



Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Ingeniería Civil de Minas



SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO GRAVITACIONAL EN BATEAS DE EXTRACCIÓN MEDIANTE DEM

POR

Nicolas Mijail Mansilla Canessa

Memoria de título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar el título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía

René Gómez Puigpinos

Profesor co-guía

Raúl Castro

Octubre 2024

Concepción (Chile)

© Nicolas Mijail Mansilla Canessa

Dedicatoria

A mis padres y abuelos los cuales han dejado su vida para criarme y hacer de mí una mejor persona.

Agradecimientos

A mis padres Margarita y Víctor que me han apoyado en todo este proceso, los cuales me inculcaron desde mi niñez el valor del esfuerzo y el trabajo duro para lograr los objetivos propuestos.

A mis abuelos Eva y Víctor los cuales siempre me han brindado palabras de apoyo y enseñanzas a través de su experiencia en los diferentes ámbitos de la vida.

A los profesores del DIMET, en especial a mi profesor guía René Gómez, por su valiosa ayuda y siempre estar dispuesto a brindar una retroalimentación durante este proceso.

A el proyecto FONDECYT 11240668 por permitirme ser parte de esta y financiar la realización de esta memoria de título.

Al DIM por brindar las licencias del software Rocky DEM para la realización de este trabajo.

A la gente del laboratorio de mecánica de rocas, Vane, Lucas, Adolfo y Guille por acogerme de grata forma tanto en el desarrollo de mi práctica como en la memoria.

A mis amigos y futuros colegas, Pedro, Basti, Rafa, Kiom, Carlos, Josué, Cristóbal, Yony y Alfredo los cuales me brindaron grandes momentos de ocio y la distracción necesaria durante el proceso.

A mis grandes amigos Seba y Pancho los cuales siempre creyeron en mí y nunca dejaron de darme un mensaje de aliento.

A los equipos de fútbol los cuales pertenezco Civil de Minas, Kinesiología, Civil, Ingeniería 85 y en especial Bayern Mining FC.

Resumen

La investigación de las operaciones de block caving ha dependido tradicionalmente de modelos físicos y el uso de marcadores, que, aunque aportan información valiosa, tienen limitaciones como la escala a la cual se puede trabajar y la incapacidad para captar la complejidad del comportamiento del material dentro de un elipsoide en condiciones reales. En este contexto, el Método de Elementos Discretos (DEM) emerge como una alternativa, la cual permite simular interacciones entre partículas individuales. Sin embargo, se debe tener en consideración que las simulaciones con el método DEM requieren equipos de alta capacidad y dependen en gran medida de la calidad de los datos de entrada.

Este estudio se enfoca en la simulación del flujo gravitacional en bateas de extracción mediante el DEM, con el objetivo de desarrollar un modelo numérico que considere la heterogeneidad de tamaños de bloques en operaciones de hundimiento. Para ello, se realizaron tres experimentos: los dos primeros sin material cohesivo, comparando los resultados con un modelo físico de referencia, y un tercero donde se añadió cohesión para formar bloques de mayor tamaño, replicando las etapas iniciales del caving en el campo cercano.

En la primera fase, se compararon los datos de las simulaciones físicas con los resultados de los modelos numéricos. Se observó que el modelo numérico reproduce de manera satisfactoria la dinámica del flujo de material, con similitudes clave respecto al modelo físico. Sin embargo, al usar partículas poliédricas, los resultados variaron debido a la mezcla entre el material socavado y el primario. Posteriormente, en la segunda fase de este trabajo se probaron distintos valores de cohesión entre ellos 6, 7, 7.5 y 8, donde un hallazgo destacado es que una cohesión de valor 7 es adecuada para generar un equilibrio entre la formación de bloques de gran tamaño y una propagación inicial consistente del colapso en la zona superior de la batea sin generar interrupciones significativas en el flujo del material.

Este trabajo sienta las bases para futuros estudios, donde se sugiere el uso de partículas poliédricas para mejorar la precisión geométrica del material socavado, además de incluir esfuerzos en las paredes del modelo para simular mejor las tensiones presentes en el entorno minero.

Abstract

The study of block caving operations has traditionally relied on physical models and the use of markers, which, although providing valuable insights, have limitations such as the scale at which they can operate and the inability to capture the complexity of material behavior within an ellipsoid under real conditions. In this context, the Discrete Element Method (DEM) emerges as an alternative, allowing for the simulation of interactions between individual particles. However, it should be noted that DEM simulations require high-capacity equipment and are highly dependent on the quality of input data.

This study focuses on simulating gravitational flow in extraction drawpoints using DEM, with the objective of developing a numerical model that considers block size heterogeneity in caving operations. To achieve this, three experiments were conducted: the first two without cohesive material, comparing the results to a reference physical model, and a third where cohesion was added to form larger blocks, replicating the initial stages of caving in the near-field zone.

In the first phase, data from physical simulations were compared with the results of numerical models. It was observed that the numerical model satisfactorily reproduces the material flow dynamics, showing key similarities to the physical model. However, when using polyhedral particles, the results varied due to the mixing of caved and primary material. Subsequently, in the second phase of the study, different cohesion values were tested, including 6, 7, 7.5, and 8. A key finding was that a cohesion value of 7 is appropriate for achieving a balance between the formation of large blocks and consistent initial propagation of the collapse in the upper part of the drawpoint, without causing significant interruptions in material flow.

This work lays the foundation for future studies, where the use of polyhedral particles is suggested to improve the geometric accuracy of caved material, along with incorporating stress on the model walls to better simulate the tensions present in the mining environment.

Índice de contenido

1. Introducción	14
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 Hipótesis.....	16
1.1.2 Objetivo general	16
1.1.3 Objetivos específicos.....	16
2. Marco teórico.....	17
2.1 Flujo gravitacional de la roca.....	17
2.2 Flujo gravitacional a escala mina.....	18
2.3 Métodos numéricos de flujo gravitacional.....	23
2.3.1 Modelo cinemáticos y difusión de vacíos:	23
2.3.2 REBOP:	24
2.3.3 Modelos continuos:	25
2.3.4 Autómatas celulares:	25
2.3.5 Modelo spot.....	26
2.4 Método DEM	27
2.4.1 Procedimiento de cálculo matemático en DEM.....	29
2.4.2 DEM aplicado a la minería.....	31
2.5 Rocky DEM	33
2.5.1 Fuerzas de contacto entre partículas.....	34
2.5.1.1 Fuerzas normales de contacto.....	34
2.5.1.2 Fuerzas tangenciales de contacto.....	36
2.5.2 Modelo de adhesión de partículas	36

2.5.2.1 Modelo de fuerza adhesiva constante.....	36
2.5.2.2 Modelo de fuerza adhesiva lineal.....	37
2.5.2.3 Modelo de fuerza adhesiva JKR.....	38
2.5.3 Tipo de partículas disponibles en Rocky.....	39
3. Metodología	42
3.1 Procedimiento experimental	42
3.2 Diseño del modelo numérico	44
3.2.1 Dimensiones de la caja.....	44
3.2.2 Dimensiones de la batea.....	44
3.3 Sistema de extracción	45
3.4 Material granular	47
3.5 Plan experimental	53
4. Calibración parámetros del material.....	56
4.1 Ensayo de ángulo de reposo para esferas.....	57
4.2 Ensayo de ángulo de reposo para poliedros.....	58
5. Resultados y análisis	60
5.1 Flujo gravitacional con materiales no cohesivo.....	60
5.1.1 Ángulo de flujo para el Pilar mayor y Pilar menor.	61
5.1.2 Altura de interacción (HIZ).....	64
5.1.3 Diámetro máximo del elipsoide de movimiento.	67
5.1.4 Evolución del ángulo de flujo y diámetro máximo del elipsoide sobre el Crown Pilar con respecto a la masa extraída.	68
5.2 Flujo gravitacional con material cohesivo	72
5.2.1 Parte 1: Pruebas de cohesión sin extracción.....	72

