



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

MODELAMIENTO NUMÉRICO DE COLGADURAS EN MINERÍA DE CAVING
MEDIANTE ELEMENTOS DISCRETOS

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERIA
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

CRISTIÁN ALONSO MARTÍNEZ VALDEBENITO

PROFESOR GUÍA:
JAVIER VALLEJOS MASSA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANDRÉS BRZOVIC PÉREZ
XAVIER EMERY
KIMIE SUZUKI MORALES

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN

El método de Block/Panel caving se distingue de otros métodos subterráneos por su bajo costo por tonelada. Las bateas recolectoras son parte integral de la infraestructura del método, permitiendo el movimiento de material de forma económica. Sin embargo, estas son susceptibles a interrupciones de flujo o colgaduras. Las colgaduras de batea representan alto riesgo tanto para las personas como los proyectos mineros, ya que el proceso a eliminarlas expone al personal, e incluso así, puede resultar en el cierre prematuro del punto de extracción. Una nueva metodología es presentada para el estudio de colgaduras generadas por la formación de arcos mecánicos de roca, mediante el uso de modelamiento numérico utilizando elementos discretos, a través del programa 3DEC (Versión 5.0.210) de Itasca Consulting Group. Esta metodología usa un algoritmo de encogimiento de elementos permite el control del tamaño de una distribución granulométrica generada al intersectar el modelo con un Discrete Fracture Network. Esto posibilitó la creación de un conjunto de elementos capaces de describir una curva granulométrica particular. La metodología propuesta considera elementos tridimensionales, de forma arbitraria, y consta de 9 etapas, las principales son: Definir la geometría de la batea, aplicar el Discrete Fracture Network, aplicar el algoritmo de encogimiento a los elementos, correr el modelo, extrayendo material cada vez que una pila estable es formada. Se realizó un estudio conceptual, utilizando una curva granulométrica genérica y un diseño de batea correspondiente a un método de hundimiento convencional. El modelo fue capaz de reproducir una colgadura al formar un arco mecánico luego de la extracción de 240 toneladas de material, exhibiendo un factor de esponjamiento del 58%. El poder de cómputo demostró ser el factor limitante para el uso del modelo a gran escala. Tuvieron que realizarse simplificaciones de modo de limitar el paso de tiempo del modelo y alcanzar una solución en un tiempo viable. A medida que nuevas tecnologías computacionales se desarrollan, el tiempo necesario para resolver el modelo disminuirá, haciendo la metodología viable para su uso en modelos de mayor tamaño.

ABSTRACT

Block/Panel caving methods stand out from other underground methods because of their low cost per ton. Drawbells are an integral part of the infrastructure of the method, enabling the movement of material in an economical way. They are, however, susceptible to flow disruptions or hangups. Drawbell hangups represent a considerable risk both for worker safety and the mining project viability, as the process of clearing them exposes personnel, and even then, may result in the premature closing of an extraction point. A new methodology is presented for the study of hangups created by the formation of mechanical arches of rock, using a discrete element numerical modeling approach through the use of 3DEC(Version 5.0.210), by the Itasca Consulting Group. The development and application of an element shrinking algorithm allowed for the control of the overall size of the granulometric distribution generated by intersecting the model with a discrete fracture network. This enabled the creation of a set of discrete elements matching a granulometric curve. The methodology proposed considers 3-Dimensional, arbitrarily shaped elements, and is comprised of 9 stages, the main stages are: Defining the drawbell geometry, applying a Discrete Fracture Network, applying a shrinkage method for the elements, and then running the model, extracting material each time a stable pile is formed. A conceptual study was performed, using a generical granulometric curve and a drawbell design corresponding to conventional caving. The model was able to reproduce a hangup by formation of mechanical arch after the extraction of 240 ton of material. The model response also showed a swell factor of 58%. Computational power was shown to be a limiting factor for the application of the work at large scale. Several compromises had to be accepted in order to limit the model timestep and achieve a solution in a viable timeframe. As new computational technologies develop, the time needed to solve the model will drop, making the methodology viable for use in large scale models.

Tabla de Contenido

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Introducción	4
2.2 Impacto de las Colgadas y el Sobretamaño	5
2.3 Colgadura de Zanja.....	10
2.4 Diseño de Mallas de Extracción y Bateas	15
2.5 Modelamiento Numérico de Flujo Gravitacional y Colgadas	18
2.6 Metodología para la Caracterización de la forma de los bloques.....	22
2.7 Conclusión de Referencias Bibliográficas.....	23
3. METODOLOGÍA.....	24
3.1 Propuesta	24
3.2 Introducción a la Herramienta a utilizar: 3DEC.....	25
3.2.1 Fundamentos de los Cálculos de Elementos Discretos en 3DEC.....	26
3.2.2 Ecuaciones de Movimiento: Ciclo de Cálculo.....	27
3.3 Modelos Constitutivos	28
3.3.1 Modelos Constitutivos de Bloques.....	28
3.3.2 Modelos Constitutivos de Discontinuidades.....	28
3.4 Discrete Fractures Networks en 3DEC	29
3.4.1 Parámetros de los DFN en 3DEC	29
3.4.2 Factor de Densidad.....	31
3.5 Algoritmo de Encogimiento de Bloques.....	31
3.5.1 Fundamento del Algoritmo de Encogimiento	32
3.6 Etapas de la Metodología.....	34
3.6.1. Generación de la Geometría de Batea a Estudiar	34
3.6.2 Selección del DFN a Utilizar	34
3.6.3 Aplicación Del DFN	35
3.6.5 Cargar Nuevo Set de Bloques en el Modelo.....	37
3.6.6 Comprobación de la Curva Granulométrica.....	37
3.6.7 Definir Parámetros del modelo	39
3.6.8 Formación de la Pila	46
3.6.9 Extracción	47

3.6.10 Comprobación del Comportamiento del Modelo	47
4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA: FORMACIÓN DE COLGADURA EN BATEA	49
4.1 Diseño de la Batea.....	49
4.2 Generación de la Curva Granulométrica.....	50
4.2.1 Descripción de la Curva Resultante.....	51
4.3 Aplicación de Factor de Encogimiento y verificación de la curva granulométrica	54
4.5 Parámetros del Modelo.....	56
4.6 Formación de la Pila & Extracción.....	56
4.7 Evaluación de Resultados del Modelo y Discusión	57
4.7.1 Estimación de la Pendiente de la Pila.....	57
4.7.2 Densidad Aparente.....	57
4.7.3 Flujo de Material y Formación de Colgadura	58
Volumen y Masa Extraída del Modelo Antes de la Formación de Colgadura	59
4.8 Resumen de Resultados del Caso de Estudio y Discusión.....	60
4.8.1 Ángulo de Reposo	60
4.8.2 Densidad Aparente.....	61
4.8.3 Número de Ciclos de Extracción, Volumen y Masa Removida antes de la Formación de Colgadura	61
5. DISCUSIÓN DE LOS FACTORES Y SU INFLUENCIA EN EL MODELO	62
5.1 Efecto del Factor de Densidad	62
5.3 Efecto del Factor de Escalamiento	64
5.4 Efecto del Factor de Encogimiento en la Curva Granulométrica	66
5.5 Efecto del Ángulo de Fricción en el Ángulo de Pila	67
5.6 Relación entre Factor de Encogimiento y Densidad Aparente Obtenida	68
5.7 Efecto del Factor de Amortiguamiento en el Tiempo de Resolución del Modelo	69
6. CONCLUSIONES	70
7 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	72
8. BIBLIOGRAFÍA.....	74

Índice de Tablas

Tabla 1 Estado de fragmentación de puntos de extracción por 5 días al comienzo de la explotación de la mina DOZ a inicios del 2002. Modificado desde (Flint <i>et al.</i> , 2006).....	6
Tabla 2 Resumen comparativo de distribución de tamaños de fragmentos de roca y frecuencia de colgaduras para distintos sectores de la mina El Teniente. Modificado desde (Hurtado <i>et al.</i> , 2007)	6
Tabla 3 Frecuencia de eventos de Colgadura y Sobretamaño para distintos años y tipos de roca para la mina DOZ/ESZ. Modificado desde (Botha <i>et al.</i> , 2008).....	7
Tabla 4 Condición de flujo en piques de traspaso según diámetro del pique de traspaso (D) y el tamaño máximo de partícula (d).	11
Tabla 5 Clasificación de Colgaduras según Origen. Traducida desde (Maass, 2013).....	14
Tabla 6 Clasificación de colgaduras según altura de formación. Formato modificado desde (Maass, 2013)	15
Tabla 7:Parámetros de la Batea	49
Tabla 8:Descripción de las curvas pre y post encogimiento	55
Tabla 9: Parámetros del modelo	56
Tabla 10:Masa y volumen extraído en cada fase.....	59
Tabla 11:Resumen de resultados del Caso de Estudio.....	60
Tabla 12: Efecto del tipo de amortiguamiento en el timestep del modelo	69

Índice de Figuras

Figura 1: Prácticas de Reducción Secundaria. En a) Reducción de sobre tamaño a través de Commando Drill, en b) Descuelgue de punto a través de jumbo de tronadura secundaria (SBU). (Flint et al., 2006).....8	8
Figura 2:Esquema del proceso de Descuelgue mediante APD para colgaduras a mayor altura (Hurtado et al., 2007).....8	8
Figura 3:Productividad de LHD para una distancia media de 100 m con un 60% de utilización del equipo. Traducido desde (Laubscher, 1994).9	9
Figura 4: Productividad de punto de extracción según su frecuencia de colgaduras para una mina en estudio. Modificado desde (Rubio, 2006).10	10
Figura 5: Guías para asegurar el flujo libre de mineral en piques de traspaso según el tamaño máximo de partículas (d) y el diámetro del pique de traspaso (D). (Hadjigeorgiou & Lessard, 2007)11	11
Figura 6: Condición de flujo para distintas condiciones de esfuerzo vertical y granulometría. (Fuenzalida, 2012)12	12
Figura 7: Figura esquemática de desarrollo de colgaduras en batea. (Kvapil, 2008).13	13
Figura 8: Vista Isométrica del diseño de Batea y Pilar Corona. (Cavieres et al., 2002)16	16
Figura 9: Diseño de Batea y Pilar Corona en perfil paralelo a galería de zanja. (Cavieres et al., 2002).....16	16
Figura 10:Diseño de Batea y Pilar Zanja en perfil perpendicular a galería de Zanja. (Cavieres et al., 2002)17	17
Figura 11: Reducción del volumen de fragmentos a través de un shrinkage factor de 0.99 y posterior asentamiento del material. Modificado desde (Taghavi & Pierce, 2011).....21	21
Figura 12: Colgadura generada con un diámetro de abertura de 10 m, y un shrinkage factor de 80%. Es posible notar que inicialmente se produce el flujo de material pero posteriormente éste se ve interrumpido (Taghavi & Pierce, 2011).....22	22
Figura 13: Triángulo de categorización de los bloques según su forma. Bloques elongados(8,9) aparecen en la parte superior del gráfico, bloques aplanados(1,2) en la parte inferior derecha y bloques equidimensionales(3,4) en la parte inferior izquierda. Formas transicionales entre cúbico y aplanados, aparecen la parte inferior del diagrama (5)23	23
Figura 14: Diagrama del Proceso Planteado25	25
Figura 15: Método de detección de contactos26	26
Figura 16: a) Plano común b) Contacto borde-borde27	27
Figura 17: Ciclo de Cálculo de ecuaciones de movimiento (modificado de Itasca,2013)28	28
Figura 18: Distribución Ley de Potencia, modificado de Itasca.....30	30
Figura 19: Distintos tipos medición de densidad de fracturas. Modificado de Golder Associates.....31	31
Figura 20: Diagrama de un bloque. La cuerda D representa la distancia original Centroide-Vértice. El volumen de bloque inicial y final se denota con distinto color(Elaboración propia.)33	33
Figura 21: a) Diseño de la Batea y Columna de Extracción b) Bloque Complementario35	35
Figura 22: Aplicación del DFN sobre el bloque complementario.....36	36
Figura 23: a) Set original de bloques, b) Disminución lineal en 30% c) Disminución lineal en 50%37	37
Figura 24: Corte Transversal a) Set Original de bloques, b) Disminución lineal en 50%.....37	37
Figura 25: Comparación de curvas granulométricas. Una curva bien graduada representa cada tamaño en proporciones similares.39	39
Figura 26:Comparación de Curva Resultado y Objetivo.....39	39
Figura 27: Esquema de amortiguamiento Itasca(2013, Manual de usuario 3DEC 5.0)43	43

Figura 28:Experimento frecuencias de vibración, Bloques sobre placa. Elaboración propia	44
Figura 29:Frecuencias de oscilación a)bloque grande ,b) bloque pequeño.....	45
Figura 30:Desplazamiento vs Tiempo según frecuencia a)3hz, b)5hz,c)7hz ,d)12hz.....	46
Figura 31:Formación de pila de material	46
Figura 32: Herramienta Plano en Pila de la Batea y la información que provee.	48
Figura 33:a) Bloques cuyos centroides se ubican dentro del Volumen 2x2x2. x: [19,21] , y:[7,9], z:[3,5] b) Bloques cuyos centroides se ubican dentro del Volumen 1x1x1 x:[19.5,20.5],y:[7.5,8.5], z:[3.5,4.5]	48
Figura 34: Curva granulométrica objetivo.....	50
Figura 35:Vista lateral de la batea (60m)	50
Figura 36: a) Bloque interno de batea. b) Bloques cortados utilizando el DFN	51
Figura 37:Curva granulométrica generada por DFN	52
Figura 38:Distribución de formas en la curva granulométrica estudiada	53
Figura 39:Diagrama de factores para la curva granulométrica generada.....	53
Figura 40:Bloques luego de la aplicación de algoritmo de encogimiento	54
Figura 41: Curvas granulométricas asociadas al modelo. a) Previo a encogimiento b) Post encogimiento	55
Figura 42: Curvas granulométricas, obtenida vs objetivo.....	56
Figura 43:Proceso de formación de la pila.....	57
Figura 44: Medición del ángulo de la pila	57
Figura 45:a) Bloques Seleccionados 2m3 b) Bloque 1m3, luego de la aplicación de cortes. (Los bloques no están a escala)	58
Figura 46:a) Extracción de material. b) Formación de colgadura	58
Figura 47:Contorno de velocidades de los bloques luego de la formación de colgadura	59
Figura 48:Comparación de curvas granulométricas, con Alfa= 3 y Alfa=1.....	62
Figura 49: Comparación gráfica de Efecto del factor densidad en los factores α y β a) Alfa = 3, b) Alfa = 1	63
Figura 50: Distribución de formas según segmento de la curva granulométrica. Alfa=3	64
Figura 51: Distribución de formas según segmento de la curva granulométrica. Alfa =1	64
Figura 52:Comparación de curvas según factor de escalamiento. a=3, a=4, a=5	65
Figura 53:Relación de Curvas Luego de Aplicar Factor de encogimiento	66
Figura 54: Relación empírica entre disminución diagonal y volumétrica	67
Figura 55:Ángulo de reposo de la pila vs ángulo de fricción de contactos	68
Figura 56: Densidad aparente en la pila vs Porcentaje de disminución diagonal.....	68

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

A través de los años, la gran minería se ha caracterizado por la explotación intensa de los yacimientos superficiales y de altas leyes, no pudiendo los yacimientos subterráneos competir con los de cielo abierto en términos de costo. Esto ha llevado al desarrollo de técnicas que permitan trabajar yacimientos masivos y de bajas leyes de forma económica. El Block/Panel Caving es el método actual que permite acomodar tales necesidades. Desde sus primeras aplicaciones en minas de Estados Unidos (Brown, 2007), el método de Block/Panel Caving ha tomado singular relevancia por su bajo costo por tonelada, su productividad y la posibilidad de automatizarse. El número de faenas mineras que la utilizan ha visto un aumento sostenido desde su introducción

El método de block caving es el método de explotación subterráneo que entrega los menores costos por tonelada de mineral (Hustrulid, 2002). Esto se logra socavando la base del cuerpo mineralizado y dejando que el material se fracture por la acción gravitacional. Esto permite fracturar una gran cantidad de material con una cantidad comparativamente pequeña de explosivos y trabajo mecanizado. El material que se desprende por la acción gravitacional es recogido en bateas recolectoras. Posterior a esto, es extraído por un equipo excavador de bajo perfil (LHD) y depositado en un pique de traspaso, para su posterior chancado.

Uno de los factores que mayor incidencia tienen en el éxito de la técnica es la posibilidad de asegurar el flujo del material quebrado. El estudio del flujo de material comienza con Kvapil (1965), con el estudio del flujo de material granular en silos mediante modelos físicos, del cual luego se hace una analogía a la roca. Se sabe que el flujo del material se ve directamente afectado por la forma del contenedor.

En un esquema de Block/Panel caving, el material debe fluir a través de la batea y luego a través de los piques de traspaso. La batea recolectora es la construcción en la roca de una cavidad capaz de recibir el material quebrado y dirigirlo hacia un punto de extracción ubicado en su base, estas excavaciones, sin embargo, son susceptibles a bloquearse al formarse arcos de roca que impiden el flujo de material. La formación de arcos estables de material dentro de la batea es siempre un riesgo, y su ocurrencia, denominada colgadura, tiene efectos negativos tanto económicos como técnicos de gran relevancia. Más aún, el proceso de eliminar dichos arcos estables constituye en sí una labor de alto riesgo. En línea con los estudios de flujo, se sabe que la geometría de la batea juega un rol en la formación y configuración de arcos estables.

Los avances en la tecnología computacional han permitido la creación de métodos numéricos que posibilitan el modelar el comportamiento de partículas en movimiento de forma explícita siguiendo determinadas leyes de movimiento. El trabajo de Peter Cundall (1979) dio origen a la técnica de elementos discretos la cual modela el sistema como un conjunto de elementos rígidos y asigna características a los contactos entre estos, así, pueden determinarse los esfuerzos en los contactos entre partículas y detectar de forma automática cuando estos se rompen, o cuando el impacto de elementos genera nuevos contactos. Estos los hacen ideales para el estudio de problemas de mecánica de rocas.

El presente trabajo busca generar una metodología para el estudio del efecto de la geometría de batea en la formación de colgadura considerando no sólo la geometría de la batea, sino que también las formas y tamaños de los bloques, y asociarlos a una curva granulométrica determinada. Esta metodología entregará información sobre la posibilidad de formación de colgaduras para una determinada configuración de geometría de batea, tamaños de bloques y propiedades físicas de las rocas involucradas. Además, la metodología será capaz de reproducir el comportamiento observado en la realidad, en términos de material extraído entre colgaduras, ángulo de pila y densidad aparente.

1.2 Objetivos

Objetivo principal:

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una metodología que permita estudiar la formación de colgaduras en las bateas recolectoras en una operación de panel caving, utilizando métodos numéricos para modelar el movimiento de las rocas dentro la batea. La metodología deberá tomar en cuenta la geometría de la batea, y el tamaño y forma de los elementos generados.

Objetivos específicos:

- Generar método que permita ajustar un grupo de bloques a una curva granulométrica objetivo mediante el encogimiento uniforme de los elementos. Su aplicación no deberá distorsionar la forma del elemento.
- Determinar qué parámetros del modelo tienen un efecto relevante en la respuesta final y evaluar su impacto.
- Determinar el efecto que el ajuste de los bloques genera en la densidad aparente obtenida.
- Reproducir los indicadores de fragmentación y porosidad obtenidos de la literatura para el material quebrado en la zanja.

- Determinar el efecto de la elección del DFN en la curva de fragmentación final obtenida.
- Validar que la respuesta del modelo se asemeja a los valores entregados en la literatura, en términos de material removido, ángulo de pila y factor de esponjamiento.

Alcances:

En el modelo se generará una geometría de batea, y un set de bloques para interactuar con esta, sin interacción entre bateas. Para generar la curva granulométrica, en este modelo se utilizarán fracturas generadas por medio de un Discrete Fracture Network (DFN), esto permite generar bloques más realistas, pues la forma de estos depende de las discontinuidades que cortan la roca, diferencia de trabajos anteriores en los cuales se han utilizado elementos esféricos para modelar el flujo de roca.

Debido a que el cálculo de esfuerzos se vuelve más complejo debido a la forma arbitraria de los bloques, y el gran número de bloques generados, para este trabajo se utilizarán bloques rígidos, por lo cual el esfuerzo inducido en el Crown Pillar por el paso de la columna de material no podrá ser estimado. Asimismo, no se realizará un estudio exhaustivo de todas las posibles geometrías de batea, debido al tiempo que necesita el modelo para correr, pudiendo tomar más de 72 hrs por modelo.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El principal objetivo de este trabajo es presentar una revisión del estado del arte respecto al proceso de colgaduras de zanja y sobretamaño en minería subterránea, mostrando los principales factores y características de su formación, el impacto e importancia dentro de la operación, y las distintas metodologías empleadas para su estudio, principalmente mediante herramientas de modelamiento numérico.

2.1 Introducción

El principio básico de explotación en minería por Block/Panel Caving corresponde a producir inestabilidad en la base de un bloque de mineral mediante una socavación inicial. Esta inestabilidad es producto de los esfuerzos inducidos provocados por esta socavación, la cual produce el desarme del bloque y la caída y flujo de material quebrado hacia las unidades productivas en donde se extrae el material. Muchas veces, esta extracción se ve interrumpida debido a la formación de arcos de material en la zona de la zanja recolectora (colgaduras de zanja) o la presencia de colpas de gran tamaño en los puntos que no pueden ser removidos por los equipos de extracción (sobretamaño). Estos eventos interrumpen la extracción de mineral desde los puntos, generando una serie de problemas e inconvenientes en este tipo de operaciones desde el punto de vista de su productividad, confiabilidad y seguridad, los cuales pueden influir fuertemente en el éxito o fracaso del proyecto.

A pesar de su gran impacto, estos eventos han sido estudiados sobre todo desde el punto de vista de la planificación en minería de Block /Panel Caving, para observar la confiabilidad de los sistemas mineros en el cumplimiento de las metas productivas, ajustando distribuciones de frecuencia, pero sin considerar mayormente las variables que influyen en su formación, existiendo sobre todo estimaciones de ocurrencia de colgaduras basadas en la experiencia, pero pocos estudios y análisis de casos. Hasta ahora, las estimaciones de sobretamaño son realizadas directamente de las curvas de fragmentación secundaria en puntos de extracción. Por otra parte, el fenómeno de colgaduras de zanjas ha sido analizado principalmente a través del software BCF (Butcher & Thin, 2007, Esterhuizen *et al.*, 1996), correspondiente a un sistema experto basado en reglas de conocimiento empírico del proceso de Caving, sin embargo, no permite recrear las condiciones físicas bajo las cuales se producen estos eventos. Debido a estas razones, se hace necesario el estudio de estos fenómenos, de forma de entender su origen y las

variables que influyen en su formación, su impacto en la operación y la forma en que han sido abordados estos problemas.

2.2 Impacto de las Colgaduras y el Sobretamaño

Los eventos de colgadura y la presencia de sobretamaño en puntos de extracción son una de las principales dificultades en operaciones de Block/Panel Caving. Entre los problemas que estos eventos generan se encuentran:

- Dificultades en alcanzar la producción comprometida debido a una menor cantidad de área disponible para la extracción.
- Interrupción en la continuidad de la operación debido a la inhabilitación de los puntos hasta que se produzca el descuelgue o la reducción de sobretamaño.
- Problemas en mantener el tiraje uniforme del Caving debido a la concentración de la extracción en aquellos puntos habilitados, lo cual puede involucrar el ingreso temprano de dilución y pérdidas de mineral que queda dentro de la columna de material quebrado.
- Aumento del riesgo en la operación, principalmente a través de la operación de descuelgue. A veces, esta operación puede ser tan riesgosa que el punto puede permanecer por largos periodos de tiempo inhabilitado o puede ser cerrado permanentemente.
- Daño en la infraestructura de la mina debido a esfuerzos inducidos sobre los pilares y a las tronaduras secundarias producidos por las colgaduras, que requieren muchas veces de la reparación de puntos o calles, y que podrían involucrar eventos de colapso.

La presencia de sobretamaño y la formación de colgaduras en los puntos de extracción corresponden a las principales causas de la inhabilitación de puntos de extracción en minería de Block/ Panel Caving. A modo de ejemplificar su impacto, (Flint *et al.*, 2006) presenta estados de puntos de extracción en la mina de Block Caving DOZ durante el comienzo de su explotación (Tabla 1). Generalmente estos eventos son cuantificados a través de índices de frecuencia cada 1000 toneladas extraídas o de tonelaje entre eventos consecutivos. Hurtado *et al.* (2007) realiza un análisis de fragmentación de distintos sectores de mina El Teniente, incorporando estadísticas de eventos de colgadura, distribución de tamaño de fragmentos de roca, dimensiones de las mallas de extracción y factor de forma de las colpas como se presenta en la Tabla 2. Junto con esto, (Botha *et al.*, 2008) simulando el sistema minero de la mina DOZ/ESZ, muestra estadísticas de frecuencia de colgaduras y sobretamaño para distintas litologías de la mina en distintos años de producción (Tabla 3).

Tabla 1 Estado de fragmentación de puntos de extracción por 5 días al comienzo de la explotación de la mina DOZ a inicios del 2002. Modificado desde (Flint *et al.*, 2006).

Condición del Punto	%
<u>Carguío Directo</u>	<u>51%</u>
<u>Bolones Pequeños</u>	<u>27%</u>
<u>Bolones Medianos</u>	<u>11%</u>
<u>Colgaduras Bajas</u>	<u>8%</u>
<u>Colgaduras Altas</u>	<u>3%</u>
<u>Arcos Cohesivos</u>	<u>2%</u>

Tabla 2 Resumen comparativo de distribución de tamaños de fragmentos de roca y frecuencia de colgaduras para distintos sectores de la mina El Teniente. Modificado desde (Hurtado *et al.*, 2007)

Sector	Diablo Reg		Reno FW		Reno Hw		Tte. 4 Sur	
Litología	CMET		CMET		CMET		Tonalita	
Sobretamaño	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
%>1m ³	32%	38%	23%	31%	28%	35%	28%	37%
%>2m ³	26%	33%	16%	25%	24%	30%	24%	32%
Tonelaje colgado Promedio (ton)	103		38		38		65	
Altura Colgadura Promedio (m)	6.9		2.9		3.2		3.9	
Tonelaje promedio entre colgaduras (ton)	605		403		450		251	
Nº colg /1000 ton	1.65		2.25		2.03		3.79	
Factor de forma	0.39		0.4		0.4		0.34	
Área de influencia [m ²]	340		260		260		300	
Dimensiones malla	17X20		15X17.32		15X17.32		15X20	
GSI	70-85		75-80		70-90		75-90	

UCS [MPa]	116	110	115	125
-----------	-----	-----	-----	-----

Tabla 3 Frecuencia de eventos de Colgadura y Sobretamaño para distintos años y tipos de roca para la mina DOZ/ESZ. Modificado desde (Botha *et al.*, 2008).

Tonelaje extraído entre eventos					
Tipo de Roca	Año	Colgaduras altas	Colgaduras medias	Colgaduras bajas	Sobretamaño
Skarn	2006	149700	1000	1514	162
Skarn	2010	165400	1100	1499	198
Skarn	2012	169100	1200	1499	247
Skarn	2014	172500	1300	1496	267
Diorita	2006	N/A	N/A	N/A	N/A
Diorita	2010	59100	700	775	65
Diorita	2012	115900	1000	897	65
Diorita	2014	155300	1200	996	70

Para volver a incorporar los puntos inhabilitados hace necesaria la implementación de prácticas de reducción secundaria. Cada una de estas prácticas depende de la problemática específica en el punto de extracción. (Flint *et al.*, 2006) presenta algunas prácticas de reducción secundaria realizadas en la mina de Block Caving DOZ que permitieron aumentar la confiabilidad del sistema minero y su productividad. Entre esas prácticas se encuentran la utilización de picarocas en piques de traspaso como reemplazo a la perforación manual en puntos de extracción para aquellos bolones mayores a $1 m^3$ que pudiesen comprometer la fluidez del material dentro del pique, el uso de perforadoras específicas de menor largo, commando drill, para la reducción del sobretamaño (mayores a $2 m^3$) sin la interferencia de la calle de producción, y el uso de jumbos de tronadura secundaria (SBU) para el descuelgue de colgaduras. Estos equipos pueden ser observados en Figura 1 a. En algunas ocasiones, las colgaduras de zanja pueden ocurrir a mayores alturas que las alcanzadas por los jumbos de tronadura secundaria. En estos casos se utilizan explosivos (Boosters Cónicos de pentolita) amarrados al extremo de coligües para posicionarlos en la zona de contacto entre rocas como se muestra en la Figura 1b.



