,05	0,22	0,05

Con esto es posible clasificar los fragmentos según la matriz de esfericidad y redondez. Al igual que el caso anterior, se muestra el resumen de este proceso en la tabla 9.

Tabla 9: Clasificación dominio según matriz de esfericidad y redondez

Dominio geotécnico	Clasificación
PEK	Sub-angulosa a sub-redondeada
QES	Sub-angulosa a sub-redondeada
Q<S	Sub-angulosa a sub-redondeada

En Anexo B se encuentran las tablas 27,28 y 29 para el cálculo de la esfericidad y redondez según dominio, y para la clasificación según la matriz, se dispone de las figuras 28,29 y 30.

#### 4.2.3. Ensayo carga puntual

Se llevaron a cabo ensayos de carga puntual para los tres dominios geotécnicos, los cálculos se pueden encontrar en las tablas 30,31 y 32, en la sección de Anexo B. En la tabla 10 se entrega el promedio según la unidad estudiada.

Tabla 10:  $I_s(50)$  según dominio geotécnico

Dominio	Promedio [MPa]
QES	1,66
Q<S	1,25
PEK	2,80

PEK resultó ser el más resistente a la carga puntual, con un promedio de 2,80 MPa, muy superior a los otros dos casos estudiados. Seguido por QES con 1,66 MPa y finalmente Q<S, quien obtuvo la menor resistencia con 1,25 MPa.

#### 4.2.4. Análisis caracterización

A partir de los indicadores usados para caracterizar el material, no se observan mayores diferencias, entre las 3 unidades geotécnicas, pero hay uno que escapa de esta tendencia y es el test de carga puntual, tabla 11. Esta indica que PEK posee la mayor resistencia y Q<S la menor.

Tabla 11: Resumen caracterización material

Dominio	Q<S	QES	PEK
Coefficiente de uniformidad	2,39	2,39	2,39
Coefficiente de curvatura	1,15	1,15	1,15
Esfericidad	0,68	0,68	0,63
Redondez	0,22	0,20	0,22
<b>Carga puntual (MPa)</b>	<b>1,25</b>	<b>1,66</b>	<b>2,80</b>

SRK Consulting (2015) llevó a cabo el estudio de la fragmentación para PMCHS y dentro de los parámetros que analizaron, hicieron registro del UCS de cada unidad geotécnica, incluyendo las 3 que se consideran para este trabajo. En este informe, PEK resulta tener el valor más alto, seguido por QES y Q<S, es decir, se mantiene la misma tendencia. Una de las razones de porque se daría este escenario es debido a una alta presencia de micro defectos en QES y en Q<S, la misma razón puede justificar los resultados obtenidos para el test de carga puntual.

Es importante destacar esto ya que cualquier diferencia que pueda surgir al momento de comparar las curvas de fragmentación secundarias experimentales, se puede deber a esta variación de resistencia.

### 4.3. Curvas experimentales de fragmentación secundaria

#### 4.3.1. Curvas de fragmentación secundaria Q<S, QES y PEK, 4 MPa

Los primeros resultados que se presentan son las curvas experimentalmente obtenidas, para los tres dominios geotécnicos (Q<S, QES, PEK) a escala laboratorio, bajo un esfuerzo vertical de 4 MPa, gráfico 4.

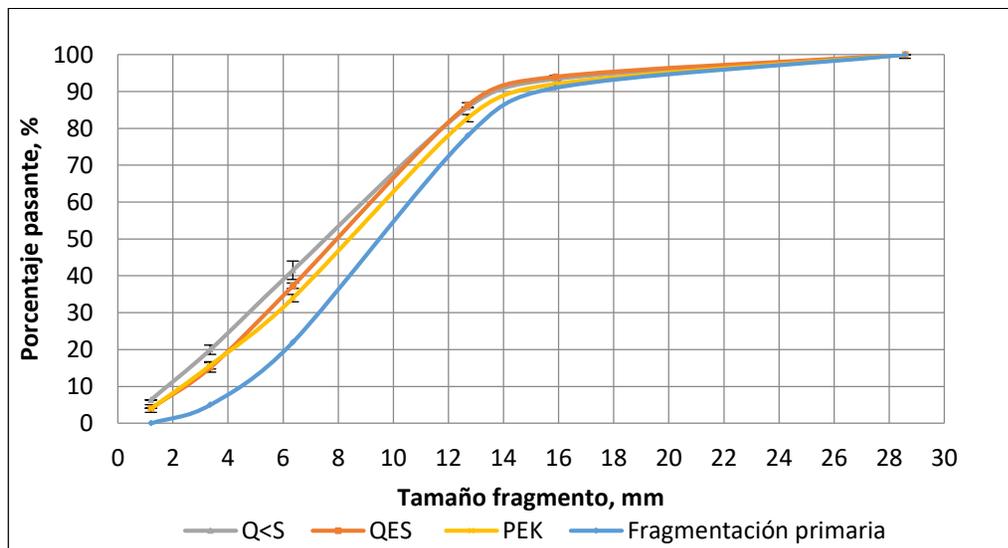


Gráfico 4: Curvas fragmentación secundaria, 3 dominios geotécnicos estudiados (4 MPa)

Tabla 12: Fragmentación secundaria, 3 dominios geotécnicos estudiados (4 MPa)

		Q<S		QES		PEK	
Porcentaje Pasante	Tamaño inicial	Tamaño final	Reducción [%]	Tamaño final	Reducción [%]	Tamaño final	Reducción [%]
D20	6 mm	3,3 mm	<b>45,8</b>	3,9 mm	<b>35</b>	3,9 mm	<b>35</b>
D40	8,4 mm	5,7 mm	<b>32,1</b>	6,5 mm	<b>22,6</b>	7,0 mm	<b>16,6</b>
D60	10,6 mm	8,6 mm	18,9	9,1 mm	14,2	9,5 mm	10,4
D80	13,0 mm	11,7 mm	10	11,8 mm	9,2	12,25 mm	5,7
D100	28,5 mm	28,5 mm	0	28,5 mm	0	28,5 mm	0

En los gráficos 17, 18, 19 y 20, Anexo C, se pueden ver las distribuciones granulométricas de las dos muestras tomadas por ensayo, según el dominio respectivo. Además, en la tabla 35 se indica la masa extraída por experimento.

#### 4.3.2. Análisis curvas de fragmentación secundaria para Q<S, QES y PEK, 4 MPa

A partir del gráfico 4, se ve que el dominio PEK resulta con la granulometría más gruesa, seguido por QES y finalmente Q<S. En cuanto a la generación de material más fino, el comportamiento es bajo y bastante similar.

La tabla 12 entrega en mayor detalle esta diferencia observada, a partir del D60 hay una reducción importante para los tres casos, pero es en los porcentajes pasantes más bajos en donde se ve la mayor disminución de tamaño de partículas. El dominio geotécnico Q<S es el que más se reduce con un 45%, en cambio, QES y PEK tienen como valor máximo un 35 % en el D20.

Para el D80 es menor la variación de tamaño, esto se puede deber al hecho que estos fragmentos son de mayor tamaño y por lo mismo tienen un mayor número de coordinación o puntos de contacto con otros fragmentos, distribuyendo de mejor manera la carga aplicada. Esto refuerza el planteamiento de autores previos (Mcdowell et al, 1996; Fuenzalida, 2012).

Dado estos resultados, se decide analizar la caracterización de cada unidad, con el fin de ver si existe alguna relación que explique esta diferencia entre las curvas post ensayo.

En el caso del factor forma, el promedio de la esfericidad está en un rango de 0,63 a 0,68 y la redondez, para los tres, varía entre 0,20 a 0,22. Es decir, estos parámetros no permiten hacer diferenciación alguna.

En cambio, para los ensayos de carga puntual si se obtuvieron diferencias notables, el dominio PEK resulta tener la mayor resistencia a la carga puntual, seguido por QES y Q<S, el menor. Si relacionamos esto con las curvas resultantes, se puede deducir que el material con mayor resistencia tiene la fragmentación más gruesa y viceversa, en el caso de Q<S que dispone de la fragmentación más fina, es decir, existe una relación directa entre el grado de fragmentación y la resistencia a la carga puntual, mientras mayor sea este último, menor es la reducción durante el flujo confinado.

### 4.3.3. Curvas de fragmentación secundaria QES, 2 y 4 MPa

Se escoge el dominio QES para construir el modelo predictivo de fragmentación secundaria, se requieren de al menos dos curvas con distintos esfuerzos. Como ya se dispone del ensayo con 4 MPa, se realiza un experimento adicional considerando un confinamiento de 2 MPa.

En el gráfico 5 se comparan las distribuciones granulométricas post ensayo obtenidas para el dominio QES. Además, en la tabla 13, se entregan los tamaños finales de los fragmentos y su reducción respectiva.

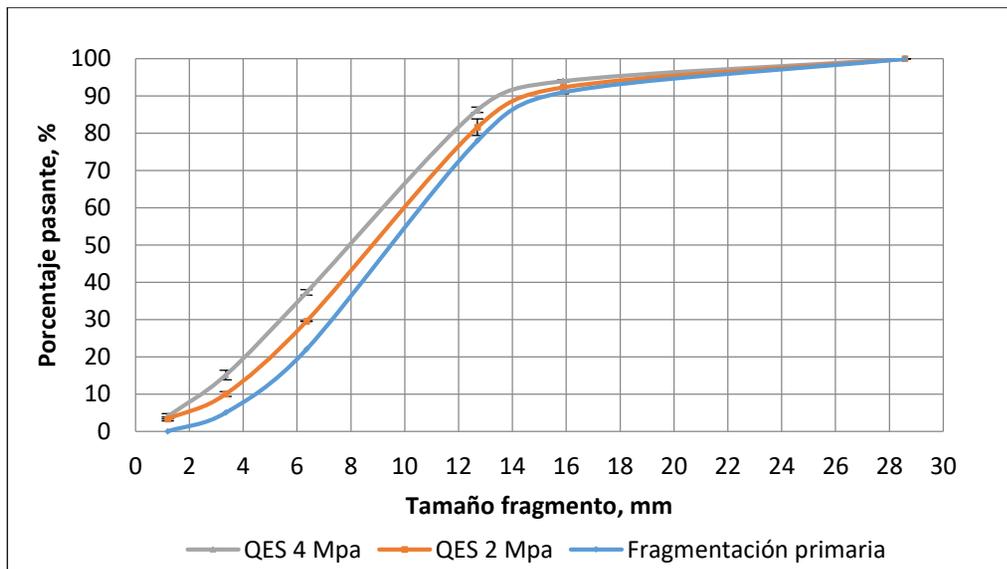


Gráfico 5: Curva fragmentación secundaria, dominio QES (2 y 4 MPa)

Tabla 13: Fragmentación secundaria, dominio QES (2 y 4 MPa)

QES		Carga = 2 MPa		Carga = 4 MPa	
Porcentaje Pasante	Tamaño inicial	Tamaño final	Reducción [%]	Tamaño final	Reducción [%]
D20	6 mm	5,0 mm	17,0	3,9 mm	35,0
D40	8,4 mm	7,5 mm	9,5	6,5 mm	22,6
D60	10,6 mm	10,0 mm	5,7	9,2 mm	14,2
D80	13,0 mm	12,5 mm	3,8	11,8 mm	9,2
D100	28,5 mm	28,5 mm	0	28,5 mm	0

#### 4.3.4. Análisis curvas de fragmentación secundaria QES, 2 y 4 MPa

Al cambiar la condición de esfuerzos, se ve afectado el grado de compactación y como consecuencia hay variaciones en la reducción de tamaño de partículas y la frecuencia de colgaduras.

Disminuyendo la carga vertical, se obtiene una distribución granulométrica más gruesa. Si comparamos los resultados con la curva de 4 MPa, se ve que la reducción porcentual es aproximadamente la mitad desde el D60 en adelante, en cambio, para el D80 es menor, tabla 13. Ambas curvas experimentales tienen un comportamiento similar en la generación del material más fino, no superando el 5% del porcentaje pasante, gráfico 5.

Una observación importante es que estos experimentos tienen como limitante la ocurrencia de colgaduras altas, interrumpiendo la extracción del mineral y dando por finalizado el ensayo. Esto condiciona los resultados ya que, en teoría, a mayor masa extraída, mayor presencia de finos. Pierce (2010) plantea que la abrasión, el principal mecanismo responsable de la generación de finos, domina bajo cizallamiento, situación que se da en los límites de las zonas de movimiento de material. Por lo tanto, la cantidad de mineral extraído influye sobre los resultados obtenidos.

Con respecto a las colgaduras, dado que no está contemplado en los objetivos ni alcances de este trabajo, se comenta que hubo un aumento muy ligero en la frecuencia, al pasar de 2 a 4 MPa.

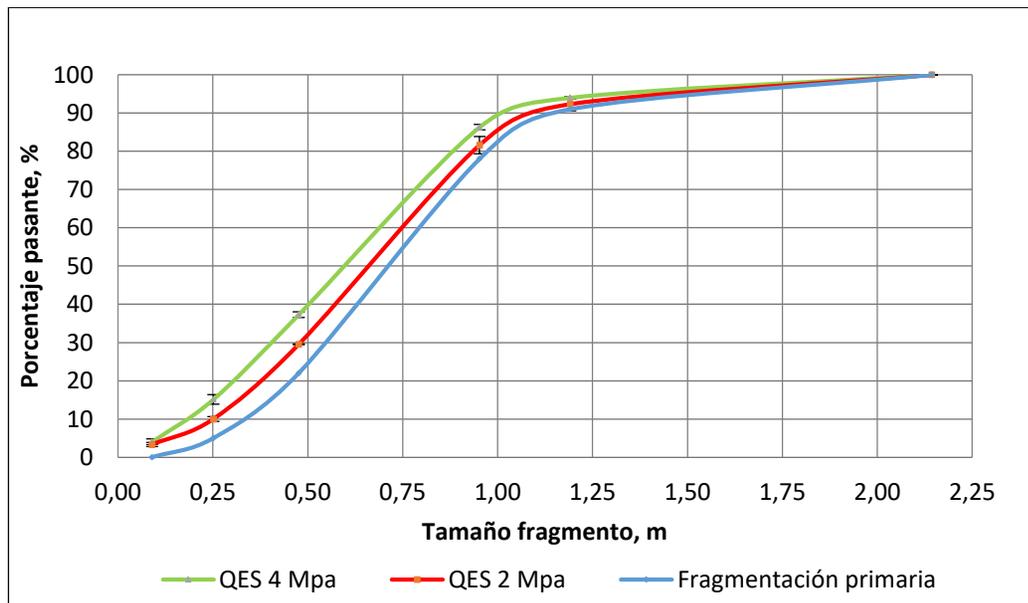


Gráfico 6: Curvas experimentales fragmentación secundaria QES, escala mina

Las dos curvas del gráfico 5 se llevan a escala mina, para esto se aplica un factor de escala geométrico de 1:75, la misma que se utiliza para obtener la curva de fragmentación primaria, gráfico 6. En la tabla 14 se entregan los porcentajes pasantes más importantes, el D80 y D50.

Se debe considerar la desviación estándar y posibles traslapes entre los dos casos estudiados, de QES. Para ello, se presentan nuevamente estas distribuciones granulométricas con su variabilidad respectiva, la cual se expresa en el área que abarcan, gráfico 7. Se observan dos cosas, lo primero es que las curvas prácticamente no se intersectan, solamente en la cola de finos y en la parte superior, entre el D90 y D100, y lo segundo es que la curva correspondiente al caso de estudio de 2MPa posee una variabilidad mayor que su par, 4 MPa, esto se ve principalmente en el rango del D70 al D90.

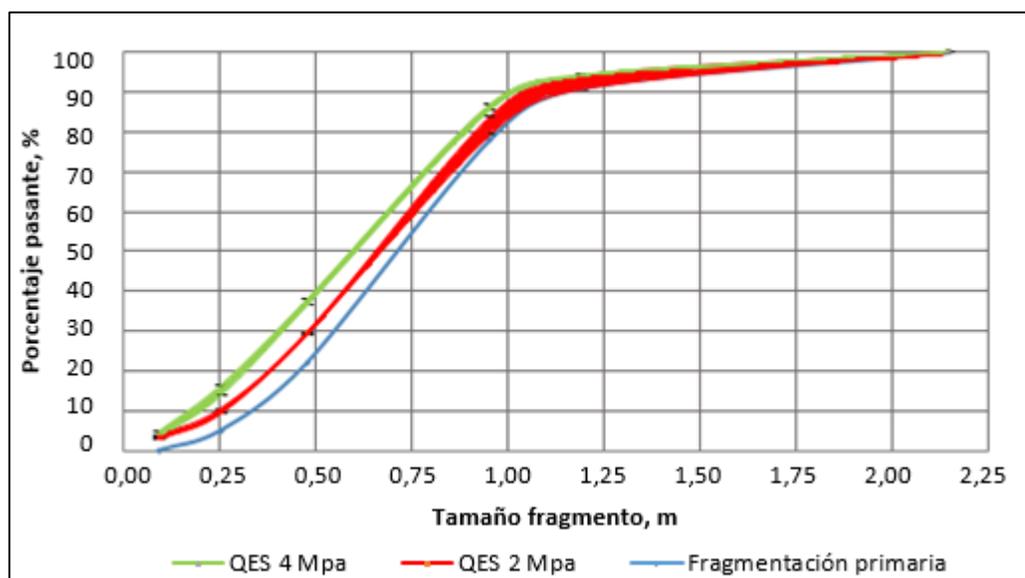


Gráfico 7: Curvas experimentales fragmentación secundaria QES, escala mina con desviación estándar

La importancia que tiene poder trabajar con fragmentación secundaria a nivel de laboratorio y posteriormente escalarlo, es que permite tener una noción de cómo se podrían dar ciertas situaciones durante el proceso de extracción en la mina, como es el caso de colgaduras y generación de sobre tamaños en los puntos de extracción. En un trabajo de investigación reciente, López (2016) concluye que a medida que la granulometría utilizada en los experimentos es más fina, el tonelaje extraído entre colgaduras aumenta. Este autor utiliza el indicador D80 porque representa a los tamaños gruesos que son los que participan en la formación de colgaduras.