5.2.2 Parte 2: Pruebas de cohesión con extracción.	75
5.2.3 Parte 3: Pruebas de extracción aislada	79
5.2.4 Parte 4: Pruebas de extracción alternada.....	82
5.2.5 Parte 5: Simulación del modelo completo.....	85
6. Conclusiones	90
7. Recomendaciones para trabajos futuros	92
Referencias	94
Anexos.....	99
Anexo A: Variables de simulación.....	99

Índice de figuras

Figura 1: Plan horizontal del sitio experimental [19]	19
Figura 2: Recuperación de marcadores como función del porcentaje de masa extraída [4].	20
Figura 3: Modelo conceptual de flujo por gravedad perturbado en el campo cercano en la mina de cueva de bloques Ridgeway Deeps [3].	21
Figura 4: Modelo conceptual de flujo por gravedad en el campo cercano. (A) Extracción de roca volada de la campana; (B) extracción inicial de material por socavado (hasta 15 m por encima del nivel de socavado (UCL)) ; (C) elevarse hasta 25 m por encima del UCL; (D) elevarse hasta 35 m por encima de UCL [20].	22
Figura 5: Modelo cinemático de Nedderman y Tuzun [21]	24
Figura 6: Perfiles de reducción del REBOP [23].	25
Figura 7: Modelo de difusión de vacíos [6].	26
Figura 8: Modelo de elementos discretos PFC3D [22].	29
Figura 9: Interacción entre dos partículas por medio de resortes [37].	30
Figura 10: Desplazamiento de material en modelo numérico [39].	31
Figura 11: a) Extracción de material. b) Formación de colgaduras [40].	32
Figura 12: Modelo numérico desarrollado por Hadjigeorgiou [41].	32
Figura 13: Stockpile (corte interior) con distinto número de partículas [42].	32
Figura 14: Replica de modelo físico en modelo numérico en stockpiles [43].	33
Figura 15: Diagrama de estructura de software DEM	34
Figura 16: Esquema típico del comportamiento de la fuerza normal en el modelo histerético [44].	35

Figura 17: Partículas disponibles en Rocky	39
Figura 18: Diagrama de trabajo de Rocky.	40
Figura 19: Procedimiento experimental	43
Figura 20: Esquema del modelo numérico a escala mina.....	44
Figura 21: Dimensiones de la batea	45
Figura 22: Geometría del LHD en el modelo numérico.	46
Figura 23: Secuencia de extracción en la simulación.	47
Figura 24: Curvas granulométricas para los experimentos	48
Figura 25: Distribución granulométrica del material socavado	48
Figura 26: Esferas a utilizar.....	52
Figura 27: Poliedros a utilizar	52
Figura 28: Esquema del modelo numérico.	55
Figura 29: Ensayo de ángulo de reposo para esferas	57
Figura 30: Ensayo de ángulo de reposo para poliedros.....	59
Figura 31: Montaje experimental, simulación 1 (esferas/esferas).....	60
Figura 32: Visualización ángulo de flujo sobre CP (experimento 1)	61
Figura 33: Visualización ángulo de flujo sobre CP (experimento 2)	62
Figura 34: Representación de los perfiles sobre el Pilar Mayor y Pilar Menor [45]......	65
Figura 35: Visualización del elipsoide de movimiento (Simulación 1)......	68
Figura 36. Evolución de la elipse de extracción del experimento 1. A) A) 3700 ton de extracción. B) 3950 ton de extracción. C) 4200 ton de extracción.....	69

Figura 37: Evolución de la elipse de extracción del experimento 2. A) 3700 ton de extracción. B) 3950 ton de extracción. C) 4200 ton de extracción.	70
Figura 38: Evolución del ángulo de flujo sobre CP en relación con la masa extraída.	71
Figura 39: Evolución del diámetro del elipsoide en relación con la masa extraída.	71
Figura 40: Estado inicial de las partículas	73
Figura 41: Pruebas de cohesión de a) 0 b) 3 c) 6 d) 8 e) 10	74
Figura 42: Estado inicial del modelo	76
Figura 43: Modelo con cohesión a) 6. b) 7. c) 7.5. d) 8.	77
Figura 44: Comparación del área de la batea con material a diferentes cohesiones.	78
Figura 45: Bloques de sobre tamaño formados con cohesión 8.	78
Figura 46: Simulación con cohesión 7 (Extracción aislada). A) 0 ton de extracción. B) 200 ton de extracción. C) 400 ton de extracción. D) 600 ton de extracción.	80
Figura 47: Simulación con cohesión 7.5 (Extracción aislada). A) 0 ton de extracción. B) 200 ton de extracción. C) 400 ton de extracción. D) 600 ton de extracción.	81
Figura 48: Simulación con cohesión 7 (Extracción alternada). A) 0 ton de extracción. B) 400 ton de extracción. C) 800 ton de extracción. D) 1200 ton de extracción.	84
Figura 49: Simulación con cohesión 7.5 (Extracción alternada). A) 0 ton de extracción. B) 400 ton de extracción. C) 800 ton de extracción. D) 1200 ton de extracción.	84
Figura 50: Modelo numérico de la simulación 3. A) 0 ton de extracción. B) 6400 ton de extracción. C) 12800 ton de extracción. D) 19700 ton de extracción.	87
Figura 51: Momento de la propagación en la zona más alta de la batea.	88
Figura 52: Bloques de tamaño considerable que se descuelgan.	88
Figura 53: Arcos observados en la batea.	89

Índice de tablas

Tabla 1: Dimensiones de la batea	45
Tabla 2: Dimensiones galerías de extracción	46
Tabla 3: Valores de comparación de curvas	49
Tabla 4: Índice de uniformidad y curvatura	50
Tabla 5: Características del mineral [45].	51
Tabla 6: Parámetros de forma de las partículas poliédricas.	53
Tabla 7: Plan experimental	54
Tabla 8: Ángulo de reposo a calibrar [45].	56
Tabla 9: Calibración ángulo de reposo en esferas.	57
Tabla 10: Calibración ángulo de reposo para poliedros.	58
Tabla 11: Resumen ángulos de flujo Crown Pilar y Pilar Menor.	62
Tabla 12: Resumen HIZ para Crown Pilar y Pilar Menor.	66
Tabla 13: Resumen diámetro máx del elipsoide.	67
Tabla 14: Resultados de extracción aislada	81
Tabla 15: Resultados de la extracción alternada	84
Tabla 16: Resumen de los resultados de la simulación 3.	87
Tabla 17: Parámetros de las simulaciones	99

1. Introducción

El block caving es uno de los métodos más efectivos y ampliamente utilizados en la minería subterránea para la explotación de yacimientos de gran volumen y baja ley. Su eficiencia radica en la inducción controlada del colapso gravitacional del macizo rocoso, facilitada por la socavación en la base del yacimiento. Este proceso permite la extracción continua de grandes volúmenes de mineral, a un costo significativamente menor por tonelada en comparación con otros métodos subterráneos [1,2], tales como room and pillar, sublevel stoping, cut and fill, entre otros. No obstante, el éxito de esta técnica depende de una planificación rigurosa y un monitoreo constante, dado que las condiciones geotécnicas pueden influir de manera crítica en la estabilidad y seguridad de las operaciones.

El block caving es especialmente relevante en depósitos de baja ley, donde otros métodos no serían económicamente viables. La extracción comienza con el desarrollo de una infraestructura subterránea que incluye túneles de acceso, galerías de extracción y sistemas de transporte, ventilación y drenaje. Estas infraestructuras permiten acceder al mineral, fragmentarlo mediante voladuras controladas y recoger el material desprendido en la base del yacimiento. A medida que se extrae el mineral, el colapso del macizo rocoso sigue propagándose hacia la superficie, lo que genera un flujo continuo de material hacia los puntos de extracción [3].