Figura 1: Prácticas de Reducción Secundaria. En a) Reducción de sobre tamaño a través de Command Drill, en b) Descuelgue de punto a través de jumbo de tronadura secundaria (SBU). (Flint et al., 2006)

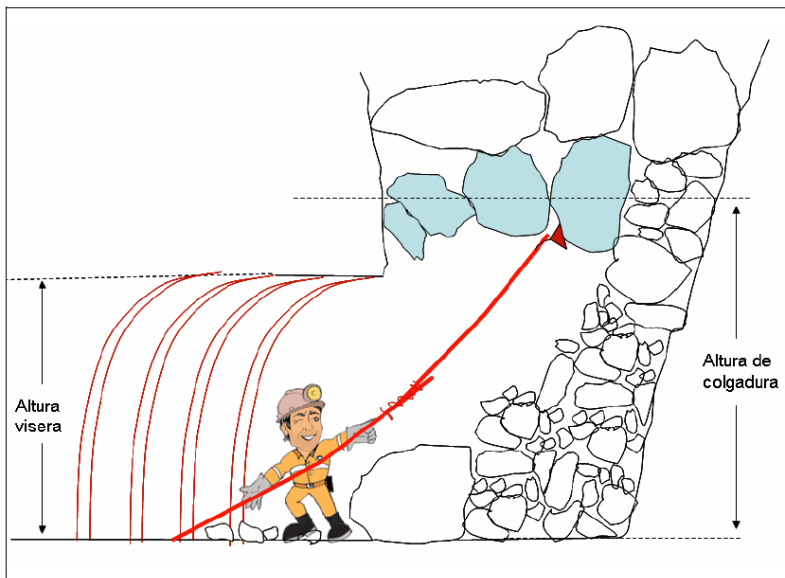


Figura 2: Esquema del proceso de Descuelgue mediante APD para colgaduras a mayor altura (Hurtado et al., 2007)

La frecuencia con que se realizan estas prácticas depende de la fragmentación secundaria presente en el punto, el método de tiraje, el diseño del punto de extracción, y el tamaño de los equipos, piques de traspaso y parrillas. En particular, este último punto es de gran relevancia pues a mayor tamaño de parrilla y pique de traspaso, menor es el requerimiento de reducción secundaria por parte de los martillos picarocas y menor es el potencial de colgaduras en el pique. Por otra parte, a mayor tamaño de equipos de carguío, mayor es el tamaño de colpas que puede ser manejado en el punto de extracción, necesitando con menor frecuencia tronadura secundaria de sobretamaño. Laubscher (1994) presenta distintas productividades de equipos de carguío según su tamaño de balde y

presencia de colpas con tamaños mayores a $2 m^3$, junto con esto presenta los requerimientos de perforación y tronadura para un LHD de $6 yd^3$ (Figura 3). Rubio (2006), incorporando la confiabilidad de la infraestructura minera en los planes de producción de minas de Block/Panel Caving, presenta gráficos de producción versus eventos de colgadura y sobretamaño para una de las minas en estudio (Figura 4). Estas investigaciones indican la gran influencia que poseen estos eventos en las operaciones de Block/Panel Caving.

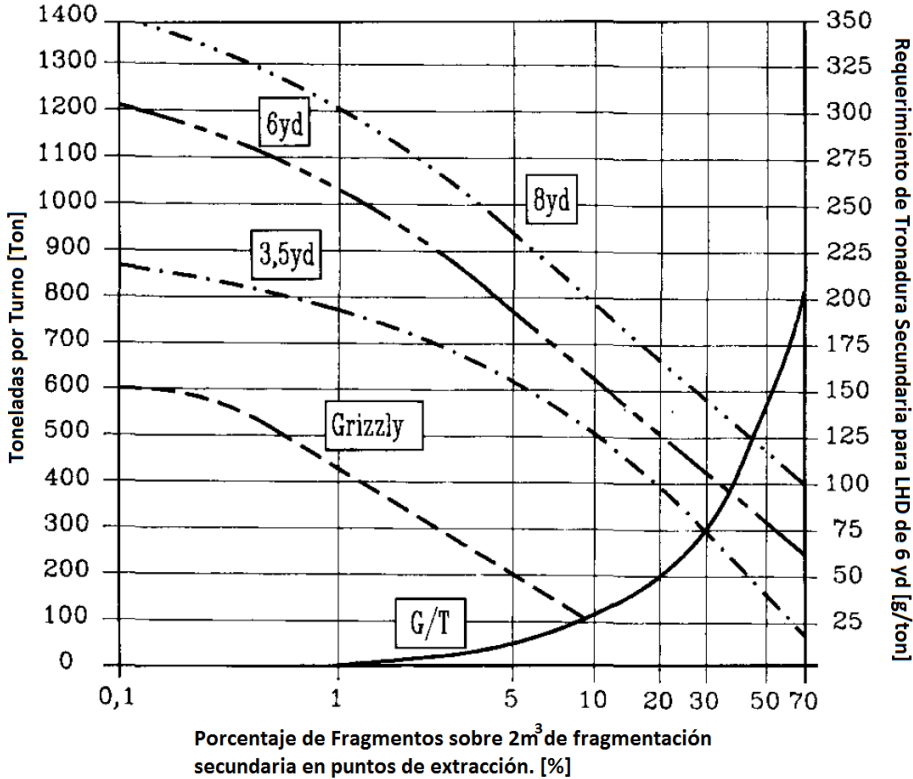


Figura 3: Productividad de LHD para una distancia media de 100 m con un 60% de utilización del equipo. Traducido desde (Laubscher, 1994).

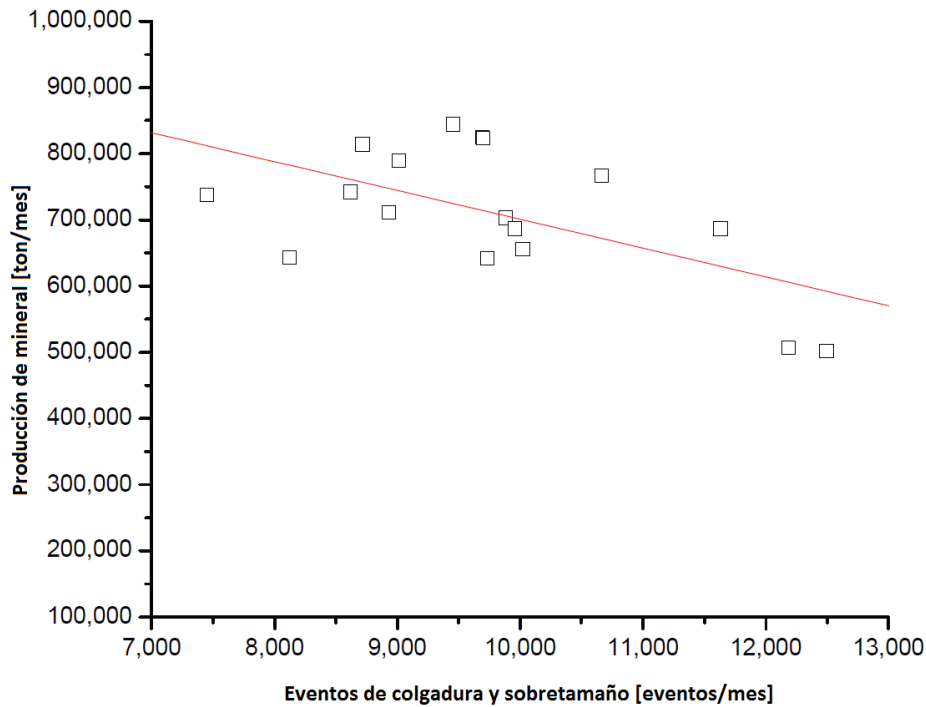


Figura 4: Productividad de punto de extracción según su frecuencia de colgaduras para una mina en estudio. Modificado desde (Rubio, 2006).

2.3 Colgadura de Zanja

La formación de arcos estables debe entenderse como una respuesta natural del material en restaurar el equilibrio del sistema. Estos arcos pueden clasificarse en dos tipos, aquellos que se generan en medios continuos, como los formados en el cave back de un hundimiento de bloques, y aquellos generados por encadenamientos estables de medios granulares, como los concebidos en piques de traspaso o zanjas de puntos de extracción (Kvapil, 2008). En particular, estos últimos son llamados colgaduras de zanja e involucran grandes interrupciones y problemas en operaciones de Block/Panel Caving.

La formación y características de estas colgaduras dependen de una serie de factores entre los cuales se encuentran el tamaño máximo de fragmento, la presencia de finos, la cohesión de finos, el ángulo de fricción, el contenido de agua, la distribución de tamaño de fragmentos de roca, forma, rugosidad y resistencia del material, la geometría del diseño minero, la tasa de extracción, y la magnitud y distribución del esfuerzo. La influencia de cada una de estas variables no está del todo clara. Con respecto al tamaño máximo de partícula, este ha sido estudiado mediante guías de condiciones de flujo para piques de traspaso y silos como se puede observar en la Figura 5. Debido a la diferencia entre autores, en la práctica

se consideran probabilidades de colgadura según la relación diámetro del pique a tamaño máximo de partícula como se muestra en la Tabla 4.

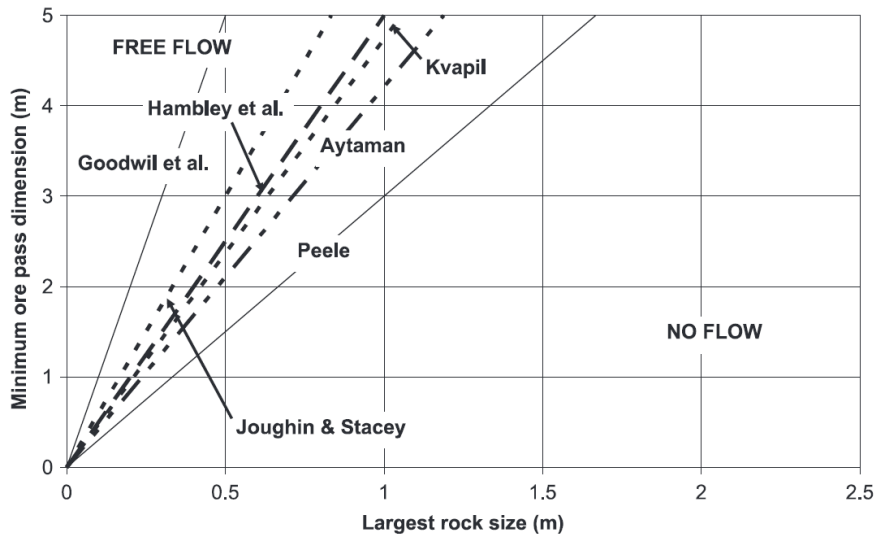


Figura 5: Guías para asegurar el flujo libre de mineral en piques de traspaso según el tamaño máximo de partículas (d) y el diámetro del pique de traspaso (D). (Hadjigeorgiou & Lessard, 2007)

Tabla 4 Condición de flujo en piques de traspaso según diámetro del pique de traspaso (D) y el tamaño máximo de partícula (d).

Razón	Frecuencia de colgaduras
$D/d > 5$	Baja
$5 > D/d > 3$	Probable
$D/d < 3$	Muy alta

En relación con la presencia y cohesión de finos, este afecta principalmente en la formación de arcos cohesivos junto a la presencia de humedad. Este tipo de arcos es poco frecuente y ha sido escasamente estudiado. Por otra parte, Fuenzalida (2012) realiza ensayos de flujo de medios granulares en modelos físicos a escala de laboratorio para distintas distribuciones de tamaño de fragmentos de roca y condiciones de esfuerzo vertical, obteniendo zonas de flujo según estas condiciones como se observa en la Figura 6

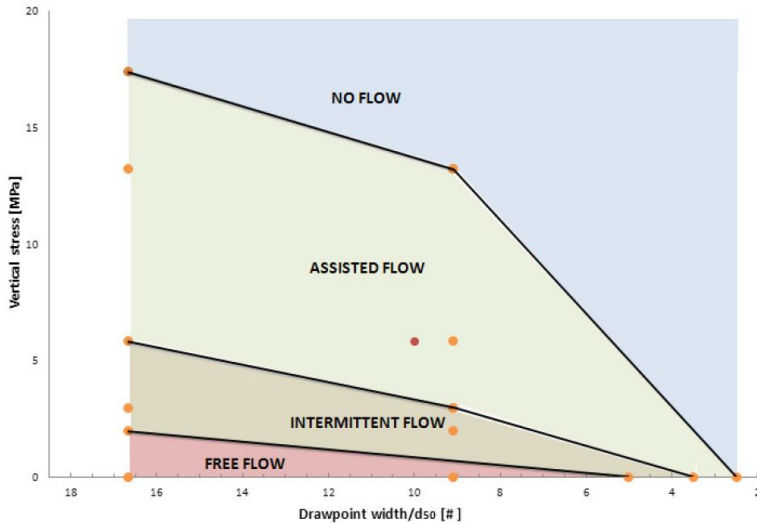


Figura 6: Condición de flujo para distintas condiciones de esfuerzo vertical y granulometría. (Fuenzalida, 2012)

Con respecto a la resistencia del material, este factor afecta en una menor probabilidad de formar arcos mecánicos estables debido a los mayores esfuerzos producidos entre el contacto de los bloques que forman la colgadura. Junto con esto, una menor resistencia produce una mayor fragmentación del mineral y distribución de tamaño de fragmentos de roca menores. Por otra parte, se cree que la tasa de extracción tiene efecto sobre la fragmentación de la roca pues esta permanecería un mayor o menor tiempo en la columna de material quebrado, teniendo mayores posibilidades de fragmentarse.

Kvapil (2008) señala que el principal factor de formación de las colgaduras corresponde a la reducción del ancho del flujo gravitacional en la abertura de salida, por lo que la geometría de la batea es de gran relevancia. Junto con esto, el mismo autor desarrolla expresiones analíticas los esfuerzos máximos y mínimos sobre las paredes provocadas por las colgaduras como se muestra en la Figura 7, y la ecuación 1 y 2.

En donde q corresponde a la carga lineal que se encuentra sobre la colgadura, l es al largo de la colgadura, α_1 es al ángulo de la batea, ϕ es el ángulo de fricción entre el material y la pared de la batea y H corresponde a la carga horizontal sobre las paredes de las bateas.

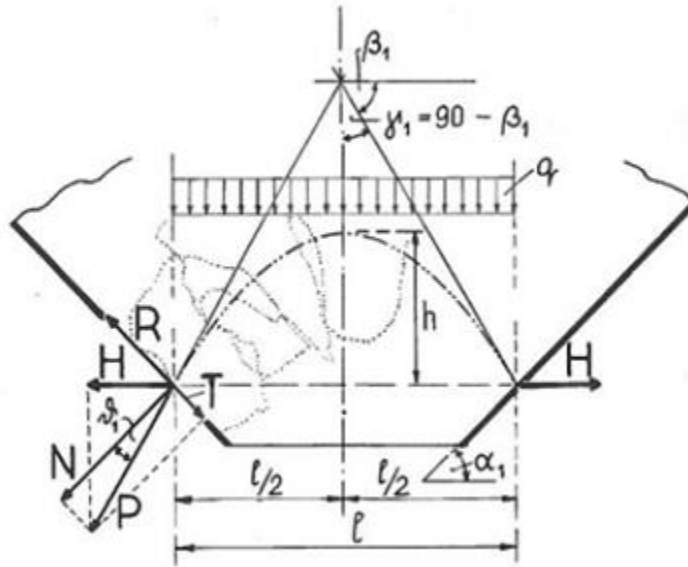


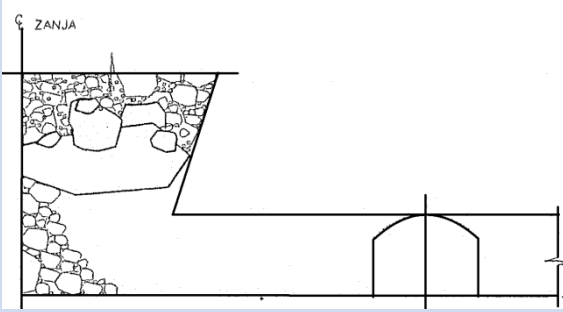
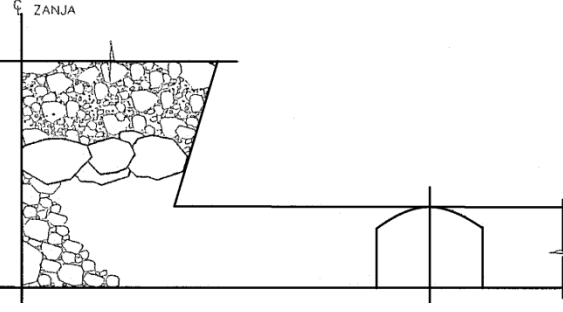
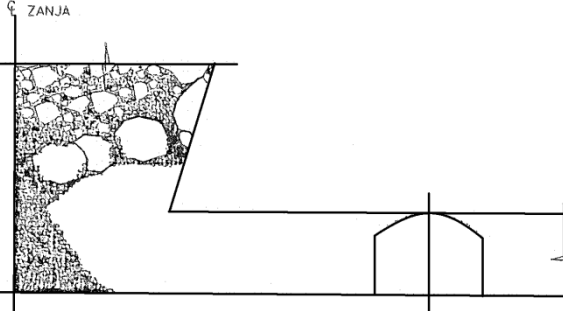
Figura 7: Figura esquemática de desarrollo de colgaduras en batea. (Kvapil, 2008).

$$H_{min} = \frac{ql}{2} \tan(\alpha_1 - \phi) \quad [1]$$

$$H_{max} = \frac{ql}{2} \tan(\alpha_1 + \phi) \quad [2]$$

Según sus características de formación y tamaño de fragmentos, las colgaduras han sido clasificadas en tres grupos correspondientes a arcos cohesivos, arcos mecánicos o bloqueo por la presencia de una colpa de gran tamaño (Maass, 2013). Esta clasificación puede ser observada en la Tabla 5.

Tabla 5 Clasificación de Colgadas según Origen. Traducida desde (Maass, 2013)

Esquema	Características
 <p>El diagrama muestra una sección transversal de una zanja. A la izquierda, una gran colpa formada por fragmentos de gran tamaño se acumula en la parte superior de la zanja, impidiendo el flujo. A la derecha, se muestra un detalle de un arco mecánico con un espacio estrecho que contribuye al bloqueo.</p>	<p>Bloqueo: Corresponde a la interrupción de flujo originada por el atascamiento en altura de una colpa de gran tamaño. Generalmente producida por que el diseño y las dimensiones de la zanja recolectora se encuentran subestimados en relación al tamaño máximo de fragmentos que fluyen por ella.</p>
 <p>El diagrama muestra una sección transversal de una zanja. Una colpa formada por fragmentos de tamaño medio se acumula en un arco mecánico, impidiendo el flujo. A la izquierda, se indica 'ZANJA' y 'IN'.</p>	<p>Arco Mecánico: Corresponde a la interrupción de flujo originada por el encadenamiento estable en altura de varias colpas con sobre tamaño. Generalmente son los más frecuentes.</p>
 <p>El diagrama muestra una sección transversal de una zanja. Una colpa formada por fragmentos de tamaño medio se acumula en un arco mecánico, pero sobre una base de material fino compactado. A la izquierda, se indica 'ZANJA'.</p>	<p>Arco Cohesivo: Corresponde a la interrupción de flujo originada por el apoyo de colpas en altura sobre una base de material fino compactado, generalmente en presencia de humedad.</p>

Existe otra clasificación basada en la altura de formación de las colgadas y el tamaño de los fragmentos involucrados (IM2, 2000)¹, la cual fue desarrollada a partir de la información obtenida de las faenas subterráneas de Codelco-Chile. Esta clasificación puede ser observada en la Tabla 6, en donde se separa las colgadas en eventos de baja altura, altura intermedia y de gran altura. Esta clasificación es

¹ Leído desde Maass, S. A. (2013) Alternativas tecnológicas para descuelgue de zanjas. Tesis Universidad de Chile..

útil para describir la facilidad con que es llevado el descuelgue del punto. El proceso de descuelgue para colgaduras de baja altura es relativamente simple y rápido a través del uso de un Jumbo de perforación. Por otra parte, las colgaduras de gran altura requieren del uso de explosivos amarrados al extremo de coligues para posicionarlos en la zona de contacto entre rocas.

Tabla 6 Clasificación de colgaduras según altura de formación. Formato modificado desde (Maass, 2013)

Clasificación	Altura de colgadura	Tamaño de fragmentos	Frecuencia
C3-C4	>12m	>6m	Muy baja
C2	4-6 m	4-6m	Alta
C1	<4m	<4m	Media

2.4 Diseño de Mallas de Extracción y Bateas

El dimensionamiento y diseño tradicional de mallas de extracción en minería por Block/Panel Caving considera como punto de inicio la determinación del diámetro del elipsoide de extracción para determinar los espaciamientos mínimos y máximos entre puntos de extracción. Existen distintas metodologías para la determinación de este diámetro, las cuales consideran como principales factores la calidad del macizo rocoso, la presencia de discontinuidades, curvas de fragmentación del material y anchos de puntos de extracción, los cuales son utilizados para determinar alturas de interacción de elipsoides y sus diámetros. Una vez determinados los diámetros de los elipsoides se analiza la distribución geométrica de estos y el diseño de la malla de extracción según criterios operacionales, geométricos y geomecánicos para posteriormente operativizar la malla según las dimensiones de los equipos de extracción LHD. Esto último puede desplazar los elipsoides, traslapándolos, determinando el ancho de la base de la batea y del pilar corona.

Los diseños de bateas y pilares coronas son dependientes entre sí. Los criterios utilizados para sus diseños involucran aspectos geomecánicos y operacionales como son la estabilidad del pilar corona, facilitar la interacción entre puntos de extracción, evitar la retención de material estático en la zona del ápex, permitir un flujo adecuado del material y poseer un método constructivo simple y eficiente. Para su diseño se requiere determinar una serie de distancias y ángulos

que determinan su geometría. En la Figura 8, Figura 9 se puede observar este diseño junto con sus distintos parámetros en vistas isométricas, perfil paralelo a la galería de zanja (Corte A-A) y perfil perpendicular a la galería de zanja (Corte B-B).

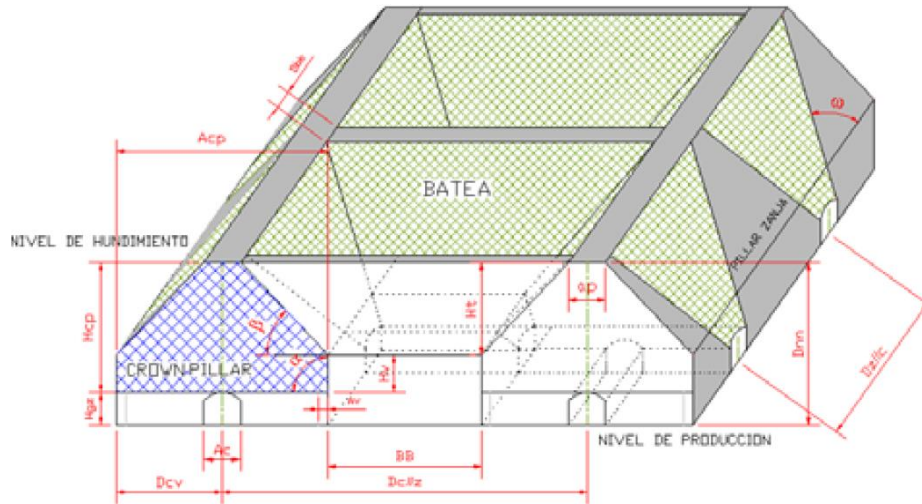


Figura 8: Vista Isométrica del diseño de Batea y Pilar Corona. (Cavieres et al., 2002)

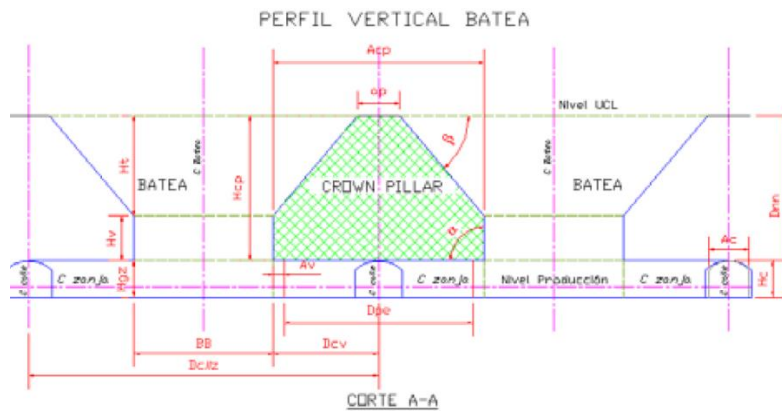


Figura 9: Diseño de Batea y Pilar Corona en perfil paralelo a galería de zanja. (Cavieres et al., 2002)

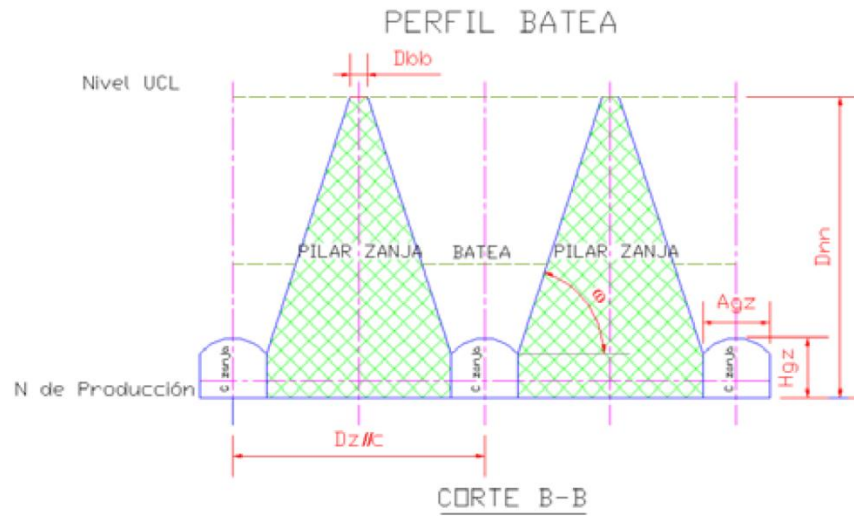


Figura 10: Diseño de Batea y Pilar Zanja en perfil perpendicular a galería de Zanja. (Cavieres et al., 2002)

Entre los parámetros utilizados para la descripción del diseño de la batea se encuentran:

$D_{C\perp C}$: Distancia perpendicular entre calles

$D_{C\parallel Z}$: Distancia paralela a zanja entre calles

$D_{Z\parallel C}$: Distancia paralela a calle entre zanjas

a_p : Ancho del ápex mayor

D_{bb} : Ancho de ápex mínimo

H_{cp} : Altura del pilar Corona

α : Angulo de la visera

H_{gz} : Altura de la galería de zanja

BB : Ancho de base de la batea

w : Angulo de la pared entre bateas

H_c : Altura de la calle de producción

A_c : Ancho de la calle de producción

A_{gz} : Ancho de la galería de zanja

D_{mn} : Distancia vertical entre nivel de producción y UCL

A_{cp} : Ancho del pilar Corona

H_t : Altura del talud de la batea

β : Angulo de talud de la batea

H_v : Altura de la visera

D_{cv} : Distancia centro de la calle a la visera

A_v : Ancho de visera

De esta forma, el diseño de bateas está determinada por las relaciones geométricas entre la infraestructura de la mina y depende de la malla de extracción, el sistema de manejo de minerales y la estabilidad del nivel de producción.

2.5 Modelamiento Numérico de Flujo Gravitacional y Colgadas

El conocimiento acerca del proceso de colgadas ha provenido principalmente de la experiencia minera, el modelamiento físico y el modelamiento numérico mediante el estudio del flujo de medios granulares.

El modelamiento físico a escala de laboratorio ha permitido el estudio de flujos granulares de menor tamaño permitiendo un gran control sobre las variables, sin embargo, posee dificultades en el escalamiento del problema y en el estudio de múltiples escenarios. El fenómeno de colgadas ha sido investigado en este tipo de modelos dentro del marco del estudio de flujo gravitacional de medios granulares a distintas condiciones de carga vertical y tamaño de partículas (Fuenzalida, 2012).