Tabla 14: D50 y D80, dominio QES, escala mina

Dominio QES		Carga = 2 MPa	Carga = 4 MPa
Porcentaje Pasante	Tamaño inicial	Tamaño final	Tamaño final
D50	0,72 m	0,66 m	0,60 m
<b>D80</b>	<b>0,98 m</b>	<b>0,94 m</b>	<b>0,88 m</b>

#### 4.4. Análisis resultados trabajos previos

Se comparan los resultados de esta investigación, del dominio QES, con otro autor quien manipuló un modelo físico similar, pero usando distintos tipos de material. Los indicadores usados para esta labor son el D50 y D80.

Gómez (2014) utilizó grava para llevar a cabo sus experimentos, considerando tres curvas con distintos D50 y D80, lo mismo sucedió en la continuación de su trabajo, Gómez (2015), en la cual usó mineral sulfurado chancado.

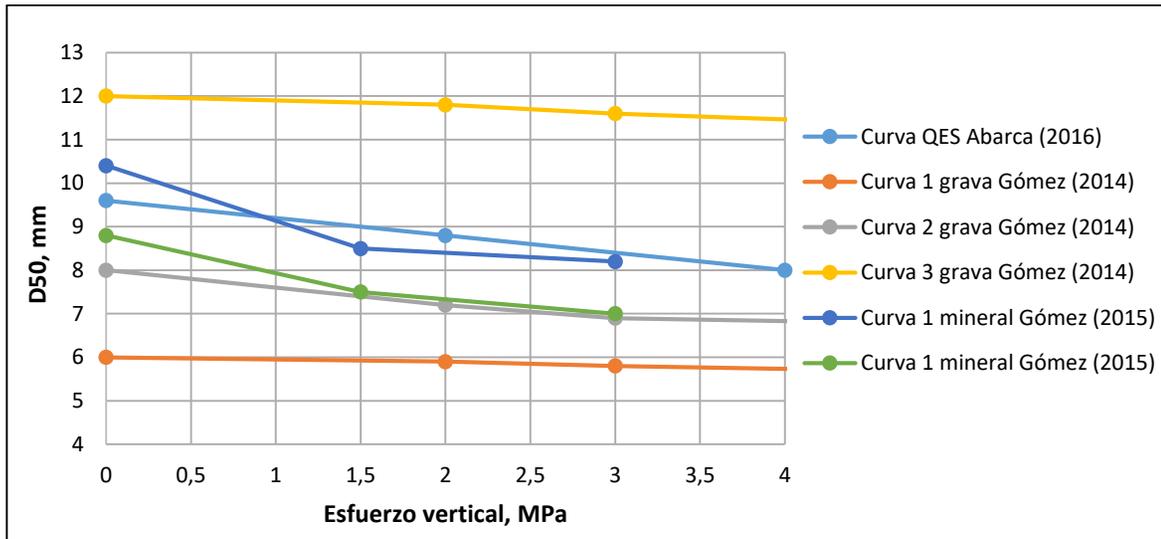


Gráfico 8: Comparación D50, resultados actuales con trabajos previos

Analizando las curvas de los gráficos 8 y 9, se ve que aquellas de grava (Gómez, 2014) tienen una menor reducción de tamaño, tanto para el D50 como D80, a medida que aumenta el esfuerzo vertical aplicado. En cambio, los casos de estudio de mineral sulfurado (Gómez, 2015) y QES tienden a sufrir una disminución de tamaño considerable con respecto a la grava, al ser sometidos a la misma carga.

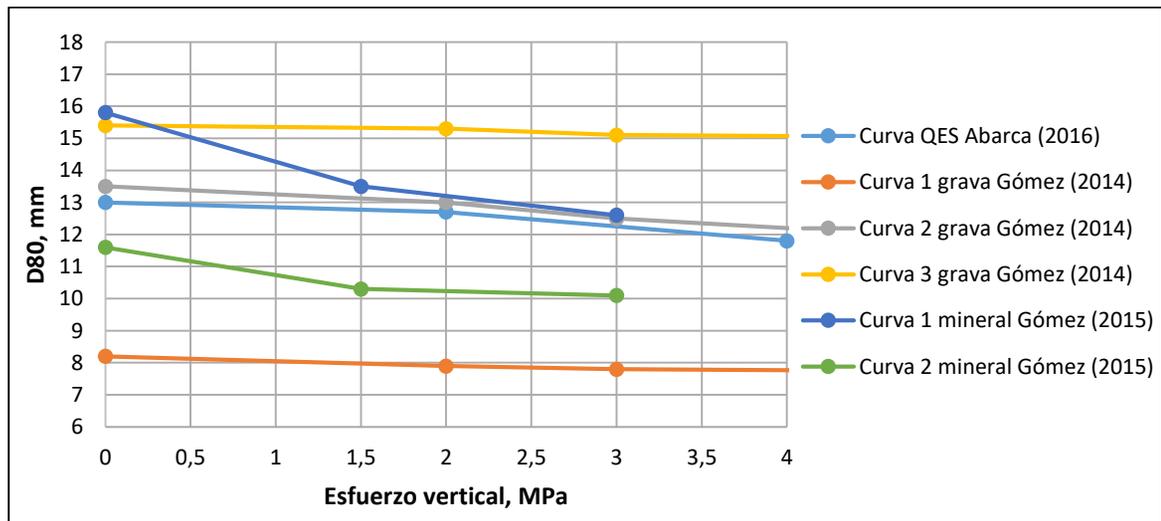


Gráfico 9: Comparación D80, resultados actuales con trabajos previos

La grava posee un valor mayor, esto implica que posee bordes más redondeados que los casos de estudio de mineral. Se puede deducir por lo tanto que el factor de forma, específicamente la redondez, tiene un impacto importante en la reducción de las partículas al estar bajo confinamiento, mientras más alto sea este indicador, menor fragmentación asociado.

Tabla 15: Resumen factor de forma, trabajos previos

Material de estudio	Esfericidad	Redondez
Mineral, QES (Abarca, 2016)	0,68	0,20
Grava curva 1 (Gómez, 2014)	0,65	0,51
Grava curva 2 (Gómez, 2014)	0,65	0,51
Grava curva 3 (Gómez, 2014)	0,65	0,51
Mineral sulfurado (Gómez, 2015)	0,58	0,25

Complementando el análisis con el índice de carga puntual, se observa que, tanto la grava como el mineral sulfurado poseen resistencias similares. En esta investigación, al comparar los 3 dominios geotécnicos (PEK, QES y Q<S) entre ellos, se puede inferir que, a mayor resistencia, menor fragmentación. En este caso se repite el mismo comportamiento para la grava, pero no así para el mineral sulfurado, usado en el trabajo de Gómez (2015), tabla 16. A pesar de poseer un valor bastante alto para este indicador, sufre una reducción bastante importante, comparado con la grava, al ser sometido bajo el mismo esfuerzo vertical.

Tabla 16: Resumen índice de carga puntual, trabajos previos

Material de estudio	Índice de carga puntual [MPa]
Mineral, QES (Abarca, 2016)	1,6
Grava (Gómez, 2014)	6,3
Mineral sulfurado (Gómez, 2015)	6,2

#### 4.5. Modelo de fragmentación secundaria

Para encontrar los parámetros del modelo de conminución, se decide utilizar Solver (Excel) ya que es bastante práctico, no tiene mayores dificultades su utilización y programación, además de entregar resultados buenos. El fin de este programa es reducir lo más posible la diferencia entre las curvas experimentalmente obtenidos y aquellas estimadas por el modelo.

Para esto, se plantea como función objetivo a minimizar la suma total del error cuadrático asociado a cada curva estudiada, del dominio QES. Además, se considera el indicador ECM (Error Cuadrático Medio) como herramienta para evaluar el ajuste de cada caso.

#### 4.5.1. Selección parámetros de ajuste

Durante el proceso de selección de los parámetros del modelo, se observa que, cumpliendo con todas las restricciones impuestas, el programa entrega una serie de soluciones que resultan ser óptimos locales. Por la modalidad de resolución del software, hay una clara dependencia de los valores inicialmente asignados para iniciar el funcionamiento del modelo.

Esto queda en evidencia al repetir el proceso de búsqueda y ajuste reiteradas veces, en la tabla 17 se presentan 7 combinaciones posibles de los parámetros buscados. Cada uno posee un error cuadrático total bajo y un buen ECM, tanto para la curva de 2 como 4 MPa. Al comparar los casos entre ellos, se presencia una diferencia muy pequeña en el error total para cada una de ellas, menos de un 1%. El registro de esto se encuentra en las tablas 33 y 34, Anexo C.

Tabla 17: Combinaciones de parámetros buscados para el modelo de conminución

Parámetros de ajuste	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
$S_1^E$	<b>1,33</b>	<b>1,12</b>	<b>0,58</b>	<b>0,83</b>	<b>0,95</b>	<b>1,52</b>	<b>0,16</b>
$Z_1$	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76
$Z_2$	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
$\alpha_1$	<b>0,49</b>	<b>0,61</b>	<b>0,99</b>	<b>0,50</b>	<b>0,53</b>	<b>0,24</b>	<b>0,99</b>
$\alpha_2$	3,56	3,57	3,61	3,56	3,56	3,53	3,60
$\alpha_3$	3,66	3,67	3,71	3,66	3,66	3,63	3,70
<b>Tau</b>	<b>0,13</b>	<b>0,15</b>	<b>0,29</b>	<b>0,20</b>	<b>0,18</b>	<b>0,11</b>	<b>1,07</b>

Si el criterio de selección es tener un buen ajuste y error total bajo, cualquiera de estas combinaciones puede ser una solución válida para la construcción del modelo de conminución. Pero se decide elegir aquel que presenta el error total más bajo, que es el primer caso.

Por otro lado, analizando los valores obtenidos para los parámetros, se ve que hay una cierta tendencia en la cual 3 factores cambian significativamente, estos son  $S_1^E$ ,  $\alpha_1$  y Tau. En cambio, los demás se mantienen prácticamente constantes ( $Z_1$  y  $Z_2$ ) o dentro un rango de variación bastante limitado ( $\alpha_2$  y  $\alpha_3$ ).

#### 4.5.2. Construcción y grado de ajuste modelo de conminución

Como se menciona anteriormente, cualquiera de las combinaciones puede ser válida para construir el modelo, más aun, las curvas ajustadas se comportan prácticamente de la misma forma para las otras soluciones, dado que la diferencia entre ellas es mínima.

Pero se escoge el primer caso para definir los parámetros de ajuste, dado que presente el menor error total, tabla 18.

Tabla 18: Parámetros de ajuste, modelo de conminución

Parámetros de ajuste						
S1 <sup>E</sup>	Z1	Z2	α1	α2	α3	Tau
1,33	1,76	0,70	0,49	3,56	3,66	0,13

De esta manera, quedan definidas las ecuaciones principales que conforman el modelo:

1. Función selección:

$$S^E_i = 1,33 \cdot \exp \left\{ 1,76 \cdot \ln \left( \frac{d_i}{d_1} \right) + 0,70 \cdot \left[ \ln \left( \frac{d_i}{d_1} \right) \right]^2 \right\}$$

2. Función de quiebre:

$$B_{i1} = 0,49 \cdot \left( \frac{x_i}{x_2} \right)^{3,56} + (1 - 0,49) \cdot \left( \frac{x_i}{x_2} \right)^{3,66}$$

3. Fracción másica resultante, intervalo tamaño i:

$$p_i = \sum_{j=1}^i A_{ij} \cdot e^{-S_j \cdot 0,13}$$

Se recuerda que los parámetros  $Z_1$  y  $Z_2$  dependen exclusivamente de las curvas a las cuales se deben adaptar, no tienen un significado físico. En cambio,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$ , son factores de forma que definen la distribución granulométrica y por lo tanto se deduce que, bajo una misma forma de conminución, al menos los parámetros  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  tienen un cierto valor asignado, que pueden ser propios del dominio QES.

El procedimiento de búsqueda, para encontrar los parámetros, se realiza de manera simultánea para ambos experimentos, 2 y 4 MPa. En los gráficos 10 y 11 se aprecia visualmente el grado de ajuste.

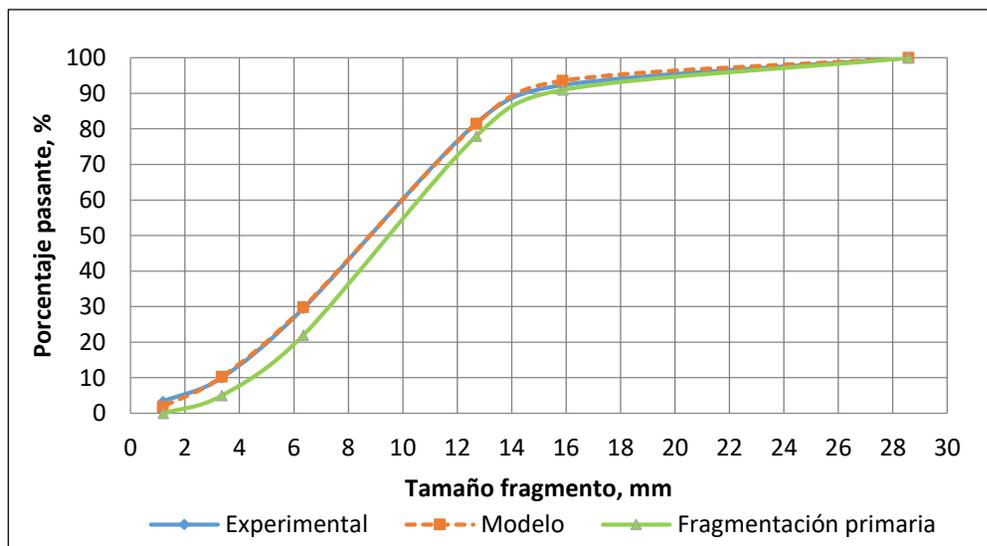


Gráfico 10: Ajuste modelo de conminución, curva QES (2 MPa)

Tabla 19: Ajuste por intervalo, QES (2 MPa), modelo de conminución

QES	Experimental	Modelo	
Malla	Fu [%]	Fu [%]	Error cuadrático [% <sup>2</sup> ]
	100	100	
1 1/8 - 5/8	92,3	93,5	1,6
5/8 - 1/2	81,6	81,6	0,0
1/2 - 1/4	29,5	29,9	0,1
1/4 - 6#	10,0	10,3	0,1
6# - 16#	3,3	1,8	2,3
		ECM [% <sup>2</sup> ]	0,81

En las tablas 19 y 20, se puede ver el grado del ajuste por intervalo de malla. Además, se hace entrega del Error Cuadrático Medio (ECM), el cuál es bastante bajo y demuestra que el ajuste fue bueno para ambos casos.

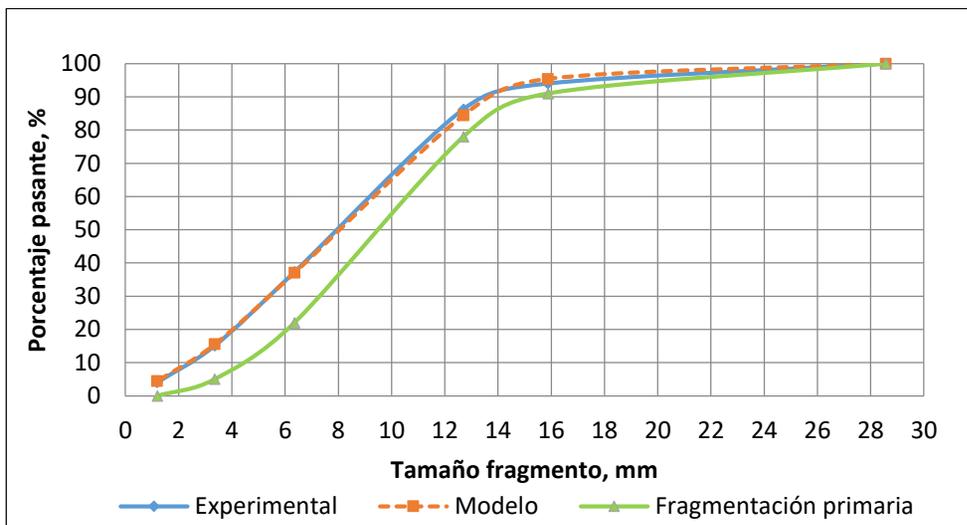


Gráfico 11: Ajuste modelo de conminución, curva QES (4 MPa)

Tabla 20: Ajuste por intervalo, QES (4 MPa), modelo de conminución

QES	Experimental	Modelo	
Malla	Fu [%]	Fu [%]	Error cuadrático [% <sup>2</sup> ]
	100	100	
1 1/8 - 5/8	94,0	95,4	2,0
5/8 - 1/2	86,3	84,4	3,4
1/2 - 1/4	37,3	37,0	0,1
1/4 - 6#	15,1	15,6	0,2
6# - 16#	4,1	4,5	0,2
		ECM [% <sup>2</sup> ]	1,17

Con el modelo de conminución elaborado, se puede estudiar el comportamiento del dominio QES, considerando distintos esfuerzos, independiente del área de marco bloque elegido ya que las funciones, selección y de quiebre, a través de los parámetros encontrados, dependen de las características del material usado y el mecanismo de fragmentación, el cual se mantiene igual.