El estudio del método de block caving y sus variables se ha basado principalmente en el uso de modelos físicos y ensayos a escala mina, empleando marcadores para rastrear el comportamiento del material, los cuales se emplean como referencias físicas, como bloques o dispositivos de medición que permiten rastrear el comportamiento del elipsoide durante las pruebas. Aunque estos modelos han sido una fuente valiosa de información, presentan limitaciones significativas, especialmente en términos de la escala de trabajo, ya que la mayoría de los experimentos se realizan en condiciones de laboratorio que no logran replicar completamente la realidad operativa. Si bien los modelos físicos son útiles para representar flujos granulares ideales, estudios con marcadores han revelado que los flujos generados durante el proceso de hundimiento son mucho más complejos y turbulentos de lo que se había anticipado [3,4]. Tras los trabajos pioneros de Kvapil [5], la investigación ha evolucionado

hacia modelos a mayor escala, abandonando el uso de arena como material de simulación y optando por grava triturada. Este cambio ha permitido mejorar la similitud entre los modelos de laboratorio y las condiciones reales de mina, superando así algunos de los desafíos de escalamiento [4,6,7]

Debido a las restricciones de los modelos físicos, los estudios recientes han comenzado a incorporar métodos numéricos en el análisis de las operaciones de hundimiento. Estos métodos numéricos permiten explorar nuevas variables y ofrecer una visión más detallada de los procesos involucrados. Entre los enfoques más destacados se encuentran los modelos cinéticos, el REBOP, los autómatas celulares, los modelos spot, los modelos de plasticidad y, especialmente, los modelos DEM (Discrete Element Method). El principal atributo del DEM es su fundamento en la física newtoniana, lo que le otorga una ventaja considerable al simular con alta precisión las interacciones entre partículas individuales y su entorno, superando muchas de las limitaciones de los modelos físicos y ofreciendo una herramienta poderosa para la optimización de las operaciones de block caving.

Los Discrete Element Method (DEM) o Método de Elementos Discretos son técnicas numéricas utilizadas para simular el comportamiento de sistemas compuestos por partículas individuales. Estos métodos han ganado popularidad en diversas áreas como la geotecnia, la mecánica de suelos, la ingeniería civil y la física de materiales granulares, entre otras. El método DEM se basa en modelar cada partícula individualmente, considerando las interacciones mecánicas entre ellas y con sus entornos. Esto permite simular fenómenos como la fractura, el flujo, la compactación y la segregación de materiales granulares [8]. Este método ha sido aplicado con éxito en la simulación de procesos geotécnicos como el colapso de cavidades mineras, la estabilidad de taludes, el comportamiento de rellenos granulares y la interacción suelo-estructura. También se ha utilizado para estudiar la mecánica de materiales en escalas microscópicas, como la deformación de partículas y la interacción entre partículas y fluidos [9].

La integración del DEM en el análisis del block caving es fundamental para mejorar la optimización de este método de extracción. El DEM ofrece una capacidad de simulación altamente detallada que captura con precisión la complejidad y fluctuación inherente a los flujos de caving. Esta capacidad no solo facilita una comprensión más profunda de los

procesos involucrados, sino que también contribuye significativamente a mejorar la seguridad y la eficiencia operativa del método. No obstante, es importante reconocer que las simulaciones basadas en DEM pueden ser computacionalmente exigentes y requieren una gran cantidad de datos precisos para garantizar resultados confiables. Además, aunque el DEM proporciona una visión detallada de la dinámica granular, la representación precisa de fenómenos a gran escala y las interacciones macroscópicas siguen siendo desafiantes. La precisión de las simulaciones está estrechamente vinculada a la correcta parametrización del modelo y a la calidad de los datos experimentales utilizados en su calibración. Por lo tanto, a pesar de sus ventajas, el DEM debe ser complementado con datos empíricos y una investigación continua para superar estas limitaciones y maximizar su efectividad en aplicaciones reales.

1.1 Objetivos

1.1.1 Hipótesis

- Es posible simular la heterogeneidad de las primeras etapas de extracción y flujo en minería de block caving mediante DEM.

1.1.2 Objetivo general

- Crear un modelo numérico que incorpore algunas de las variables de la heterogeneidad de los tamaños de bloques en las operaciones de hundimiento.

1.1.3 Objetivos específicos

- Realizar una revisión detallada de los trabajos previos con respecto al flujo gravitacional en DEM.
- Comparar los resultados de las simulaciones a escala mina con algunos trabajos previamente realizados.
- Incorporar la heterogeneidad de los tamaños de bloques a la investigación de block caving mediante el uso de DEM.
- Estudiar cómo influye la cohesión a la construcción de bloques de mayor tamaño en un modelo numérico.

- Analizar el potencial de DEM para replicar las primeras etapas del caving en el campo cercano.

2. Marco teórico

2.1 Flujo gravitacional de la roca

La dinámica del flujo de rocas fragmentadas es un factor significativo que influye en el diseño y la operación de una mina subterránea por hundimiento. La construcción de un diseño minero optimizado depende en gran medida de modelos empíricos basados en datos de pruebas físicas a escala y experiencia en campo [10-12]. La modelización a escala del flujo proporciona una visión valiosa sobre los mecanismos del flujo gravitacional y ha dado lugar a diversas teorías, incluyendo la teoría del Elipsoide de Movimiento de Kvapil [5]. Esta teoría permite predecir con antelación el área de recuperación y ha servido de base para muchos diseños posteriores de Sub Level Caving (SLC) [13-15]. Aunque esta teoría es útil para modelar flujos granulares ideales, datos recientes de pruebas con marcadores indican que los flujos de caving son significativamente más complejos y turbulentos [3,4].

A partir del trabajo de Kvapil [5], la investigación se ha orientado hacia modelos a mayor escala, abandonando la arena como medio de modelización en favor de grava triturada. Este cambio hacia un modelo a mayor escala tenía como objetivo superar las dificultades asociadas con la escala de similitud entre los modelos y el tamaño real [4,6,7]. Los resultados mostraron que, al representar el flujo de manera no dimensional, las tensiones circundantes y el ángulo de fricción de las partículas juegan un papel más significativo en el flujo que la escala del experimento [16,17]. A continuación, se presenta un resumen de investigaciones empleando modelos tridimensionales a mayor escala

2.2 Flujo gravitacional a escala mina

La recolección de datos de flujo a escala real puede ser una tarea difícil debido a la general inaccesibilidad a la información post voladura. Implementar un ensayo con marcadores es una buena solución para este problema, sin embargo, es un ejercicio costoso y también desvía recursos de la producción. Como resultado, hay una cantidad limitada de datos disponibles para el flujo a escala real, especialmente para operaciones de block caving. Para superar esto, algunos estudios han empleado métodos indirectos de recolección de datos, que podrían hacer uso de marcadores geológicos, como tipo de roca, para determinar la forma de la zona de extracción. Las minas también pueden utilizar marcadores rudimentarios como soporte de malla de trabajos antiguos, neumáticos arrojados encima de la zona de subsidencia o partes de maquinaria que puedan haber quedado en niveles anteriores para determinar una altura aproximada de la zona de movimiento aislado (IMZ) [18]. Sin embargo, los ensayos con marcadores siguen siendo el método más confiable de recolección de datos.

Entre los primeros registros de ensayos con marcadores que se tienen registro son los reportados por Gustafsson [19] donde en 1998, en la mina subterránea de hierro de Kiruna, Suecia se llevaron a cabo ensayos experimentales con marcadores para estudiar el comportamiento del flujo de mineral en operaciones de minería por hundimiento de bloques. En aquella ocasión los marcadores, tanto físicos como electrónicos, se colocaron en puntos estratégicos dentro del material socavado para rastrear el movimiento de las partículas y medir la distribución del flujo en las bateas de extracción.