Por otra parte, la experiencia minera permite la observación directa del evento que se desea estudiar, sin embargo, el control sobre las variables que participan en estos eventos es extremadamente limitado y costoso, por lo que su aporte es principalmente de observación y experiencia. Una de las herramientas utilizadas para la predicción de colgadas basada en la experiencia minera y en fundamentos de la minería de caving corresponde a BCF el cual es un sistema experto que incorpora una gran cantidad de factores de la roca, discontinuidades, fragmentos, esfuerzos, altura de columna y tasas de extracción para la predicción de la fragmentación primaria, secundaria y potencial de colgadas mediante reglas empíricas y/o simplificadas. Para la fragmentación primaria se utiliza la resistencia y el esfuerzo sobre las discontinuidades y de la roca para evaluar que planos se abren y forman bloques primarios. Por otra parte, la predicción de la fragmentación secundaria se realiza en función de una unidad de distancia llamada ciclo, que es función de la razón de aspecto de los fragmentos, su resistencia, altura de columna, esfuerzos y ritmo de extracción. Finalmente, la predicción de colgadas considera la información de la fragmentación secundaria y secciones de geometría de la batea para estimar el potencial de colgadas según la relación entre áreas de bloques y secciones.

Finalmente, el modelamiento numérico permite el control sobre la mayoría de las variables y escenarios a un bajo costo siendo la mayor dificultad la complejidad en el modelamiento y la calibración y validación de los resultados. Debido a la naturaleza discontinua del medio granular a fluir, el método de elementos discretos (DEM) es ideal para simular este proceso debido a su habilidad única de recrear de forma completa el comportamiento cinemático y dinámico de cuerpos discretos interactuando. Para el estudio de estos eventos se han realizado simulaciones de flujos en piques de traspaso y bateas en 2D y 3D en PFC, UDEC y 3DEC entre otros. Entre estos trabajos se encuentran:

- Nazeri et al. (2000) desarrollaron e implementaron dos métodos, uno mediante clusters rígidos de circunferencias traslapadas (cluster2d) y el otro mediante elementos discretos supercuádricos (super2d) el cual permite la generación de forma de partículas desde cuadradas a elípticas. Posteriormente utiliza estas metodologías para analizar los esfuerzos generados en el medio y paredes de un pique de traspaso para partículas esféricas y traslapadas según la primera metodología, y para partículas esféricas y cuadradas según la segunda metodología cuando estas son cargadas introducidas en un silo. Los resultados muestran diferencias en los esfuerzos normales y de corte entre las distintas formas de partículas, mostrando las partículas redondas un mayor esfuerzo normal y menor esfuerzo de corte sobre las paredes que las partículas con formas más irregulares, junto con esto observa mayores fuerzas de encadenamiento y eventos de colgadura en partículas cuadradas.
- Mustoe & Miyata (2001) utilizaron una metodología de elementos discretos elípticos (2D) y elipsoidales (3D) para una situación de movimiento en un molino y de flujo en un pique de traspaso, para el caso del flujo analizaron tres formas y tamaño de partículas observando una mayor fluidez de las partículas esféricas en comparación a las partículas elipsoidales grandes y pequeñas. Junto con esto observaron detenciones del flujo y mayores esfuerzos normales en la base de los piques.
- Nazeri & Mustoe (2002) estudiaron cómo afectan cuatro formas de fragmentos en los esfuerzos sobre las paredes y base de los piques, y evalúa la formación de colgaduras para distintos ángulos de inclinación de codo de piques de traspaso.
- Tibor & Ebert (2005), estudiaron los esfuerzos generados en las paredes y bases de varias geometrías de silos en condición estática después de la carga de material y en condición dinámica en su descarga para partículas esféricas monotamaño y sin cohesión mediante un código DEM en 3D realizado en C++ integrando numéricamente las ecuaciones de Newton. Inicialmente genera partículas al interior del silo y carga la gravedad para

producir su asentamiento, posteriormente se remueve la base del silo para observar la respuesta dinámica sobre las paredes del silo, obteniendo distintas distribuciones de fuerza para las distintas geometrías.

- Hadjigeorgiou & Lessard (2007), estudiaron mediante PFC3D la condición de flujo de partículas esféricas y cuadradas, para distintas geometrías e inclinaciones de piques de traspaso y relaciones entre tamaño máximo de partícula y diámetro del pique. La calibración la realiza a través de ensayos triaxiales que simulen el ángulo de fricción del medio. Sin embargo, obtienen valores menores de fricción para las partículas esféricas. Para observar el flujo, se rellena el pique con material en forma batch hasta una cierta altura y posteriormente se remueve la base para observar la condición de flujo, obteniendo guías de zonas de flujo libre, intermitente o sin flujo para cada combinación de inclinaciones, geometría de pique de traspaso y forma de partículas. Se observó una mayor capacidad de fluir de las partículas esféricas y piques de traspaso cuadrados.
- Antillo (2010) estudió el esfuerzo producido por un medio granular mediante elementos discretos en UDEC. Para esto estudia el esfuerzo producido en modelos sin extracción, con extracción aislada y extracción múltiple. Los parámetros utilizados se obtienen principalmente de valores de la literatura y de caracterización del medio granular. En el modelo sin extracción determina el tamaño medio de distribución de fragmentos que entregase la mejor estimación de esfuerzos según la literatura y datos experimentales, posteriormente utiliza este tamaño para estudiar los esfuerzos en condición de flujo aislado para distintos anchos de extracción y ángulos de fricción de las discontinuidades, y extracción múltiple ante diversas colgaduras.
- Orellana (2011) desarrolló una metodología para el estudio de flujo gravitacional a través de modelamiento numérico y modelos físicos, aplicándola a un caso de minería continua a escala de laboratorio. Para la modelación numérica considera la simulación en PFC2D/3D de fragmentos tanto esféricos como clusters, calibrando las micropropiedades de rigidez y coeficiente de fricción del material mediante ensayos triaxiales y midiendo el ángulo de reposo del material. Posteriormente valida y vuelve a calibrar las propiedades según los esfuerzos generados por el medio granular en la batea y paredes inferiores del modelo físico. Finalmente, comparó la productividad, la frecuencia de colgaduras y las zonas de flujo para los distintos modelamientos con el modelo físico, observando que el modelo numérico subestima las colgaduras cuando la forma de los fragmentos es esférica, debido a su tendencia a fluir. El uso de clúster puede ser más representativo para la simulación de colgaduras, sin embargo, las zonas de contacto seguirán siendo puntos y no áreas.

- El primer intento de simular el flujo gravitacional mediante 3DEC fue desarrollado por Taghavi & Pierce (2011), los cuales analizan el flujo de elementos tetrahédricos de igual tamaño a través de una abertura en una geometría en forma de paralelepípedo. Los elementos tetrahédricos de igual tamaño son generados a través de Kubrix (Simulation Works², 2009) a través de dos etapas, inicialmente se diseña una superficie 2D compuesta de triángulos, la cual se utiliza como base para la generación automática de una grilla 3D mediante Kubrix. Estos elementos tetrahédricos son cargados al interior de una caja con una abertura (diseñada en Rhino, programa CAD) y se cargan sus propiedades de densidad, rigideces de los contactos, ángulo de fricción y gravedad. Debido a que la malla generada del medio granular es compacta, el medio generado posee una porosidad igual a 0, lo cual no permite el flujo. Ante esta situación, los autores plantean un factor de reducción de volumen de cada uno de los elementos tetrahédricos (shrinkage factor) y el posterior asentamiento del material con el fin de aumentar la porosidad del medio, la aleatoriedad en la posición de las partículas y permitir el flujo de material. Esto último puede ser observado en la Figura 11.

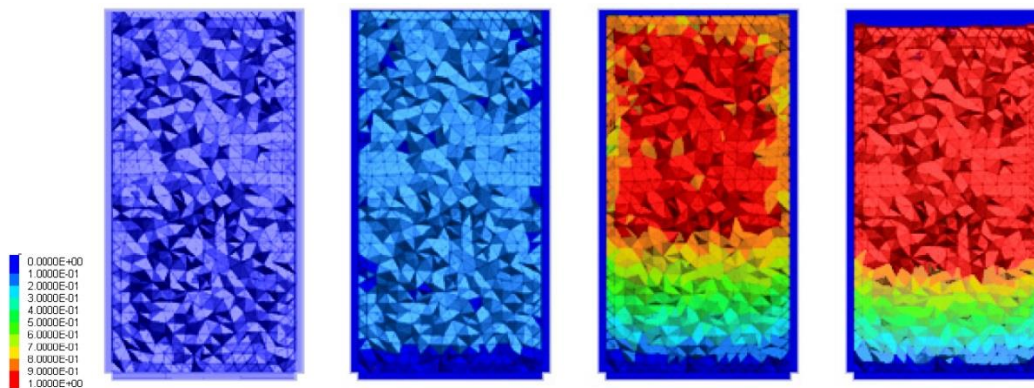


Figura 11: Reducción del volumen de fragmentos a través de un shrinkage factor de 0.99 y posterior asentamiento del material. Modificado desde (Taghavi & Pierce, 2011).

Posteriormente se produce la apertura de la base y la caída del material para el estudio del flujo. Esto último es realizado para distintos ángulos de fricción, shrinkage factor y dimensiones de diámetro de abertura, obteniendo en algunas situaciones colgaduras posteriores al inicio del flujo (Figura 12), demostrando el potencial de esta técnica en el estudio de colgaduras.

² Simulation Works Inc. fue adquirida por Itasca Consulting Group en 2012. El software Kubrix actualmente es comercializado por Itasca.

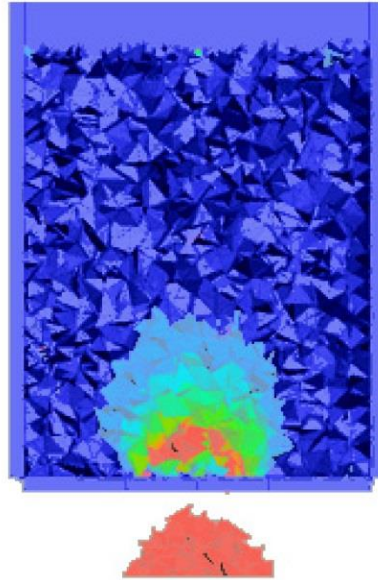


Figura 12: Colgadura generada con un diámetro de abertura de 10 m, y un shrinkage factor de 80%. Es posible notar que inicialmente se produce el flujo de material pero posteriormente éste se ve interrumpido (Taghavi & Pierce, 2011).

2.6 Metodología para la Caracterización de la forma de los bloques

- Kalenchuk et al., (2006) desarrollaron una metodología para la caracterización de la forma de bloques en 3D para macizos rocosos fracturados. Esta metodología utiliza la información de la orientación, espaciamiento y persistencia de las discontinuidades ajustando distribuciones de probabilidad para simular el macizo y la distribución granulométrica de tamaño. Esta metodología considera la estimación de los parámetros alfa y beta, que describen la elongación y agudeza de los bloques para la caracterización de forma. Finalmente utiliza esta metodología para la descripción de la forma de los bloques que producen dilución en una operación de transición rajo subterránea en Koala Mine (Kalenchuk *et al.*, 2008).

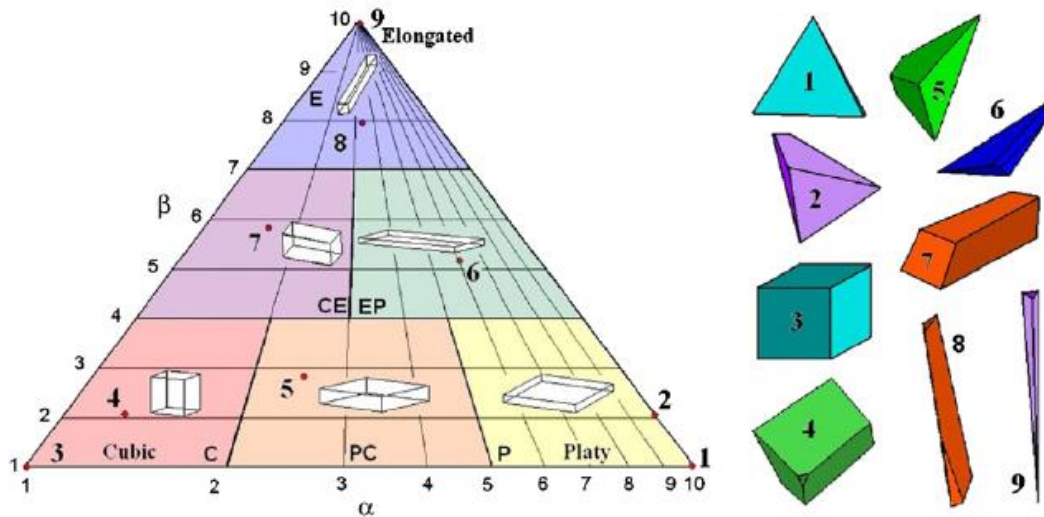


Figura 13: Triángulo de categorización de los bloques según su forma. Bloques elongados(8,9) aparecen en la parte superior del gráfico, bloques aplanados(1,2) en la parte inferior derecha y bloques equidimensionales(3,4) en la parte inferior izquierda. Formas transicionales entre cúbico y aplanados, aparecen la parte inferior del diagrama (5)

2.7 Conclusión de Referencias Bibliográficas

A partir del análisis del estado del arte del estudio de colgaduras, se concluye que:

- Las colgaduras por formación de arcos mecánicos representan la mayoría de los eventos, siendo las colgaduras por bloqueo producto de una subestimación del tamaño máximo de bloques y las formaciones de arcos cohesivos eventos relativamente poco comunes.
- Se ha observado que el diseño de la batea juega un rol en la formación de colgaduras, sin embargo, hasta ahora este no ha sido considerado en los estudios de laboratorio o de modelamiento numérico.
- La formación de arcos mecánicos está relacionada tanto con los esfuerzos a los que está sometido el medio granular, como a la forma y distribución de tamaño de estos.
- Los estudios numéricos realizados hasta ahora consideran análisis en dos dimensiones, o bien simplificaciones en términos de la distribución de los tamaños.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se explica la metodología propuesta, seguida de los detalles de la herramienta a utilizar y cómo ésta influencia el modelo.

3.1 Propuesta

A partir de estudios anteriores de flujo con elementos discretos (Nazeri & Mustoe, 2002; Antillo, 2010; Tagavhi & Pierce, 2011) se plantea una nueva metodología para el estudio de colgaduras de batea. Esta considerará el diseño de la batea, permitiendo estudiar su efecto y utilizará bloques en 3 dimensiones sin restringir la forma de estos a esferas o tetraedros. La distribución granulométrica de los elementos será controlada mediante un algoritmo de encogimiento, permitiendo calibrar la granulometría resultante para aproximar aquella que se quiere modelar. Con esto, se logra definir una metodología que posibilita el estudio de las colgaduras de batea por arcos mecánicos, en tres dimensiones.

La metodología propuesta comprende las siguientes etapas:

1. Generación de la geometría de batea
2. Selección de parámetros representando un DFN
3. Generación de una curva granulométrica mediante la generación de un DFN
4. Aplicación factor de encogimiento.
5. Cargar bloques en el modelo.
6. Comprobación de la curva granulométrica
7. Definición de parámetros y ejecución del modelo.
8. Definición del criterio de termino en función de la Pila y la extracción
9. Evaluación del comportamiento del modelo.

El diagrama del proceso en la Figura 14 comprende el diseño de la batea, y posteriormente, la calibración de la curva granulométrica mediante el uso de un DFN. En caso negativo, se debe aplicar un nuevo DFN. Una vez que se ha formado una pila de material, se evalúa en ángulo de reposo. Si éste no estuviera de acuerdo con lo esperado, se deberán volver a definir los parámetros del modelo. Una vez que se cuenta con un modelo que satisface los requerimientos de ajustarse a la curva granulométrica y reproducir el ángulo de reposo de forma apropiada, se inicia la extracción de material. El proceso de extracción se repite hasta la formación de una colgadura.

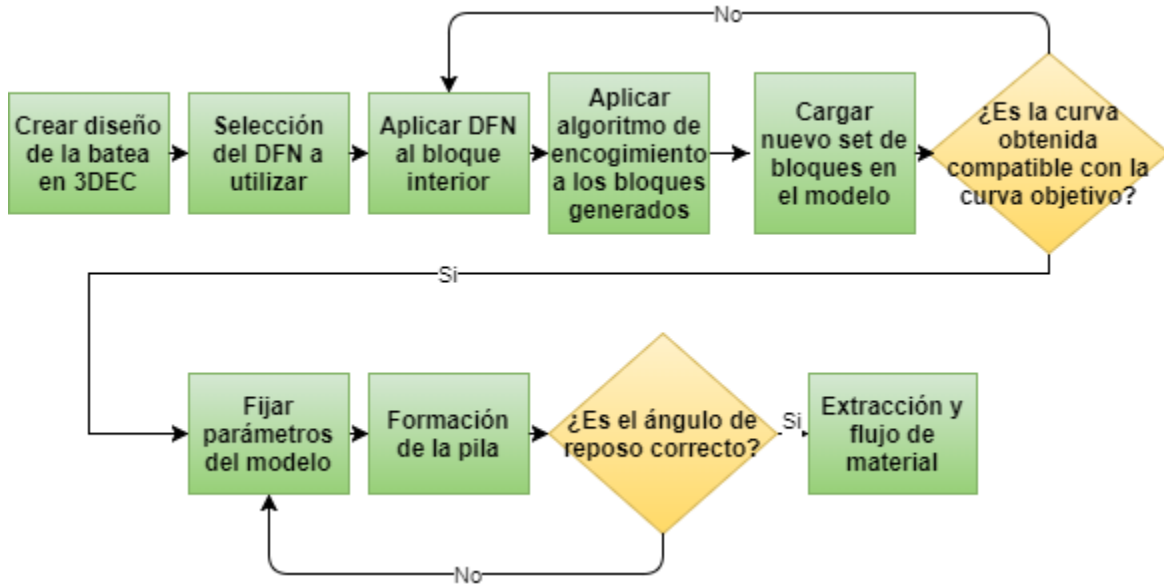


Figura 14: Diagrama del Proceso Planteado

3.2 Introducción a la Herramienta a utilizar: 3DEC

3DEC (Itasca Consultants S.A., 2018) y pertenece a la familia de los Métodos de Elementos Discretos. Algunas de las ventajas que presenta sobre otras herramientas de modelamiento, como UDEC, PFC y FLAC3D, son las siguientes:

- Método discontinuo, lo que permite modelar los bloques de forma individual.
- Trabaja con bloques tridimensionales.
- Los bloques pueden presentar geometría angular. A diferencia de PFC, no está limitado a elementos esféricos.
- Detección automática de nuevos contactos: los bloques pueden entrar en contacto entre sí, chocar y rebotar, permitiendo simular material libre.
- Soporte de sistemas de fracturas generados estocásticamente: conocidos como Discrete Fracture Networks (DFN), estos sistemas de fracturas se generan con el objetivo de simular la respuesta de un cuerpo fracturado, sin necesidad de mapear las estructuras individualmente.
- Variedad de modelos constitutivos: el programa permite elegir el modelo constitutivo que mejor se adapte a la realidad a modelar.
- El código permite grandes desplazamientos de los bloques en las discontinuidades (en particular, permite separación completa entre bloques, al inicio o durante la simulación)
- Los bloques pueden rotar.
- Los bloques pueden comportarse como elementos rígidos o deformables.

En 3DEC, un medio discontinuo es considerado como una colección de bloques, siendo las discontinuidades las fronteras entre estos. Las propiedades de las discontinuidades pueden ser manipuladas según la respuesta que se busque del modelo.

3.2.1 Fundamentos de los Cálculos de Elementos Discretos en 3DEC

A continuación, se exponen las principales características del modelamiento con 3DEC:

Detección de Contactos:

En primer lugar, el sistema debe detectar si dos bloques son contiguos. Para esto, el espacio tridimensional es dividido en celdas. Luego, el sistema asigna un contorno al bloque, el paralelepípedo más pequeño que contiene todos los vértices del bloque. En la Figura 15, los bloques A y C son contiguos ya que los contornos de ambos caen en la celda 13, del mismo modo, A y B son contiguos ya que sus contornos coinciden en la celda 8, y B y C son contiguos porque coinciden en la celda 9. De esta forma, el programa evita búsquedas en donde cada bloque sea comparado con todos los demás presentes en el modelo, sino que compara cada bloque solo con aquellos contiguos a este.

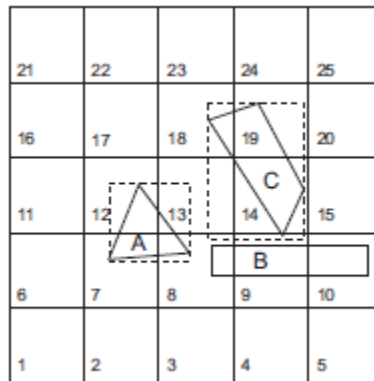


Figura 15: Método de detección de contactos

Cuando dos bloques contiguos se encuentran suficientemente cerca, el programa asigna un contacto. Esto es independiente de si los bloques se encuentran físicamente en contacto o no. En caso de que no estén tocándose, el contacto se establece y no se le asigna carga, de modo que cuando los bloques entren en contacto físico, no se genere desfase en el cálculo de fuerzas y este comience en cuanto los bloques se toquen.

3DEC reconoce varios tipos de contactos, según sea el caso. Estos son:

- Vértice-Vértice
- Vértice-Borde
- Vértice-Cara

- Cara-Cara

Dos bloques pueden estar en contacto en cualquiera de las formas antes mencionadas. Para simplificar la detección de estos, el programa establece un plano común, que separa a la mitad el espacio entre bloques (Figura 16a). Luego, se evalúa el contacto virtual del vértice con dicho plano (Figura 16b). De esta forma el programa solo evalúa contactos del tipo vértice-plano.

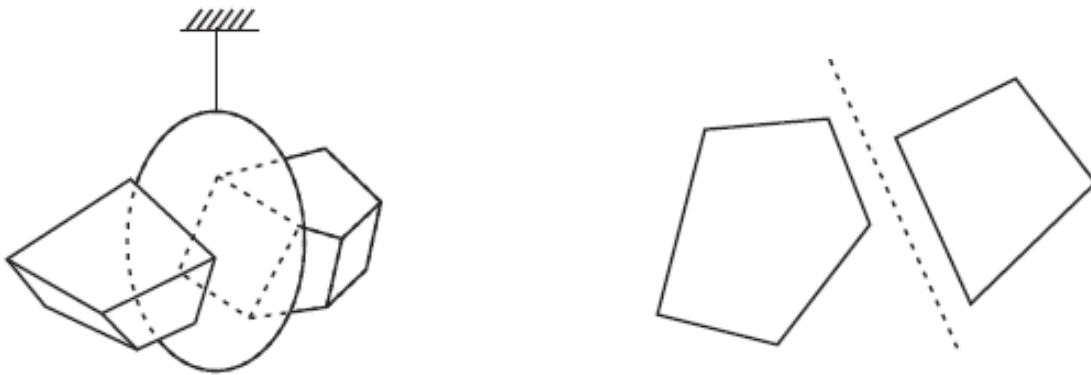


Figura 16: a) Plano común b) Contacto borde-borde

Tratamiento de Bloques en 3DEC

3DEC define los bloques en términos de las coordenadas de sus vértices. Los bloques deben ser convexos y en caso de no serlo, el programa los divide internamente para lograr formas convexas.

En 3DEC un bloque puede generarse utilizando comandos especiales (comando BLOCK), o bien ingresando una por una las coordenadas de los vértices del bloque. Este último método es altamente complejo de utilizar pues el programa no correrá a menos que los vértices indicados formen un bloque bien definido. Esto se vuelve altamente difícil al generar formas complejas con un gran número de caras.

3.2.2 Ecuaciones de Movimiento: Ciclo de Cálculo

3DEC resuelve las ecuaciones de movimiento del sistema por medio de una formulación explícita de diferencias finitas. En cada paso de tiempo, las leyes de movimiento y las ecuaciones constitutivas son aplicadas. Para bloques rígidos y deformables, se aplican relaciones fuerza-desplazamiento. La integración de la ley de movimiento genera nuevas posiciones para los bloques y con esto, incrementos en los desplazamientos. La relación fuerza-desplazamiento de los subcontactos se utiliza para actualizar las fuerzas de los subcontactos que se aplicarán a los bloques en el siguiente paso de tiempo (Figura 17).

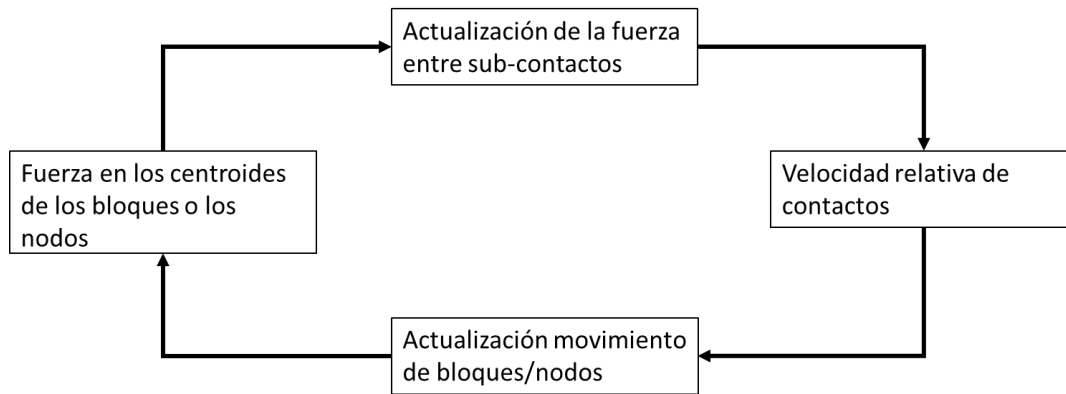


Figura 17: Ciclo de Cálculo de ecuaciones de movimiento (modificado de Itasca,2013)

3.3 Modelos Constitutivos

Los modelos constitutivos del programa permiten controlar los parámetros más relevantes para el problema, estos son: rigidez normal y de corte de las discontinuidades a estudiar, ángulo de fricción del material, cohesión del material, resistencia a la compresión simple y tracción, y módulos elásticos. A pesar de que en este trabajo no se utilizarán todos estos parámetros debido a que se determinó el uso de bloques rígidos, estos podrían eventualmente ser modificados para realizar un estudio con bloques deformables elásticos

3.3.1 Modelos Constitutivos de Bloques

3DEC cuenta con cinco modelos constitutivos por defecto:

- Nulo: Simboliza material que ha sido extraído del modelo
- Elástico Isotrópico: El modelo más simple, considera relación lineal de stress/strain.
- Elástico anisotrópico: Modelo útil para materiales que presentan diferencias notorias en sus propiedades, según la dirección. Materiales ortotrópicos y transversalmente isotrópicos son caracterizados con este modelo.
- Modelo Plástico de Mohr - Coulomb: La envolvente de falla corresponde al criterio de Mohr – Coulomb. Considera una regla de flujo no asociativa para la falla en corte, y no considera regla de flujo para falla en tensión.

En este trabajo se utiliza un modelo nulo para el material extraído y un modelo elástico isotrópico, ya que no se necesita dar énfasis a las propiedades elásticas en direcciones determinadas, como en el caso de un modelo elástico anisotrópico.

3.3.2 Modelos Constitutivos de Discontinuidades

Los modelos constitutivos de las discontinuidades están diseñados para reproducir el comportamiento de los contactos en roca. Para modelar el comportamiento de las discontinuidades, 3DEC posee dos métodos:

- Modelo de deslizamiento de Mohr Coulomb (Coulomb Slip Model): Diseñado para bloques compactados donde sus contactos son áreas. Incorpora una representación de la rigidez y resistencia máxima. Se basa en propiedades de las discontinuidades como resistencia friccional, cohesiva y tensional. Representa el debilitamiento por pérdida de cohesión y resistencia tensional al momento de ocurrir falla en corte o en tensión.
- Continuously Yielding Model: Modelo más complejo en el cual el debilitamiento se modela de manera continua, como función de la deformación plástica acumulada.

El modelo de tipo Continuously Yielding es más complejo que el de Mohr Coulomb, y requiere conocimiento previo del comportamiento de la discontinuidad mediante pruebas de laboratorio. En general, los estudios iniciales deben basarse en un modelo de Mohr Coulomb (Itasca, 2013 Manual 3DEC 5.0), debido a esto, en este trabajo se utiliza el modelo de deslizamiento de Mohr Coulomb para las discontinuidades.