De esta forma es posible ver la evolución del D80 y D50, a medida que aumenta el esfuerzo vertical aplicado. Para esto se considera la aplicación del modelo en un rango de 0 a 5 MPa, expresado en el gráfico 21, Anexo C. La reducción del D80 y D50, a escala laboratorio se presentan en el gráfico 12, estos datos, llevados a escala mina se encuentran en el gráfico 22, Anexo C.

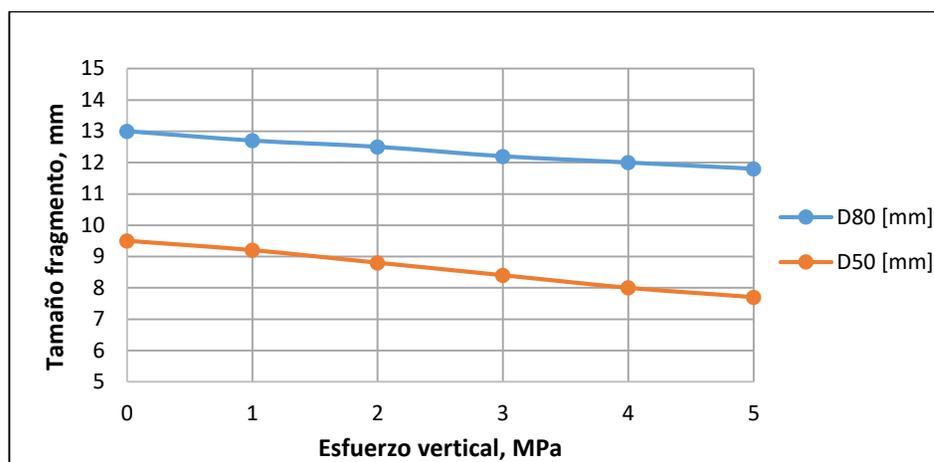


Gráfico 12: Evolución D80 y D50, estimado por el modelo de conminución para QES, escala laboratorio

A primera vista, se observa que tanto el D80 como el D50 se reducen efectivamente a medida que aumenta el esfuerzo vertical aplicado, mostrando coherencia en los resultados entregados por el modelo.

Esta variación, de ambos indicadores, se puede estudiar de otra forma, relacionando el esfuerzo vertical aplicado con la profundidad a la cual se encuentra la columna de mineral. Para que existe concordancia entre el área del macro bloque y el rango de esfuerzo vertical a aplicar, se considera en esta ocasión 100.000 m<sup>2</sup>, asegurando de esta manera llegar a los 5 MPa, gráfico 13.

A medida que aumenta la altura de columna, hay una disminución de ambos indicadores, pero el grado de reducción, a partir de los 50 m aproximadamente, es mayor para el D50, llegando casi a un 20% versus los 10% del D80. Esta diferencia se puede deber al hecho de que las partículas de mayor tamaño tienen más puntos de contacto y de esta manera distribuyen de mejor forma la carga aplicada.

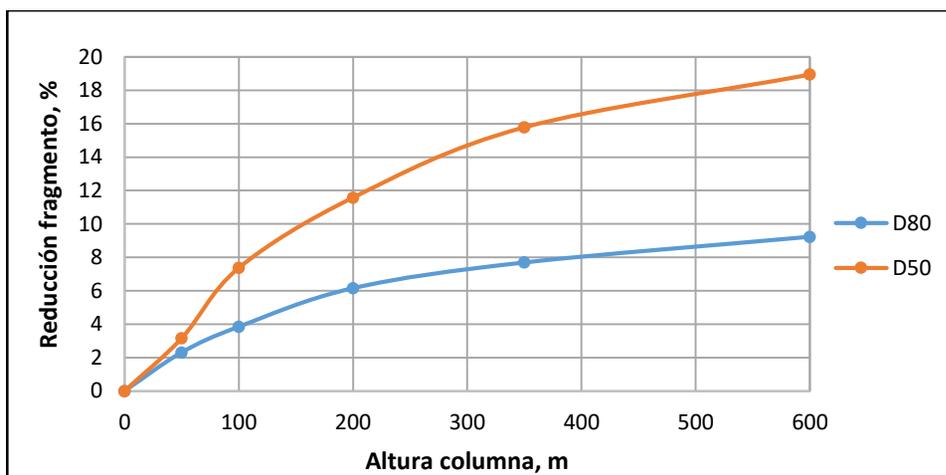


Gráfico 13: Reducción porcentual D80 y D50, estimado por el modelo de conminución para QES, escala mina

### 4.5.3. Análisis de sensibilidad de los parámetros, modelo de conminución

El objetivo es analizar la sensibilidad que puede presentar el modelo de conminución al cambiar uno de sus parámetros y cuantificar esta variación. A pesar de que se escoge la primera combinación de los 7 casos presentados anteriormente, el estudio se lleva a cabo para todos.

La modalidad consiste en fijar 6 de las 7 variables, a excepción de una, aumentando y disminuyendo su valor original en un 5%, posterior a esto se calcula la diferencia porcentual entre el nuevo error cuadrático total del modelo y el inicial, tablas 21 y 22.

Tabla 21: Análisis de sensibilidad, caso 1 a 4

Parámetros	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4	
	Error total [%]							
	-5%	5%	-5%	5%	-5%	5%	-5%	5%
S1E	12,20	12,09	12,20	12,1	12,20	12,1	12,20	12,1
Z1	<b>40,30</b>	<b>31,92</b>	<b>40,30</b>	<b>31,92</b>	<b>40,30</b>	<b>31,93</b>	<b>40,30</b>	<b>31,93</b>
Z2	10,67	13,45	10,67	13,45	10,67	13,46	10,67	13,45
a1	<b>0,00</b>							
a2	0,27	0,23	0,42	0,36	1,06	0,95	0,29	0,24
a3	0,28	0,26	0,16	0,16	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	0,27	0,25
Tau	12,20	12,09	12,20	12,09	12,20	12,09	12,20	12,09

Tabla 22: Análisis de sensibilidad, caso 5 a 7

	caso 5		caso 6		caso 7	
	Error total [%]		Error total [%]		Error total [%]	
Parámetros	-5%	5%	-5%	5%	-5%	5%
S1 <sup>E</sup>	12,20	12,1	12,20	12,1	12,20	12,1
Z1	<b>40,30</b>	<b>31,94</b>	<b>40,31</b>	<b>31,91</b>	<b>40,30</b>	<b>31,93</b>
Z2	10,67	13,46	10,66	13,46	10,67	13,46
a1	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
a2	0,32	0,27	0,07	0,05	1,06	0,95
a3	0,24	0,22	0,63	0,56	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
Tau	12,20	12,09	12,20	12,10	12,20	12,09

La primera observación es que todos los modelos son más sensibles a cambios que puede sufrir el parámetro Z1, con variaciones de un 30 a 40%, y el caso contrario se da para a<sub>1</sub>, el cual prácticamente no afecta el error total original. De estos 7 escenarios presentados, el 3 y el 7 muestran una pequeña diferencia en su comportamiento con los demás y consiste en que también a<sub>3</sub> tiene nulo impacto al cambiar su valor dentro de un rango de un 5%.

Si se hace un análisis más global, se puede ver que todas las variables que componen la función selección (S1<sup>E</sup>, Z<sub>1</sub> y Z<sub>2</sub>) influyen fuertemente sobre el modelo, en cambio, los parámetros de la función de quiebre (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> y a<sub>3</sub>) no generan una diferencia superior al 1%. Tau también impacta considerablemente sobre los resultados finales.

#### 4.5.4. Aplicación modelo de conminución

SRK Consulting (2015) llevó a cabo el estudio de la fragmentación para los distintos dominios de PMCHS, dentro de estos se encuentra la curva de fragmentación primaria para QES, dominio C2, la cual se usa como base para este trabajo, pero además se hizo una estimación de la fragmentación secundaria, el software usado para esto es BCF.

Este programa tiene como input una serie de parámetros geomecánicos y de tiraje, los cuales se usan, a través de la aproximación de Janssen, para estimar el esfuerzo vertical y la posterior aplicación del modelo de conminución, tabla 23.

Tabla 23: Parámetros BCF para estimación fragmentación secundaria

Parámetros	
Altura extracción [m]	20
Altura máxima caving [m]	400
Factor esponjamiento [%]	20
Densidad de la roca [kg/m <sup>3</sup> ]	2,7
Área flujo [m <sup>2</sup> ]	22.500

Ambos escenarios estimados, se presentan en el gráfico 14, de la cual se puede ver que el modelo tiende a sub estimar los tamaños más gruesos comparado con BCF, pero, en la parte inferior de ambas curvas existe una mayor similitud en los resultados entregados, tabla 24.

Esta última observación es interesante ya que algunos autores han planteado que este software tiende a ser conservador en la estimación de finos (Butcher, 2007), otro precedente que se tiene sobre este tema es el estudio llevado a cabo en los yacimientos Ridgeway Deeps y Cadia East, Australia (Brunton, 2016), en la cual se comparan las predicciones de BCF para la fragmentación secundaria con las mediciones que se tomaron en los puntos de extracción, confirmando este planteamiento de que BCF es conservador en la estimación de finos.

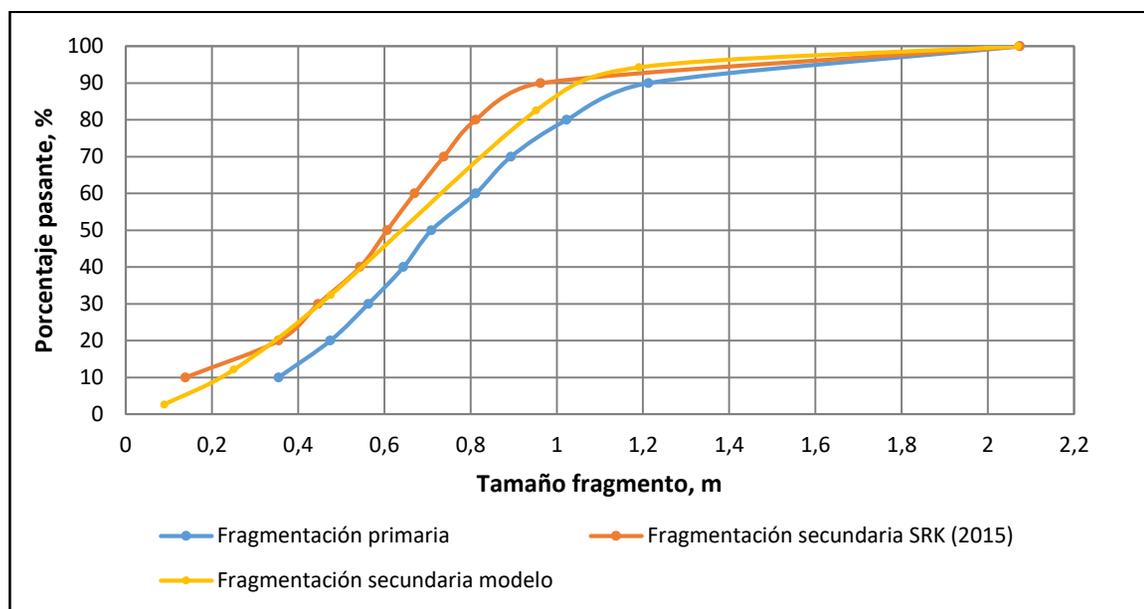


Gráfico 14: Comparación fragmentación secundaria, SRK (2015) vs modelo de conminución

El hecho de que exista un comportamiento similar con BCF y tomando en cuenta las observaciones, durante el análisis de las curvas experimentales, en la cuales se comenta la menor generación de finos, pueden indicar que el modelo tiende a subestimar la generación de las partículas más finas.

Tabla 24: Comparación fragmentación secundaria, SRK (2015) vs modelo de conminución

Porcentaje pasante (%)	BCF (m)	Modelo (m)	Diferencia (%)
D80	0,81	0,92	-13,6
D50	0,61	0,62	-1,6
D30	0,45	0,43	2,3

#### 4.5.5. Modelo de conminución con porcentaje de extracción

Gómez (2015) trató de evaluar su modelo de conminución a distintas alturas, dividiendo la columna en tramos. Fue estimando el esfuerzo vertical según la profundidad y además introdujo el concepto de tiempo de residencia, relacionándolo con el parámetro Tau. Pero este último factor es bastante complejo de estimar, hay que recordar que las partículas se pueden desplazar tanto vertical como horizontalmente, durante el proceso de extracción en la mina. Además, requiere del estudio de varios casos reales para poder validar y certificar que esta forma de calcular el tiempo cumpla efectivamente con su función.

Por ello, se propone otra forma de realizar esto, incorporando porcentajes de extracción y dejando Tau como un parámetro de ajuste, pero variando los inputs del modelo, los cuales son: esfuerzo vertical y la distribución granulométrica de ingreso.

Todo esto se explica mejor mediante un ejemplo, en la cual se aplica el modelo de conminución elaborado. La situación consiste en una columna de mineral discretizada, a la cual se le asigna un régimen de esfuerzos verticales según la profundidad, la figura 22 es una representación esquemática de este caso.

Al inicio de cada bloque, desde abajo hacia arriba, se estiman los esfuerzos verticales mediante la metodología de Janssen-Nedderman, considerando la profundidad. A medida que se van extrayendo los bloques, en la parte inferior, los demás irán descendiendo y pasando por un nuevo estado de esfuerzos, variando la fragmentación secundaria para cada caso.

Para la aplicación del modelo, se va a considerar una columna de extracción de 300 m para el macro bloque N1, dividido en 3 tramos de igual altura (100 m), figura 23. Los siguientes supuestos fueron considerados:

- Cada bloque es extraído por completo, correspondiendo aproximadamente a un tercio de la columna.
- La sobrecarga se mantiene, es decir, hay relleno desde la superficie para mantener la carga vertical constante.

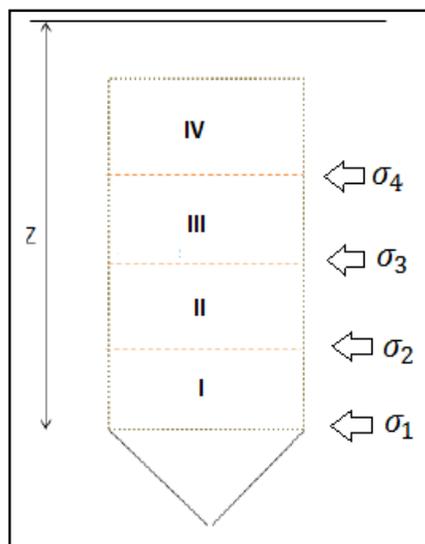


Figura 22: Esquema columna de extracción discretizada

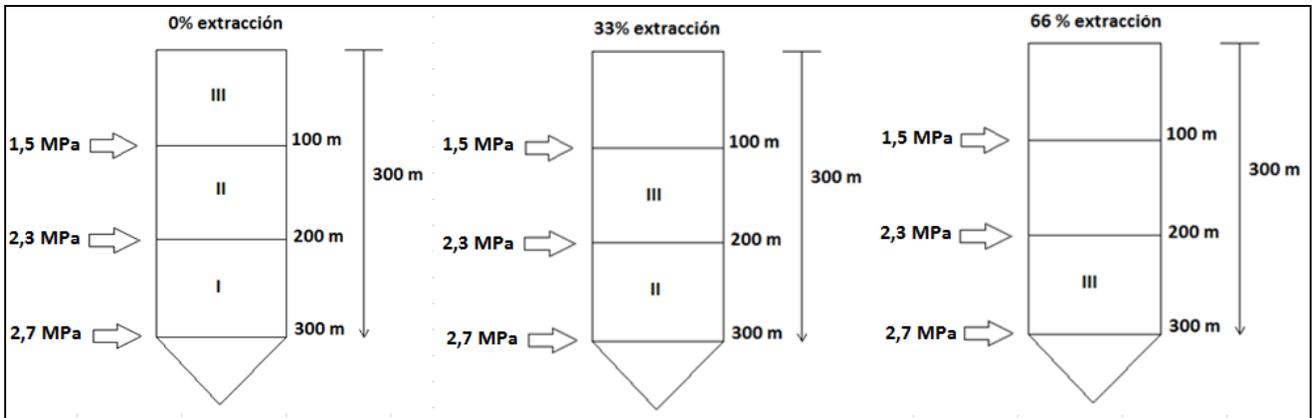


Figura 23: Secuencia de extracción, columna de 300 m

En teoría, el bloque I debe ser aquel que menos reducción sufre ya que es el primero en ser extraído, por otro lado, el bloque III al encontrarse en la parte superior de la columna, debe resultar con una fragmentación más fina. En Anexo C, gráficos 23, 24 y 25, se presentan las variaciones en la fragmentación para cada uno de los bloques. En el nivel de producción no se ven estas etapas intermedias, sino que solamente la final al momento de ser extraído. Por lo mismo, en el gráfico 15 se presentan las fragmentaciones finales que se observarían en los puntos de extracción.