Estos ensayos permitieron observar que el flujo del mineral no era homogéneo, con variaciones significativas en la velocidad y el desplazamiento del material según el punto de hundimiento y extracción. Además, se identificó la formación de colgaduras y arcos que obstruían el paso del mineral, lo que fue clave para ajustar los ciclos de extracción y mejorar la eficiencia del proceso. El uso de estos marcadores proporcionó información valiosa sobre cómo se propagaba el hundimiento y ayudó a optimizar la operación, asegurando una recuperación más eficiente del mineral sin interrupciones significativas.

Gustafsson [19] concluyó que las colgaduras generadas por los bloques de gran tamaño en las bateas podían controlarse mejor ajustando la secuencia de extracción y el diseño de las

bateas. Además, se comprobó que la cohesión y tamaño del material socavado influían directamente en la formación de arcos que impedían el flujo continuo del mineral. Estos datos sirvieron para desarrollar y validar modelos numéricos que anticipaban el comportamiento del mineral en condiciones de hundimiento masivo. Las conclusiones mejoraron la planificación de la extracción, permitiendo minimizar los riesgos de obstrucción y optimizar el rendimiento de la mina. Estos avances influyeron notablemente en la eficiencia y seguridad de las operaciones subterráneas en Kiruna y en otras minas que adoptaron este enfoque.

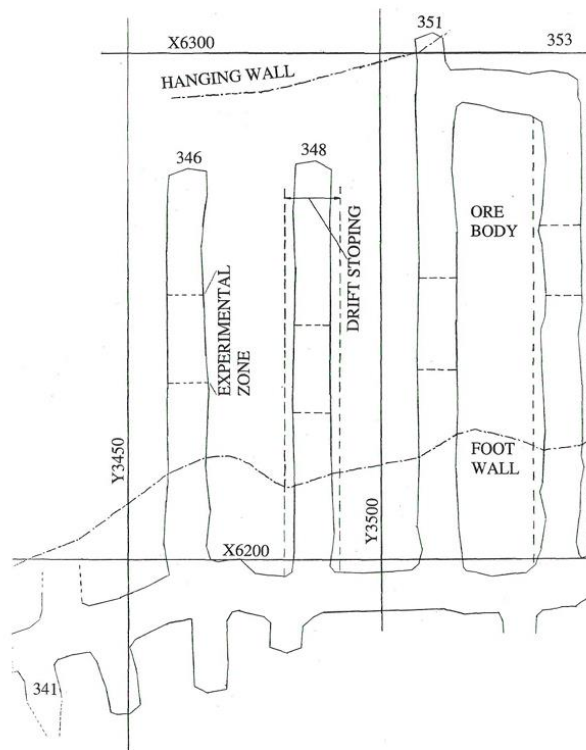


Figura 1: Plan horizontal del sitio experimental [19]

Posteriormente, muchas operaciones de Sub Level Caving (SLC) han utilizado ensayos con marcadores en el pasado para intentar cuantificar el comportamiento del flujo y desarrollar estrategias para aumentar la recuperación, no obstante, el más extenso de estos ensayos de caving de SLC fue realizado por Power [4] en la mina Ridgeway SLC. Se utilizaron un total de siete ensayos para determinar el comportamiento del flujo de material SLC volado en varios niveles. Cada ensayo utilizó aproximadamente 320 marcadores, de tamaño 42mm x 250mm, instalados en tres planos dentro de un anillo de carga de 2.6m. Los escenarios de SLC difieren ligeramente de los ensayos en Block Caving en que el material se fragmenta

mediante voladura, en lugar del proceso natural de caving impulsado por el estrés. Esto resulta en una fragmentación más fina y estrecha del material que debería comportarse de manera similar a los modelos elipsoidales desarrollados a partir de la modelización de arena. Power [4] determinó, sin embargo, que la variabilidad en el comportamiento de la voladura puede resultar en flujos perturbados, fuera de las formas elipsoidales esperadas.

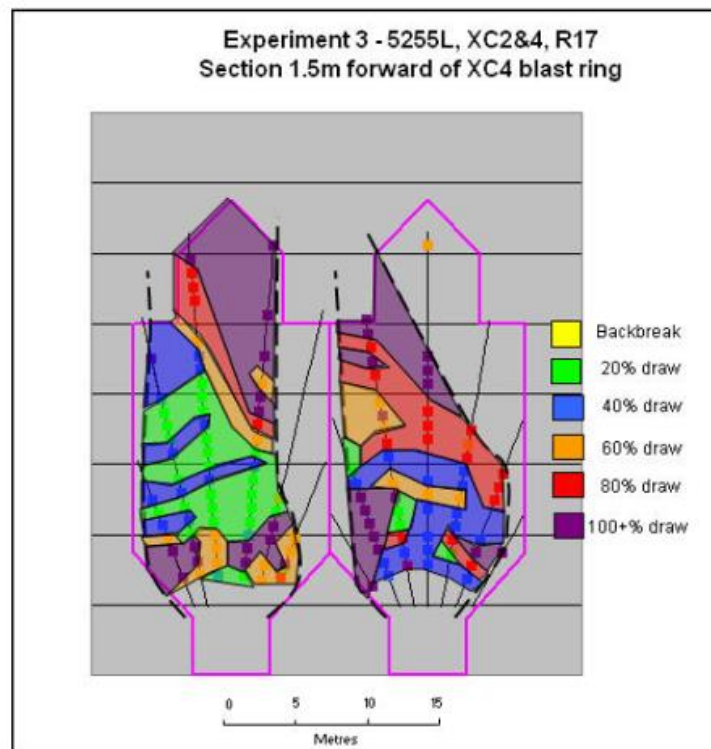


Figura 2: Recuperación de marcadores como función del porcentaje de masa extraída [4].

La fragmentación en Block Caving está fuertemente influenciada por la distribución y persistencia de juntas y fallas dentro de la masa de roca in situ. Una distribución tan amplia de tamaños de bloques también puede hacer que el flujo se desvíe del comportamiento elipsoidal convencional [12], como encontraron Brunton et al. [3], quienes realizaron el ensayo con marcadores más extenso hasta la fecha dentro de un caving de bloques. Brunton et al. [3] estudiaron una operación donde se instalaron cerca de 3000 marcadores sobre tres puntos de extracción en la dirección del ápice menor del Ridgeway Deeps block cave. Los experimentos tenían como objetivo cuantificar y evaluar la forma de la zona de extracción, mecanismos de flujo potenciales que controlan el comportamiento del flujo, identificar

posibles fuentes de ingreso de desechos y determinar el grado de variabilidad del comportamiento del flujo.

Brunton et al. [3] concluyen que existe un comportamiento perturbado del flujo el cual es resultado de grandes bloques de control que pueden desviar la forma ideal del elipsoide. Esto resulta en comportamientos como rat-holing localizado, altos atascamientos y segregación por tamaño. Los resultados resaltan la recuperación temprana de material en las cercanías del ápice principal, que se expande hacia el centro de las campanas de extracción monitoreadas a medida que se extraen más toneladas. Este tipo de comportamiento se desvía significativamente de la teoría de flujo convencional basada en modelos numéricos y modelos físicos a escala utilizando distribuciones estrechas de partículas idealizadas o agregados triturados. Un modelo que incorpora la heterogeneidad de tamaños de bloques dentro de las operaciones de caving, puede ser un ejercicio útil para cuantificar y entender el comportamiento de los datos del ensayo con marcadores.