3.4 Discrete Fractures Networks en 3DEC

3DEC soporta el uso de DFN (Discrete Fracture Networks), representaciones estocásticas de las fracturas dentro de una muestra rocosa. A partir de un set de parámetros estadísticos, se definen las coordenadas de un conjunto de fracturas.

3.4.1 Parámetros de los DFN en 3DEC

En 3DEC una discontinuidad es representada por un disco, que intersecta los bloques del modelo, generando nuevos bloques. Para la definición de dichas discontinuidades, deben especificarse tres parámetros: Tamaño, orientación y posición:

1) Distribución del tamaño de discontinuidades: 3DEC trabaja con las distribuciones: Uniforme, Gaussiana, Ley de Potencia, Bootstrapped y FISH³.

³ De FLAC-ish. FISH es un lenguaje de programación desarrollado por Itasca para el software FLAC, que permite controlar el comportamiento sin utilizar la interfaz gráfica. FISH también es parte de 3DEC.

Para este trabajo, la Ley de Potencia es de particular interés pues representa una forma de controlar el tamaño de las discontinuidades, y con esto, afectar la curva granulométrica generada. Esta se detalla a continuación.

Ley de Potencia:

$$n(l) = \alpha * l^{-a}$$

Donde,

$n(l)$: Número de discontinuidades de tamaño l , por unidad de volumen.

α : Factor de ajuste, llamado densidad de discontinuidades

a : Exponente de escalamiento

La distribución se define entre l_{\min} y l_{\max} , tamaños de fracturas máximos y mínimos respectivamente.

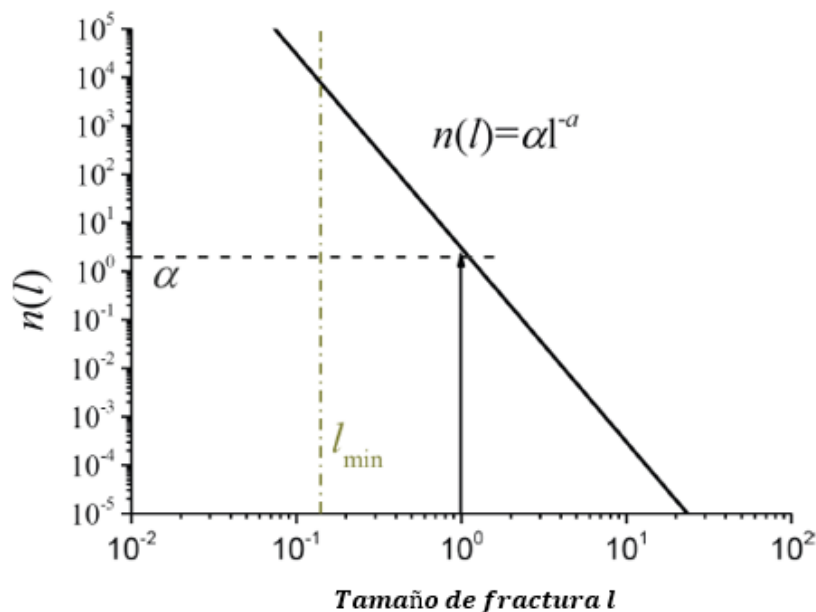


Figura 18: Distribución Ley de Potencia, modificado de Itasca

La Figura 18, muestra el efecto del exponente a , al incrementarse el exponente, la proporción de fracturas pequeñas aumenta en relación a la proporción de gran tamaño.

2) La distribución de la posición de las fracturas, es decir, los centros de los discos, puede ser ajustada según las siguientes distribuciones: Uniforme, Gaussiana, Bootstrap (Es decir, toma valores aleatorios a partir de un set de referencia) y FISH (definida por el usuario mediante el lenguaje incluido en el programa).

3) La orientación de las fracturas puede ser ajustada según las distribuciones Uniforme, Gaussiana, Fisher y FISH. En este caso, el programa asigna el dip y dipdirection del contacto a partir de la distribución de probabilidad especificada.

3.4.2 Factor de Densidad

Existen distintas formas de medir la densidad de fracturas en un bloque en terreno, dependiendo de las dimensiones a las que se tenga acceso. La medición podrá ser puntual, lineal, superficial o volumétrica (), luego, se aplica un factor para extrapolar la densidad de fracturas a partir de la medición.

Los parámetros de tamaño, posición y orientación antes explicados definen completamente el DFN. El rol del factor de densidad es escalar el número de facturas observadas en terreno, las cuales están asociadas a una unidad sobre la cual fueron medidas (por ejemplo, un bloque), al modelo completo. La generación de fracturas termina cuando la densidad especificada es alcanzada.

		Dimensiones de fractura				
		0	1	2	3	
Dimensiones de la región muestreada	0	P00 [*] Número de fracturas en muestra puntual de macizo rocoso				Medidas Puntuales
	1	P10 [1/m] Número de Fracturas por unidad de largo	P11 [*] Apertura total por unidad de largo			Medidas Lineales
	2	P20 [1/m ²] Número de centros de traza por unidad de área	P21 [1/m] Número de fracturas por unidad de área	P22 [*] Área de fracturas por unidad de área		Medidas Areales
	3	P30 [1/m ³] Número de fracturas por unidad de volúmen	P31	P32 [1/m] Área de fracturas por unidad de volúmen	P33 [*] Volúmen de fracturas por unidad de volúmen de roca	Medidas Volumétricas

Figura 19: Distintos tipos medición de densidad de fracturas. Modificado de Golder Associates

3.5 Algoritmo de Encogimiento de Bloques

Para la implementación de la metodología presentada en este trabajo, se desarrolló una herramienta que permite el encogimiento de los bloques, basado en el concepto utilizado por Taghavi y Pierce (2007), utilizando una implementación diferente que permite extender su uso a elementos de cualquier geometría y no sólo tetraedros. Dicha herramienta disminuye la distancia entre el centroide de los

bloques y los vértices, permitiendo disminuir su volumen sin alterar su forma. Esto, con la finalidad de poder desplazar la curva granulométrica sin alterar la configuración de esta.

En la sección anterior se detalló el trabajo con el DFN, que, por medio de su aplicación, permiten transformar un bloque original en un alto número de sub bloques.

Luego, estos bloques son encogidos, generando el espacio vacío en el sistema que permitirá que estos se acomoden y fluyan.

3.5.1 Fundamento del Algoritmo de Encogimiento

A continuación, se definen las variables que forman la base del método de reducción de tamaño. Más detalles asociados al algoritmo de encogimiento pueden encontrarse en el Anexo B.

C_i : Centroide del bloque i

V_{ij} : Bloque i , vértice j

C_{ix} : Centroide del bloque i , coordenada x

C_{iy} : Centroide del bloque i , coordenada y

C_{iz} : Centroide del bloque i , coordenada z

V_{ijx} : Bloque i , vértice j , coordenada x

V_{ijy} : Bloque i , vértice j , coordenada y

V_{ijz} : Bloque i , vértice j , coordenada z

D_{ij} : Cuerda que une el centroide del bloque i , con el vértice j del bloque i

Se tiene que:

$$D_{ij} = C_i - V_{ij} \quad [3]$$

Luego, se aplica el factor de disminución sobre la cuerda D :

$$D'_{ij} = c * D_{ij}, c \in [0,1] \quad [4]$$

Se impone que la posición del centroide se mantenga fija, por lo que las coordenadas del nuevo vector posición del vértice serán:

$$V'_{ij} = C_i + D'_{ij} \quad [5]$$

Por tanto,

$$V'_{ij} = C_i + cD_{ij} \quad [6]$$

Finalmente,

$$V'_{ijx} = V_{ijx} + cD_{ix} \quad [7]$$

$$V'_{ijy} = V_{ijy} + cD_{iy} \quad [8]$$

$$V'_{ijz} = V_{ijz} + cD_{iz} \quad [9]$$

Utilizando la capacidad de 3DEC de identificar el centroide y los vértices de cada uno de los bloques, se calcula la distancia entre el centroide y cada vértice, llamada cuerda D_{ij} , la cual conecta el centroide del bloque i con el vértice j del mismo bloque (Ecuación 3). Posteriormente, se define un factor de encogimiento para el bloque, este factor es multiplicado por la magnitud del vector D , definiendo la nueva cuerda D' (Ecuación 4). Finalmente, se impone que el centroide del bloque mantiene su posición, y se calcula la nueva posición del vértice V'_{ij} (Ecuación 5), los componentes del vector posición del nuevo vértice V'_{ij} estarán dados según las ecuaciones 7,8,9.

En la Figura 20 se observa un diagrama de un bloque a ser encogido. Por simplicidad, se eligió un elemento cúbico. El método es el mismo independiente de la forma del bloque estudiado.

La cuerda D une el Centroide con la posición original del Vértice, mientras que la Cuerda D' une el Centroide con la posición final del Vértice, posterior al encogimiento. El factor de reducción de volumen del bloque estará, por tanto, directamente relacionado con el factor de reducción aplicado a las cuerdas que unen el centroide con los vértices

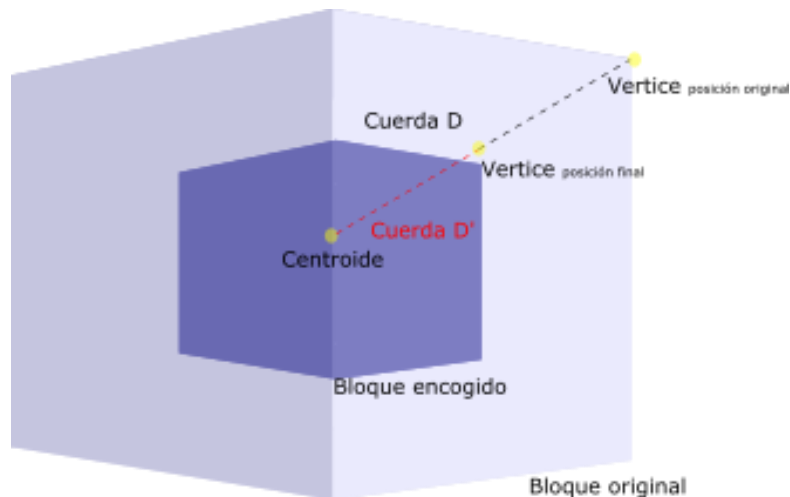


Figura 20: Diagrama de un bloque. La cuerda D representa la distancia original Centroide-Vértice. El volumen de bloque inicial y final se denota con distinto color (Elaboración propia.)

3.6 Etapas de la Metodología

A continuación, se analizan una a una las etapas de la metodología expuestas en “3.1 Propuesta”.

3.6.1. Generación de la Geometría de Batea a Estudiar

La generación de la batea implica generar un bloque con forma de paralelepípedo y aplicar cortes, de modo de lograr la geometría deseada, luego de este proceso el modelo tendrá dos secciones: el bloque con la geometría de la batea, y su bloque complementario, que fue extraído del bloque original. Se programó una rutina FISH a partir de la parametrización de la batea (ver Anexo A), en base a las variables expuestas en el punto “2.4 Diseño de Mallas de Extracción y Bateas”. Esta rutina define la geometría y aplicar los cortes apropiados basado en los parámetros de diseño que se ingresen.

Los parámetros que deberán ser especificados son seis:

1. Altura de columna: Medida desde el piso de la batea hasta el extremo superior del modelo. La altura de columna determinará las dimensiones del bloque original que será subdividido, afectando la cantidad de bloques que se generarán dentro del modelo.
2. Ángulo de la pared entre bateas: Corresponde al ángulo del pilar zanja. Este ángulo es comúnmente despreciado en análisis 2D. Este ángulo normalmente toma valores de 64 a 71° (Cavieres et al, 2002)
3. Ángulo de visera: Este ángulo debe ser lo más cercano posible a 90° para evitar que el material quebrado genere esfuerzos sobre el pilar corona. Este ángulo varía entre 80 y 90°
4. Distancia entre bateas: Corresponde al apex menor, determinado por el diseño de la malla de extracción.
5. Altura del crown pillar: Dada por el diseño de la batea, según sea la distancia entre el nivel de extracción y hundimiento. La altura del crown pillar determinará la altura de la batea en el modelo.
6. Extremos laterales de la batea: La extensión lateral del modelo es igual a la distancia entre calles, más el ancho del apex superior del pilar corona.

$$\textit{Extensión del modelo} = Dc + ap \quad [10]$$

3.6.2 Selección del DFN a Utilizar

Una vez definida una geometría específica a estudiar, se definen los parámetros del Discrete Fracture Network.

Definir Dominio del DFN

El dominio del DFN es la zona donde se modelarán los cortes en la roca, los centros de los discos que representan los cortes del DFN se ubicarán dentro del dominio especificado. Debe elegirse un dominio que sea mayor al área que contiene el modelo de manera de asegurar que todo el bloque será subdividido.

Selección de Distribuciones de Probabilidad

Se definen distribuciones de probabilidad para la posición de los cortes, su tamaño y su orientación. La elección de las distribuciones de probabilidad afectará principalmente la forma de los bloques, la cantidad de bloques generados y la distribución de la curva granulométrica resultante: una distribución uniforme. El DFN generado en esta etapa sólo especifica los parámetros que definen los cortes a ser aplicados en el modelo, luego todos los cortes son generados por el sistema y aplicados secuencialmente al ejecutar el DFN.

3.6.3 Aplicación Del DFN

Seleccionar Bloque Interno De La Batea

Una vez se cuenta con el diseño de la batea y el DFN a utilizar, se selecciona el bloque interno, ocultando el resto del modelo (Figura 21a). El bloque interno considera el material a extraer de la batea y la altura de columna a estudiar, la cual es modelada proyectando verticalmente la sección superior de la batea.

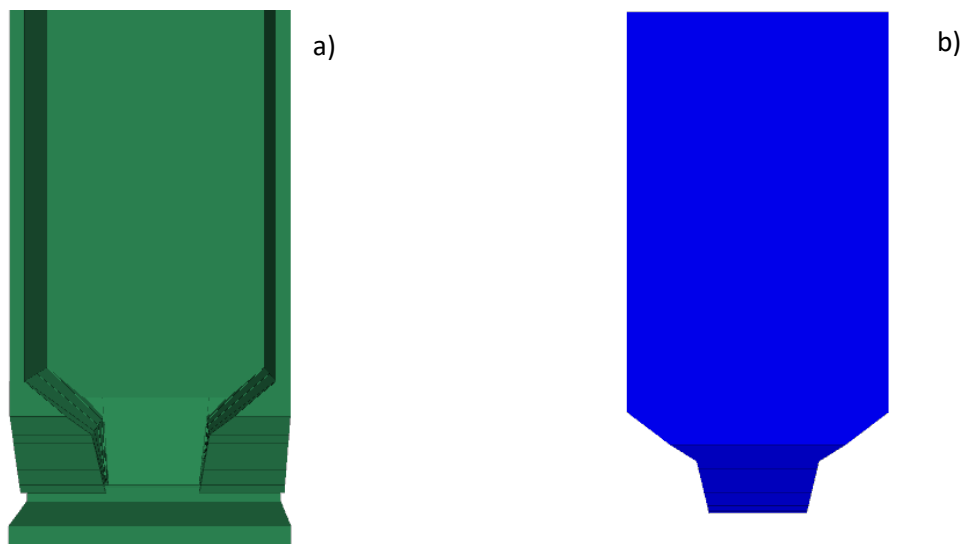


Figura 21: a) Diseño de la Batea y Columna de Extracción b) Bloque Complementario

La altura de la columna determinará la cantidad total de material a ser analizado. Es necesario crear esta columna sobre la batea ya que, de otra forma, el material generado por la subdivisión del bloque sería insuficiente para evaluar la posibilidad de colgaduras. Existirá un trade-off entre la altura de columna, y el tiempo de corrida del modelo ya que a mayor altura se generarán más bloques, y estos tendrán que desplazarse una mayor distancia para llegar a la base de la batea.

Aplicación del DFN sobre el Bloque Interno de la Batea

En esta etapa, se corta el bloque interno con el DFN definido anteriormente. La razón principal para utilizar un DFN es porque permite la manipulación de los cortes que serán aplicados en el sistema a través de la selección de la distribución de probabilidad para la ubicación y dirección de las fracturas. Desde la aplicación del DFN, el modelo pasa de tener 1 bloque, a tantos como definan las intersecciones de los contactos generados por el DFN, la muestra el resultado de aplicar un DFN sobre el bloque de la batea.

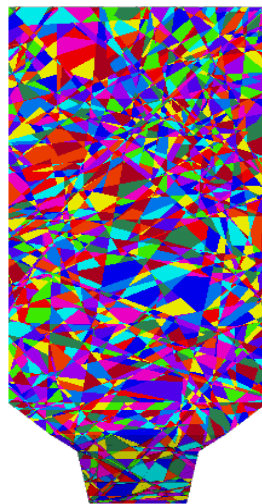


Figura 22: Aplicación del DFN sobre el bloque complementario

En esta etapa, se han definido los bloques que serán estudiados en el modelo, pero estos se encuentran completamente en contacto entre sí. Para poder lograr que se produzca el flujo, deberá aplicarse un método para generar porosidad en el modelo.

3.6.4 Aplicación del Factor de Encogimiento

La aplicación del factor de encogimiento consta de las siguientes etapas:

1. Importar archivo de bloques con los centroides.

2. Importar archivo de coordenadas de vértices de cada bloque.
3. Determinar factor de encogimiento de utilizar, con un valor de 0 a 1. Se comienza con un factor de 0.5
4. Aplicar el método especificado en “3.5.1 Fundamento”.
5. Generar un archivo que contenga las coordenadas de los vértices de los bloques encogidos.

3.6.5 Cargar Nuevo Set de Bloques en el Modelo

Para cargar el nuevo set de bloques, este es importado del archivo generado por el código de encogimiento. Al igual que el archivo de coordenadas que exporta 3DEC, en este nuevo archivo se define el ID de cada bloque, las caras del mismo, y las coordenadas de cada vértice que conforman cada una de las caras.

El conjunto de bloques original es reemplazado por el set de bloques encogidos. A partir de un mismo conjunto inicial, pueden generarse distintos sets encogidos, dependiendo del factor de encogimiento aplicado (Figura 23).

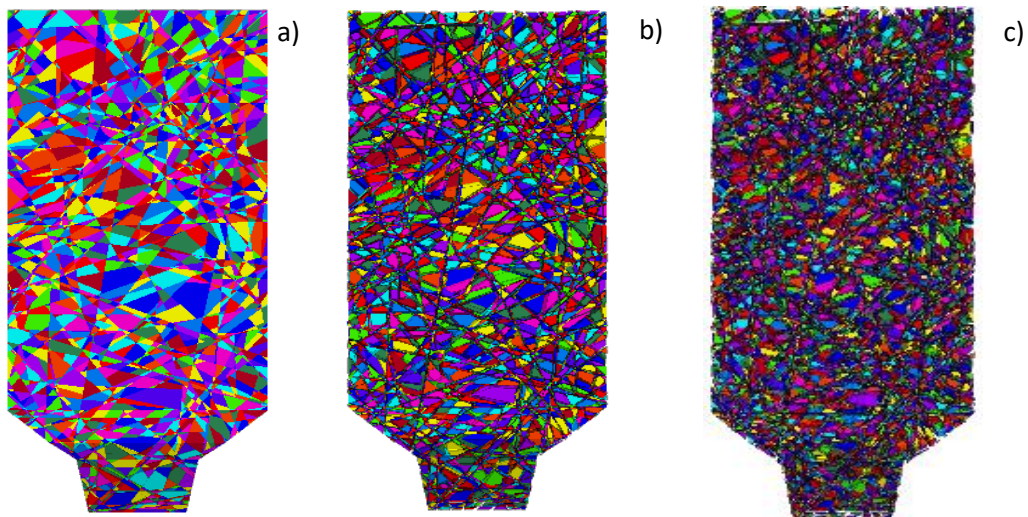


Figura 23: a) Set original de bloques, b) Disminución lineal en 30% c) Disminución lineal en 50%

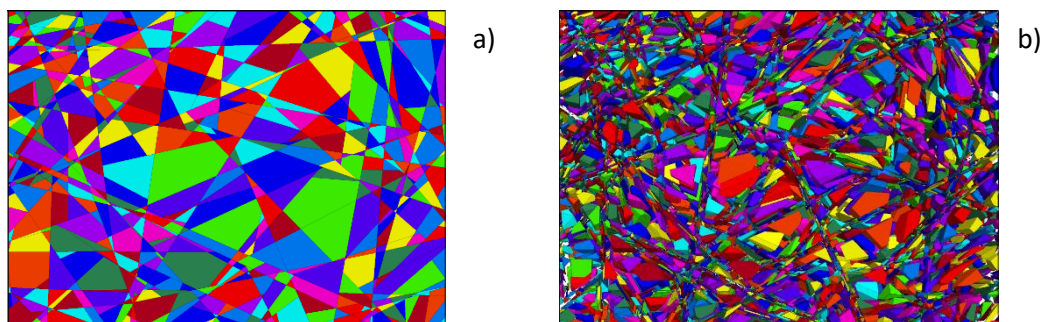


Figura 24: Corte Transversal a) Set Original de bloques, b) Disminución lineal en 50%

3.6.6 Comprobación de la Curva Granulométrica

Para la aplicación de esta metodología es importante contar con una curva granulométrica contra la cual los resultados serán comparados.

El algoritmo de encogimiento permite el desplazamiento de la curva granulométrica generada en la simulación hacia la izquierda (hacia los tamaños menores), . Sin embargo, no se afecta la forma de la misma, la cual estará dada por la distribución de los tamaños dentro de esta. Por esta razón, las curvas resultante y objetivo podrían no presentar la misma forma, implicando que son diferentes en cuanto a su graduación y su uniformidad. Una pendiente baja en la curva granulométrica indica mayor uniformidad de tamaños y mejor graduación, es decir, todos los tamaños aparecen representados en medidas similares.

Para efectos de esta metodología, aquellas curvas que presenten formas similares serán llamadas compatibles. Al ser la curva experimental y objetivo compatibles, el encogimiento de bloques bastará para calibrar la curva experimental hacia la curva objetivo.

Dependiendo de la compatibilidad de la forma de la curva generada y la curva objetivo, se debe tomar una decisión sobre cómo ajustarlas. Si las curvas son compatibles, la elección del factor de encogimiento adecuado será suficiente para lograr la superposición de las curvas. Por otra parte, si las curvas no son compatibles, se realiza una inspección visual y se ajustan las curvas en su punto medio (entre P50 y P60), de modo de privilegiar el ajuste en el centro de la distribución

La Figura 25 muestra curvas granulométricas experimentales y objetivo que presentan distintas distribuciones:

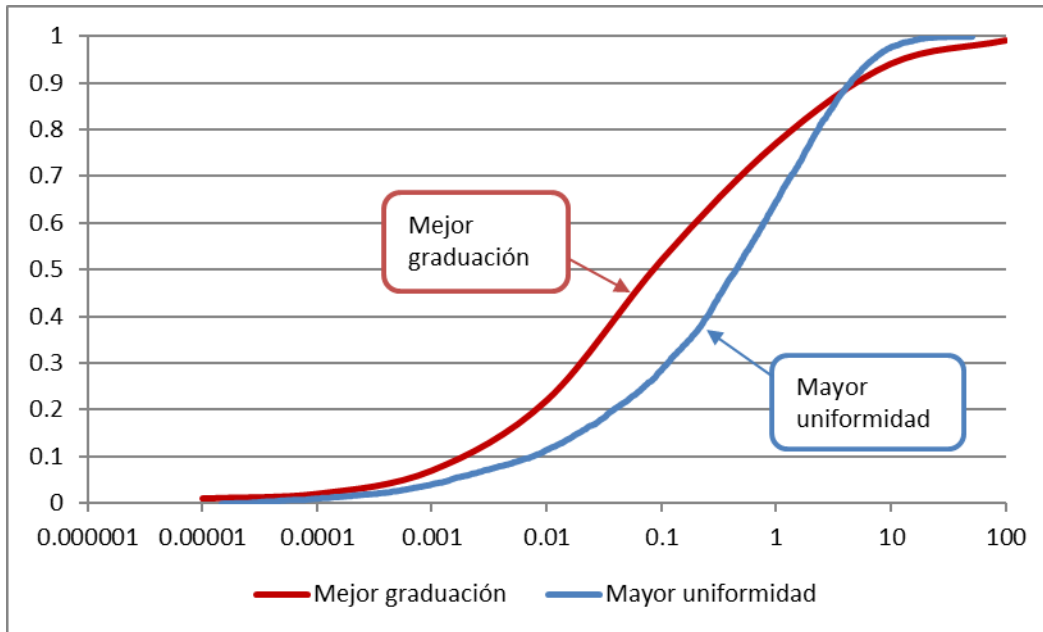


Figura 25: Comparación de curvas granulométricas. Una curva bien graduada representa cada tamaño en proporciones similares.

En la Figura 26 se observan la curva resultado superpuesta con la curva objetivo, la curva resultado fue encogida de modo de hacer coincidir su P60 con el de la curva objetivo. En este caso la curva resultado subestima el tamaño máximo de los gruesos en comparación con la curva objetivo, pero genera una mejor aproximación del tamaño promedio de los bloques.

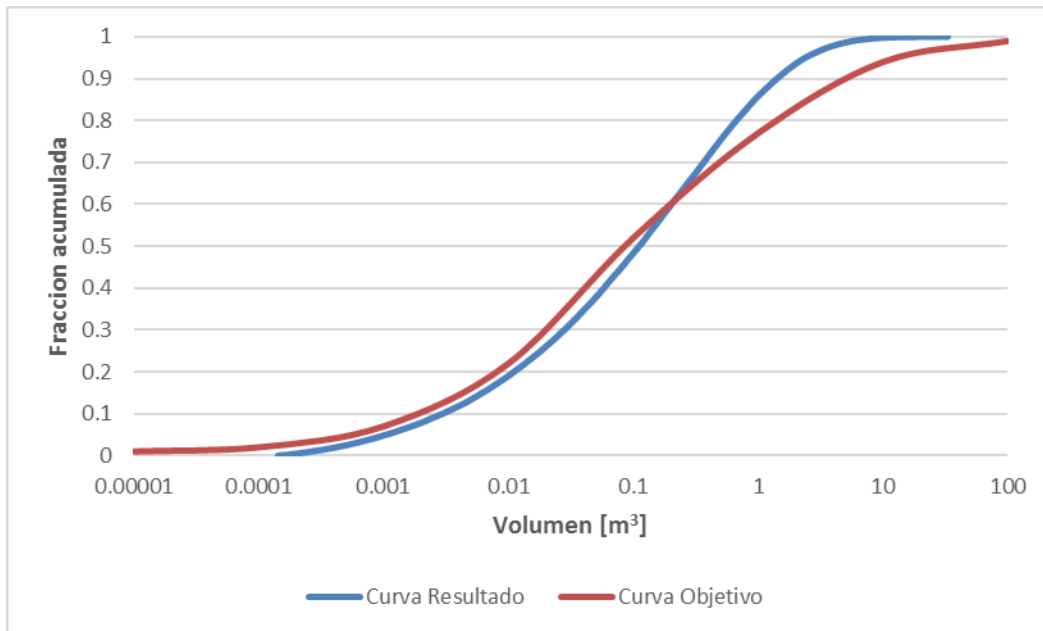


Figura 26: Comparación de Curva Resultado y Objetivo.

3.6.7 Definir Parámetros del modelo

Selección de Modelos Constitutivos

Una vez cargados los bloques, deben seleccionarse los modelos constitutivos de bloques y contactos. Considerando que el objetivo es analizar la respuesta de los bloques en caída libre, se utilizará un modelo constitutivo isotrópico homogéneo para los bloques, de modo de simplificar sus propiedades. Para los contactos, se utilizará el modelo constitutivo Coulomb Slip, mencionado en “3.3.2 Modelos Constitutivos de Discontinuidades”. En este trabajo se utilizó la convención de unidades MKS. La distinción de unidades es importante ya que 3DEC puede utilizar cualquier sistema de unidades que sea consistente, y no chequea las unidades de cada campo, quedando esto a responsabilidad del usuario. (3DEC 5.0 User Manual).

A continuación, se detallan los parámetros requeridos por el modelo:

Modelo Constitutivo de Bloques

Un modelo Isotrópico, homogéneo requiere:

$$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]: \text{Densidad de la Roca}$$

$$E \left[\frac{GPa}{m} \right]: \text{Módulo de Young de la Roca}$$

$$\nu = \text{Razón de Poisson}$$

En este caso, sin embargo, ya que se considerarán bloques rígidos, el único valor relevante es la densidad ρ . Para todos los experimentos de este trabajo, el valor considerado es de $2700[\text{kg}/\text{m}^3]$.