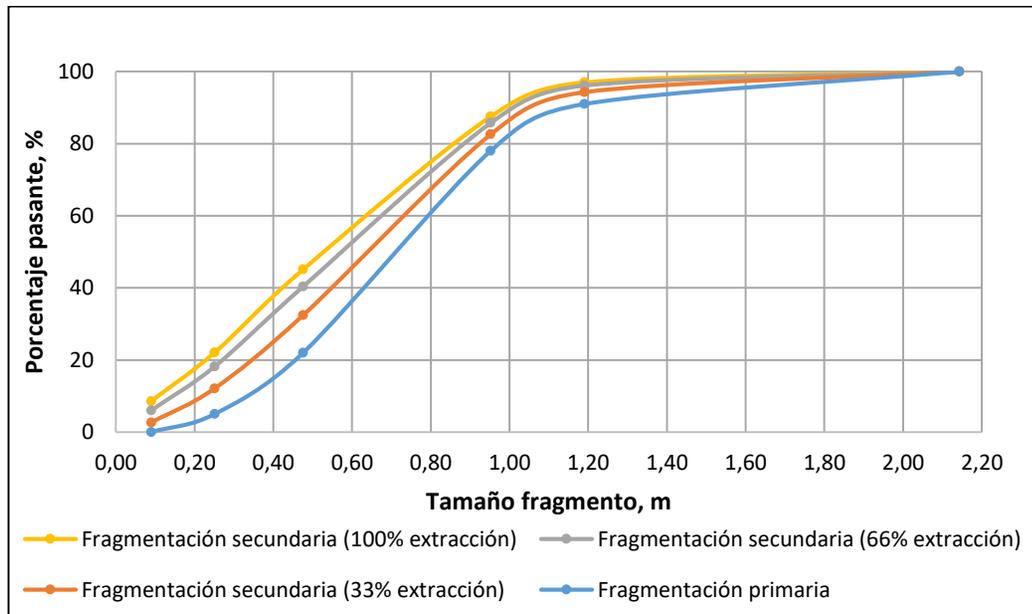


Gráfico 15: Fragmentación secundaria final según avance de extracción, ejemplo modelo de conminución

En la tabla 25 se presentan los tamaños de fragmentos para los porcentajes pasantes D80, D50 y D20, según el avance.

Tabla 25: Reducción fragmentos según avance extracción, ejemplo modelo de conminución

Porcentaje extracción [%]	0%	33%	66%	100%
D80 [m]	0,98	0,92	0,88	0,85
D50 [m]	0,72	0,64	0,58	0,51
D20 [m]	0,46	0,35	0,27	0,23

Con este ejemplo, queda demostrado que el modelo es capaz de reproducir el proceso de extracción a lo largo de una columna, indicando que la granulometría observada en el nivel de producción tiende a ser más fina a medida que avanza el proceso de extracción, es decir, es coherente con lo observado en la mina.

Se aplica esta modalidad al escenario anteriormente propuesto por BCF, pero considerando porcentajes de extracción. Ya que no se dispone de estimaciones para otras alturas, esta comparación sirve para ver como evoluciona el grado de reducción con respecto al modelo. Se considera que la columna está compuesta de 4 tramos, 100 m cada una. En el gráfico 16, se presentan las curvas correspondientes a una extracción de 50% y 100%. En Anexo C, gráficos 26, 27, 28 y 29 se muestran todos los avances según el porcentaje de avance.

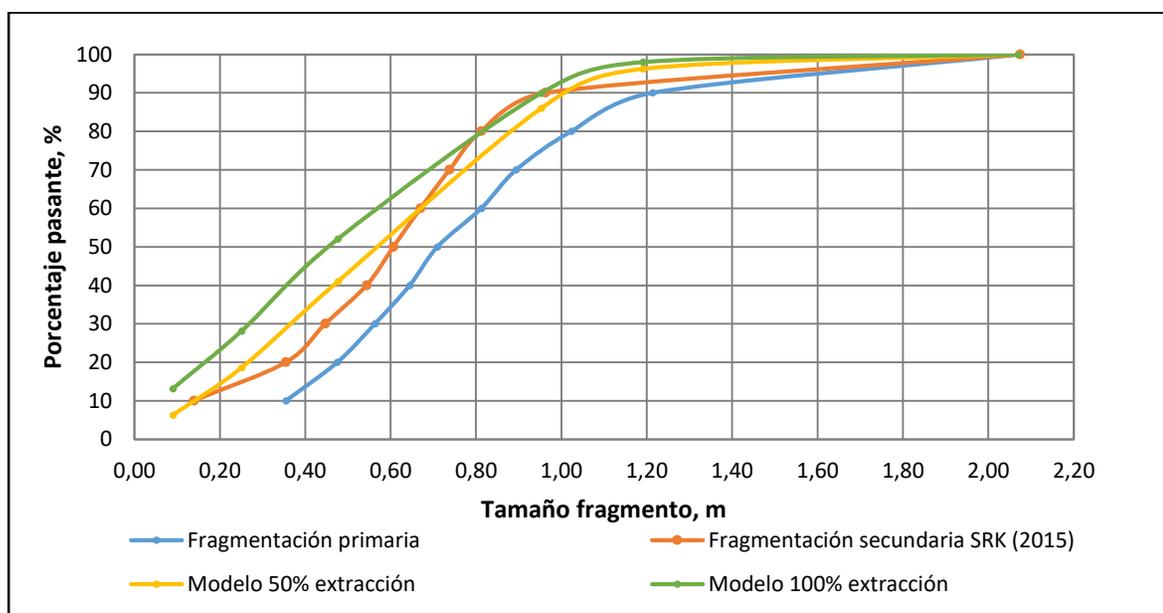


Gráfico 16: Modelo de conminución con porcentajes extracción vs BCF

Lo que se observa es que a medida que avanza la extracción, aumenta el grado de reducción de las partículas, especialmente para la parte más fina. En la tabla 26, se presentan las variaciones porcentuales del D80, D50 y D20.

Tabla 26: Reducción según porcentaje extracción

Porcentaje extracción	0%	50%	100%
D80 m (%)	1,02 m (0 %)	0,88 (14 %)	0,81 (21 %)
D50 m (%)	0,71 m (0 %)	0,58 (18 %)	0,46 (35 %)
D20 m (%)	0,47 m (0 %)	0,26 (45 %)	0,16 (66 %)

#### 4.5.6. Análisis modelo de conminución a partir de datos de mina

De las posibles modalidades de uso para el modelo de conminución, aparece como otra alternativa su empleo en distribuciones medidas en control de producción en la mina, es decir, omitiendo la etapa de experimentos en el laboratorio y obtener los parámetros del material directamente de la fragmentación observada en los puntos de extracción.

Para que esto sea factible, se debe cumplir con 4 requisitos: Disponer de las curvas de fragmentación primaria y secundaria, estimar el esfuerzo asociado y definir los intervalos de tamaño en lugar del set de tamices.

La curva de fragmentación primaria se puede obtener a partir de estudios geomecánicos y predicciones hechas mediante software como BCF, posterior a esto se deben definir los intervalos de tamaño que toman el lugar de las aberturas de tamices a nivel de laboratorio. Esto se puede hacer en base a los porcentajes pasantes de la curva primaria, definiendo de esta manera las funciones de selección y quiebre.

Lo más complejo de este proceso es obtener la curva de fragmentación secundaria de la mina y estimar los esfuerzos asociados:

- La fragmentación se mide en los puntos de extracción y, dependiendo del método de observación, se requiere de un tiempo para adquirir y procesar estos datos, para la construcción de la curva final.
- Puede ser complejo definir los esfuerzos verticales para el modelo ya que no necesariamente se trabaja con una columna de mineral completamente quebrada, hay una brecha entre la tasa de extracción y el proceso de quiebre, indicando que hay una altura variable. Por lo tanto, se debe estimar la altura del caveback y considerar esto para definir el techo de la columna.

A partir de este análisis se puede concluir que para poder llevar a cabo una implementación directa del modelo de conminución, a partir de datos de mina, se deben resolver ciertas limitaciones relacionados a la curva de fragmentación secundaria, medida en terreno, y la estimación de los esfuerzos verticales.

## 4.6. Conclusiones del capítulo

### 4.6.1. Curvas experimentales de fragmentación secundaria

De la primera etapa de resultados se puede concluir:

- El test de carga puntual es la herramienta más relevante durante la caracterización del material. PEK posee la mayor resistencia, seguido por QES y Q<S.
- La primera serie de experimentos. para los 3 dominios geotécnicos, considerando 4 MPa, indica que PEK posee la distribución granulométrica post experimental más gruesa, en cambio, Q<S la más fina.
- Se considera el dominio QES para la construcción del modelo de conminución, para esto se realiza un experimento adicional de 2 MPa.
- A partir de los experimentos de QES, 2 y 4 MPa, queda en evidencia que, al aumentar la carga vertical, es mayor la ruptura de los fragmentos.
- Hay un comportamiento transversal para todos los ensayos, una menor generación de fino y reducción de partículas de mayor tamaño.
- La redondez tiene un impacto importante en la fragmentación, bajo confinamiento. Esto queda demostrado al comparar los resultados de este trabajo con otro autor que usa el mismo modelo físico, pero con distintos materiales.

### 4.6.2. Modelo de conminución

Para esta temática se concluye lo siguiente:

- Se obtiene el modelo de conminución para el dominio QES, el cual permite estudiar la fragmentación secundaria al variar el esfuerzo vertical aplicado.
- El programa escogido para encontrar los parámetros, Solver, entrega una serie de soluciones locales que dependen de los valores iniciales asignados al modelo, todas estas tienen un buen ajuste y bajo error total asociado.
- Se escoge la primera combinación de parámetros, dado que presenta el menor error total, la cual muestra un ECM bajo, tanto para el ensayo de 2 MPa como de 4 MPa, indicando que el ajuste llevado a cabo es bueno.
- A partir del test de sensibilidad, se ve que los factores que más afectan el modelo son aquellos que componen la función selección ( $S_1^E$ ,  $Z_1$  y  $Z_2$ ), junto con Tau. En cambio, para la función de quiebre sucede todo lo opuesto.
- Se compara el escenario propuesta para la fragmentación secundaria, usando BCF, versus aquella planteada por el modelo de conminución. Los resultados indican que, para el rango de los gruesos, BCF entrega una granulometría más reducida y en la parte más fina hay una similitud en el comportamiento, con respecto al modelo.
- Se presenta una nueva modalidad de uso para el modelo de conminución, la cual incluye porcentajes de extracción de la columna. Mediante un ejemplo se demuestra que los resultados entregados son coherentes con lo que dice la teoría y lo que se observa en la mina, a mayor avance de extracción, más fino el material. Se aplica esta modalidad al escenario disponible de BCF, para ver como evoluciona el grado de reducción de las partículas para QES, dominio C2.

# CAPÍTULO 5

---

## CONCLUSIONES

### 5.1. Conclusiones generales

A partir de la revisión bibliográfica es posible ver que hasta el día de hoy no existe consenso sobre un tema tan importante como es la fragmentación secundaria, a pesar de que se han llevado a cabo diversos estudios para poder entender mejor este fenómeno físico. Debido al gran impacto que tiene en la minería, específicamente para los métodos de caving, se estudia este tema, continuando una línea de trabajo establecido por autores previos.

Para esto se llevaron a cabo ensayos con material granular, bajo confinamiento, en un modelo físico escalado, con el fin de estudiar la fragmentación secundaria de 3 dominios geotécnicos elegidos del Proyecto Mina Chuquicamata Subterráneo (PEK, QES y Q<S), además de la construcción de un modelo predictivo de la fragmentación secundaria, al variar el esfuerzo vertical aplicado, para QES. De esta investigación es posible concluir, tanto para PMCHS como en general:

- Al ser sometidos bajo 4 MPa, PEK posee la distribución granulométrica post experimental más gruesa, seguida por QES y finalmente Q<S.
- Se logra construir el modelo predictivo de fragmentación secundaria para el dominio QES, eligiendo la combinación de parámetros que tiene asociado el menor error.
- Se hace una comparación entre el escenario propuesto para la fragmentación secundaria, usando BCF, versus la predicción del modelo de conminución. El modelo indica que habrá una menor reducción para los fragmentos gruesos, en cambio, para la estimación del fino hay una similitud en el comportamiento.
- Se propone una nueva modalidad de uso para el modelo de conminución, la cual incluye porcentajes de extracción de la columna. Esto permite estudiar la evolución del grado de reducción de las partículas, a medida que avanza la extracción.
- Las características del material tienen una gran fluencia en el proceso de fragmentación secundaria, dos indicadores registran este hecho, el primero es el test de la carga puntual y el segundo es el factor de forma, específicamente la redondez. A partir de los ensayos confinados (PEK, QES y Q<S) queda demostrado que, a mayor resistencia a la carga puntual, menor es la fragmentación. Por otro lado, comparando con trabajos previos, mayor redondez implica menor reducción.
- Se ratifica lo que habían observado autores previos, que han usado modelos físicos escalados, a medida que aumenta la aplicación de la carga vertical, aumenta el grado de fragmentación.
- El uso de un modelo físico demuestra ser útil para poder estudiar fenómenos o tendencias que se dan en la mina como es la fragmentación secundaria, aprovechando las ventajas que ofrece el trabajar a escala laboratorio.

Con los conocimientos adquiridos, de esta investigación, se ratifica la influencia de las propiedades de los materiales sobre el proceso de la fragmentación secundaria, por ello, es necesario llevar a cabo una caracterización adecuada de los dominios geotécnicos a explotar.

En el caso de PMCHS, cuyos macro bloques están compuestos por distintas unidades, puede tener un grave impacto no interpretar bien el grado de fragmentación que puede sufrir cada una de estas, durante la etapa de extracción. Por lo mismo se debe definir una tasa de extracción adecuada, según el área en la cual se trabaje.

Estos hechos impulsan más aun el desarrollo de herramientas y modelos, cada vez más precisos al momento de predecir la fragmentación secundaria. Hoy en día, el software más utilizado y aceptado en la industria minería para estudiar este tema, tanto primaria como secundaria, es el Block Caving Fragmentation (BCF).

Pero al igual que la mayoría, sigue estando incompleto, por lo que este modelo predictivo de conminución aparece como una vía alternativa para complementar los estudios de fragmentación secundaria, realizando ensayos con material proveniente de la mina, a escala laboratorio y aprovechando las ventajas que ofrece.