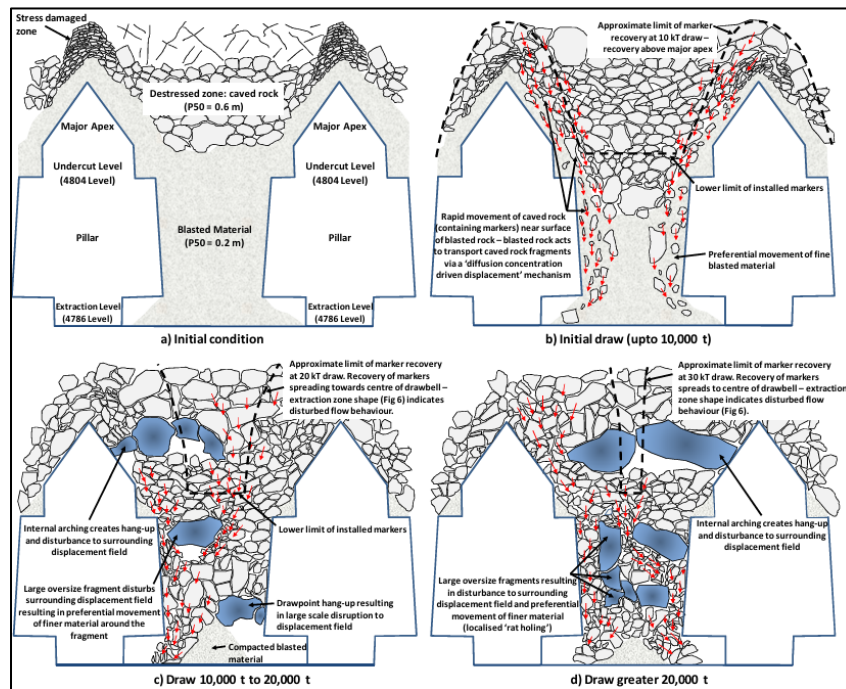


Figura 3: Modelo conceptual de flujo por gravedad perturbado en el campo cercano en la mina de cueva de bloques Ridgeway Deeps [3].

Posteriormente, se han realizado investigaciones de flujo gravitacional en operaciones de hundimiento a través de marcadores inteligentes, como la de Garces [20] situada en Bloque-

2 de mina Esmeralda, División el teniente el cual comenzó a registrar datos desde agosto de 2012 hasta enero de 2015, en donde la información de los trazadores se procesó empleando una interpolación lineal de la posición inicial de los marcadores y el tonelaje acumulado. Estos experimentos tenían como objetivo examinar la geometría de la zona de extracción y su evolución, junto con obtener datos que permitan entender el flujo gravitacional para mejorar aspectos de diseño minero y tiraje.

Garces [20] concluye que los resultados experimentales sugieren que el flujo gravitacional es más o menos regular dependiendo del tonelaje extraído y la diferencia de fragmentación observada en los puntos de extracción. Ese hallazgo muestra que el material removido no solo tiene un impacto significativo en el comportamiento del flujo y su crecimiento, sino que también influye en el movimiento de diferentes tamaños de partículas dentro de la columna de mineral.

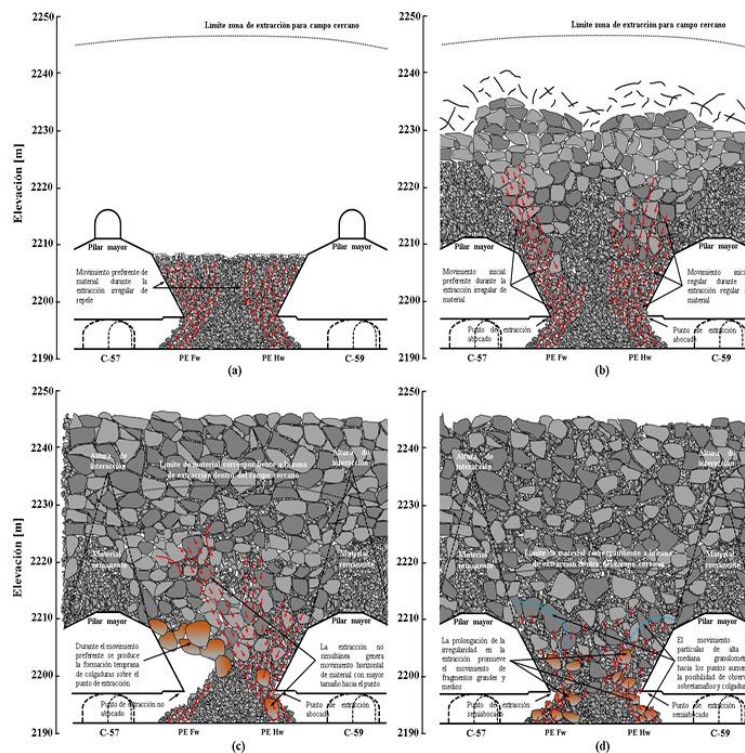


Figura 4: Modelo conceptual de flujo por gravedad en el campo cercano. (A) Extracción de roca volada de la campana; (B) extracción inicial de material por socavado (hasta 15 m por encima del nivel de socavado (UCL)) ; (C) elevarse hasta 25 m por encima del UCL; (D) elevarse hasta 35 m por encima de UCL [20].

2.3 Métodos numéricos de flujo gravitacional

Los modelos físicos, aunque han sido históricamente fundamentales en la investigación científica y la ingeniería, presentan desafíos significativos en términos de costos y complejidad. La construcción de un modelo físico puede requerir la fabricación de componentes especializados, la instalación de equipos de medición precisos y la dedicación de un espacio adecuado para su montaje. Además, la calibración y validación de un modelo físico pueden llevar mucho tiempo y requerir un alto grado de precisión y atención a los detalles.

Por otro lado, los modelos numéricos ofrecen una alternativa poderosa y flexible. Una vez que se han calibrado adecuadamente utilizando datos observacionales o experimentales, los modelos numéricos pueden simular una amplia gama de condiciones y geometrías de manera rápida y eficiente. Esto permite a los investigadores explorar diferentes escenarios y condiciones de manera sistemática, lo que puede conducir a una comprensión más profunda y detallada de los procesos físicos involucrados en el flujo de gravedad.

Además, los modelos numéricos permiten la realización de estudios de control, en los que se pueden modificar sistemáticamente los parámetros clave para evaluar su impacto en el comportamiento del flujo. Esta capacidad de realizar experimentos virtuales bajo condiciones controladas proporciona una herramienta invaluable para los investigadores y los ingenieros que estudian el flujo de gravedad, ya que les permite obtener información detallada y precisa sobre cómo diferentes factores influyen en el fenómeno.

Entre los métodos numéricos podemos encontrar:

2.3.1 Modelo cinemáticos y difusión de vacíos:

- **Modelos Cinemáticos:** Se basan en la teoría de que el flujo de partículas se puede describir mediante ecuaciones que representan el movimiento colectivo de las partículas. Estos modelos consideran las interacciones entre partículas y cómo estas afectan el movimiento general del material.
- **Modelos de Difusión de Vacíos:** Estos modelos se enfocan en cómo los espacios vacíos entre partículas se mueven y cambian a lo largo del tiempo. La idea es que los

vacíos se “difunden” a través del material granular, lo que afecta la forma en que fluye el conjunto de partículas.

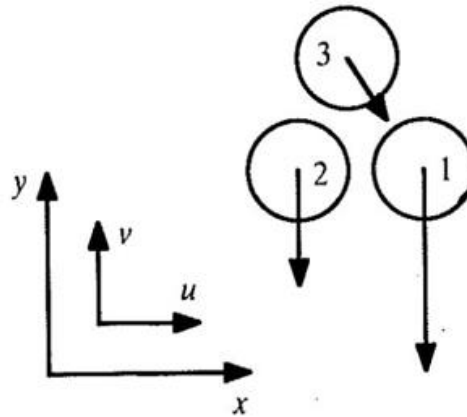


Figura 5: Modelo cinemático de Nedderman y Tuzun [21]

2.3.2 REBOP:

REBOP (Emulador Rápido Basado en PFC3D) ha sido desarrollado por HClasca como una forma de superar la naturaleza inherentemente lenta del DEM [22,23]. REBOP incorpora reglas para el balance de masa entre capas que han sido calibradas tanto para el modelado DEM como para el trabajo experimental.