Modelo Constitutivo de Discontinuidades

Como se mencionó previamente, el modelo utiliza el Mohr-Coulomb Slip Joint Model para sus discontinuidades, el cual requiere ingresar los siguientes parámetros:

$$JK_N \left[\frac{Pa}{m} \right]: \text{Rigidez normal de las discontinuidades}$$

$$JK_S \left[\frac{Pa}{m} \right]: \text{Rigidez de corte de las discontinuidades}$$

$$c \left[\frac{Pa}{m} \right]: \text{Cohesión de las discontinuidades}$$

$$T[Pa]: \text{Resistencia normal máxima}$$

ϕ [°]: *Ángulo de fricción de la discontinuidad*

Los parámetros de rigidez normal y de corte relacionan el esfuerzo necesario para desplazar una unidad, en la dirección normal o lateral. En ausencia de datos de terreno, se consideran los siguientes valores para JK_N y JK_S , tomando como base los valores utilizados en los estudios de flujo de Taghavi & Pierce(2011). Para efectos de esta metodología, los bloques comienzan su movimiento sin contacto entre ellos, por lo cual no existe una cohesión que superar, por lo que el facto se fija en cero.

$$JK_N = 10e^9 \left[\frac{Pa}{m} \right]$$

$$JK_S = 10e^8 \left[\frac{Pa}{m} \right]$$

Para los efectos del modelo, la razón JK_N/JK_S , es 10.

Los parámetros de cohesión y ángulo de fricción son los correspondientes al modelo falla de Mohr-Coulomb dado por

$$\tau = c + \sigma_N \tan \phi \quad [10]$$

Donde,

σ_N : *Esfuerzo normal aplicado sobre la discontinuidad*

La elección del ángulo de fricción de los contactos influencia directamente el flujo del modelo, y debe ser seleccionada según el tipo de roca. Se seleccionó el valor de 35°, basándose en la información de Franklin y Dusseault(1989), la cual reporta que para rocas de grano grueso, el ángulo de fricción de las discontinuidades está entre 33-48°.

Los parámetros de cohesión y resistencia a la tracción representan la resistencia inicial de la discontinuidad. Cuando el sistema detecta falla, tensional o de corte, asigna automáticamente valor cero a estos parámetros de modo que el comportamiento de la discontinuidad cambia abruptamente con una reducción su resistencia. En este trabajo tanto la cohesión como la resistencia máxima a la tensión se fijaron en cero. Esto se interpreta como que las fracturas están en movimiento y su resistencia al desplazamiento tangencial sólo depende del confinamiento.

Aceleración de Gravedad

Se considera una aceleración de gravedad actuando verticalmente, paralela al eje z.

$$g = 9.8[m/s^2]$$

Esta será la única fuerza actuado sobre los bloques libres del modelo.

Esquema de Amortiguamiento

A continuación, se discutirán más a fondo los parámetros de amortiguamiento, cuál es su propósito y qué fue lo que se decidió utilizar para la elaboración del modelo.

Para simular de forma correcta el comportamiento de los bloques en el modelo, es necesario incluir algún mecanismo de amortiguamiento, que permita la disipación de la energía, de lo contrario, los bloques no dejarán de rebotar entre sí, distorsionando la respuesta del modelo. Debido a que se está estudiando un problema de tipo dinámico, el esquema de amortiguamiento incorporado en 3DEC por defecto no puede ser utilizado. Esto es debido a que se trata de un procedimiento de escalamiento másico, el cual está diseñado para mejorar el tiempo de corrida, al disminuir la dispersión en el rango de masas de los bloques. Para hacer esto, el programa artificialmente aumenta la masa de los bloques más pequeños y disminuye la de los mayores. Cuando los desplazamientos relativos son muy pequeños, como en el caso de un problema cuasi estático, la modificación de las masas en la forma antes mencionada afecta de forma muy pequeña el resultado. Sin embargo, en un problema dinámico donde hay desplazamientos grandes, modificar las masas de esta forma entrega un resultado alejado de la realidad.

Otro punto para considerar es que el esquema de amortiguamiento normalmente utilizado es de tipo viscoso y, por lo tanto, proporcional a la velocidad. Esto implica que el amortiguamiento será dependiente de la frecuencia. Sin embargo, se sabe que, en rocas y suelos, el amortiguamiento natural en procesos dinámicos presenta histéresis, es decir, el estado presente del sistema depende de sus estados anteriores, y es independiente de la frecuencia. El esquema de amortiguamiento del modelo debería ser capaz de reproducir esta característica. La dificultad, está en cómo modelar este comportamiento, sin tener que modelar toda la historia de desplazamientos de cada bloque.

El esquema más apropiado es utilizar el llamado amortiguamiento de Rayleigh en el cual se genera una matriz de amortiguamiento total, suma de una matriz de amortiguamiento proporcional a la masa(M) y una proporcional a la rigidez de las discontinuidades(K).

$$C = \alpha M + \beta K$$

donde,

α : Constante proporcional a la masa

β : Constante proporcional a la rigidez de los contactos

C: Matriz de amortiguamiento total

M: Matriz de amortiguamiento proporcional a la masa

K: Matriz de amortiguamiento proporcional a la rigidez de las discontinuidades

Para un sistema de múltiples grados de libertad, la razón de amortiguamiento crítica está dada por la ecuación 11:

$$\alpha + \beta\omega_i^2 = 2\omega_i\varepsilon_i \quad [11]$$

El factor ξ_i es llamado fracción de amortiguamiento crítico del modo i con frecuencia angular ω_i (Itasca, 2013)

La Figura 27, indica que, a menor frecuencia angular, el tipo de amortiguamiento predominante será el proporcional a la masa, mientras que, a altas frecuencias, dominará la parte proporcional a la rigidez de las discontinuidades() (Itasca, 2013).

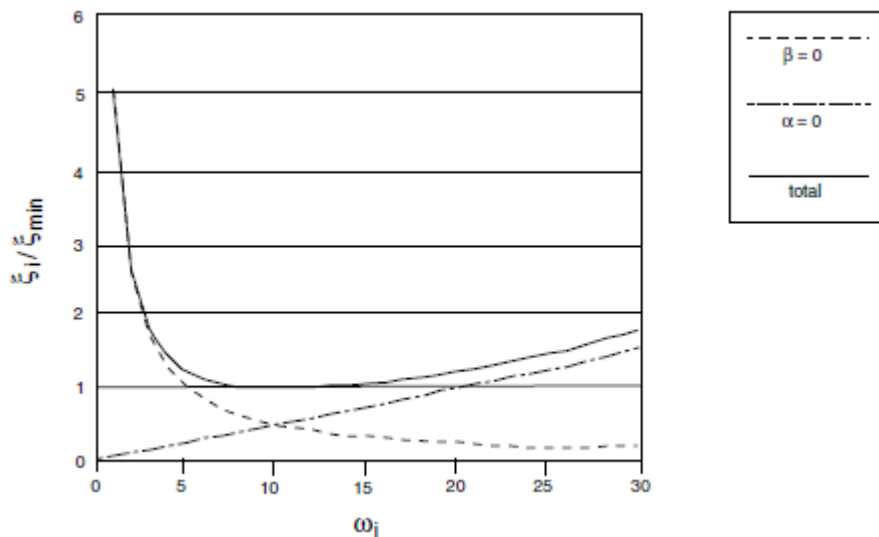


Figura 27: Esquema de amortiguamiento Itasca(2013, Manual de usuario 3DEC 5.0)

El beneficio de utilizar este esquema es que, al combinar ambos tipos de amortiguamiento, se genera una zona en un rango de frecuencias en las cuales el amortiguamiento es independiente de estas.

Para el estudio de casos en donde se observa caída libre, lo más apropiado es utilizar un esquema de amortiguamiento proporcional a la rigidez del sistema. Esto es, debido a que un amortiguamiento fuerte proporcional a la masa podría eventualmente distorsionar el comportamiento de la caída libre. La desventaja de este procedimiento es que el amortiguamiento proporcional a la rigidez afecta el paso de tiempo (timestep) del sistema, mientras que el amortiguamiento proporcional a la masa lo deja intacto.

El problema de la caída de los bloques dentro de la batea es, ciertamente, un problema dinámico, sin embargo, en este problema en particular no es de interés la respuesta dinámica, solo debe formarse la pila de forma realista ya que posterior a la formación de la pila, el problema se vuelve en la práctica, un problema cuasiestático donde los bloques se encuentran en contacto entre sí, y deslizan bajo la acción gravitacional hacia el espacio libre generado por la extracción de material. Debido a lo anterior, se decidió aplicar un amortiguamiento proporcional a la masa.

A continuación, se detalla el proceso utilizado para determinar los parámetros a utilizar en el esquema de amortiguamiento:

Dado que solo se consideró amortiguamiento proporcional a la masa, se tiene que $\beta=0$, por tanto:

$$\alpha = 2\omega_i \varepsilon_i \quad [12]$$

con lo que se tiene que:

$$C = \alpha M \quad [13]$$

Dicha frecuencia, debe idealmente encontrarse dentro del rango de frecuencias para el cual el nivel de amortiguamiento es constante, es decir, ubicarse en el rango donde el amortiguamiento es independiente de la frecuencia. Como se explicó anteriormente, este se encuentra en una relación de 1:3 en torno a una frecuencia central, la cual fue determinada a través de un experimento sencillo: Se crearon dos bloques de forma cúbica, cuyo volumen fuera equivalente a los de los bloques de mayor y menor tamaño del modelo, respectivamente (Figura 28). Hecho esto, se los posicionó sobre una placa y se activó la gravedad. Se crearon a la vez, gráficos de distancia vs tiempo para un vértice de cada bloque (Figura 29).

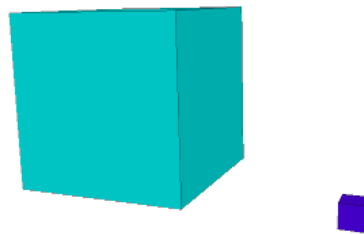


Figura 28: Experimento frecuencias de vibración, Bloques sobre placa. Elaboración propia

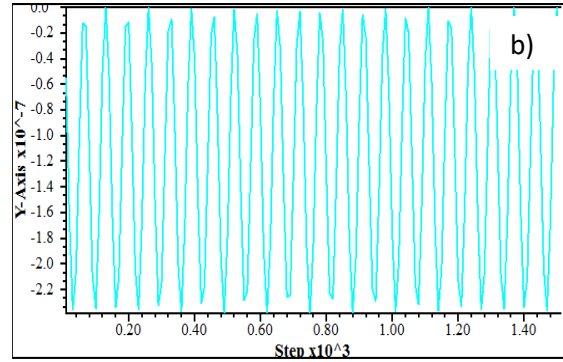
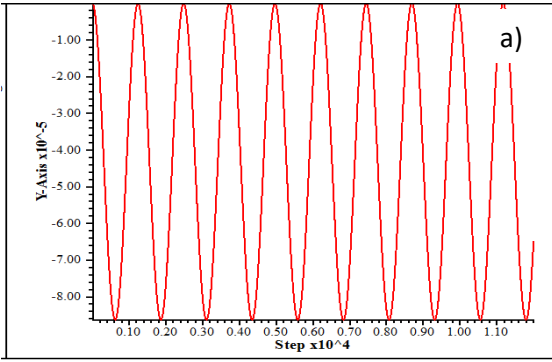


Figura 29:Frecuencias de oscilación a)bloque grande ,b) bloque pequeño

Se observó el movimiento oscilatorio y se determinó la frecuencia para cada uno de estos dos casos extremos. Teniendo las frecuencias, se elige para el modelo, una frecuencia que se encuentre dentro de ese rango. Para definir el valor exacto, se tomó un bloque de tamaño representativo de la muestra. Se creó una placa bajo este y se lo dejó caer bajo la acción gravitacional. Se generó y graficó un historial de desplazamiento vs tiempo en el que se observó el comportamiento del bloque al rebotar, utilizando distintas frecuencias centrales de amortiguamiento (Figura 30) Se consideró que una roca no debería rebotar más de aproximadamente tres veces, y que la altura alcanzada en cada uno de dichos rebotes debería disminuir de forma notoria respecto del anterior. Es decir, se necesita que la disipación de energía sea alta.

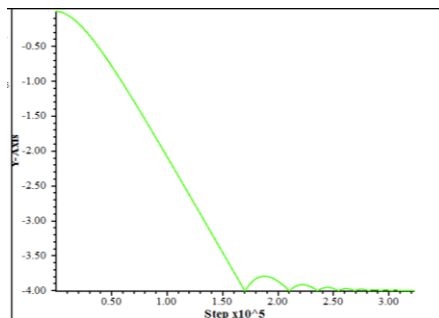
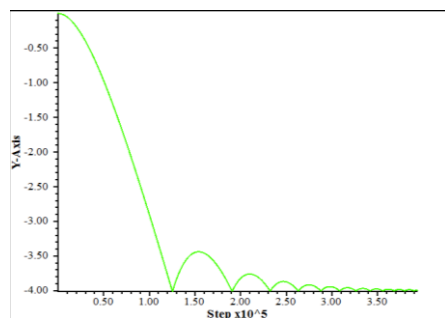
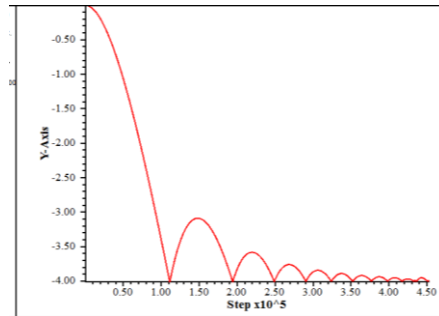
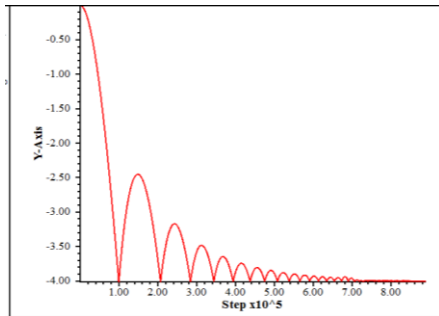


Figura 30:Desplazamiento vs Tiempo según frecuencia a)3hz, b)5hz,c)7hz ,d)12hz

En esta etapa se debe tomar una decisión por parte del modelador, ya que un amortiguamiento excesivo generará problemas como una eliminación completa de los rebotes, situación igualmente poco realista a la de rebote excesivo, y un tiempo de corrida demasiado extenso. Por otra parte, un insuficiente amortiguamiento provocará problemas en la respuesta del material ya que, sin un esquema de disipación de energía, será muy difícil modelar la formación de colgaduras ya que el movimiento constante de los bloques impedirá la formación de un arco mecánico.

Debido a esto, deberá escogerse un nivel de amortiguamiento que reúna las características antes mencionadas:

- Frecuencia dentro del rango según extremos de la distribución granulométrica.
- Rebote adecuado respecto de la cantidad de energía disipada.
- Nivel de amortiguamiento que no interfiera de manera importante con el tiempo de corrida de la simulación.

3.6.8 Formación de la Pila

El factor principal para poder considerar que el modelo se ajusta al comportamiento real de la roca fracturada descendiendo por la batea, es la capacidad de formar una pila de material. La Figura 31, muestra un ejemplo de una pila formada. Los bloques en la parte inferior de esta han dejado de moverse.

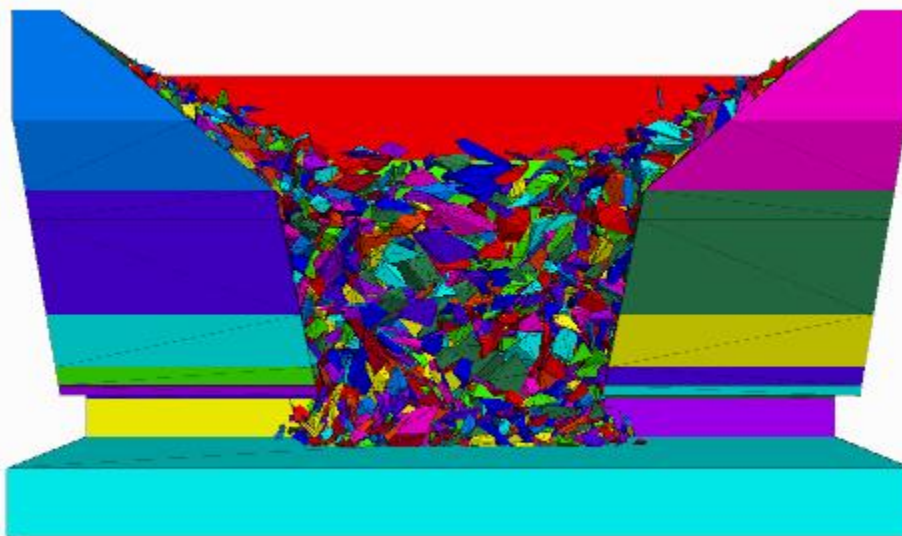


Figura 31:Formación de pila de material

A diferencia de códigos de elementos finitos que entregan una solución al terminar de ejecutarse, 3DEC calcula las posiciones de los bloques en cada paso de tiempo, por lo que cada corrida no tiene una solución final definida, debido a esto, debe establecerse alguna condición para terminar la corrida. Para considerar que la pila ha alcanzado su forma final, el criterio considerado es que la velocidad de los bloques en la vecindad de la zanja de extracción sea menor a 0.02 [m/s].

3.6.9 Extracción

El proceso de extracción consiste en, posterior a la formación de una pila estable de material, eliminar los bloques de la zanja, de modo de permitir el flujo de los bloques. El material es eliminado de forma instantánea y el proceso de formación pila estable y extracción de material continúa hasta la formación de una colgadura.

La eliminación de material se realiza asignando las coordenadas a una región del modelo, de la que se eliminarán aquellos bloques cuyos centroides estén dentro de esta. Para este trabajo, la región a ser eliminada se definió como: x [25, 39.26], y [6,10] z: [0,4]. Esto significa que todo bloque que se encuentre en la zanja (dada por sus coordenadas z e y) y cuya coordenada x se encuentre entre 25 y el borde del modelo, será eliminado. La masa y volumen de material extraído en cada etapa dependerá de la densidad del bloque y la porosidad generada por el modelo.

3.6.10 Comprobación del Comportamiento del Modelo

Ángulo de Reposo de la Pila

El ángulo de reposo de la pila se mide con la herramienta Planes de 3DEC (Figura 32), la cual posiciona un plano, anclándolo a los vértices de bloques particulares. El sistema a entrega las siguientes medidas respecto del plano: Dip, Dip Direction, Vector normal al plano, y Coordenadas de cada uno de los puntos que definen el plano. El Dip del plano indicará el ángulo de la pila.

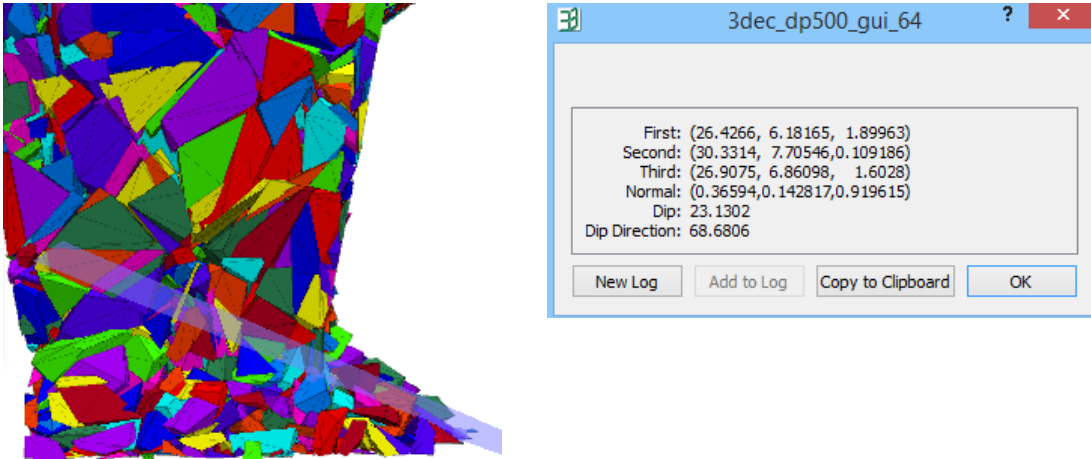


Figura 32: Herramienta Plano en Pila de la Batea y la información que provee.

Determinación de la Densidad Aparente

El proceso para la determinación de la densidad aparente del modelo consta de tres etapas:

1. Buscar bloques cuyos centroides se encuentren dentro de un volumen de $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$. Al seleccionar bloques a través de un rango de coordenadas, 3DEC activa aquellos bloques cuyos centroides se encuentren en el rango seleccionado (Figura 33a). La cantidad de bloques seleccionados a través de este proceso variará según la disposición de los bloques y sus centroides.
2. Cortar conjunto de bloques a un volumen de $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ (Figura 33b).
3. Determinar masa total contenida en el volumen de 1 m^3 . Su valor será igual a la densidad aparente medida.

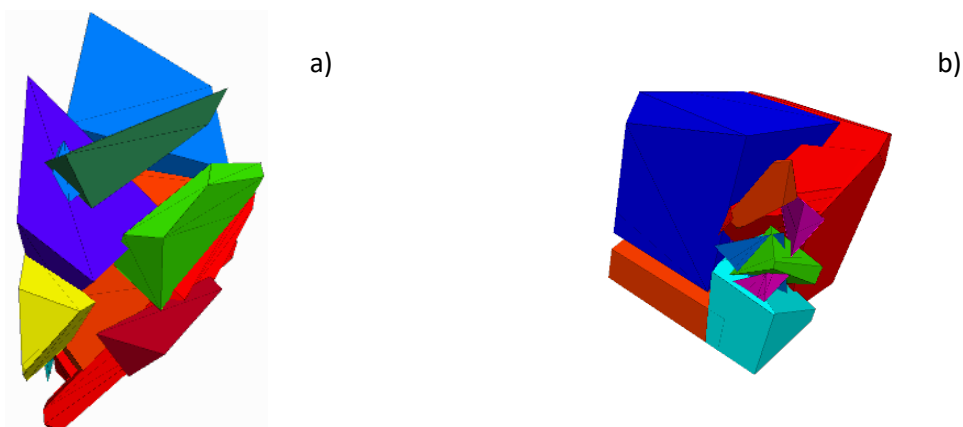


Figura 33:a) Bloques cuyos centroides se ubican dentro del Volumen $2 \times 2 \times 2$. $x: [19,21]$, $y: [7,9]$, $z: [3,5]$ b) Bloques cuyos centroides se ubican dentro del Volumen $1 \times 1 \times 1$ $x: [19.5,20.5]$, $y: [7.5,8.5]$, $z: [3.5,4.5]$

4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA: FORMACIÓN DE COLGADURA EN BATEA

Se aplicó la metodología propuesta en la sección anterior, a un diseño basado en la literatura. A continuación, se desglosa el proceso paso por paso.

4.1 Diseño de la Batea

El diseño de la batea a estudiar fue tomado de Cavieres et al.(2005) y generado en 3DEC. La batea seleccionada tiene 20 metros de alto, mientras que el bloque se extendió verticalmente 60 metros, a fin de generar suficiente material. La Tabla 7 muestra los parámetros de diseño de la batea. También se definió una curva granulométrica objetivo basada en el trabajo de López(2013), cuyo comportamiento se espera reproducir a través del modelo (Figura 34).

Debido a que la exigencia computacional aumenta rápidamente con el número de bloques, se definió aprovechar la simetría del modelo con respecto al plano YZ. Por lo tanto, el modelo fue dividido en dos, y el proceso fue aplicado a la mitad de la batea (Figura 35).

Tabla 7:Parámetros de la Batea

Dimensiones del modelo	
Altura de batea[m]	20
Angulo ápex menor [°]	64.4
Angulo ápex mayor [°]	40
Angulo de visera [°]	70
Altura de visera [m]	8.23

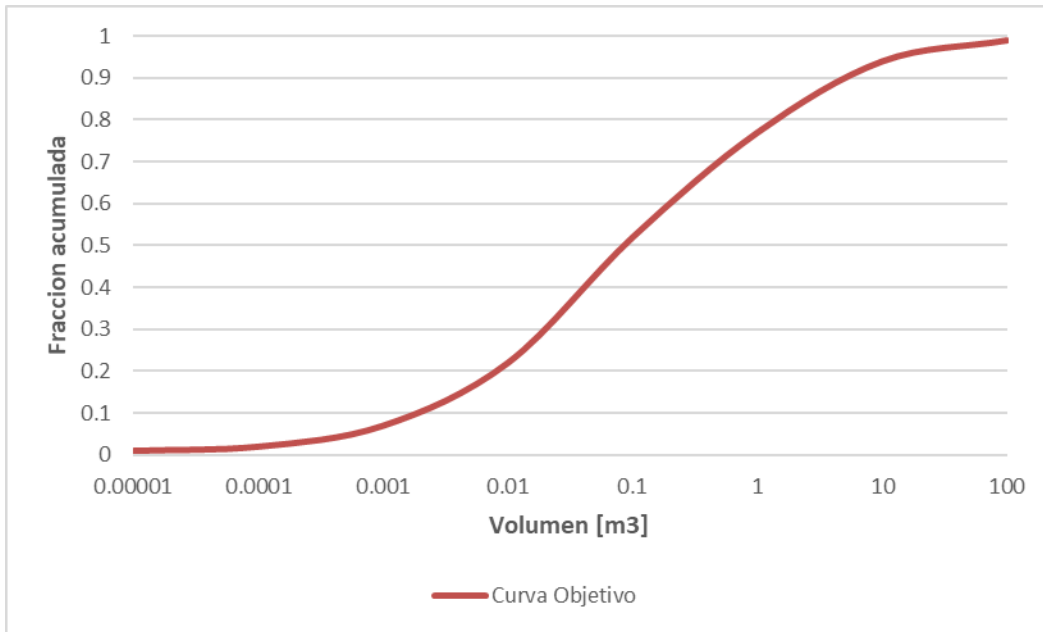


Figura 34: Curva granulométrica objetivo

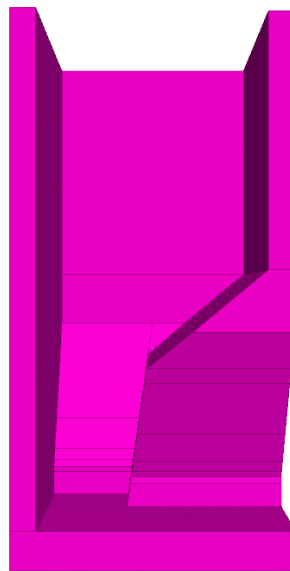


Figura 35: Vista lateral de la batea (60m)

4.2 Generación de la Curva Granulométrica

En el DFN utilizado, la distribución de tamaños corresponde a Ley de Potencia, mientras que la posición y la orientación fueron consideradas uniformes. Distribución de tamaños:

$$n(l) = \alpha \cdot l^{-a} \quad [14]$$

donde:

$$\alpha = 3$$

$$a = 0.5$$

$$l_{min} = 1$$

$$l_{max} = 100$$

El DFN fue creado utilizando el siguiente código:

```
" dfn template create name 'dfn_template' &  
    id 1 &  
    size powerlaw 0.5 slimit 1 100 &  
    position uniform &  
    orientation uniform  
  
dfn generate template name 'dfn_template' density 3 "
```

Los valores para la definición de la curva granulométrica se determinaron a partir de una serie de experimentos para identificar las combinaciones de parámetros que fueran útiles para la generación de bloques en el modelo, resultando en un factor alfa de 0.5, y una densidad de 3.