## 5.2. Recomendaciones para trabajo futuro

Este trabajo es la continuación de investigaciones previas y busca aportar con conocimiento nuevo al área de la minería, a pesar de que se han hecho avances importantes, siempre existe la posibilidad de seguir mejorando, para esto se hacen las siguientes recomendaciones:

- Considerar distintas unidades geotécnicas, con el objetivo de generar curvas de fragmentación secundarias, estudiando los factores que pueden condicionar estas, como lo son: resistencia a la carga puntual, redondez y esfericidad, coeficiente de curvatura, etc. Se pueden hacer ensayos, enfrentando estos parámetros entre ellos, para ver cual se impone o tiene un mayor impacto sobre la fragmentación.
- Tomar el caso de una mina en explotación, recolectar información sobre la fragmentación secundaria observada en los puntos de extracción y, por otro lado, a nivel de laboratorio, usar material del mismo lugar para construir el modelo de conminución. De esta manera se pueden validar los resultados obtenidos mediante el modelo a escala mina.
- En vez de considerar un régimen de esfuerzos verticales constante para los experimentos, se puede hacer variable. De esta manera es posible ver cuánto aumenta el grado de reducción a medida que varía el esfuerzo vertical aplicado, similar a una columna de mineral y las etapas de extracción. Pero para poder hacer esto se debe resolver el problema de las colgaduras altas, ya que marcan actualmente el fin de los ensayos, limitando la extracción de masa.
- Se puede considerar la inclusión de un factor asociado al tiempo de residencia en el modelo de conminución, una forma de relacionar esto puede ser en base a la tasa de extracción y la altura de columna. La mejor forma de validar esto es construyendo y estudiando el modelo para una mina en explotación.
- Considerar la posibilidad de aplicar y construir directamente el modelo a partir de datos obtenidos en la mina, saltándose la etapa de ensayos en el laboratorio.
- Hacer ensayos confinados con más de una batea para ver cómo afecta esto la fragmentación secundaria e incorporar movimiento horizontal de las partículas durante el tiraje.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Austin, L G, Klimpel R R and Luckie, P T, 1984. The Batch Grinding Equation: The Size-Mass Rate Balance. *Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling*, pp. 61-78.
2. Arancibia, E and Flores, G, 2004. Design for underground mining at Chuquicamata orebody. Scoping engineering stage. *Proceedings MassMin 2004: Proud to be Miners*, A Karzulovic and M Alfaro (Ed), Instituto de Ingenieros de Chile, Santiago, Chile, pp. 603-609.
3. Broadbent, S R and Callcott, T G. 1956. A Matrix analysis of processes involving particle assemblies. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Londres, pp. 99-123.
4. Brown, E T. 2007. *Block Caving Geomechanics*, second edition, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, Australia.
5. Brunton, I, Lett J and Thornhill T. 2016. Fragmentation Prediction and Assessment at the Ridgeway Deeps and Cadia East Cave Operations. *Seventh International Conference & Exhibition on Mass Mining*, *Proceedings MassMin 2016*, Sydney, Australia, pp. 151-160.
6. Butcher, R J and Thin, I G T. 2007. The inputs and choices for predicting fragmentation in block cave projects. In *Proceedings 1st International Symposium on Block and Sub-level Caving*, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, South Africa, pp. 35-49.
7. Castro, R. 2006. Study of the mechanisms of gravity flow for block caving. PhD Thesis, The University of Queensland, Brisbane, Australia.
8. Castro, R. 2001. Escalamiento para modelo físico de flujo gravitacional. *Memoria de Ingeniero Civil de Minas*, Universidad de Chile, Chile.
9. Castro, R, Fuenzalida A and Lund, F. 2014. Experimental study of gravity flow under confined conditions. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 67, pp. 164-169.
10. Castro, R, Gómez, R, Casali A and Hekmat, A. 2016. Experimental and Conminution Model Framework for Secondary Fragmentation Prediction in Block Caving. *Proceedings MassMin 2016*, Sydney, Australia, pp. 175-183.
11. Chitombo, G P. 2010. Cave mining: 16 years after Laubscher's 1994 'Cave mining state of art'. *Proceedings of the Second International Symposium on Block Caving and Sublevel Caving*, Potvin Y (Ed), 20-22 Abril 2010, Perth, Australia, pp. 45-62.
12. Cho, G, Dodds J and Santamarina, J. 2006. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands. *Journal of Geotechnical and GeoEnvironmental Engineering*. Vol. 132, pp. 591-602.
13. Codelco. 2009. Estudio de prefactibilidad: Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. Vicepresidencia Corporativa De Proyectos, Codelco.
14. Craig, R F. 2004. *Craig's soil mechanics*, Seventh Edition, pp. 71 -74.

15. Epstein, B. 1948. Logarithmico-Normal Distribution in Breakage of Solids. *Industrial and Engineering Chemistry*. Industrial and Engineering Chemistry, pp. 2289-2291.
16. Fuenzalida, M. 2012. Estudio del flujo gravitacional confinado y su aplicación a la minería de caving. Tesis de Magister en minería. Universidad de Chile, Chile.
17. Gómez, R. 2014. Modelo de fragmentación secundaria y colgaduras en minería de caving. Memoria de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, Chile.
18. Gómez, R. 2015. Experimental assessment of hang up and secondary fragmentation for block caving. Tesis de Magister en minería. Universidad de Chile, Chile.
19. Hoz, K. 2007. Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos. Tesis de magister en ciencias de la ingeniería. Universidad de Chile, Chile.
20. Jaeger, H M, Nagel S R and Behringer, R P. 1996. Granular solids, liquids and gases. *Review of Modern Physics*, Vol. 68, pp. 1259-1273.
21. Laubscher, D H. 1994. Cave mining - the state of the art. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 279-293.
22. López, S. 2016. Estudio experimental de colgaduras. Memoria de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, Chile.
23. Mcdowell, G R, Bolton M D and Robertson, D. 1996. The fractal crushing of granular materials. *Mech Phys Solids*, Vol. 44, pp. 2079-2012.
24. Merino, L. 1986. Predicting the size distribution of ore fragments in block caving mines. Tesis de Magister en minería. Imperial College, Inglaterra.
25. Mery, H. 1972. Mecánica de Fluidos I. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile, Chile.
26. Montecino, N. 2011. Modelo de mezcla de fragmentación secundaria en minería de block/panel caving. Tesis de Magister en minería. Universidad de Chile, Chile.
27. Nedderman, R. 1992. Statics and Kinematics of Granular Materials, pp. 84-126.
28. Olivares, D. 2014. Influencia de fino y humedad en flujo gravitacional confinado. Memoria de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, Chile.
29. Orellana, L. 2012. Evaluación de variables de diseño del sistema de minería continua a partir de experimentación en laboratorio. Tesis de Magister en minería. Universidad de Chile, Chile.
30. Pierce, M. 2010. A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines. PhD Thesis. The University of Queensland, Australia.
31. Pineda, M. 2012. Study of the gravity flow mechanisms at goldex by means of a physical model. Tesis de Magister en minería. Universidad de Chile, Chile.
32. Pouliquen, O and Chevoir, F. 2002. Dense flows of dry granular material. *Comptes Rendus Physique*, pp. 163-175.
33. Pöschel, T, Salueña C and Schwager T. 2002. Scaling properties of granular materials. Humboldt University Berlin, Alemania.
34. Reid, K J. 1965. A solution to the batch grinding equation. *Chemical Engineering Science*, Volume 20, pp. 953-963.

35. Stacey, T R and Terbrugge, P J. 2000. Open Pit to Underground-Transition and Interaction. Proceedings MassMin 2000. Australian Institute of Mining and Metallurgy, Brisbane, Australia, pp. 97-104.
36. Sotomayor, G. 2016. Recomendación de malla de extracción para el Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea. Memoria de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, Chile.
37. SRK Consulting. 2015. Chuquicamata Underground Project: 2015 Fragmentation Study Update for Initial and Experimental Macroblocs (Reporte Interno-Codelco).

# ANEXO A

## Diseño equipo experimental

Dimensiones en centímetros de la batea a utilizar, modelo físico.

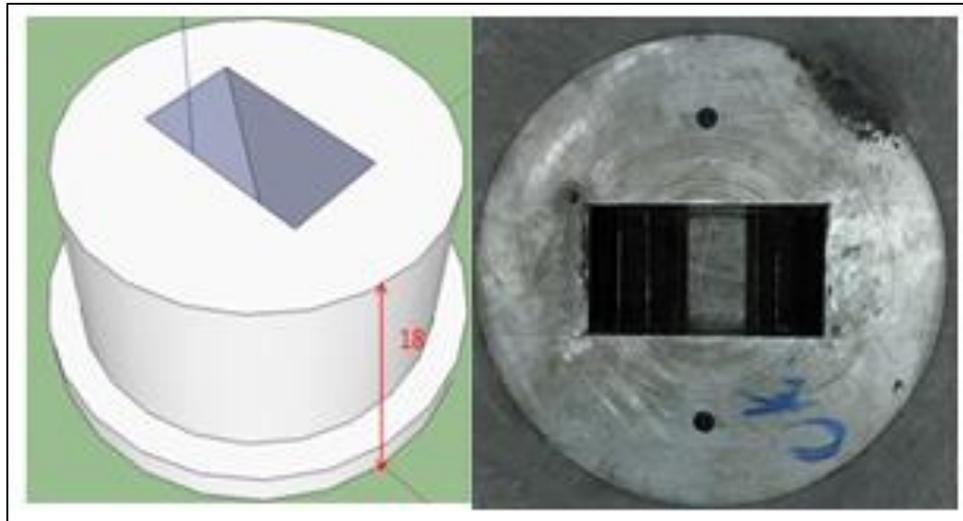


Figura 24: Vista isométrica y planta de batea, modelo físico (Olivares, 2014)

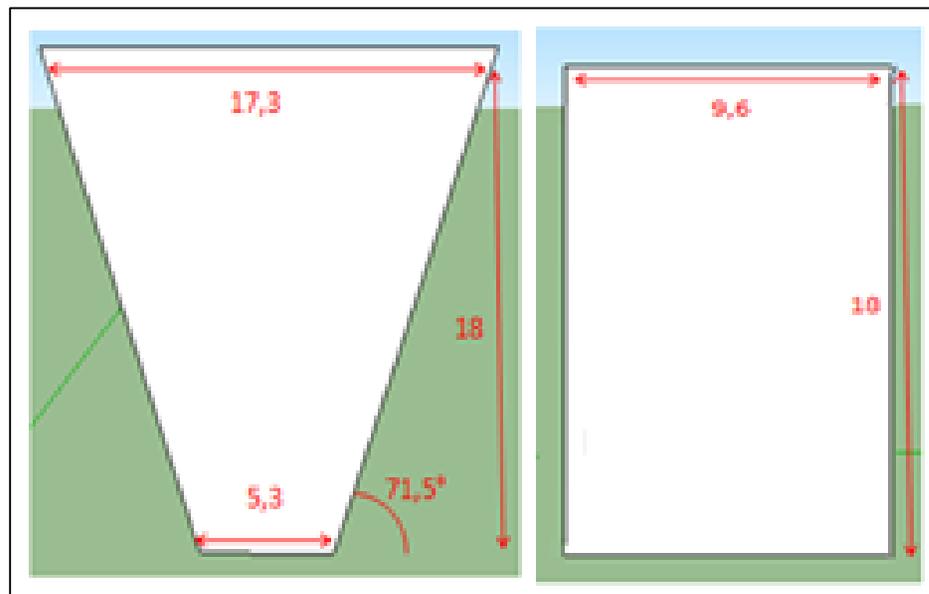


Figura 25: Dimensiones batea, modelo físico (Olivares, 2014)

Dimensiones en milímetros de pala mecanizada, modelo físico.

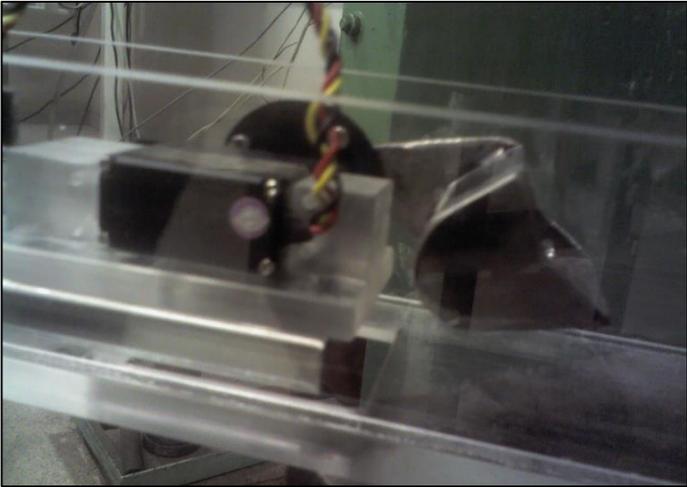


Figura 26: Vista isométrica pala escalada, modelo físico

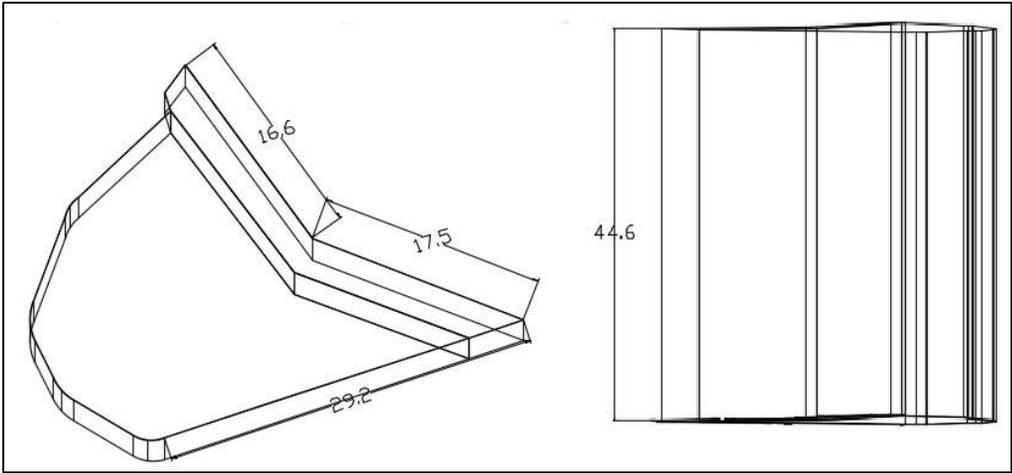


Figura 27: Vista isométrica y planta pala escalada, Autocad

# ANEXO B

## Caracterización material

### Esfericidad y redondez

Tabla 27: Esfericidad y redondez, dominio QES

Muestra	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	Rmin-cr	Rmax-in	Esfericidad	Redondez	
1	1,50	0,93	0,49	0,13	0,27	0,00	0,00	0,00	1,50	0,93	0,62	0,31	
2	1,28	0,90	0,26	0,23	0,13	0,00	0,00	0,00	1,28	0,90	0,70	0,23	
3	1,50	0,97	0,37	0,26	0,17	0,26	0,22	0,00	1,50	0,97	0,64	0,26	
4	1,15	0,86	0,26	0,14	0,26	0,00	0,00	0,00	1,15	0,86	0,75	0,25	
5	1,24	0,95	0,18	0,95	0,14	0,13	0,18	0,00	1,24	0,95	0,77	0,41	
6	1,18	0,79	0,33	0,31	0,22	0,10	0,00	0,00	1,18	0,79	0,67	0,30	
7	1,73	0,98	0,26	0,29	0,22	0,15	0,14	0,00	1,73	0,98	0,57	0,22	
8	1,21	0,80	0,18	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	1,21	0,80	0,66	0,21	
9	1,38	0,87	0,24	0,24	0,16	0,13	0,10	0,13	1,38	0,87	0,63	0,19	
10	1,33	0,92	0,25	0,17	0,12	0,12	0,11	0,00	1,33	0,92	0,69	0,17	
11	1,36	0,92	0,14	0,14	0,16	0,09	0,09	0,00	1,36	0,92	0,68	0,13	
12	1,57	0,96	0,22	0,18	0,13	0,11	0,11	0,11	1,57	0,96	0,61	0,15	
13	1,59	1,16	0,10	0,09	0,10	0,15	0,00	0,00	1,59	1,16	0,73	0,09	
14	1,27	0,95	0,28	0,16	0,10	0,10	0,08	0,00	1,27	0,95	0,74	0,15	
15	1,29	0,82	0,07	0,13	0,24	0,00	0,00	0,00	1,29	0,82	0,63	0,18	
16	1,22	1,00	0,10	0,13	0,11	0,10	0,10	0,00	1,22	1,00	0,82	0,11	
17	1,23	0,77	0,12	0,13	0,10	0,11	0,00	0,00	1,23	0,77	0,63	0,15	
18	1,53	1,00	0,12	0,22	0,13	0,17	0,00	0,00	1,53	1,00	0,65	0,16	
19	1,27	0,80	0,15	0,22	0,18	0,17	0,00	0,00	1,27	0,80	0,63	0,23	
20	1,26	0,95	0,17	0,16	0,13	0,12	0,12	0,00	1,26	0,95	0,76	0,15	
21	1,35	0,86	0,17	0,15	0,10	0,10	0,00	0,00	1,35	0,86	0,64	0,15	
22	1,35	0,97	0,13	0,13	0,06	0,09	0,00	0,00	1,35	0,97	0,72	0,11	
23	1,22	0,73	0,14	0,12	0,21	0,16	0,00	0,00	1,22	0,73	0,60	0,22	
24	1,45	0,86	0,18	0,12	0,10	0,23	0,10	0,00	1,45	0,86	0,60	0,17	
25	1,41	1,07	0,18	0,17	0,17	0,00	0,00	0,00	1,41	1,07	0,76	0,16	
26	1,16	0,74	0,17	0,12	0,16	0,07	0,13	0,00	1,16	0,74	0,64	0,18	
27	1,42	1,00	0,14	0,17	0,13	0,13	0,00	0,00	1,42	1,00	0,70	0,14	
28	1,28	0,93	0,28	0,26	0,17	0,14	0,00	0,00	1,28	0,93	0,73	0,23	
29	1,32	0,90	0,25	0,14	0,47	0,00	0,00	0,00	1,32	0,90	0,68	0,32	
30	1,14	0,76	0,14	0,17	0,12	0,12	0,00	0,00	1,14	0,76	0,67	0,18	
											Promedio	0,68	0,20
											Desviación	0,06	0,07