El emulador permite simulaciones de vida de mina de operaciones de hundimiento utilizando parámetros físicos. Estos incluyen el ángulo de fricción del material, el diámetro medio del fragmento y el salto de porosidad. Todos estos pueden ser utilizados para influir en la recuperación de un punto de extracción dentro del modelo. Sin embargo, en la práctica, muchos de estos parámetros de entrada pueden ser difíciles de medir. Esta es una oportunidad donde el modelado DEM también puede ser capaz de contribuir.

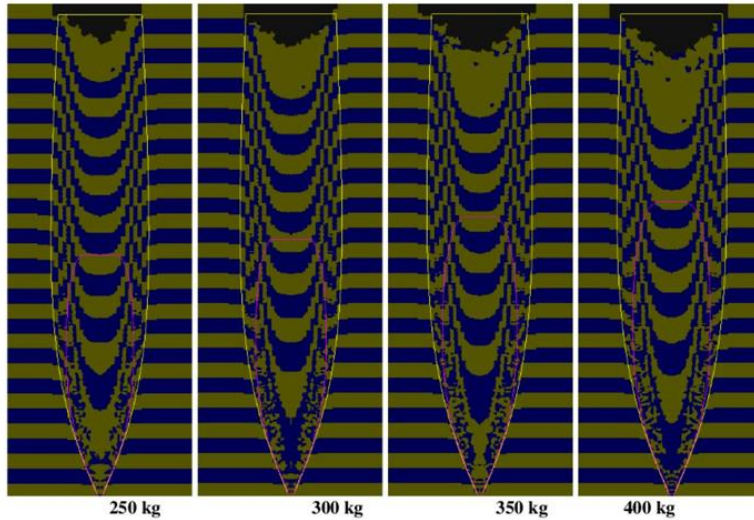


Figura 6: Perfiles de reducción del REBOP [23].

2.3.3 Modelos continuos:

Los modelos continuos se basan en la noción de que los materiales pueden describirse mediante pequeños elementos de volumen donde las propiedades pueden expresarse utilizando relaciones deterministas. Los flujos granulares presentan un desafío único para la modelización continua, ya que el medio generalmente consiste en un conjunto discreto no cohesivo de partículas dentro de una distribución de tamaño dada. Al usar un elemento de volumen aproximado, los modelos continuos encuentran dificultades para capturar comportamientos fundamentales del flujo como cadenas de fuerza, formación de túneles y atascos [24]. La bifurcación debido a la formación de bandas de cizalla también presenta un problema interesante al usar métodos continuos y actualmente se investiga utilizando enfoques de Cosserat [25]. Como resultado de este trabajo, las transiciones de límites pueden incorporarse en las ecuaciones gobernantes que impulsan el flujo.

2.3.4 Autómatas celulares:

Los Autómatas Celulares (CA) son un método computacional discreto mediante el cual se puede resolver un problema dividiendo un dominio en una cuadrícula de celdas que interactúan entre sí utilizando un conjunto de reglas preestablecidas [26]. La aplicabilidad de los CA ha permitido su uso para reproducir con éxito fenómenos naturales como el crecimiento de la población, la propagación de enfermedades, incendios, deslizamientos de

tierra y terremotos. Aunque el marco para un código de CA parece simple, los CA tienen la capacidad de incorporar cantidades físicas en los cálculos, como el estrés, la forma de las partículas y el ángulo de fricción [27].

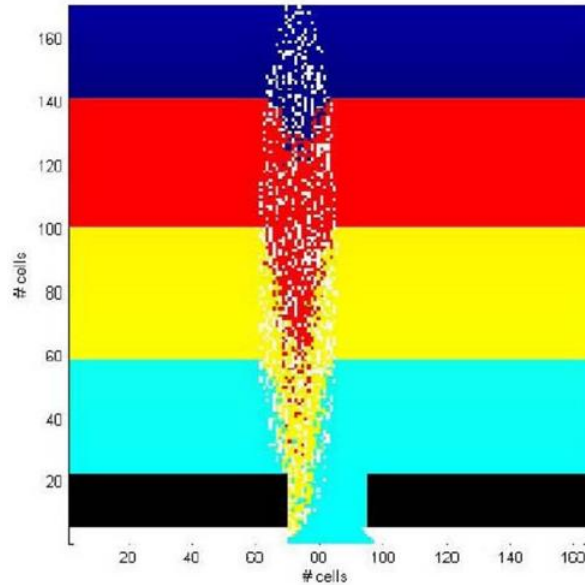


Figura 7: Modelo de difusión de vacíos [6].

2.3.5 Modelo spot

El modelo Spot introducido por Rycroft et al. [28] se describe mejor como un modelo acoplado que combina un DEM elástico simple con difusión estocástica de vacíos. Al combinar ambos modelos, se afirma que las simulaciones son 100 veces más rápidas que el DEM sin perder demasiada precisión [28,29]. Al utilizar las interacciones DEM entre partículas, se permiten interacciones físicas realistas, mientras que el vacío estocástico se usa para limitar las regiones de partículas donde son necesarios más cálculos debido al movimiento.

El modelo Spot funciona superponiendo el "spot", una esfera abarcadora aproximadamente 2.6 veces el diámetro de la partícula más grande, cerca del punto de extracción. La simulación sigue los siguientes pasos de manera iterativa hasta que el spot llega a la parte superior del modelo:

1. Se aplica un movimiento hacia arriba al spot basado en probabilidades de movimiento lateral y vertical.
2. Todas las partículas dentro del spot se mueven en la dirección opuesta al movimiento del spot.
3. Luego se realiza un paso de relajación utilizando repulsión elástica pura para estabilizar las partículas movidas. Esto implica usar un spot más grande que rodea al spot original, lo que permite llevar todas las partículas al equilibrio.

La introducción de un nuevo spot en la base del punto de extracción tiene el efecto de extraer material del modelo. La tasa de extracción puede implementarse a través del número de spots introducidos en el modelo. Una comparación cualitativa entre el modelo Spot y las simulaciones de flujo DEM muestra que ambos modelos están en buen acuerdo [28]. Una desventaja importante del modelo Spot es que está limitado en su alcance. El movimiento del material está inherentemente ligado al movimiento del spot, lo que dificulta capturar procesos fuera de lo que ha sido diseñado, como el rilling (formación de surcos).

2.4 Método DEM

El Método de Elementos Discretos (DEM,) propuesto por primera vez por Cundall y Strack [30] entrega una forma de simular material granular modelando cada grano como una partícula individual. Las partículas pueden interactuar entre sí mediante repulsión elástica con un componente de fricción. El movimiento de cada partícula se puede calcular integrando la segunda ley de Newton repetidamente en incrementos de tiempo cortos. El DEM es muy costoso computacionalmente; sin embargo, al incorporar física entre partículas en interacción, el método puede proporcionar una gran cantidad de información sobre el comportamiento fundamental, que no se puede lograr con otros métodos computacionales [6, 31-33].

Dado que el DEM tiene bases en la física newtoniana, muchos han concluido que tiene el mayor potencial de todos los métodos numéricos como herramienta de investigación para la modelización de flujos de caving [34,35]. El principal inconveniente del DEM es su limitación en cuanto al tamaño de las simulaciones que pueden realizarse en la actualidad.

Como resultado, muchos modelos de DEM solo permiten analizar la extracción de material de forma aislada y a alturas de bloque reducidas.