La Figura 36a) y b) muestra el bloque original, antes y después de la aplicación del DFN. Luego de este proceso, el número de bloques del modelo se vio incrementado de 1 a 32.750

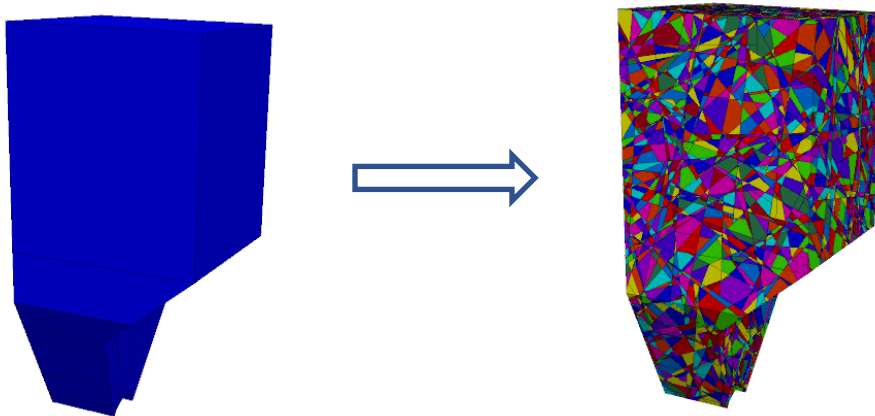


Figura 36: a) Bloque interno de batea. b) Bloques cortados utilizando el DFN

4.2.1 Descripción de la Curva Resultante

La Figura 37 muestra la curva granulométrica que se describe utilizando la metodología expuesta por Kalenchuk et al. (2006). Se observa que la distribución

de tamaños la ubica a la derecha de la curva objetivo. Esta es una condición deseable y necesaria para el modelo. Por un lado, la curva resultante debe estar compuesta de bloques de mayor tamaño que la curva objetivo para poder aplicar el algoritmo de encogimiento. Una mayor cantidad de cortes generará curvas con mayor cantidad de bloques, cada uno de ellos de menor tamaño. Sin embargo, el control directo del tamaño de los bloques es provisto por el algoritmo de encogimiento.

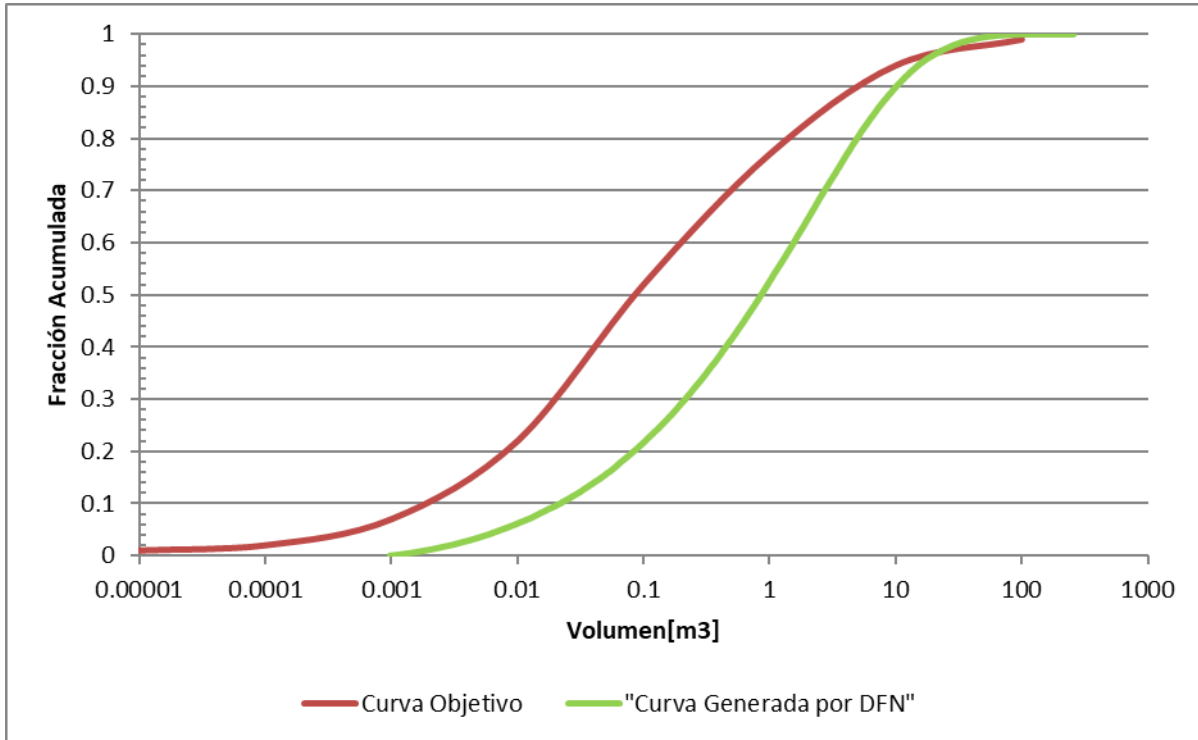


Figura 37: Curva granulométrica generada por DFN

En términos de la distribución de formas en cada rango de tamaño (Figura 38), los elementos planos y alargados representan la gran mayoría de los bloques. Esto es consistente con el hecho de que estos fueron creados aplicando cortes aleatorios en el modelo. La intersección de cortes subparalelos, necesariamente dará lugar a bloques puntiagudos, llamados Elongated en la clasificación de Kalenchuk et al. (2006). El resto de las formas se ve representada en proporción relativamente similar: Cúbicas (“Cubic” – C), Cúbicas Elongadas (“Elongated Cubic” – EC), Cúbicas aplanadas (“Platy Cubic” – PC) y Elongadas Aplanadas (“Elongated Platy” – EP). La única forma que se ve subrepresentada es la forma Aplanada (“Platy” – P), pues esta forma implica caras planas, pero con todos sus vértices a distancias similares del centro, como el caso de un tetraedro.

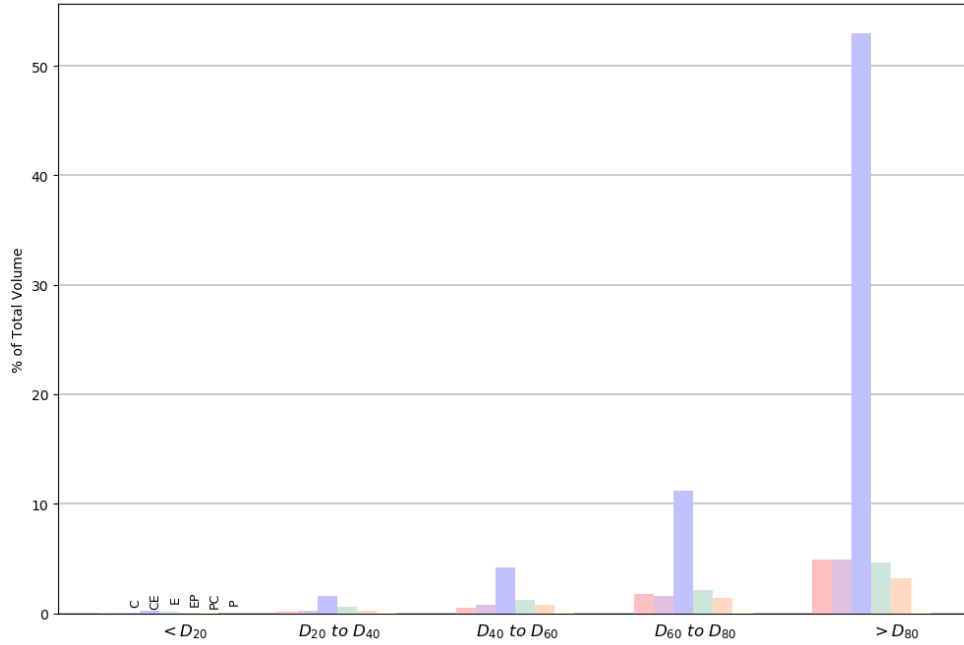


Figura 38: Distribución de formas en la curva granulométrica estudiada

La representación visual (Figura 39), indica una gran concentración de bloques con altos valores de los factores α y β . Consistente con la observación de una alta presencia de bloques alargados y puntiagudos.

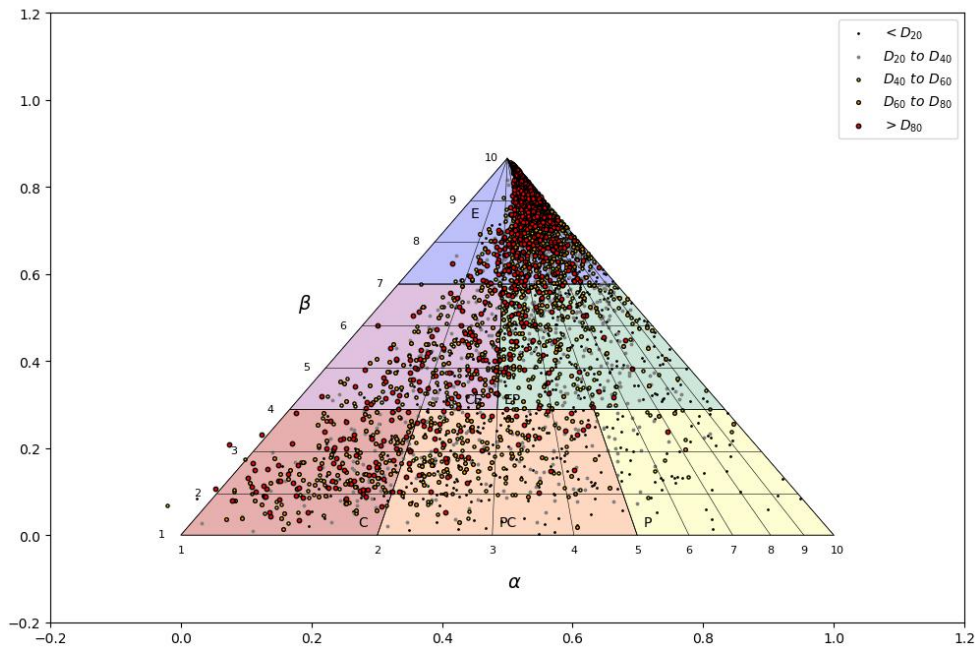


Figura 39: Diagrama de factores para la curva granulométrica generada

4.3 Aplicación de Factor de Encogimiento y verificación de la curva granulométrica

Las coordenadas de los bloques fueron exportadas de 3DEC y se aplicó un factor de encogimiento de 50% a los bloques(Figura 40). Los bloques resultantes disminuyeron su tamaño en un 87.5%, sin verse alterada su forma. Se observa que, según lo esperado, la nueva curva granulométrica corresponde a un desplazamiento hacia la izquierda de la curva original, sin modificarse la forma de la curva, indicado que la distribución de los tamaños se mantuvo a pesar del escalamiento.

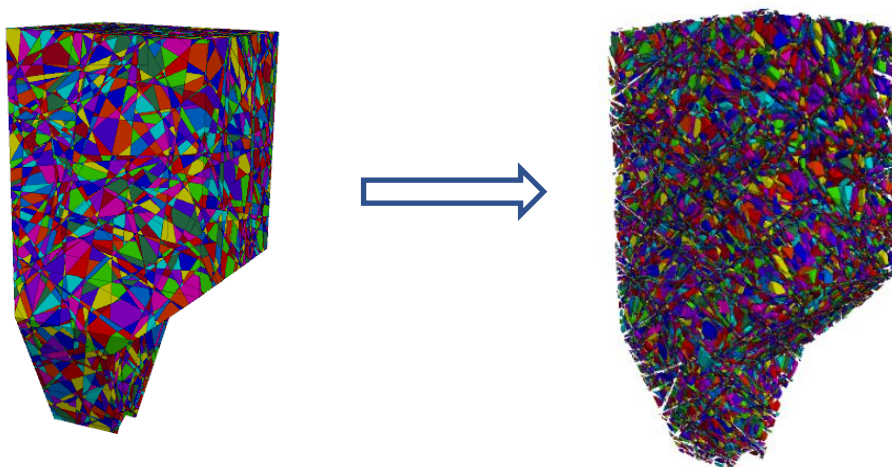


Figura 40: Bloques luego de la aplicación de algoritmo de encogimiento

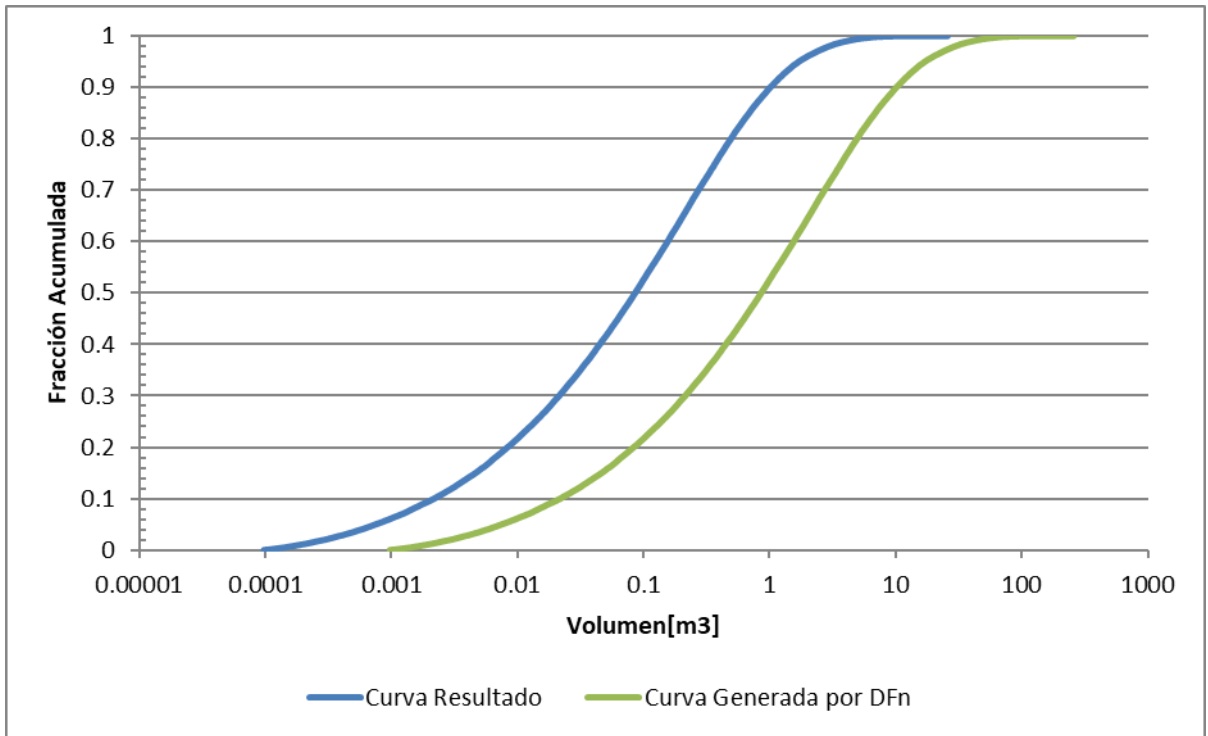


Figura 41: Curvas granulométricas asociadas al modelo. a) Previo a encogimiento b) Post encogimiento

Tabla 8: Descripción de las curvas pre y post encogimiento

Fracción pasante	Curva Pre-Encogimiento	Curva Post-Encogimiento
P20	0.08	0.01
P40	0.29	0.03
P60	0.73	0.08
P80	1.78	0.2
P100	36.55	3.4

Se generó la curva granulométrica asociada al DFN, la curva obtenida fue graficada junto a la curva objetivo, y puede observarse en la Figura 42, más abajo. Se observa que la curva obtenida se ajusta a la curva objetivo en el centro de la distribución (P50). Comparada con la curva objetivo, la curva resultante subestima los gruesos, y no alcanza un tamaño máximo comparable con el de la curva objetivo.

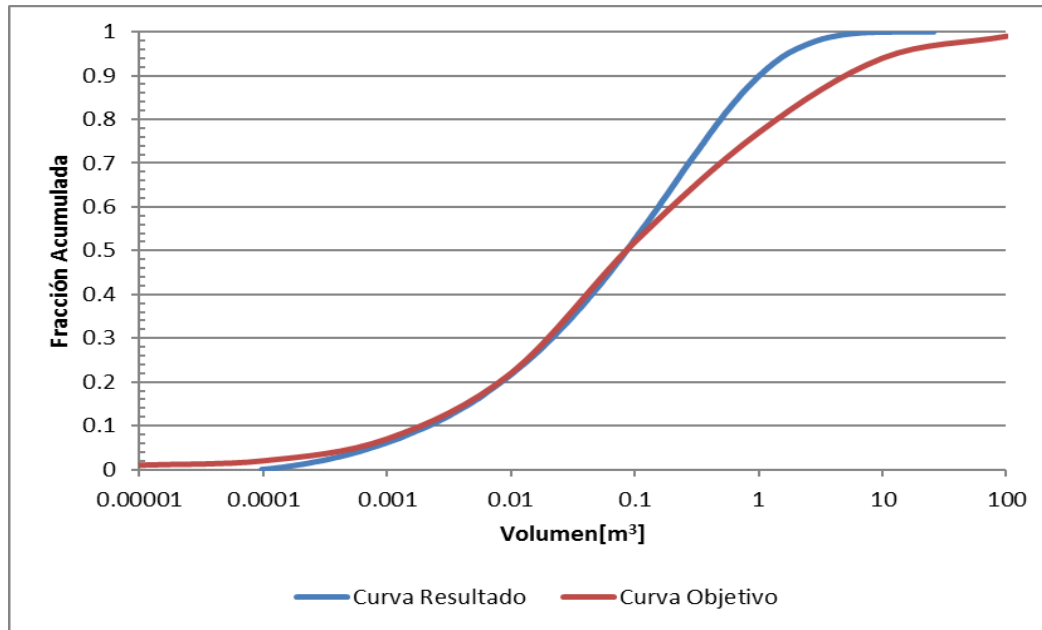


Figura 42: Curvas granulométricas, obtenida vs objetivo

4.5 Parámetros del Modelo

Se definieron los parámetros de amortiguamiento de Rayleigh (frecuencia central y fracción de frecuencia crítica) de acuerdo a los resultados del experimento detallado en “Esquema de Amortiguamiento”. Para disminuir el tiempo de corrida del modelo, antes de correr se aplicó un filtro eliminando todos aquellos bloques con un volumen menor a 10^{-2} m^3 .

Tabla 9: Parámetros del modelo

Parámetros del modelo	
Densidad	2700 [kg/m ³]
Rigidez normal de las discontinuidades (kn)	1e9 [Pa/m]
Rigidez de corte de las discontinuidades (ks)	1e8 [Pa/m]
Ángulo de fricción de las discontinuidades	35 [deg]
Amortiguamiento de Rayleigh: Frecuencia central	7 [Hz]
Amortiguamiento de Rayleigh: Fracción de frecuencia crítica	0.05

4.6 Formación de la Pila & Extracción

La Figura 43, muestra el proceso de formación de la pila. Se observa que los vacíos creados por el DFN se van siendo ocupados por material a medida que este fluye.

Este proceso consume mucho poder de cómputo, pues cada bloque del modelo se desplaza una distancia considerable. Puede observarse que al caer los bloques, estos interactúan con las paredes de la batea y con otros bloques. Cuando finalmente se forma la pila, la forma del DFN que dio origen al conjunto de bloques ya no puede ser distinguida en el modelo.

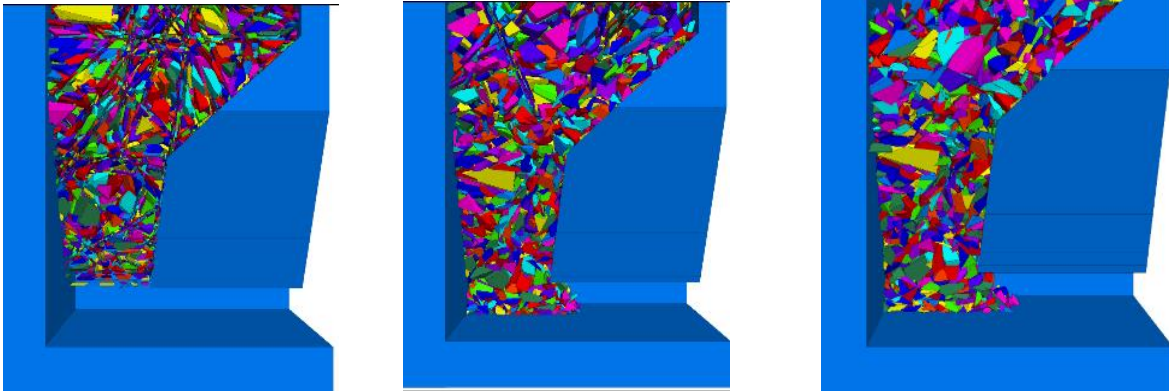


Figura 43: Proceso de formación de la pila

4.7 Evaluación de Resultados del Modelo y Discusión

4.7.1 Estimación de la Pendiente de la Pila

El ángulo de la pila fue medido luego de la formación de esta, posterior al encogimiento de bloques y previo al proceso de extracción (Figura 44), alcanzando un valor de 47° .

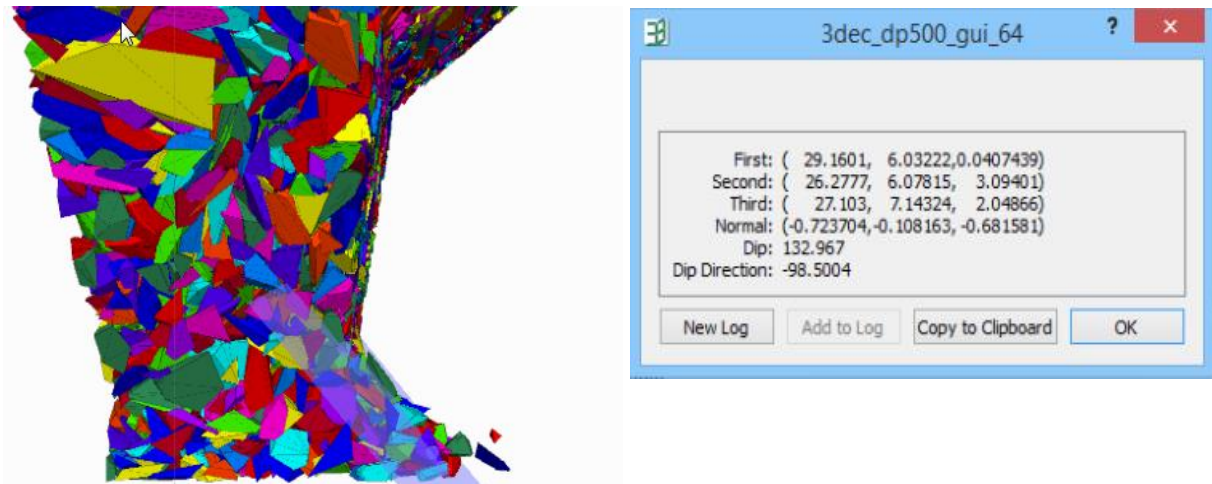


Figura 44: Medición del ángulo de la pila

4.7.2 Densidad Aparente

La densidad aparente fue calculada según el proceso descrito en la sección “Determinación de la Densidad Aparente”. Se seleccionó un volumen de $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$ en las coordenadas x [19,21] y : [5,7] , z [5,7]: lo cual activa todos los bloques cuyos centroides caen dentro de este espacio.

La selección de bloques por los centroides selecciona los bloques completos, debido a esto, posterior a la selección se aplicaron 6 cortes, de manera de obtener con un cubo de $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$. Finalmente, la densidad aparente corresponderá la masa contenida en el espacio de 1 m^3 . La masa total obtenida fue de 1703.89 [kg], obteniendo una densidad de 1.7[ton/m³]

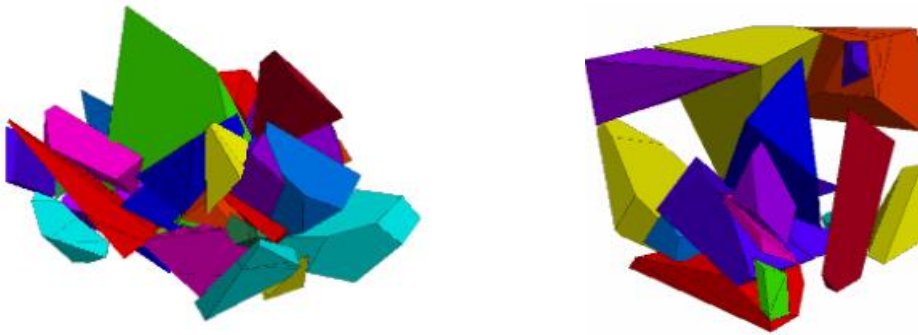


Figura 45:a) Bloques Seleccionados 2 m^3 b) Bloque 1 m^3 , luego de la aplicación de cortes. (Los bloques no están a escala)

4.7.3 Flujo de Material y Formación de Colgadura

Las Figura 46 a) y b), muestran el proceso de extracción y formación de una colgadura. En la Figura 46a) se observa la pila inmediatamente de que el material fue removido. Desde este punto el material fluye hasta acomodarse. Una vez formada la pila de material, se realiza la extracción(eliminación) de los bloques, y el proceso se repite, permitiendo que el material se acomode nuevamente.

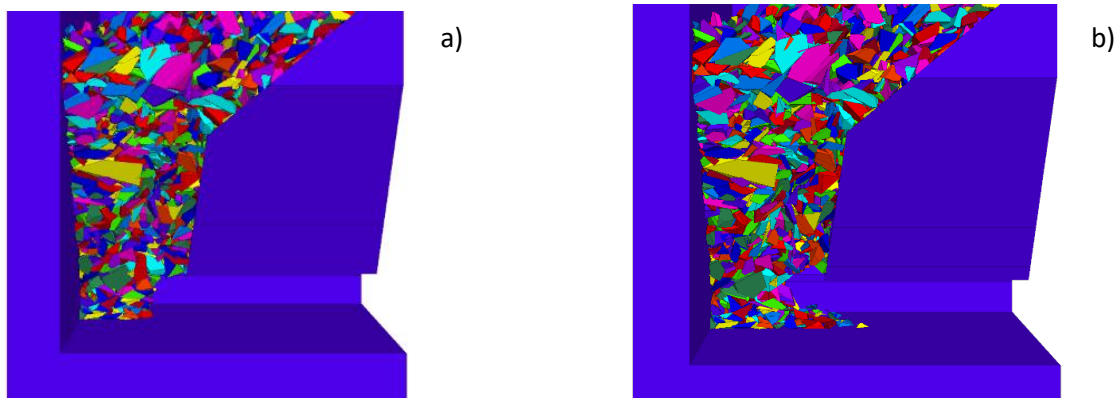


Figura 46:a) Extracción de material. b) Formación de colgadura

Luego de realizar la tercera fase de extracción, el modelo formó un arco estable, las velocidades de los bloques en este punto son del orden de 0.001 [m/s], debido a cuál se consideró que han dejado de desplazarse.

La Figura 47 muestra un contorno de velocidad de la disposición final de los bloques en la batea. Se aprecia la diferencia de velocidades entre los bloques. Los bloques superiores, en contacto con la batea, son los que presentan menor velocidad, mientras que los bloques inferiores se mueven ligeramente más rápido. Estas diferencias, sin embargo, son irrelevantes puestas las velocidades son del orden de 10^{-3} [m/s] por tanto se consideran estáticos, y se estima que se ha formado una colgadura.

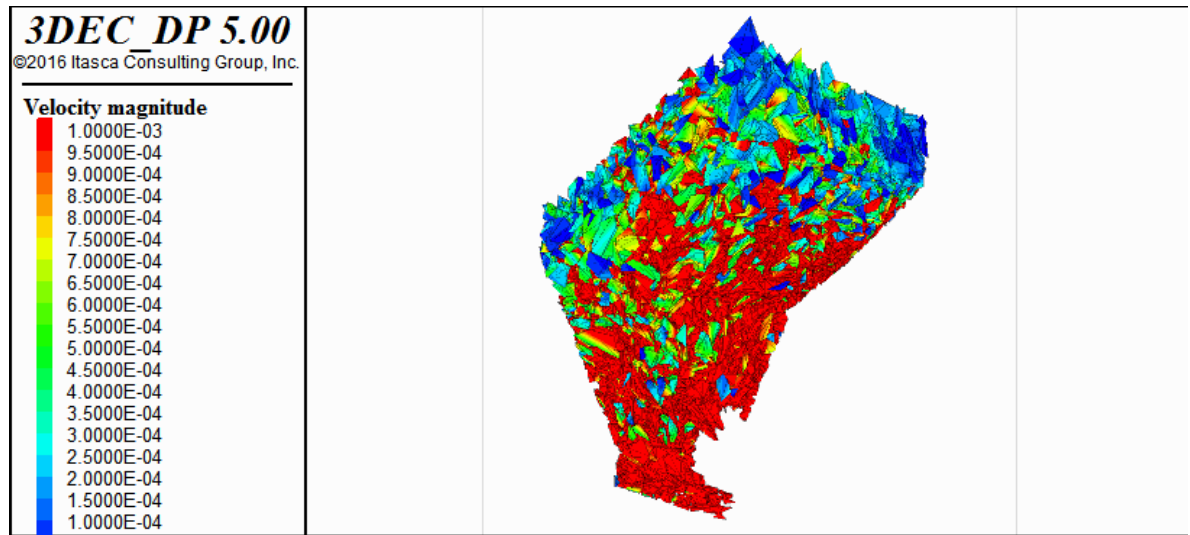


Figura 47: Contorno de velocidades de los bloques luego de la formación de colgadura

Volumen y Masa Extraída del Modelo Antes de la Formación de Colgadura

Durante el análisis se realizaron 3 extracciones de material, siendo este eliminado del modelo y permitiendo el reacomodo de los bloques restantes.