Tabla 28: Esfericidad y redondez, dominio PEK

Muestra	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	Rmin-cr	Rmax-in	Esfericidad	Redondez	
1	1,42	0,90	0,10	0,07	0,21	0,34	0,15	0,08	1,42	0,90	0,63	0,18	
2	1,32	0,94	0,31	0,19	0,13	0,10	0,14	0,00	1,32	0,94	0,71	0,18	
3	1,43	0,87	0,21	0,19	0,13	0,46	0,00	0,00	1,43	0,87	0,61	0,29	
4	1,41	0,76	0,11	0,18	0,19	0,10	0,00	0,00	1,41	0,76	0,54	0,19	
5	1,53	0,80	0,21	0,22	0,16	0,14	0,21	0,00	1,53	0,80	0,52	0,23	
6	1,26	0,71	0,39	0,20	0,06	0,31	0,00	0,00	1,26	0,71	0,56	0,34	
7	1,13	0,91	0,54	0,17	0,08	0,20	0,00	0,00	1,13	0,91	0,81	0,27	
8	1,15	0,90	0,14	0,10	0,16	0,15	0,00	0,00	1,15	0,90	0,78	0,15	
9	1,49	0,94	0,27	0,25	0,11	0,11	0,00	0,00	1,49	0,94	0,63	0,20	
10	1,16	0,87	0,13	0,24	0,11	0,14	0,08	0,00	1,16	0,87	0,75	0,16	
11	1,16	0,87	0,12	0,13	0,11	0,00	0,00	0,00	1,16	0,87	0,74	0,14	
12	1,30	0,92	0,14	0,13	0,08	0,00	0,00	0,00	1,30	0,92	0,71	0,13	
13	1,55	0,93	0,79	0,18	0,14	0,12	0,21	0,00	1,55	0,93	0,60	0,31	
14	1,31	0,85	0,11	0,12	0,31	0,11	0,11	0,00	1,31	0,85	0,65	0,18	
15	1,31	0,82	0,25	0,19	0,14	0,16	0,13	0,00	1,31	0,82	0,62	0,21	
16	1,27	0,72	0,11	0,20	0,14	0,12	0,23	0,00	1,27	0,72	0,57	0,22	
17	1,24	0,83	0,30	0,17	0,21	0,18	0,10	0,00	1,24	0,83	0,67	0,23	
18	1,66	0,90	0,16	0,11	0,17	0,00	0,00	0,00	1,66	0,90	0,54	0,16	
19	1,30	0,97	0,24	0,26	0,18	0,13	0,13	0,00	1,30	0,97	0,75	0,19	
20	1,44	0,78	0,39	0,25	0,15	0,14	0,00	0,00	1,44	0,78	0,55	0,30	
21	1,49	0,89	0,19	0,16	0,11	0,12	0,15	0,09	1,49	0,89	0,59	0,16	
22	1,57	0,93	0,37	0,18	0,15	0,15	0,00	0,00	1,57	0,93	0,59	0,23	
23	1,47	0,88	0,39	0,32	0,30	0,19	0,09	0,00	1,47	0,88	0,60	0,29	
24	1,38	0,79	0,13	0,15	0,11	0,11	0,08	0,00	1,38	0,79	0,57	0,15	
25	1,22	0,71	0,16	0,10	0,22	0,00	0,00	0,00	1,22	0,71	0,58	0,23	
26	1,70	0,97	0,25	0,14	0,15	0,24	0,21	0,34	1,70	0,97	0,57	0,23	
27	1,45	0,95	0,17	0,19	0,26	0,58	0,21	0,00	1,45	0,95	0,66	0,29	
28	1,41	0,78	0,17	0,25	0,11	0,21	0,00	0,00	1,41	0,78	0,55	0,24	
29	1,10	0,76	0,26	0,15	0,15	0,09	0,00	0,00	1,10	0,76	0,69	0,22	
30	1,53	0,82	0,25	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	1,53	0,82	0,53	0,28	
											Promedio	0,63	0,22
											Desviación	0,08	0,06

Tabla 29: Esfericidad y redondez, dominio  $Q < S$

Muestra	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7	r8	Rmin-cr	Rmax-in	Esfericidad	Redondez
1	1,23	0,89	0,32	0,20	0,25	0,11	0,17	0,00	1,23	0,89	0,72	0,24
2	1,46	0,96	0,40	0,37	0,48	0,22	0,00	0,00	1,46	0,96	0,66	0,38
3	1,34	0,84	0,08	0,11	0,12	0,23	0,22	0,00	1,34	0,84	0,63	0,18
4	1,38	1,07	0,47	0,11	0,20	0,12	0,15	0,00	1,38	1,07	0,78	0,20
5	1,41	1,05	0,44	0,18	0,40	0,41	0,00	0,00	1,41	1,05	0,74	0,34
6	1,46	1,01	0,13	0,22	0,15	0,11	0,14	0,00	1,46	1,01	0,69	0,15
7	1,59	0,91	0,25	0,11	0,31	0,14	0,13	0,00	1,59	0,91	0,57	0,21
8	1,40	0,94	0,28	0,17	0,14	0,11	0,11	0,00	1,40	0,94	0,67	0,17
9	1,43	0,90	0,26	0,20	0,11	0,37	0,07	0,00	1,43	0,90	0,63	0,23
10	1,50	1,11	0,21	0,16	0,26	0,15	0,15	0,00	1,50	1,11	0,74	0,17
11	1,26	0,92	0,18	0,11	0,29	0,21	0,14	0,00	1,26	0,92	0,73	0,20
12	1,54	1,05	0,39	0,17	0,17	0,09	0,11	0,25	1,54	1,05	0,68	0,19
13	1,55	0,98	0,11	0,16	0,08	0,09	0,11	0,17	1,55	0,98	0,63	0,12
14	1,30	0,90	0,30	0,25	0,13	0,17	0,23	0,23	1,30	0,90	0,69	0,24
15	1,36	0,88	0,20	0,12	0,17	0,25	0,17	0,22	1,36	0,88	0,65	0,21
16	1,33	0,91	0,20	0,23	0,24	0,23	0,12	0,00	1,33	0,91	0,69	0,22
17	1,35	1,06	0,43	0,30	0,21	0,11	0,29	0,00	1,35	1,06	0,79	0,25
18	1,55	0,92	0,16	0,16	0,23	0,13	0,22	0,34	1,55	0,92	0,60	0,23
19	1,49	1,05	0,25	0,11	0,26	0,27	0,25	0,15	1,49	1,05	0,71	0,20
20	1,41	0,95	0,24	0,24	0,23	0,26	0,24	0,10	1,41	0,95	0,67	0,23
21	1,42	0,97	0,21	0,23	0,19	0,27	0,20	0,24	1,42	0,97	0,68	0,23
22	1,22	0,76	0,10	0,31	0,29	0,09	0,14	0,14	1,22	0,76	0,63	0,24
23	1,01	0,62	0,13	0,18	0,10	0,12	0,14	0,00	1,01	0,62	0,61	0,22
24	1,14	0,71	0,13	0,26	0,19	0,00	0,00	0,00	1,14	0,71	0,62	0,27
25	1,38	0,91	0,42	0,60	0,26	0,18	0,23	0,12	1,38	0,91	0,66	0,33
26	1,38	1,01	0,13	0,13	0,19	0,21	0,30	0,13	1,38	1,01	0,73	0,18
27	1,18	0,84	0,11	0,22	0,18	0,16	0,19	0,13	1,18	0,84	0,71	0,19
28	1,30	0,86	0,25	0,25	0,18	0,11	0,21	0,00	1,30	0,86	0,66	0,23
29	1,45	0,95	0,23	0,25	0,21	0,00	0,00	0,00	1,45	0,95	0,65	0,24
30	1,47	1,00	0,26	0,12	0,27	0,28	0,12	0,12	1,47	1,00	0,68	0,20
										Promedio	0,68	0,22

## Clasificación de los fragmentos

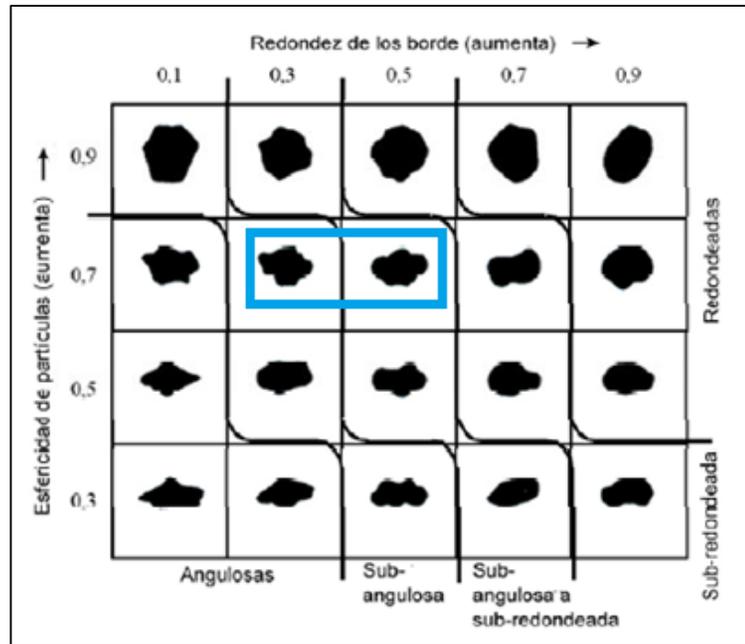


Figura 28: Clasificación fragmentos, dominio QES

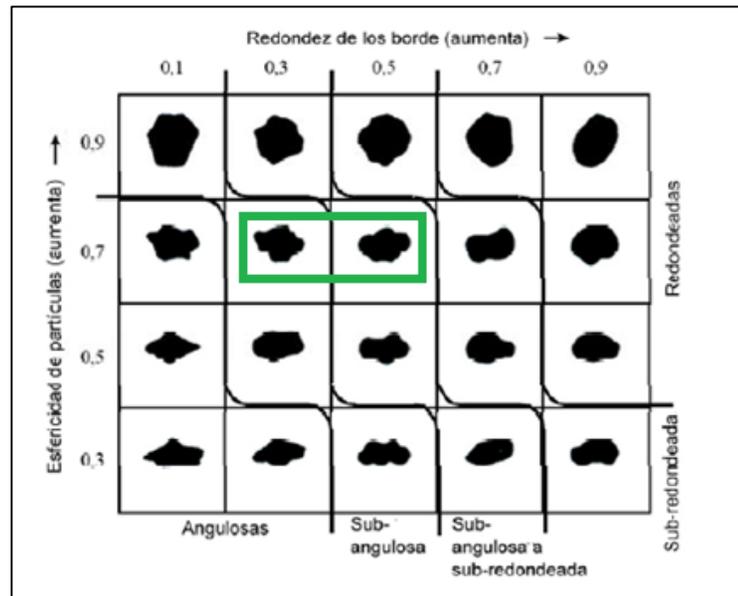


Figura 29: Clasificación fragmentos, dominio PEK

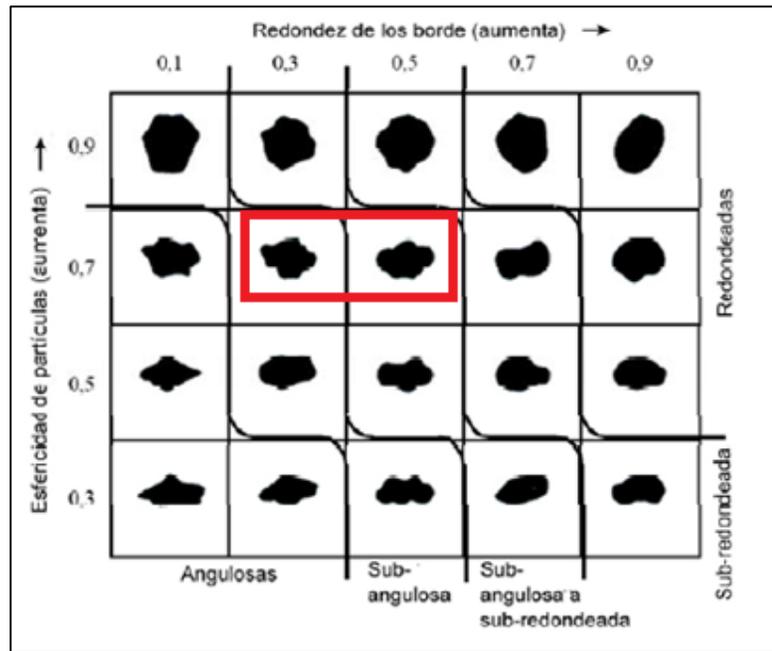


Figura 30: Clasificación fragmentos, dominio  $Q < S$

## Ensayos de carga puntual

Tabla 30: Ensayo de carga puntual, dominio PEK

Distancia entre puntas (D) [mm]	Ancho 1 [mm]	Ancho 2 [mm]	Ancho promedio [mm]	Fuerza de Ruptura [KN]	De <sup>2</sup> [mm <sup>2</sup> ]	De [mm]	Índice de Carga Puntual (Is) [Mpa]	Factor de Corrección	Índice de Carga Puntual (Is) [Mpa]
23	70	35	52,5	3,7	1537,4	39,2	2,4	0,9	2,1
29	53	36	44,5	3,3	1643,1	40,5	2,0	0,9	1,8
22	46	25	35,5	5,9	994,4	31,5	5,9	0,8	4,8
26	51	34	42,5	2,4	1406,9	37,5	1,7	0,9	1,5
29	51	30	40,5	4,6	1495,4	38,7	3,0	0,9	2,7
29	63	49	56,0	6,3	2067,7	45,5	3,0	1,0	2,9
20	50	40	45,0	6,8	1145,9	33,9	5,9	0,8	5,0
28	54	31	42,5	2,1	1515,2	38,9	1,4	0,9	1,2
22	55	36	45,5	7,0	1274,5	35,7	5,5	0,9	4,7
25	95	27	61,0	2,3	1941,7	44,1	1,2	0,9	1,1
28	65	53	59,0	6,0	2103,4	45,9	2,9	1,0	2,8
23	56	28	42,3	2,3	1237,3	35,2	1,9	0,9	1,6
35	52	45	48,5	2,8	2161,3	46,5	1,3	1,0	1,2
31	61	53	57,0	4,5	2249,8	47,4	2,0	1,0	1,9
24	93	24	58,5	4,3	1787,6	42,3	2,4	0,9	2,2
20	76	44	60,3	1,2	1534,3	39,2	0,8	0,9	0,7
16	49	38	43,5	9,9	886,2	29,8	11,1	0,8	8,8
29	78	32	55,3	5,5	2040,0	45,2	2,7	1,0	2,6
14	60	48	54,3	6,9	967,0	31,1	7,1	0,8	5,8
24	46	30	37,8	5,5	1153,6	34,0	4,8	0,8	4,0
27	65	27	46,0	2,3	1581,4	39,8	1,4	0,9	1,3
26	48	19	33,5	2,6	1109,0	33,3	2,3	0,8	1,9
20	69	30	49,5	3,4	1260,5	35,5	2,7	0,9	2,3
24	82	37	59,3	4,1	1810,5	42,6	2,3	0,9	2,1
22	60	44	52,0	4,6	1456,6	38,2	3,2	0,9	2,8

Tabla 31: Ensayo de carga puntual, dominio QES

Distancia entre puntas (D) [mm]	Ancho 1 [mm]	Ancho 2 [mm]	Ancho promedio [mm]	Fuerza de Ruptura [KN]	De <sup>2</sup> [mm <sup>2</sup> ]	De [mm]	Índice de Carga Puntual (Is) [Mpa]	Factor de Corrección	Índice de Carga Puntual (Is) [Mpa]
22	49	31	40	4	1120,5	33,5	3,6	0,8	3
26	57	30	43,5	1,2	1440	37,9	0,8	0,9	0,7
23	56	40	48	2,7	1405,7	37,5	1,9	0,9	1,7
20	45	34	39,5	0,7	1005,9	31,7	0,7	0,8	0,6
21	48	30	39	1,3	1042,8	32,3	1,3	0,8	1
24	50	24	37	1,3	1130,6	33,6	1,1	0,8	1
25	52	36	44	4,6	1400,6	37,4	3,3	0,9	2,9
26	53	31	42	1,4	1390,4	37,3	1	0,9	0,9
25	66	40	53	4,7	1687	41,1	2,8	0,9	2,5
22	53	28	40,5	2,1	1134,5	33,7	1,9	0,8	1,6
42	68	69	68,5	1,5	3663,1	60,5	0,4	1,1	0,5
41	106	60	56	5,8	2923,4	54,1	2	1	2,1
57	112	71	91,5	3,9	6640,6	81,5	0,6	1,2	0,7
20	39	56,5	47,8	6,1	1215,9	34,9	5,0	0,9	4,2
20	67	40	53,5	2,7	1362,4	36,9	2,0	0,9	1,8
27	61	45	53,0	2,2	1822,0	42,7	1,2	0,9	1,1
23	66	50	58,0	4,1	1698,5	41,2	2,4	0,9	2,2
30	63	40	51,5	4,5	1967,2	44,4	2,3	0,9	2,1
22	62	44	53,0	1,7	1484,6	38,5	1,1	0,9	1,0
27	59	40	49,5	2,8	1701,7	41,3	1,7	0,9	1,5
14	58	41	49,5	1,0	882,4	29,7	1,2	0,8	0,9
20	65	51	58,0	1,9	1477,0	38,4	1,3	0,9	1,2
16	66	54	60,0	4,0	1222,3	35,0	3,3	0,9	2,8
24	50	45	47,5	6,1	1451,5	38,1	4,2	0,9	3,7
38	78	54	66,0	1,0	3193,3	56,5	0,3	1,1	0,3
21	64	55	59,5	3,5	1590,9	39,9	2,2	0,9	2,0
23	67	37	52,0	1,5	1522,8	39,0	1,0	0,9	0,9