Los modelos de DEM para flujos generalmente parten del mismo supuesto utilizado en la modelización física: un estado inicial donde el montón de material está formado y listo para ser extraído. La recreación de esta columna se logra mediante algoritmos que llenan un espacio con una distribución específica de partículas. Estas partículas se colocan en una geometría definida por paredes planas, que representan la geometría del punto de extracción, la base y los lados del modelo. Luego, las partículas se asientan gravitacionalmente y se simula la apertura del punto de extracción para representar el proceso de extracción. Posteriormente, se pueden estudiar los efectos de la geometría, el tamaño de las partículas y parámetros como la rigidez y el ángulo de fricción interno mediante estudios de control.

Un estudio realizado por Pierce et al. [36] utilizando un modelo geométrico de una batea de un solo punto de extracción muestra que el modelo DEM coincide bien con el comportamiento de los experimentos de modelización física. Estos resultados también dieron lugar a una explicación de la mecánica del flujo basada en cambios en la porosidad; una variable difícil de medir utilizando experimentos físicos. En los experimentos, se permitió que partículas con un radio promedio de 0,35 m fluyeran a través de una abertura de radio 7 m dentro de un modelo de 42 m de altura, 19,25 m de ancho y 19,25 m de profundidad. Las partículas se extrajeron del modelo utilizando un perfil de velocidad aplicado en la base, lo que representa el flujo hacia un campanario de extracción. Al hacer esto, se eliminó la necesidad de modelar directamente la geometría del campanario de extracción. El uso de la cuarta simetría y el perfil de velocidad permitieron una reducción en el tiempo de cálculo.

La mayor parte de los resultados presentados por Pierce et al. [36] se relacionan solo con las regiones IMZ. Las conclusiones de estos experimentos muestran que el tamaño de la IMZ se ve afectado tanto por la forma como por el tamaño de las partículas; sin embargo, la excentricidad de la IMZ no se ve afectada por el tamaño de las partículas. Esto está en buen acuerdo con los resultados de pruebas físicas en 2D de Peters [7]; sin embargo, tanto Power [4] como Castro [6] han demostrado lo contrario utilizando el modelo físico en 3D. Dado que el modelo PFC3D tenía solo 42 m de altura, se requieren más pruebas a alturas mayores para

un examen más crítico. Esta es un área en la que el uso de un código DEM paralelo como ESyS-Particle podría contribuir.

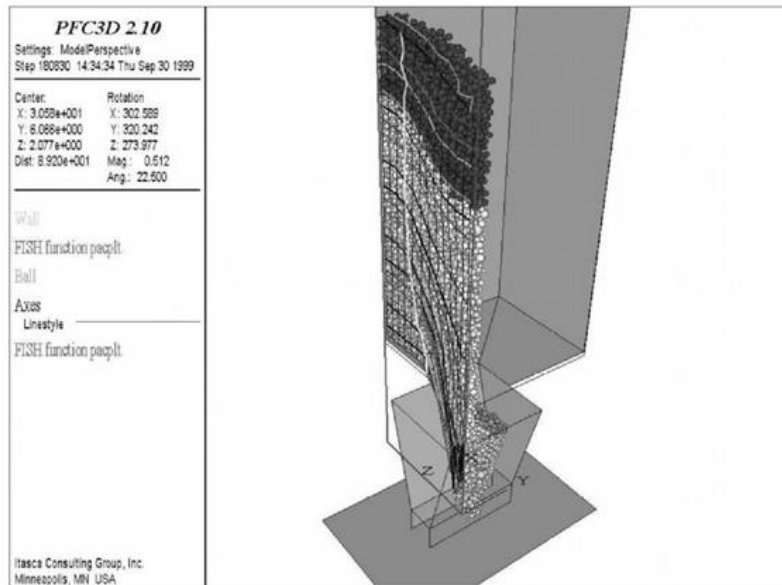


Figura 8: Modelo de elementos discretos PFC3D [22].

2.4.1 Procedimiento de cálculo matemático en DEM

Un software basado en el Método de Elementos Discretos (DEM) sigue los siguientes pasos para calcular el estado físico de cada partícula, que incluye su posición, velocidad y momento rotacional:

Aplica, la **Tercera Ley de Newton**, que indica que a toda acción corresponde una reacción de igual magnitud, pero en sentido opuesto. Esta ley es clave para entender cómo interactúan las partículas y determinar la fuerza neta que actúa sobre ellas en cada etapa del cálculo.

$$F_{12} = -F_{21} \quad (1)$$

La fuerza neta resultante se divide en dos componentes: una perpendicular a la superficie de la esfera y otra tangencial. Estas componentes se calculan aplicando la ley de Hooke. Básicamente, el software modela la fuerza neta que una partícula ejerce sobre otra como la suma de las fuerzas de dos resortes, cada uno con su propio coeficiente de elasticidad.

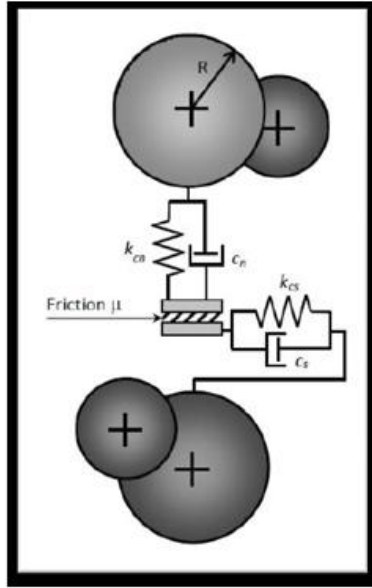


Figura 9: Interacción entre dos partículas por medio de resortes [37].

La Segunda Ley de Newton establece que la fuerza aplicada a un objeto es igual a la masa del objeto multiplicada por la aceleración que experimenta debido a esa fuerza. Esta ley permite calcular la aceleración (A_1) de una partícula de masa (M_1) en función de la fuerza neta (F_1) aplicada sobre ella.

$$M_1 A_1 = F_1(t) \quad (2)$$

La Primera Ley de Newton indica que un objeto permanecerá en su estado actual de reposo o movimiento uniforme en línea recta a menos que una fuerza externa actúe sobre él [38]. Esta ley lleva a la ecuación (3), que permite calcular la nueva velocidad, V_1 , de una partícula en función de la aceleración, A_1 , a la que está sujeta y el intervalo de tiempo Δt entre las iteraciones.

$$V_1(t + \Delta t) = V_1(t) + \Delta t A_1(t) \quad (3)$$

Utilizando el cálculo infinitesimal, se deriva la ecuación de trayectoria, que permite calcular la posición actualizada $P_1(t + \Delta t)$ de la partícula cuando hay un incremento en el tiempo Δt . Para esto, se considera la posición previa en el cálculo $P_1(t)$, la velocidad en ese momento $V_1(t)$, y la aceleración $A_1(t)$.

$$P_1(t + \Delta t) = P_1(t) + \Delta t V_1(t) + 0.5 \Delta t^2 A_1(t) \quad (4)$$

2.4.2 DEM aplicado a la minería

Las simulaciones numéricas basadas en DEM tienen una ventaja significativa en la industria minera, ya que permiten obtener una amplia gama de información sobre los procesos modelados, información que sería difícil de obtener con modelos físicos tradicionales. Sin embargo, estas simulaciones están limitadas a modelos relativamente pequeños, por lo general compuestos por decenas o cientos de miles de partículas. La realización de simulaciones a gran escala, que implican millones de partículas, requiere una capacidad de procesamiento que suele estar más allá de los recursos disponibles en la mayoría de las empresas mineras.