El material fue eliminado siguiendo el proceso detallado en “3.6.9 Extracción”. El volumen y masa total extraído alcanzaron los 88.9m³ y 240.29 ton aproximadamente (Tabla 10) donde se observó que en la primera y segunda extracción, la masa extraída fue similar y luego hubo una notoria disminución en la tercera iteración.

Tabla 10: Masa y volumen extraído en cada fase.

Proceso de extracción	Masa Extraída[kg]	Masa extraída acumulada [kg]	Volumen Extraído[m ³]	Volumen extraído acumulado [m ³]
-----------------------	-------------------	------------------------------	-----------------------------------	--

1ra extracción	98,478.60	98,478.60	36.47	36.47
2da extracción	88,791.65	187,270.26	32.89	69.36
3ra extracción	53,020.07	240,290.32	19.64	89

4.8 Resumen de Resultados del Caso de Estudio y Discusión

Al analizar la respuesta del modelo (Tabla 11) se observa que este fue exitoso en reproducir el comportamiento de la pila de material, y se logró evidenciar la formación de una colgadura al utilizar la metodología propuesta.

Tabla 11: Resumen de resultados del Caso de Estudio

Resumen de resultados	
Ángulo de reposo	47°
Densidad aparente medida[kg/m³]	1703
Número de ciclos de extracción antes de formación de colgadura	3
Volumen extraído antes de formación de colgadura [m³]	88.9
Masa total extraída antes de la formación de la colgadura [ton]	240.29

4.8.1 Ángulo de Reposo

El ángulo de reposo medido de la pila fue de 47° aproximadamente, este valor se ve influenciado por el alto ángulo de fricción asignado a los contactos. El ángulo de fricción, junto con el amortiguamiento son los factores que determinarán el ángulo de la pila. La curva está caracterizada por una gran cantidad de bloques elongados, los cuales pueden por si mismos contribuir a trabar el flujo de material. El efecto de la forma de los elementos en el flujo fue demostrado por Hadjigeorgiu y Lessard (2007). Si bien no se estudió directamente el efecto de la forma de los fragmentos en el flujo, se espera que una mayor cantidad de bloques cuya forma se aleje de un tetraedro, tendrán un efecto en impedir el flujo de material, en línea con lo observado por un efecto en línea con lo observado por Hadjigeorgiu y Lessard(2007) al estudiar flujo en piques de traspaso.

4.8.2 Densidad Aparente

El modelo fue capaz de reproducir el efecto de la reducción de tamaño en la densidad aparente. El factor de esponjamiento obtenido fue de 58%. El factor de encogimiento y la densidad original material determinan este valor. En este punto, el modelo de elementos discretos presenta una ventaja sobre los demás, ya que la densidad aparente pudo ser medida de forma directa.

Utilizando el método definido en la sección “Determinación de la Densidad Aparente”, el valor obtenido puede variar ligeramente, dependiendo de dónde en el modelo se sitúe la zona de $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ para realizar la evaluación. En este caso, sin embargo, se consideró como representativo situarla en el centro de la pila, lejos tanto de la zona de extracción como de la parte superior del modelo, donde una menor concentración de bloques podría haber alterado el resultado.

4.8.3 Número de Ciclos de Extracción, Volumen y Masa Removida antes de la Formación de Colgadura

Para lograr la formación de la colgadura tuvieron que realizarse 3 ciclos de extracción, equivalentes a 240 ton aproximadamente. Considerando un equipo LHD de 6 yd^3 , esto equivale a 20-25 paladas. La cantidad de material removido antes de la formación de la colgadura posiciona el modelo ligeramente por debajo de El Teniente 4 Sur, con una cantidad de material entre colgaduras de 251 toneladas en promedio.

El modelo demostró ser capaz de reproducir el comportamiento en la caída libre de los elementos, su reacomodo en una pila de material y su desplazamiento luego de la extracción, en línea con lo que se observa en el proceso en la realidad.

A continuación, se estudian uno a uno los parámetros y su influencia en la respuesta del modelo.

5.DISCUSIÓN DE LOS FACTORES Y SU INFLUENCIA EN EL MODELO

5.1 Efecto del Factor de Densidad

El factor de densidad, el cual corresponde al P32 referenciado en definido en la Figura 19 representa una forma de aumentar el número de cortes o fracturas en el modelo, como es el caso de todos los experimentos en este trabajo.

La cantidad de fracturas contenidas en un volumen L, estará dada por:

$$N(l, L) = Alfa * \frac{l^{-a+1}}{a - 1} \quad [15]$$

Donde l es el tamaño mínimo de fractura definido al momento de generar el DFN (Itasca,2013 Manual de usuario 3DEC 5.0)

Un factor de densidad mayor implicará una mayor cantidad de fracturas, lo que a su vez conllevará un tamaño menor de bloque y un desplazamiento hacia la izquierda de la curva granulométrica relativo a un menor factor de densidad. (Figura 48)

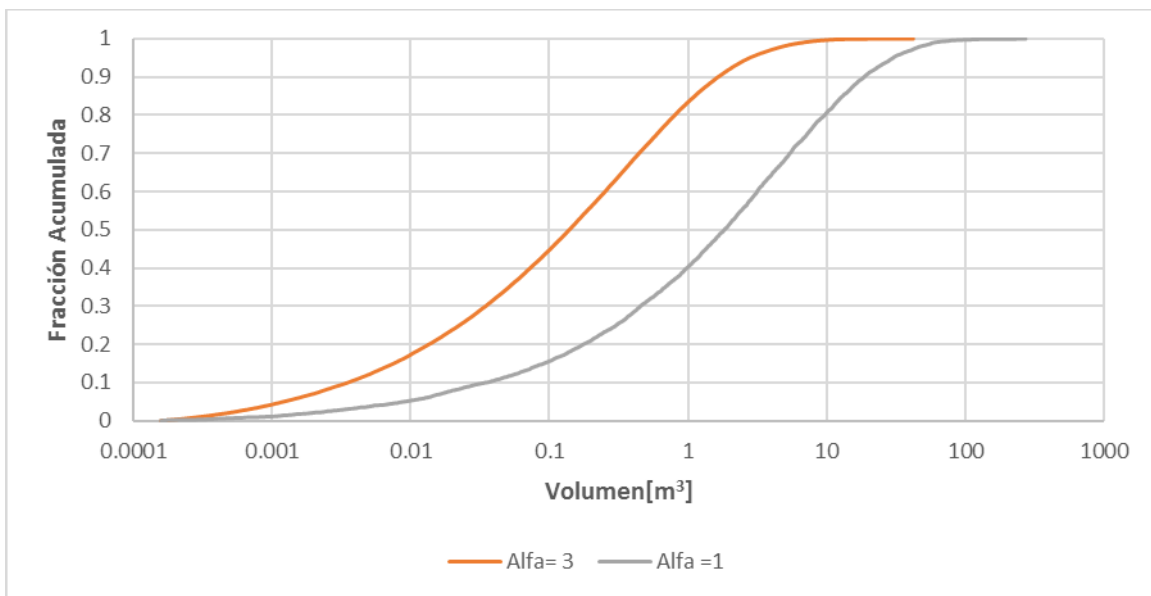


Figura 48: Comparación de curvas granulométricas, con Alfa= 3 y Alfa=1

Otro efecto importante, es que el número total de bloques en el modelo, posterior a la aplicación del DFN, dependerá de la densidad de este, mientras mayor sea la densidad, mayor será la cantidad de bloques. En este caso, los números de bloques de cada curva son:

- Curva Alfa = 1: 5,693 bloques
- Curva Alfa = 3: 62,021 bloques

Esto es esperable ya que, dependiendo de la posición y tamaño de las discontinuidades generadas, cada nueva discontinuidad puede intersectar a múltiples fracturas definidas previamente. Debido a esto, la cantidad de bloques generada se relaciona de forma no lineal con la cantidad de fracturas.

El factor de densidad juega un rol en la definición de la curva granulométrica, sin embargo, el hecho de que altere la cantidad de bloques del modelo, lo hace insuficiente como método de definición de la curva granulométrica a estudiar. Por otra parte, si bien el concepto de factor de densidad tiene una explicación física como se indicó en la sección “3.4.2 Factor de Densidad”, en el contexto de este trabajo, el área de fracturas por unidad de volumen del DFN original se utiliza como un parámetro que definirá la cantidad de bloques discontinuidades, y por tanto, de bloques individuales que se generarán y serán cargados en el modelo luego de la aplicación del algoritmo de encogimiento.

Un análisis gráfico a través del triángulo de clasificación de formas demuestra el efecto de un mayor valor de Alfa en la cantidad de bloques, y una mayor concentración de elementos de forma elongada (Figura 48,49,50). Se observó que un factor de densidad entre 3-5 genera curvas útiles para estudiar tanto en cantidad de tamaño de bloques. Un factor muy bajo generará muy pocos bloques como para generar una pila, mientras que un factor muy alto generará muchos finos, los cuales serán de igual manera descartados.

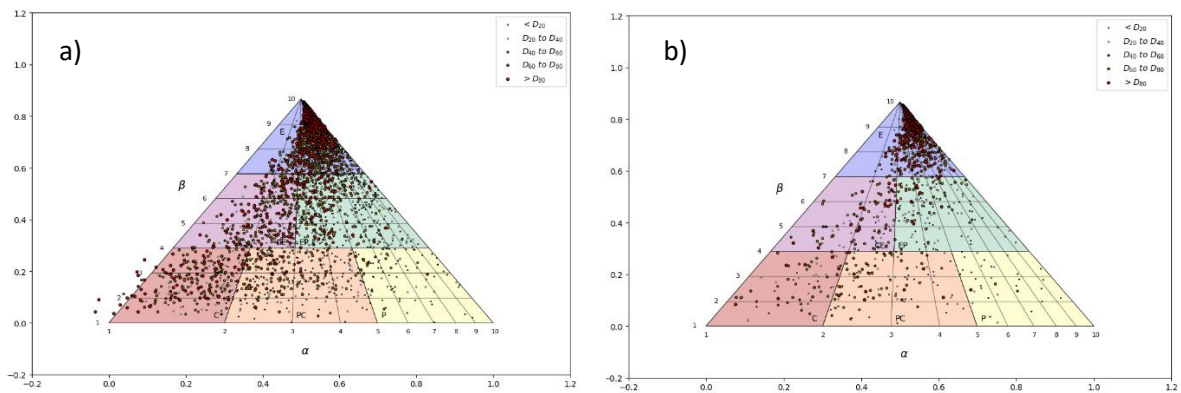


Figura 49: Comparación gráfica de Efecto del factor densidad en los factores α y β a) Alfa = 3, b) Alfa = 1

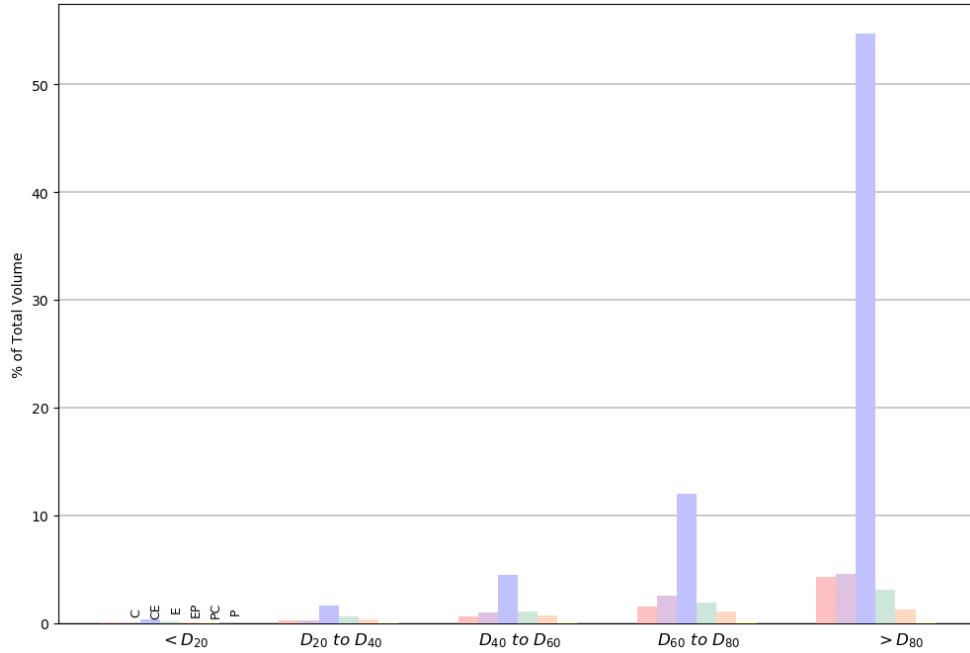


Figura 50: Distribución de formas según segmento de la curva granulométrica. Alfa=3

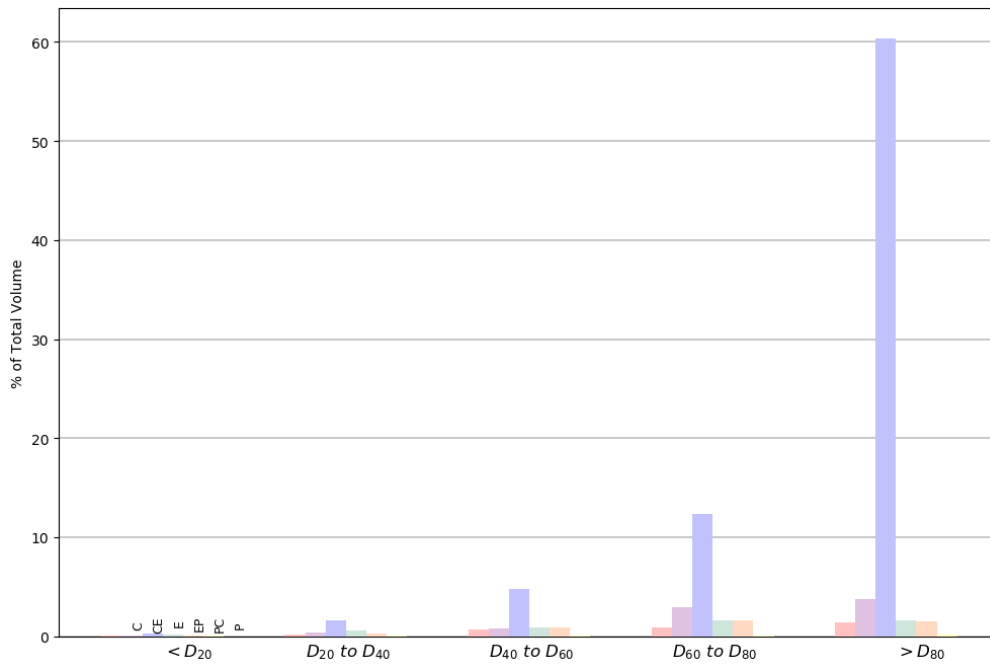


Figura 51: Distribución de formas según segmento de la curva granulométrica. Alfa =1

5.3 Efecto del Factor de Escalamiento

Como fue descrito en la sección “3.4.1 Parámetros de los DFN en 3DEC”, el factor de escalamiento “a”, controla la proporción de fracturas pequeñas vs fracturas

de gran tamaño. Si el factor de escalamiento es suficientemente grande (≥ 4) la población de fracturas correspondiente estará dominada por las fracturas pequeñas.

Se generaron tres curvas idénticas salvo por su factor de escalamiento (Figura 52) donde se observó que un mayor factor de escalamiento implica un DFN dominado por fracturas pequeñas, las cuales, debido a su tamaño, generan menor superposición que lo que generarían grandes fracturas.

Debido a esto, un factor alto, implicará una curva compuesta por bloques de mayor tamaño evidenciados por su posición a la derecha, relativo a valores menores de a .

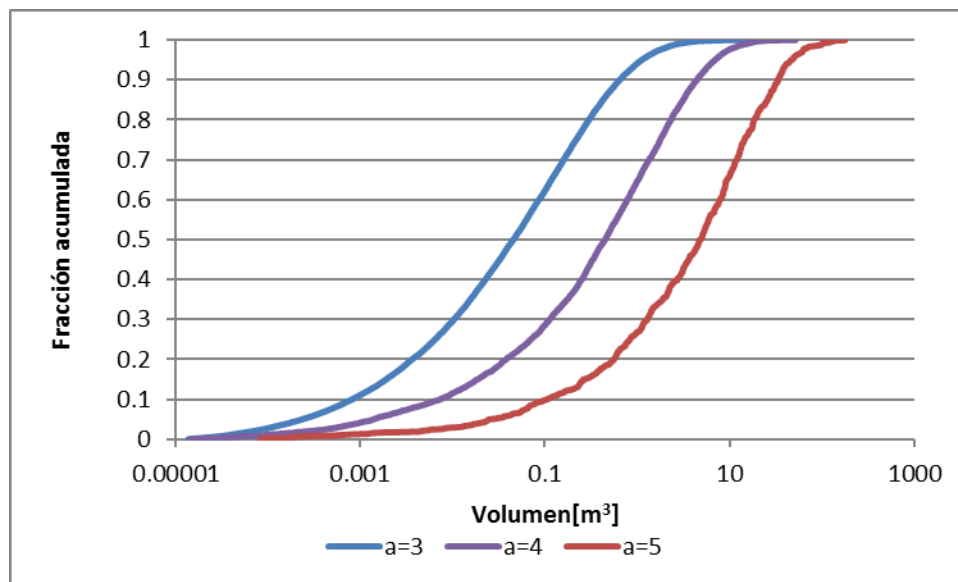


Figura 52: Comparación de curvas según factor de escalamiento. $a=3$, $a=4$, $a=5$

Otro efecto del tamaño de las fracturas del DFN, será la cantidad de bloques generados. Las curvas de la ilustración anterior están compuestas por:

- Curva $a=5$: 663 bloques
- Curva $a=4$: 5,057 bloques
- Curva $a=3$: 32,970 bloques

Se observa que un mayor factor de escalamiento genera desplazamiento de la curva hacia la izquierda (disminución de tamaño de bloques), además de un aumento en el número de bloques.

El factor de escalamiento, por tanto, deberá mantenerse en el rango [3-4] para generar curvas que sean útiles para el análisis, manteniendo un balance entre la cantidad de bloques generados y el tamaño de estos. Al igual que en el caso del factor de densidad, un valor muy alto generará una menor cantidad de bloques de mayor tamaño, mientras que un valor muy bajo generará una gran cantidad de finos, que posteriormente serán eliminados.

Además, la superposición de fracturas generada por un factor de escalamiento bajo aumentará el tiempo necesario para aplicar el DFN. En el caso de un modelo de gran tamaño, este tiempo puede ser significativo.

5.4 Efecto del Factor de Encogimiento en la Curva Granulométrica

Aplicar un factor de reducción a la longitud de la cuerda D, genera un desplazamiento de toda la curva granulométrica hacia la izquierda, manteniendo esta su forma (Figura 53). Esto implica que la distribución de los elementos gruesos y finos no varía al encoger los bloques. Es posible que el encogimiento de la curva genere finos en exceso en el modelo, los cuáles no sólo aumentan la carga computacional del modelo, sino que también perjudican el timestep, pues este se ve afectado por la dispersión de tamaños dentro del modelo.

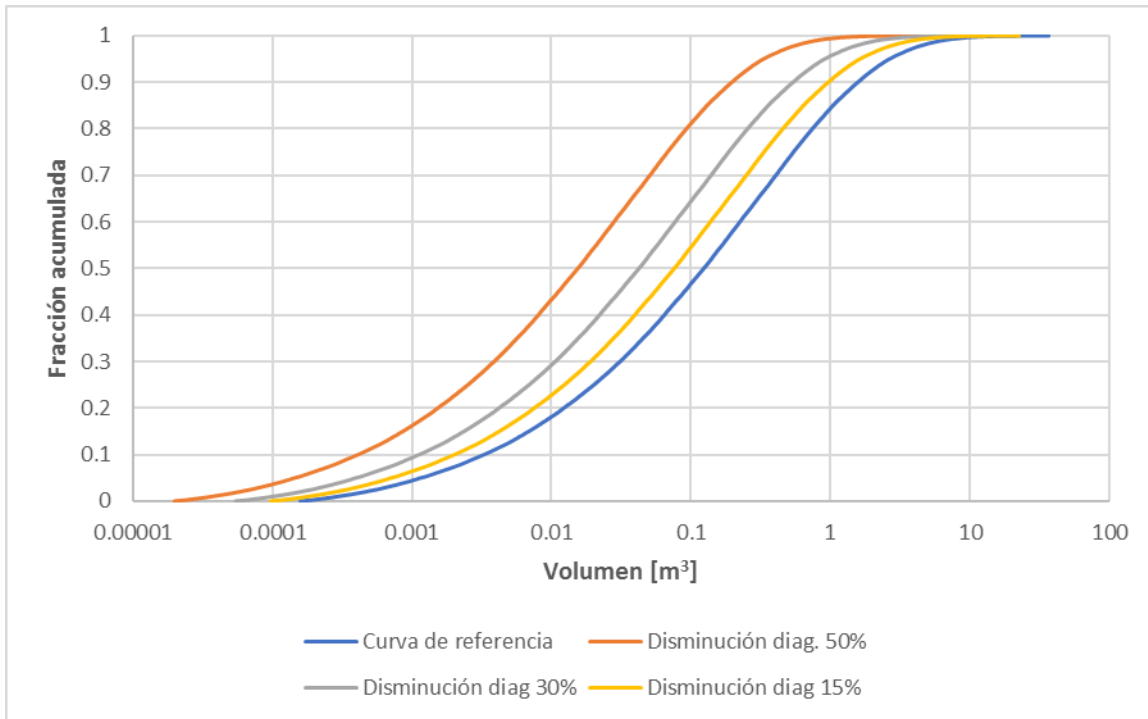


Figura 53: Relación de Curvas Luego de Aplicar Factor de encogimiento

Una vez que se cuenta con una curva generada por DFN, se determina el factor de encogimiento a ser aplicado, considerando si se quiere desplazar la curva de modo de igualar el P50, P80 o P100 de la curva objetivo. El número de bloques en la curva original y la curva objetivo no tuvo variación al aplicar el algoritmo de encogimiento y el número de bloques en cada curva es de 65,513.

Por motivos de potencia computacional, aquellos bloques con un volumen menor a un volumen definido (cutoff) son eliminados del modelo, esto no genera un gran impacto en el resultado final pues los finos no juegan un rol preponderante en la formación de arcos mecánicos.

A fin de cuantificar el efecto que tiene la disminución de la diagonal en el volumen, se generaron curvas a distintos niveles de encogimiento y se calculó su diferencia de volumen con la curva original. A partir de los datos recopilados, se determina una relación empírica entre la disminución de la cuerda D y la reducción volumétrica de los bloques, indicada en la Figura 54. Esta información es relevante para determinar el valor de encogimiento a ser aplicado. El valor a seleccionar dependerá a su vez, de si se busca ajustar la curva a su P50, para modelar el tamaño promedio, o bien a su P80 de modo de minimizarla sobreestimación de gruesos.

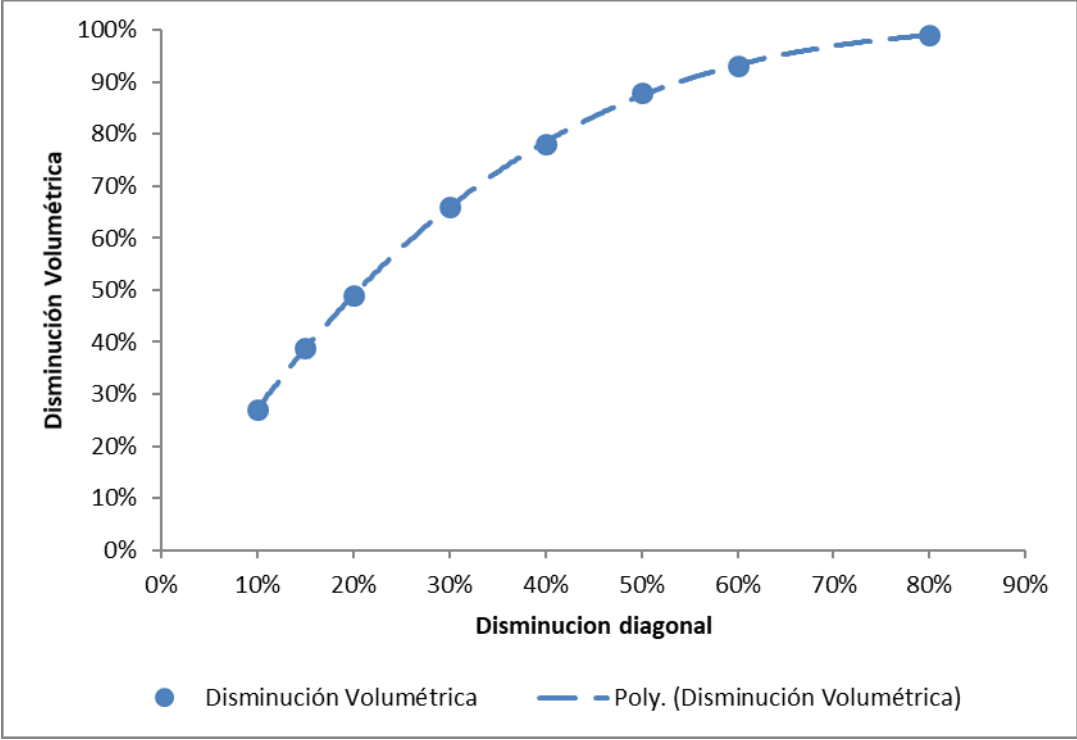


Figura 54: Relación empírica entre disminución diagonal y volumétrica

5.5 Efecto del Ángulo de Fricción en el Ángulo de Pila

El ángulo de fricción de los contactos es el principal factor a calibrar para determinar el ángulo de la pila en el modelo. Un mayor ángulo de fricción está directamente relacionado con un aumento en el ángulo de la pila formada(Figura 55)

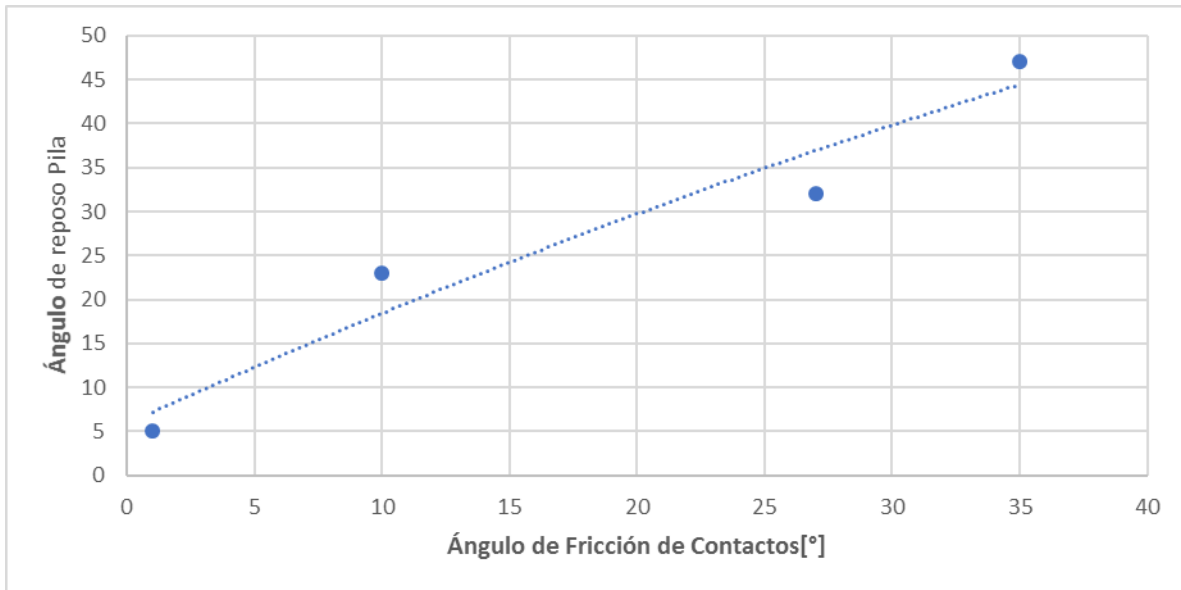


Figura 55: Ángulo de reposo de la pila vs ángulo de fricción de contactos

5.6 Relación entre Factor de Encogimiento y Densidad Aparente Obtenida

Se realizaron tres experimentos, donde se corrió el modelo hasta la formación de la pila, a tres diferentes niveles de encogimiento de la diagonal del bloque, con una densidad original de 2.7[ton/m³]. Se observa que una mayor disminución de la distancia entre los vértices y el centroide, con su disminución de volumen asociada, resulta en una menor densidad aparente (Figura 56).