Tabla 32: Ensayo de carga puntual, dominio  $Q < S$

Distancia entre puntas (D) [mm]	Ancho 1 [mm]	Ancho 2 [mm]	Ancho promedio [mm]	Fuerza de Ruptura [KN]	De <sup>2</sup> [mm <sup>2</sup> ]	De [mm]	Índice de Carga Puntual (Is) [Mpa]	Factor de Corrección	Índice de Carga Puntual (Is) [Mpa]
40	85	75	80	2,4	4074,4	63,8	0,6	1,1	0,7
16	46	43	44,5	1,2	906,5	30,1	1,3	0,8	1
20	58	50	54	0,7	1375,1	37,1	0,5	0,9	0,5
15	57	35	46	1,1	878,5	29,6	1,2	0,8	0,9
25	65	25	45	2,6	1432,4	37,8	1,8	0,9	1,6
16	53	34	43,5	2,8	886,2	29,8	3,2	0,8	2,5
23	57	30	43,5	2,8	1273,9	35,7	2,2	0,9	1,9
27	85	54	69,5	0,9	2389,2	48,9	0,4	1	0,4
18	72	42	57	1,9	1306,3	36,1	1,4	0,9	1,2
21	56	41	48,5	2,7	1296,8	36,0	2,1	0,9	1,8
27	68	58	63	4,9	2165,8	46,5	2,3	1,0	2,2
12	78	33	55,5	1,5	848,0	29,1	1,8	0,8	1,4
22	61	52	56,5	3,7	1582,6	39,8	2,3	0,9	2,1
29	62	48	55	4,2	2030,8	45,1	2,0	1,0	2,0
31	56	40	48	1,3	1894,6	43,5	0,7	0,9	0,6
36	68	45	56,5	1,3	2589,8	50,9	0,5	1,0	0,5
17	70	45	57,5	1,3	1244,6	35,3	1,1	0,9	0,9
27	39	61	50	0,8	1718,9	41,5	0,5	0,9	0,4
38	61	67	64	6,8	3096,5	55,6	2,2	1,0	2,3
19	63	70	66,5	2,2	1608,7	40,1	1,4	0,9	1,2
31	71	52	61,5	1,4	2427,4	49,3	0,6	1,0	0,6
20	65	38	51,5	1,1	1311,4	36,2	0,8	0,9	0,7

# ANEXO C

## Modelo de conminución

### Error cuadrático (EC) y Error Cuadrático Medio (ECM)

Tabla 33: EC para los 7 casos, ajuste modelo de conminución

	Modelo 2 MPa		Modelo 4 MPa		Modelos 2 y 4 Mpa	
	EC [% <sup>2</sup> ]	Diferencia EC [%]	EC [% <sup>2</sup> ]	Diferencia EC [%]	EC [% <sup>2</sup> ]	Diferencia EC [%]
<b>Caso 1</b>	<b>4,0297</b>	<b>0,0000</b>	<b>5,8348</b>	<b>0,0000</b>	<b>9,8645</b>	<b>0,0000</b>
Caso 2	4,0296	0,0025	5,8349	-0,0015	9,8645	0,0001
Caso 3	4,0297	-0,0005	5,8346	0,0030	9,8643	0,0016
Caso 4	4,0297	0,0003	5,8348	-0,0002	9,8645	0,0001
Caso 5	4,0297	-0,0008	5,8348	0,0006	9,8645	0,0002
Caso 6	4,0296	0,0025	5,8349	-0,0010	9,8644	0,0004
Caso 7	4,0296	0,0012	5,8347	0,0018	9,8643	0,0016

Tabla 34: ECM para los 7 casos, ajuste modelo de conminución

	Modelo 2 MPa	Modelo 4 MPa
	ECM [% <sup>2</sup> ]	ECM [% <sup>2</sup> ]
<b>Caso 1</b>	<b>0,8059</b>	<b>1,1669</b>
Caso 2	0,8059	1,1669
Caso 3	0,8059	1,1669
Caso 4	0,8059	1,1669
Caso 5	0,8059	1,1669
Caso 6	0,8059	1,1669
Caso 7	0,8059	1,1669

### Extracción de masa por experimento

Tabla 35: Masa extraída según experimento

Experimento	Masa extraída [kg]
PEK (4 MPa)	4,55
Q<S (4 MPa)	4,52
QES (4 MPa)	4,80
QES (2 MPa)	4,88

## Curvas granulométricas según dominio

Se presentan las distribuciones granulométricas de las 2 muestras tomadas por dominio.

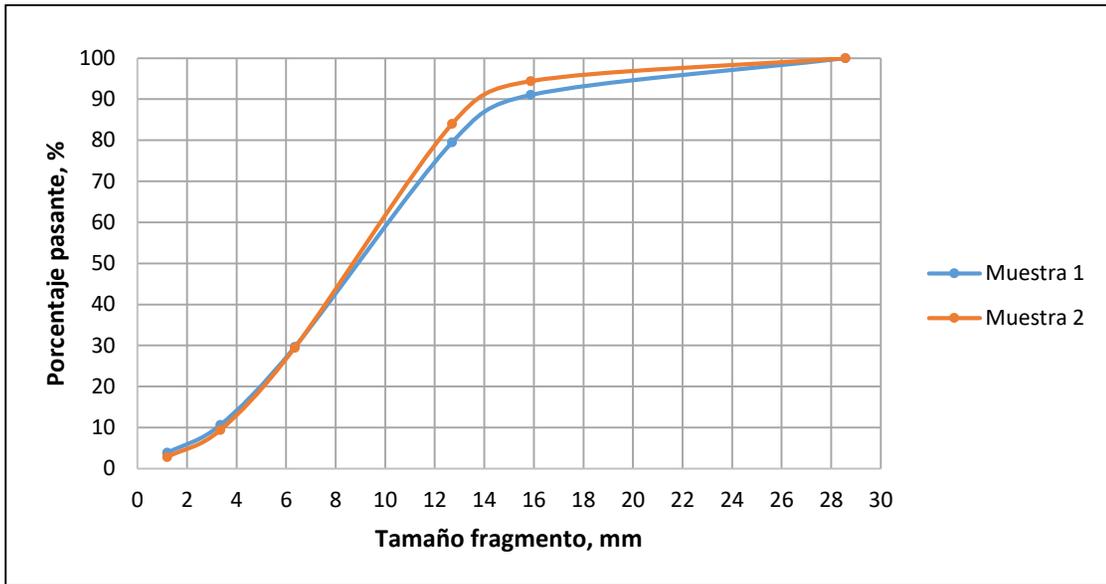


Gráfico 17: Curvas granulométricas de muestras, QES (2 MPa)

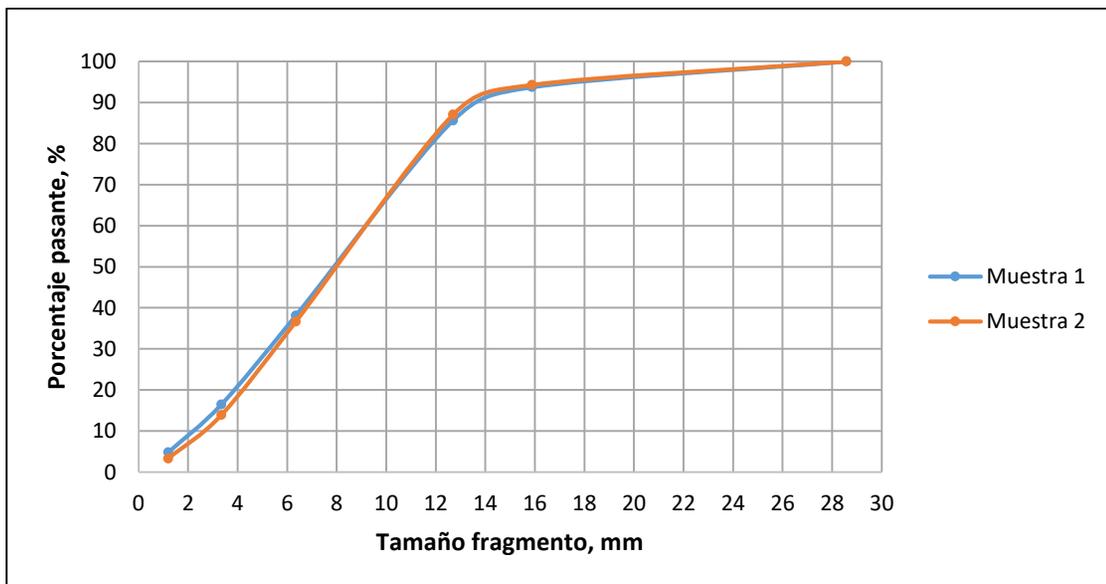


Gráfico 18: Curvas granulométricas de muestras, QES (4 MPa)

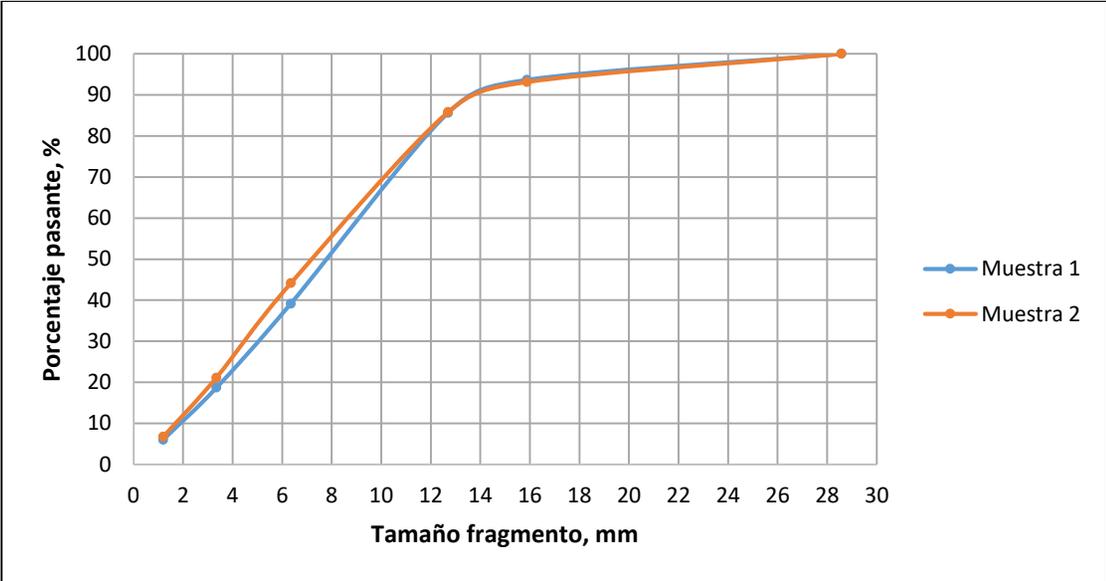


Gráfico 19: Curvas granulométricas de muestras, Q<S (4 MPa)

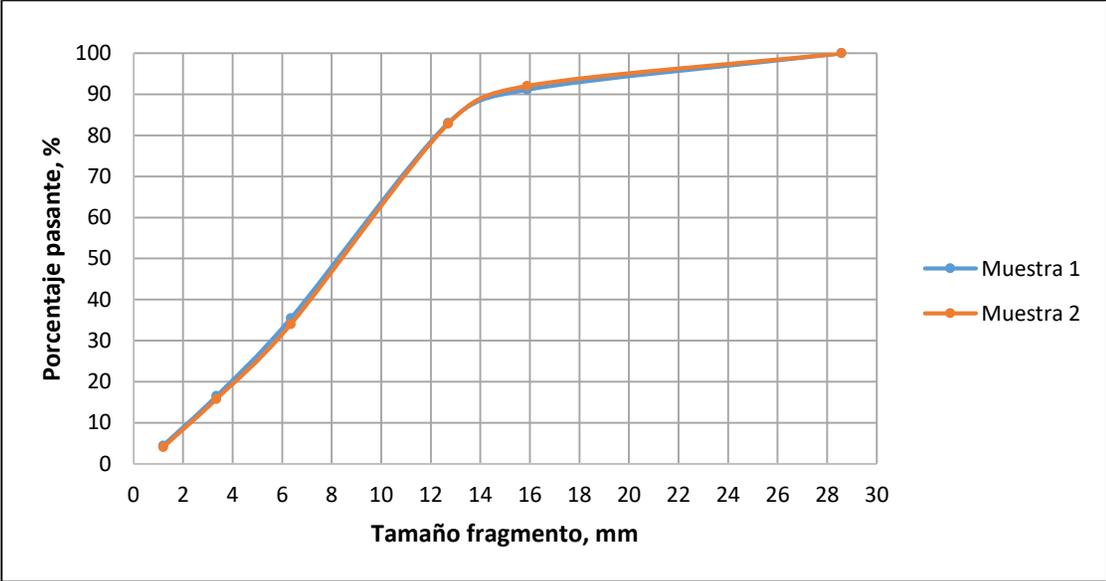


Gráfico 20: Curvas granulométricas de muestras, PEK (4 MPa)

## Estimación fragmentación secundaria, dominio QES

Fragmentación secundaria del dominio QES, en un rango de 0 a 5 MPa, mediante la aplicación del modelo de conminución elaborado.

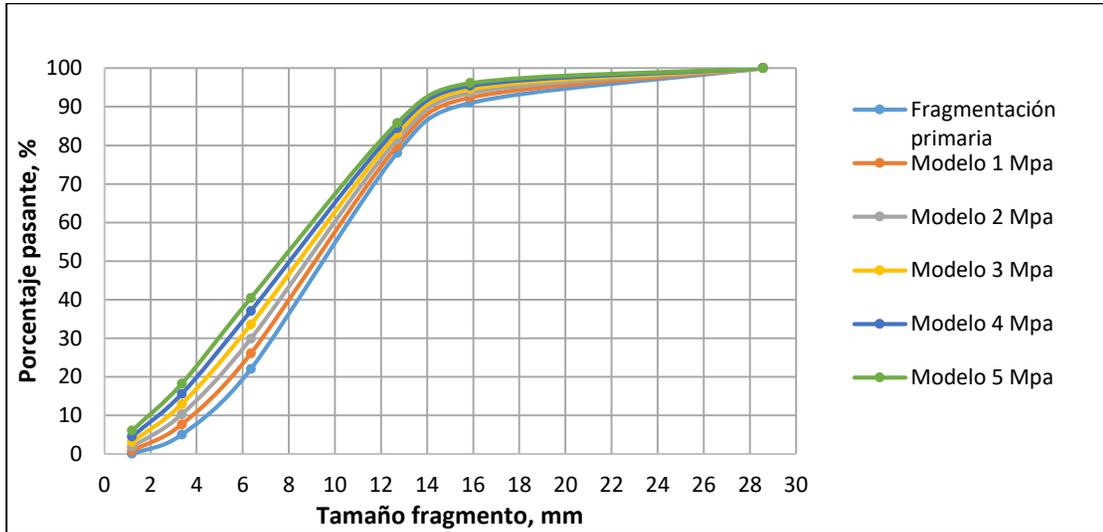


Gráfico 21: Fragmentación secundaria bajo un rango de esfuerzos, QES, modelo de conminución

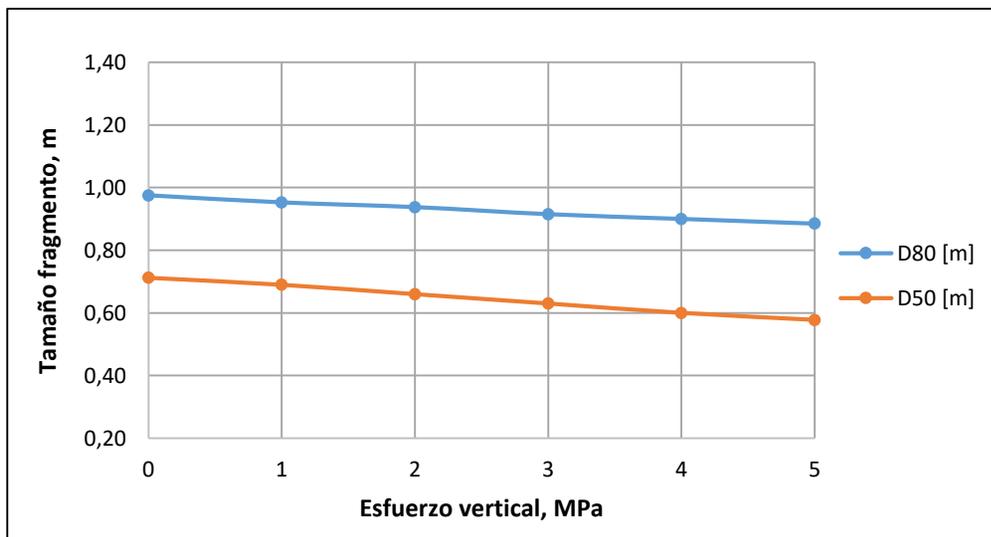


Gráfico 22: Evolución D80 y D50, estimado por el modelo de conminución para QES, escala mina

## Ejemplo modalidad de uso con porcentaje extracción, columna 300 m

Fragmentación secundaria según avance de extracción, bloque I.