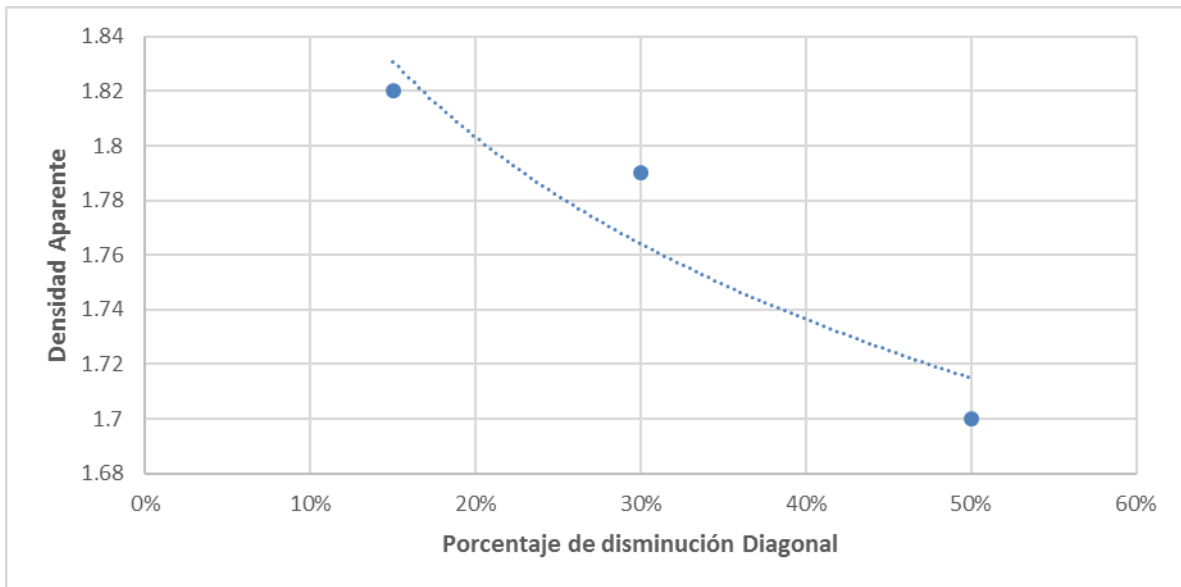


Figura 56: Densidad aparente en la pila vs Porcentaje de disminución diagonal

En el rango estudiado, se tiene que una disminución diagonal en el rango 15 – 50% genera densidades aparentes entre 1.82-1.7[ton/m³], equivalente a un factor

de esponjamiento entre 48 a 58%. Esto es consistente con el valor de 55% utilizado por Hustrulid (2002)

5.7 Efecto del Factor de Amortiguamiento en el Tiempo de Resolución del Modelo

El timestep del modelo identifica el avance de la variable tiempo en cada ciclo, donde un timestep más pequeño implica un mayor tiempo de resolución del problema. El programa define automáticamente el timestep óptimo a utilizar. Varios factores afectarán este valor: Número de bloques en el modelo, diferencia de tamaño entre los bloques mayores y menores, rigideces de los contactos y el tipo de amortiguamiento elegido.

El efecto del tipo de amortiguamiento es particularmente notorio, tomando como base el caso de estudio, un modelo sin amortiguamiento tiene un timestep de 10^{-7} . En el amortiguamiento combinado de Rayleigh, el timestep será el menor de ambos, en este caso, 10^{-11} , correspondiente al amortiguamiento proporcional a la rigidez de los contactos. Debido a la gran cantidad de bloques en los modelos involucrados, el timestep se vuelve un factor determinante para la factibilidad de utilizar el modelo. Al tomar la decisión de utilizar amortiguamiento proporcional a la masa, el timestep sube a 10^{-7} . Finalmente, al tomar la decisión de eliminar aquellos bloques con volumen menor a 10^{-2} m^3 , el timestep logró bajarse en un orden magnitud, hasta 10^{-6}

Tabla 12: Efecto del tipo de amortiguamiento en el timestep del modelo

Tipo de amortiguamiento	Timestep
Sin amortiguamiento	1.00E-07
Amortiguamiento de Rayleigh proporcional a la rigidez de contactos	1.00E-11
Amortiguamiento de Rayleigh proporcional a la masa	1.00E-07
Amortiguamiento proporcional a la masa, volumen mayor a 10^{-2} m^3	1.00E-06

6. CONCLUSIONES

La metodología propuesta para el estudio de colgaduras de batea representa de forma adecuada el comportamiento de los bloques a medida que estos se desplazan según progresa la extracción. Se logró reproducir una colgadura de batea, considerando que esta se encuentra colgada cuando la velocidad de los bloques en la parte superior de la misma es menor a $0.02[m/s]$, con lo que se considera que el flujo de material se ha detenido.

A través del algoritmo de encogimiento, se pudo reducir de forma exitosa el tamaño de los bloques, sin alterar la forma de los mismos, ni su posición relativa en la curva granulométrica. Esto permitió desplazar la curva completa hacia una curva objetivo previamente definida, haciendo coincidir sus P50. La aplicación del algoritmo de encogimiento genera un efecto en la densidad aparente, que se relaciona tanto con el grado de encogimiento aplicado como con la distribución de tamaños de los bloques, es decir, con la forma de la curva granulométrica. Aun así, el factor de esponjamiento provocado por la disminución de tamaño estuvo en el rango de 48-58%, dependiendo del grado de encogimiento. Esto concuerda con la literatura consultada. En el caso desarrollado, la cantidad de material entre colgaduras fue 240 toneladas, ligeramente por debajo de El Teniente 4 Sur (251 ton entre colgaduras).

Durante el desarrollo de la tesis se observó que el uso de un DFN uniforme para las direcciones de los cortes genera una amplia distribución de tamaños, que, luego de desplazada la curva mediante el algoritmo de encogimiento resulta en gran cantidad de finos. Debido al método de cálculo utilizado por el software 3DEC, esto significa un elevado costo computacional. Una opción para evitar este problema es la utilizada en el trabajo: eliminar finos, seleccionados según un volumen mínimo. Otra opción posible de estudiar sería el aplicar la disminución a los bloques por rangos, de modo de generar un rango de tamaños que se ajuste exactamente a la curva objetivo. Para este caso habría que especificar también el número de bloques en cada rango de tamaños.

Se determinó que los parámetros más importantes son el factor de densidad, el factor de encogimiento y el DFN. Se observó que tanto el factor de densidad como el factor de escalamiento tienen efecto en la cantidad final de bloques generados. Dentro de los parámetros geomecánicos, se observó que ángulo de fricción interna afecta directamente la capacidad de fluir de la pila y el ángulo de reposo de esta.

El desempeño de la técnica de diseño, determinación de la curva a través del DFN y posterior encogimiento de la misma, se ve negativamente afectado por el número de bloques en movimiento, y por la distancia que estos deben recorrer. En los casos estudiados, con un número de bloques cercano a 32,000, el tiempo de resolución requerido dificulta aplicar el método de forma rápida, el tiempo para

generar la pila inicial es cercano a las 72 horas, dependiendo de las condiciones, y el reacomodo de material posterior a cada extracción, puede tomar hasta 24 horas.

La metodología propuesta presenta la ventaja de que la curva granulométrica, una vez procesada y encogida, puede ser desacoplada del diseño de la batea que la originó, pues se genera un grupo independiente bloques. Debido a esto, es posible realizar pruebas utilizando el mismo grupo de bloques, en diseños diferentes de batea.

La metodología propuesta demuestra potencial en cuanto el comportamiento de los elementos del modelo se asemejan a la realidad, sin embargo, su uso a mayor escala se ve impedido por la capacidad de cómputo requerida para resolver el problema. Por otra parte, avances en el desarrollo de computación paralela permitirían subdividir el problema del movimiento de bloques, y resolver cada uno en forma simultánea, en vez de secuencial, como se hace actualmente. Desarrollos en esta línea ya ha demostrado reducción de hasta 6 veces el tiempo de corrida del modelo. Este tipo de técnica podrían hacer viable la metodología presentada en este trabajo para uso a gran escala.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La aplicación de la metodología reveló la posibilidad de mejorar la respuesta del modelo aplicando un esquema de encogimiento en el cual cada bloque se mueve hacia el valor exacto que le corresponde en la curva granulométrica objetivo. Esto entrega un mejor resultado pues los bloques generados se ajustarán de forma precisa a la curva objetivo. Se sugiere realizar un estudio similar, aplicando el nuevo esquema de encogimiento. Tal método requeriría la generación de bloques gruesos, de modo que cada uno de los bloques pudiera ser proyectado hacia la curva objetivo mediante encogimiento

El principal obstáculo en la validación de los resultados obtenidos a partir del modelo es el tiempo que este requiere para el desplazamiento de los bloques. A pesar de esto, es relevante validar el proceso permitiendo que una batea completa se vacíe. Este proceso requerirá de semanas para llevarse a cabo.

Se propone explorar los siguientes puntos a futuro:

En este trabajo se presenta la hipótesis de que la distribución de formas de los bloques debe generar un efecto tanto en el factor de esponjamiento calculado, mediante su influencia en la densidad aparente, como en el ángulo de la pila, mediante su influencia en el ángulo de reposo de los bloques. Este efecto podría ser estudiado filtrando los bloques según sus factores α y β según la clasificación de Kalenchuk et al.(2006).

Se propone aplicar un modelo similar al presentado en este trabajo, pero con bloques deformables, esto permitirá medir esfuerzos generados por la pila en la batea, esto permitiría estudiar, por ejemplo, rupturas de visera. A la fecha, 3DEC no permite la utilización de bloques rígidos y deformables en el mismo modelo, el timestep aumenta exponencialmente al incluir los nodos requeridos para un modelo de bloques deformables.

En este trabajo se utilizó amortiguamiento de Rayleigh proporcional a la masa para mejorar el tiempo de formación de la pila. A pesar de esto, un esquema de amortiguamiento que también considere la rigidez de las discontinuidades generaría un mejor modelo de la caída y distribución de los bloques en la pila.

En este trabajo, se consideró que el material que interactuaría con la batea, debido a la limitación en el tiempo de resolución del modelo, sería aquel que se encontraba directamente sobre la misma. Se propone realizar modelo a mayor escala, el cuál debería permitir visualizar el elipsoide de extracción y analizar su movimiento en tres dimensiones.

Finalmente, se propone agregar un paso a la metodología, en el cual se determine el factor de forma medio de roca que se quiere modelar en función de los parámetros α y β , y en base a esto, determinar el DFN apropiado para el modelo.

Esto implicaría generar una gran cantidad de bloques y filtrar para utilizar sólo aquellos que presenten la forma deseada. Si la cantidad resultante de bloques es insuficiente, la altura de columna puede incrementarse.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Antillo, D. E. (2010) Estudio de esfuerzos en roca hundida por medio de elementos discretos. *Memoria Universidad de Chile*.
2. Botha, J., Watson, S., Arkadius, T. & Samosir, E. (2008) Simulation applications at PT Freeport Indonesia's DOZ/ESZ block cave mine. *MassMin2008*.
3. Butcher, R. & Thin, I. (2007) The inputs and choices for predicting fragmentation in block cave projects. *1st International Symposium on Block and Sub-level Caving Cave Mining, Cape Town, South Africa*.
4. Cavieres, P., Contreras, E. & Arce, J. C. (2002) Dimensionamiento de mallas de extracción, bateas recolectoras y pilar corona para método panel caving en roca primaria, mina el teniente.
5. Esterhuizen, G. S., Laubscher, D. H., Bartlett, P. J. & Kear, R. M. (1996) An expert system approach to predicting fragmentation in block caving. *Proceeding Massmin Mining Methods, SAIMM*.
6. Flint, D., Sinuhaji, A., Setyoko, T. B. & Kalangi, H. (2006) Secondary breakage practice at the DOZ block cave mine. Perth ed. 9th Underground Operator Conference, AusIMM.
7. Franklin & Dusseault(1989) *Rock Engineering*.McGraw-Hill
8. Fuenzalida, M. A. (2012) Estudio del flujo gravitacional confinado y su aplicación a minería de caving. *Tesis Universidad de Chile.*, 145.
9. Hadjigeorgiou, J. & Lessard, J. (2007) Numerical investigations of ore pass hang-up phenomena. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(6), 820-834.
10. Hurtado, J., Pereira, J. & Campos, R. (2007) Nnm-ico-geo-inf n°003 informe final backanalysis de fragmentación minas: Diablos regimiento, reno y teniente 4 sur tonalita., Codelco-Chile.
11. Hustrulid (2001) *Underground Mining Methods*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration
12. Im2 (2000) Levantamiento de alternativas tecnológicas para descolgadura de zanja. Codelco-Chile.
13. Kalenchuk, K. S., Diederichs, M. S. & Mckinnon, S. (2006) Characterizing block geometry in jointed rockmasses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(8), 1212-1225.
14. Kvapil, R. (2008) *Gravity flow in sublevel and panel caving: A common sense approach*, (Luleå University of Technology).

15. Laubscher, D. (1994) Cave mining-the state of the art. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 94(10), 2279.
16. Maass, S. A. (2013) Alternativas tecnológicas para descuelgue de zanjas. *Tesis Universidad de Chile*.
17. Moss, A., Russell, F. & Jones, C. (2004) Caving and fragmentation at Palabora: Prediction to production. *Proceedings of Massmin*, 585-590.
18. Mustoe, G. & Miyata, M. (2001) Material flow analyses of noncircular-shaped granular media using discrete element methods. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(10), 1017-1026.
19. Nazeri, H. & Mustoe, G. (2002) Application of dem to simulate gravity flow of bulk solid materials in mines. *Discrete Element Methods @ sNumerical Modeling of Discontinua*. ASCE.
20. Nazeri, H., Mustoe, G. G. W., Rozgonyi, T. & Miyata, M. (2000) Computer simulation of gravity flow of ore in ore passes by the discrete element method (dem). B.H.V. Topping ed. Edinburgh, Finite Elements: Techniques and Developments, Civil-Comp Press.
21. Orellana, M. (2011) Modelación numérica de la minería continua. Tesis Universidad de Chile.
22. Rubio, E. (2006) *Block cave mine infrastructure reliability applied to production planning*. University of British Columbia.
23. Tibor, J. G. & Ebert, F. (2005) Three-dimensional discrete element simulations in hoppers and silos. *Powder technology*, 158(1), 58-68.
24. López, C. (2013) Modelamiento Numérico de Fragmentación Primaria en Caving Mediante la Técnica De Macizos Rocosos Sintéticos. Memoria Universidad de Chile.

ANEXOS:

ANEXO A. FUNCIONES PARA GENERACIÓN DE BATEA.

El siguiente Anexo muestra los códigos FISH para la generación de la batea, y las funciones para manipularla:

MAIN

new

config dynamic

def dimensiones_del_modelo

xi=0

yi=0

zi=0

xf= 39.26

yf=16

zf=20

x2=xf/2

y2=yf/2

z2=zf/2

end

@dimensiones_del_modelo

poly brick @xi @xf @yi @yf @zi @zf

;call tunnel

;call parametrizacion_batea

;call test_DFN_cm.fis

;call Funciones

TUNNEL

def tunel_zanja

; comienzo y fin del túnel

xxa= xi

xxb= xf

; dimensiones en y, z

$$tyb1 = 6$$

$$tzb1 = 0$$

$$tyb2 = 10$$

$$tzb2 = 0$$

;techo semicircular

$$tyc = 8$$

$$tzc = 2$$

$$tr = 2$$

$$ty1 = tyc + tr * \cos(180 * \text{degrad})$$

$$tz1 = tzc + tr * \sin(180 * \text{degrad})$$

$$ty2 = tyc + tr * \cos(165 * \text{degrad})$$

$$tz2 = tzc + tr * \sin(165 * \text{degrad})$$

$$ty3 = tyc + tr * \cos(150 * \text{degrad})$$

$$tz3 = tzc + tr * \sin(150 * \text{degrad})$$

$$ty4 = tyc + tr * \cos(135 * \text{degrad})$$

$$tz4 = tzc + tr * \sin(135 * \text{degrad})$$

$$ty5 = tyc + tr * \cos(120 * \text{degrad})$$

$$tz5 = tzc + tr * \sin(120 * \text{degrad})$$

$$ty6 = tyc + tr * \cos(105 * \text{degrad})$$

$$tz6 = tzc + tr * \sin(105 * \text{degrad})$$

$$ty7 = tyc + tr * \cos(90 * \text{degrad})$$

$$tz7 = tzc + tr * \sin(90 * \text{degrad})$$

$$ty8 = tyc + tr * \cos(75 * \text{degrad})$$

$$tz8 = tzc + tr * \sin(75 * \text{degrad})$$

$$ty9 = tyc + tr * \cos(60 * \text{degrad})$$

$$tz9 = tzc + tr * \sin(60 * \text{degrad})$$

$$ty10 = tyc + tr * \cos(45 * \text{degrad})$$

```

tz10= tzc + tr * sin (45*degrad)
ty11= tyc + tr * cos (30 *degrad)
tz11 = tzc + tr * sin (30*degrad)
ty12= tyc + tr * cos (15 *degrad)
tz12 = tzc + tr * sin (15*degrad)
ty13= tyc + tr * cos (0 *degrad)
tz13 = tzc + tr * sin (0*degrad)
end
; ejecutar función
@tunel_zanja
; generar el tunel
tunnel radial &
  a  @xxa,@tyb1,@tzb1  @xxa,@ty1,@tz1 &
    @xxa,@ty2,@tz2  @xxa,@ty3,@tz3 &
    @xxa,@ty4,@tz4  @xxa,@ty5,@tz5 &
    @xxa,@ty6,@tz6  @xxa,@ty7,@tz7 &
    @xxa,@ty8,@tz8  @xxa,@ty9,@tz9 &
    @xxa,@ty10,@tz10  @xxa,@ty11,@tz11 &
    @xxa,@ty12,@tz12  @xxa,@ty13,@tz13 @xxa,@tyb2,@tzb2 &
  b  @xxb,@tyb1,@tzb1  @xxb,@ty1,@tz1 &
    @xxb,@ty2,@tz2  @xxb,@ty3,@tz3 &
    @xxb,@ty4,@tz4  @xxb,@ty5,@tz5 &
    @xxb,@ty6,@tz6  @xxb,@ty7,@tz7 &
    @xxb,@ty8,@tz8  @xxb,@ty9,@tz9 &
    @xxb,@ty10,@tz10  @xxb,@ty11,@tz11 &
    @xxb,@ty12,@tz12  @xxb,@ty13,@tz13 @xxb,@tyb2,@tzb2 &
reg 5

```

group block tunnel range reg 5

delete reg 5

PARAMETRIZACIÓN

def parametros

;Altura de la batea (distancia entre niveles)

hb=zf

;Ángulo de pared de la batea

w=64.4

;Ángulo de visera

alfa= 82

;Ángulo de talud de la batea

beta= 40

;Altura de la visera

hv=8.23

;Coordenada z Altura de visera

zhv=tz7 + hv

;Distancia entre bateas

dbb=1.32

pbi=yi-dbb/2

pbd=yf+dbb/2

;Piso batea

piso=-3

;Altura crown pillar

hcp=16

;Altura talud de la batea

ht=hb-(hv+tz7)

;Coordenada z altura de talud

```

;Extremos batea
exi=xi + tr
exd=xf-tr
;Coordenadas cortes visera
vix=exi+ht/tan(beta*degrad)
vdx= exd-ht/tan(beta*degrad)
vz=hb-ht
end
;Ejecutar
@parametros
;Generación de la batea
;Columna superior batea
poly brick @exi @exd @yi @yf @zf 80

;Cortes ángulo de pared de la batea
jset dip @w dd 0 origin @x2 @ty2 @tz2
jset dip @w dd 180 origin @x2 @ty12 @tz12
hide below dip @w dd 0 origin @x2 @ty2 @tz2
hide below dip @w dd 180 origin @x2 @ty12 @tz12
;Corte a la mitad y esconder parte inferior
jset dip 0 dd 0 origin @x2 @y2 @zhv
hide range z 0 @zhv
;Cortes ángulo de talud de la batea y esconder sobrantes.
jset dip @beta dd 90 origin @exi @y2 @hb
jset dip @beta dd 270 origin @exd @y2 @hb

hide below dip @beta dd 90 origin @exi @y2 @hb
hide below dip @beta dd 270 origin @exd @y2 @hb
mark reg 1

```



```

;Buscar region inferior y cortar ángulo de visera
seek
hide reg 1
jset dip @alfa dd 90 origin @vix @y2 @vz
jset dip @alfa dd 270 origin @vdx @y2 @vz
;Seleccionar la región 2
hide range plane below dip @alfa dd 90 origin @vix @y2 @vz
hide range plane below dip @alfa dd 270 origin @vdx @y2 @vz
hide range plane below dip @w dd 0 origin @x2 @ty2 @tz2
hide range plane below dip @w dd 180 origin @x2 @ty12 @tz12
mark reg 2
;Eliminar material dentro de la batea
seek
;mark region 3 range plane above dip @w dd 0 origin @x2 @yi 15 plane above dip
@w dd 180 origin @x2 @yf 15 &
;plane above dip @alfa dd 90 origin @acp @y2 @hv plane above dip @alfa dd 270
origin @acpd @y2 @hv &
;z @hv @hb
hide reg 1
hide reg 2
;hide reg 3
;Lados de la batea
poly brick @xi @xf @pbi @yi @zi @zf
poly brick @xi @xf @yf @pbd @zi @zf
;Piso de la batea
poly brick @xi @xf @pbi @pbd @piso @zi
;Parte interna batea
;poly brick @exi @exd @yi @yf @zf 100
;Bloques tope de los lados

```

```
poly brick @xi @xf @pbi @yi @zf 80
poly brick @xi @xf @yf @pbd @zf 80
poly brick @xi @exi @yi @yf @zf 80
poly brick @exd @xf @yi @yf @zf 80
group bl 'batea'
```

FUNCIONES UTILIZADAS

```
define interior
command
hide
show reg 1
show reg 2
endcommand
end
```

```
define batea
command
seek
hide reg 1
hide reg 2
endcommand
end
```

```
define media_batea
eximb= x2-tr
command
hide
show reg 1
jset dip 90 dd 90 or @x2 @y2 @zi
```

```
delete below dip 90 dd 90 or @x2 @y2 @zi
mark reg 1
hide
show reg 2
jset dip 90 dd 90 or @x2 @y2 @zi
delete below dip 90 dd 90 or @x2 @y2 @zi
mark reg 2
seek
hide reg 1
hide reg 2
jset dip 90 dd 90 or @x2 @y2 @zi
delete below dip 90 dd 90 or @x2 @y2 @zi
poly brick @eximb @x2 @pbi @pbd @piso 80
endcommand
end
```

```
;define props
;command
;join off
;;fix
;change cons 1
;prop mat=1 dens 2700 bulk 8e9 g 5e9
;prop jmat=1 jkn 1e10 jks 1e9 jfric 27
;gravity 0,0,-9.8
;endcommand
;end
;
;define generar_bloques
```

```

;command
;@interior
;jset dfn 1
;join off
;mark reg 4
;endcommand
;end
;@generar_bloques

```

```

define visualizar
command
hide range plane below dip @w dd 0 origin @x2 @ty2 @tz2 z @zi 80
hide block 77533
endcommand
end

```

```

;Funciones de caracterización de bloques
;
;def count_blocks ; fish function to count block within zone of interest
;   global total_blocks
;   bi = block_head
;   loop while bi # 0
;       if b_x(bi) > xi & b_x(bi) < xf
;           total_blocks = total_blocks + 1
;       endif
;       bi = b_next(bi)
;   endloop
;

```

```

;end
;@count_blocks
;
;def record_blocks ;fish function to record block data and calculate block shape
parameter
;   ;initialize calculation parameters
;   array block_data(total_blocks,11)
;   array num_vv_contact(total_blocks,2)
;   bi = block_head
;   array vector_arr(4,10000)
;   ii=1
;   loop while bi # 0
;       section
;           ;reset parameters for each block
;           stage=0
;           vv_min=1000.0
;           vv_max=0.0
;           vv_length=0.0
;           outer=0
;           vv_tot=0.0
;           dot_product_total=0
;           length_total=0
;           num_of_contacts=0
;           m_count=1
;           dot_total=0
;           ww=1
;           ll=1
;           loop qa(1,10000)
;               vector_arr(1,qa)=0

```

```

;           vector_arr(2,qa)=0
;           vector_arr(3,qa)=0
;           vector_arr(4,qa)=0
;         endloop
;
;           ;start recording block info for bloks within zone of intersect
;
;           block_data(ii,1)=bi
;           block_data(ii,2)=b_vol(bi)
;           block_data(ii,5)=0
;           block_data(ii,6)=1
;           block_data(ii,7)=b_x(bi)
;           block_data(ii,8)=b_y(bi)
;           block_data(ii,9)=b_z(bi)
;           block_data(ii,10)=0
;
;           ;BLOCK SHAPE CALCULATIONS
;           vi1 = b_gp(bi)
;           loop while vi1 # 0
;               vi2 = vi1
;               vi2 = gp_next(vi2)
;               loop while vi2 # 0
;                   vv_x=gp_x(vi1)-gp_x(vi2)
;                   vv_y=gp_y(vi1)-gp_y(vi2)
;                   vv_z=gp_z(vi1)-gp_z(vi2)
;
;           vv_length=sqrt((vv_x)^2+(vv_y)^2+(vv_z)^2)
;           vv_tot=vv_tot + vv_length
;           vector_arr(1,m_count)=vv_length

```

```

;           vector_arr(2,m_count)=vv_x
;           vector_arr(3,m_count)=vv_y
;           vector_arr(4,m_count)=vv_z
;
;
; num_of_contacts=num_of_contacts+1
;           m_count=m_count+1
;
;           vi2 = gp_next(vi2)
;         endloop
;         vi1 = gp_next(vi1)
;       endloop
;
;           vv_avg=vv_tot/num_of_contacts
;           alpha=(vv_avg*b_area(bi))/(7.7*b_vol(bi))
;           block_data(ii,3)=alpha
;
;
; ;sort vector array
;
; kk=1
; loop while kk < num_of_contacts
;       cc=kk+1
;       loop while cc < (num_of_contacts+1)
;         if vector_arr(1,kk) > vector_arr(1,cc)
;           dump=vector_arr(1,cc)
;         endif
;       endloop
;       vector_arr(1,cc)=vector_arr(1,cc)
;       vector_arr(1,cc)=dump
;
;       dump=vector_arr(2,cc)

```



```

;@record_blocks
;def write_block_info ;fish function to write block data to a log file
;    command
;        set log on
;    endcommand
;    dum=out(string('bi vol alpha beta vel fail(N1) fail_mode fail_stage'))
;    loop n(1,total_blocks)
;        a=string(block_data(n,1))+string('|')
;        b=string(block_data(n,2))+string('|')
;        c=string(block_data(n,3))+string('|')
;        d=string(block_data(n,4))+string('|')
;        e=string(block_data(n,5))+string('|')
;        f=string(block_data(n,6))+string('|')
;        g=string(block_data(n,10))+string('|')
;        h=string(block_data(n,11))+string("")
;        dum=out(a+b+c+d+e+f+h)
;    endloop
;    command
;        set log off
;    endcommand
;end

```

ANEXO B: ALGORITMO DE ENCOGIMIENTO

El algoritmo de encogimiento está escrito en el lenguaje Python (<https://www.python.org>), lenguaje de código abierto para programación de propósito general.

Los archivos de entrada son:

- Archivo de centroides de los bloques: Se exporta con el comando List Block, entrega la posición del centroide para cada bloque, según su ID.

- Archivo de factores: Utilizando la función "Record_blocks" del Anexo A, se obtiene una matriz en la cual figura cada bloque con sus respectivos valores de α y β según la clasificación de Kalenchuk.

- Archivo de coordenadas de los vértices: Se exporta con el comando List Polyhedron, entrega un archivo que identifica cada vértice de cada cara, para cada uno de los bloques, según su ID.

El output del proceso es un archivo de salida, el cual mantiene el mismo formato que el Archivo de coordenadas de los vértices, reemplazando el valor de cada vértice por aquel que le corresponda según el factor de encogimiento definido.