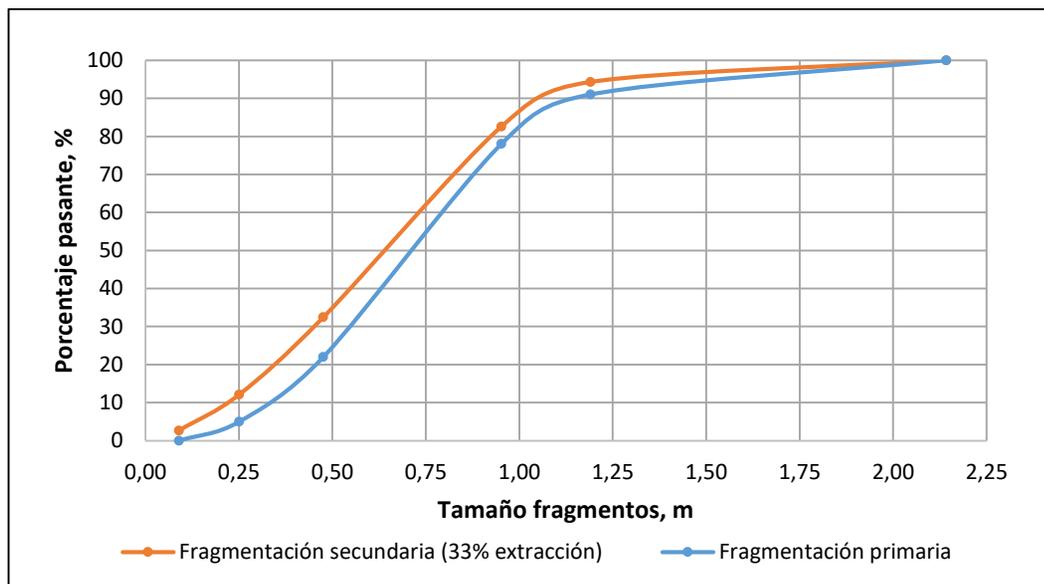


Gráfico 23: 33% extracción columna, avance bloque I

Fragmentación secundaria según avance de extracción, bloque II.

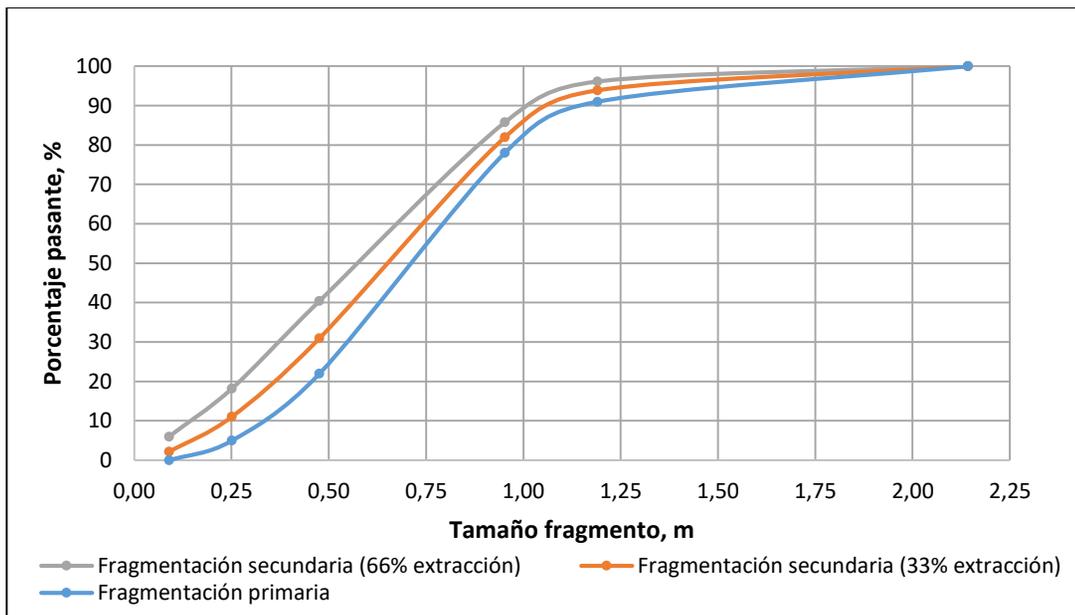


Gráfico 24: 66% extracción columna, avance bloque II

Fragmentación secundaria según avance de extracción, bloque III.

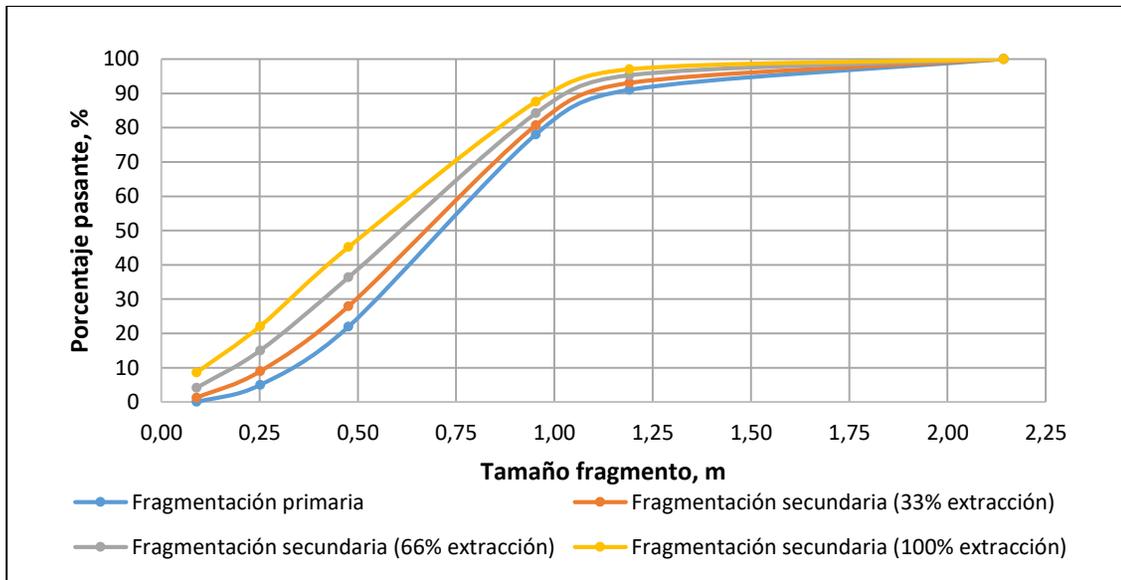


Gráfico 25: 100% extracción columna, avance bloque III

### Ejemplo modalidad de uso con porcentaje extracción versus BCF

Fragmentación secundaria según avance de extracción, bloque I.

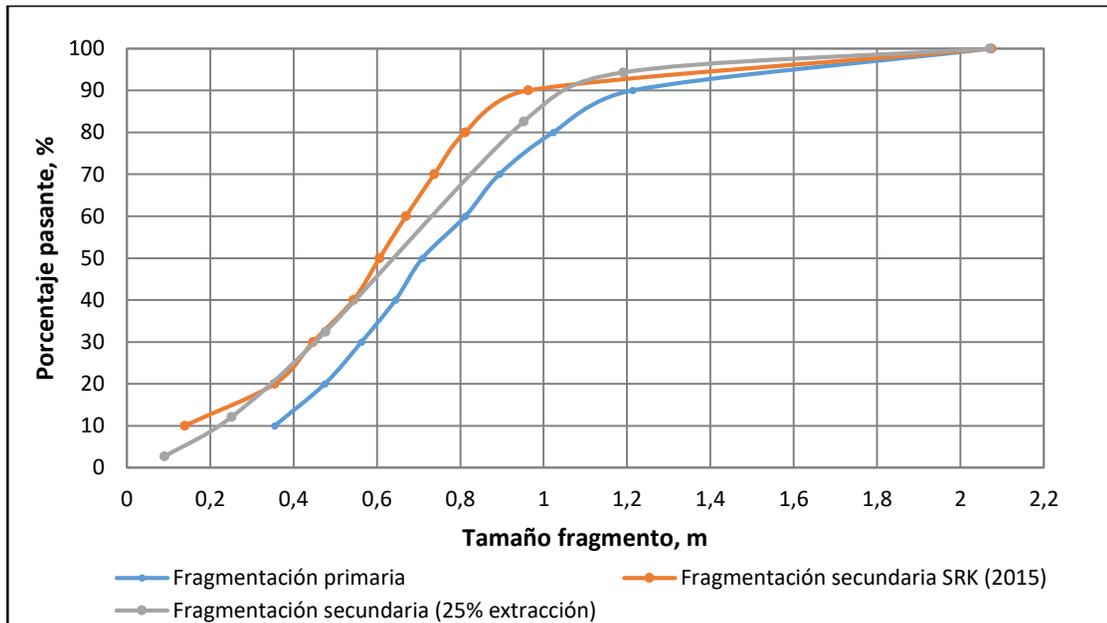


Gráfico 26: 25% extracción columna, avance bloque I

Fragmentación secundaria según avance de extracción, bloque II.

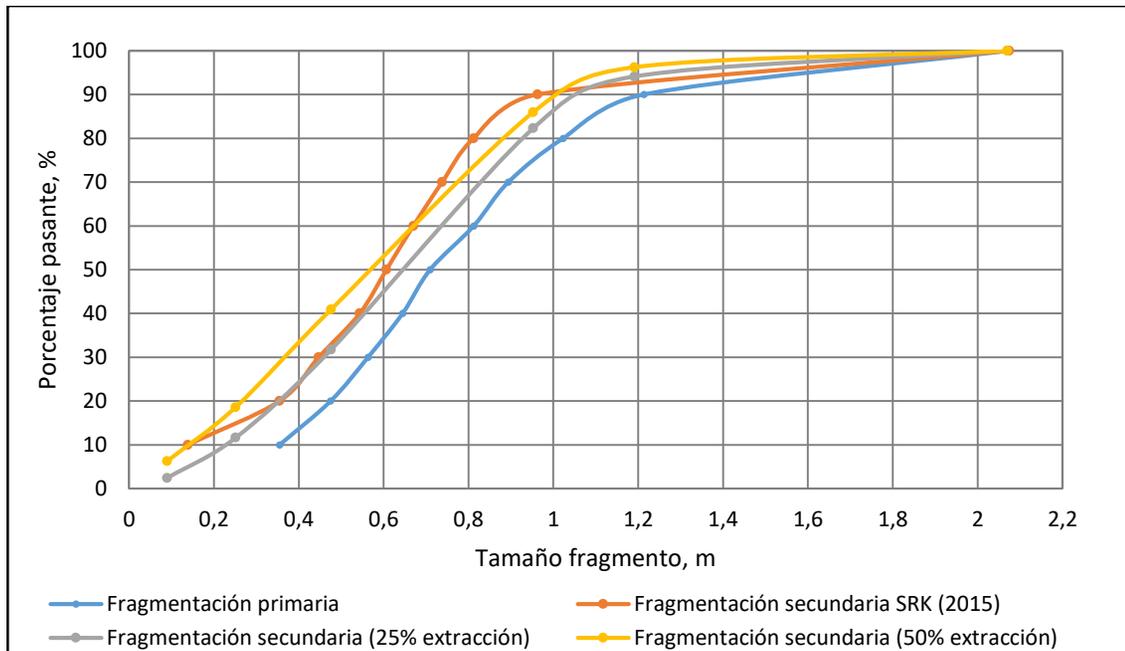


Gráfico 27: 50% extracción columna, avance bloque II

Fragmentación secundaria según avance de extracción, bloque III.

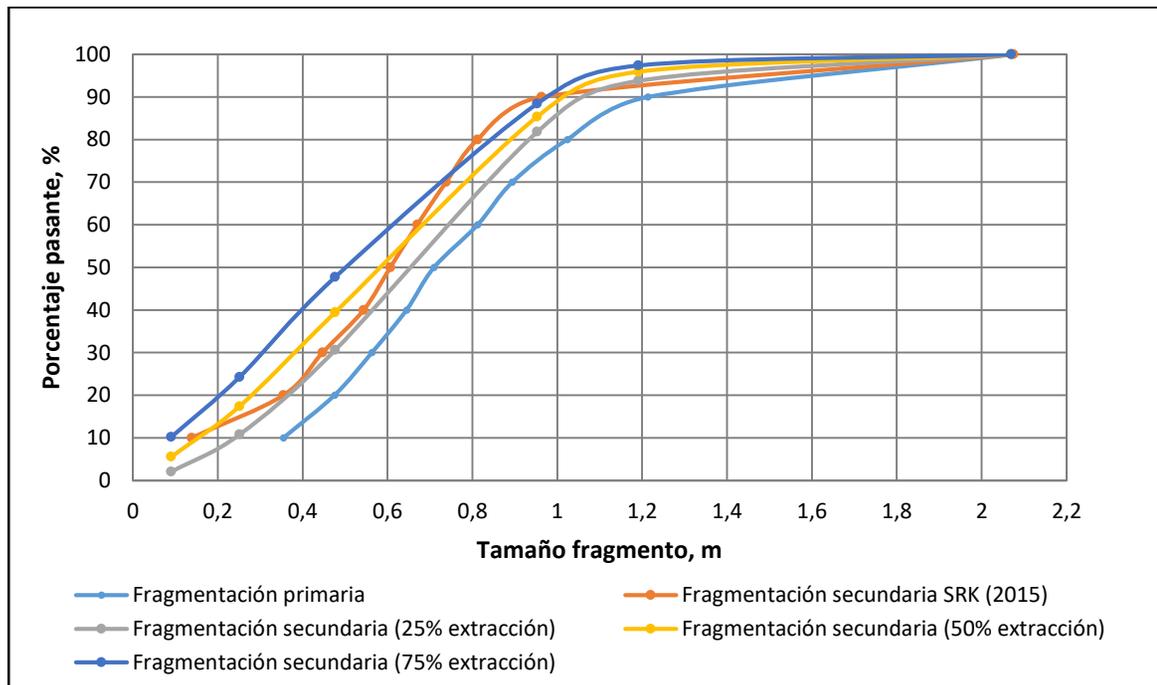


Gráfico 28: 75% extracción columna, avance bloque III

Fragmentación secundaria según avance de extracción, bloque IV.

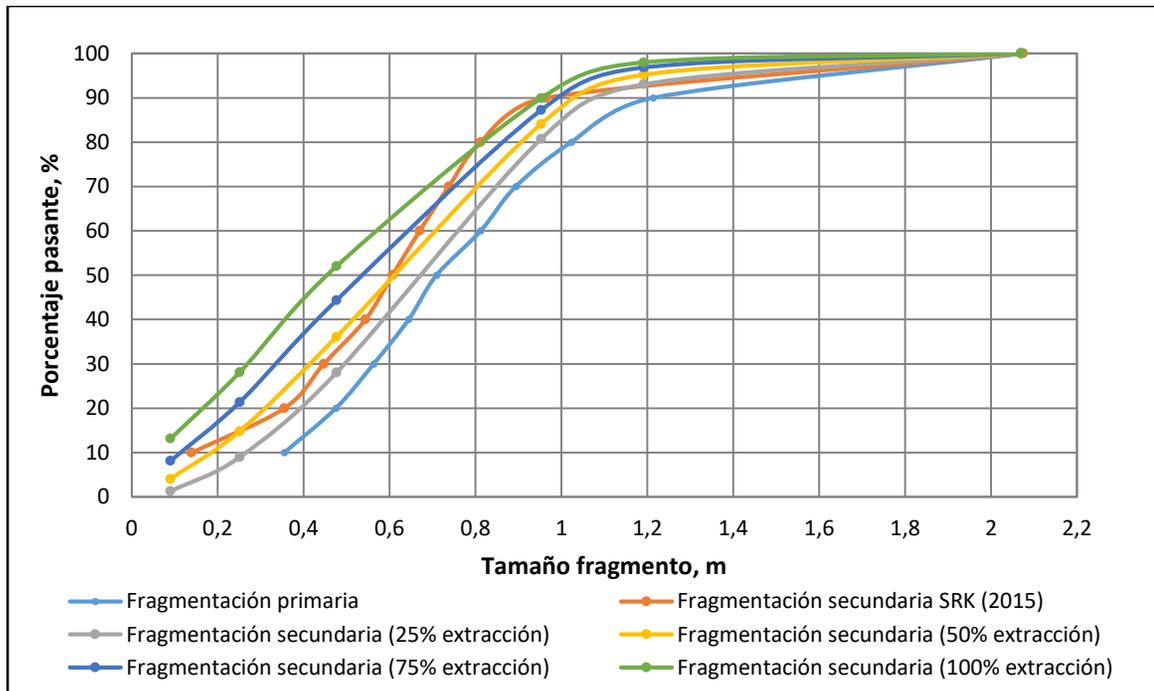


Gráfico 29: 100% extracción columna, avance bloque IV