Por ejemplo, se utilizan en la minería para estudiar el comportamiento del flujo de material granular, basándose en modelos físicos de caving, estudios de colgaduras, estimación de cave back, stockpiles, así como en bombeo de finos. Estos ejemplos se pueden observar en algunas de las siguientes figuras:

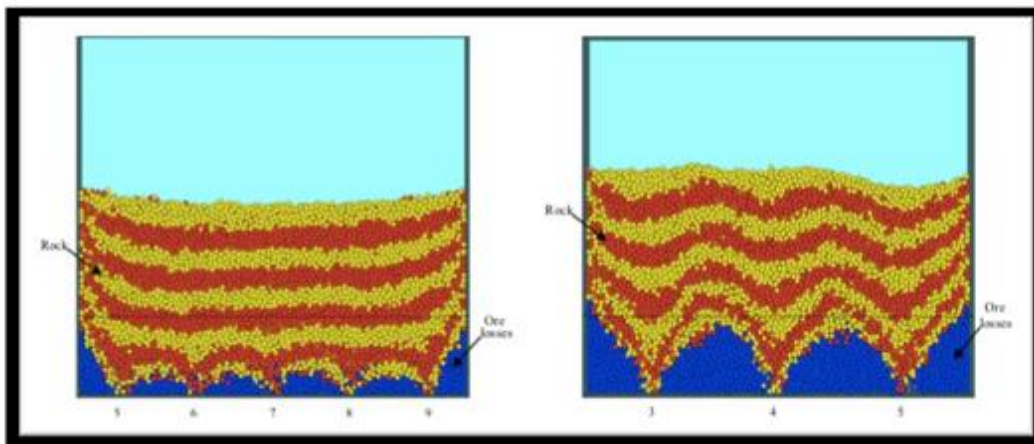


Figura 10: Desplazamiento de material en modelo numérico [39].

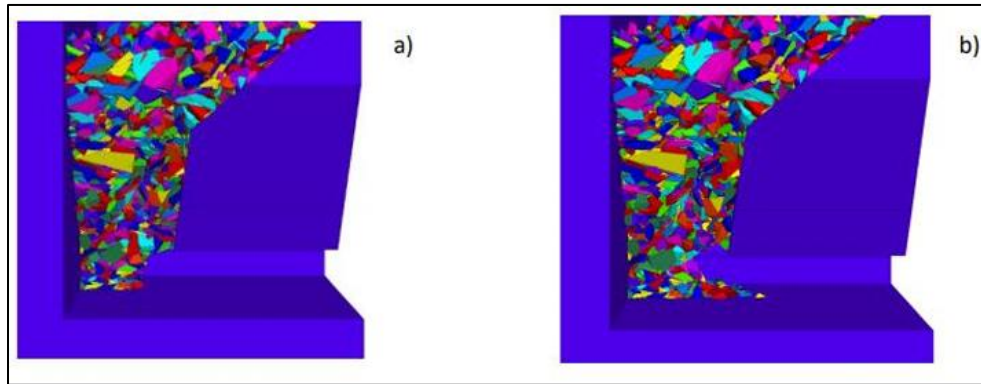


Figura 11: a) Extracción de material. b) Formación de colgaduras [40].

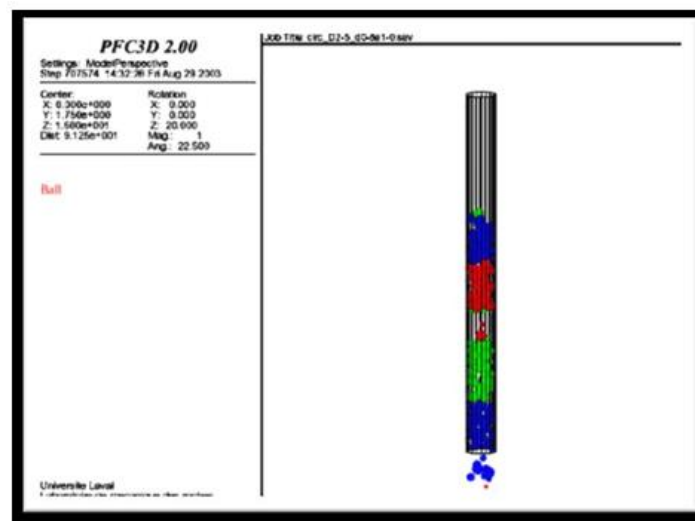


Figura 12: Modelo numérico desarrollado por Hadjigeorgiou [41].

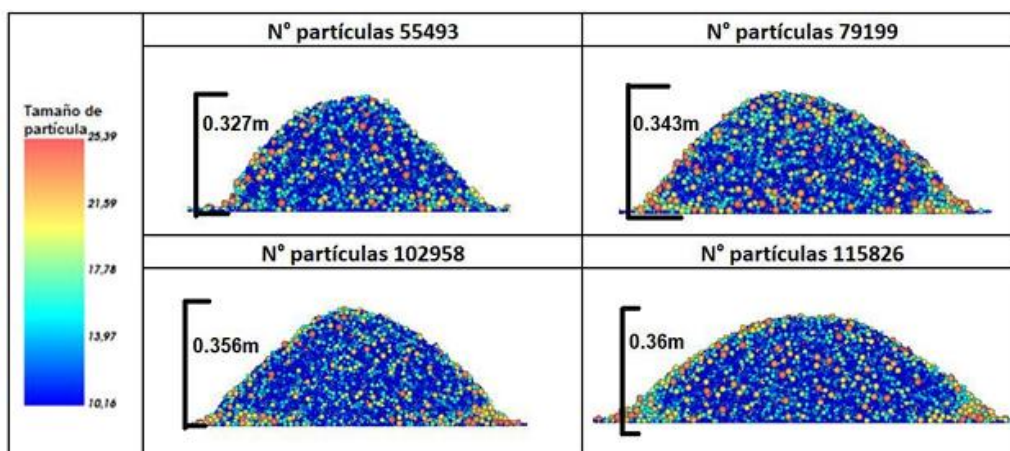


Figura 13: Stockpile (corte interior) con distinto número de partículas [42].

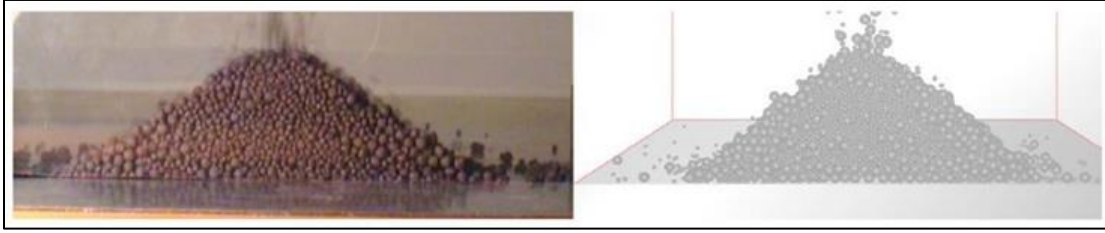


Figura 14: Replica de modelo físico en modelo numérico en stockpiles [43].

2.5 Rocky DEM

Rocky DEM es un software de simulación de dinámica de partículas creado por ESSS (Engineering Simulation and Scientific Software) y actualmente perteneciente a ANSYS. Este software se emplea principalmente en la simulación de sistemas de manejo de materiales a granel y procesos de granulación, comunes en la industria minera, alimentaria, farmacéutica, agrícola y otros sectores.

Rocky está diseñado para abordar problemas de ingeniería y destaca por su capacidad para modelar formas reales de partículas, como sólidos, capas 2D y fibras rígidas y flexibles. Proporciona simulaciones precisas y fieles, gracias a la tecnología de resolución de GPU que le permite simular el comportamiento de partículas de diversas formas y tamaños en aplicaciones industriales.

Este software se basa en el Método de Elementos Discretos (DEM) y se especializa en simular el comportamiento de materiales granulares. Su funcionamiento se fundamenta en los siguientes principios:

- Interacción de partículas teniendo en cuenta todos los elementos del medio.
- Movimiento de partículas considerando cada elemento individualmente.
- Cálculo de las ecuaciones de movimiento respectivas en tiempo real durante la simulación.

Estos conceptos se pueden visualizar en el siguiente diagrama:

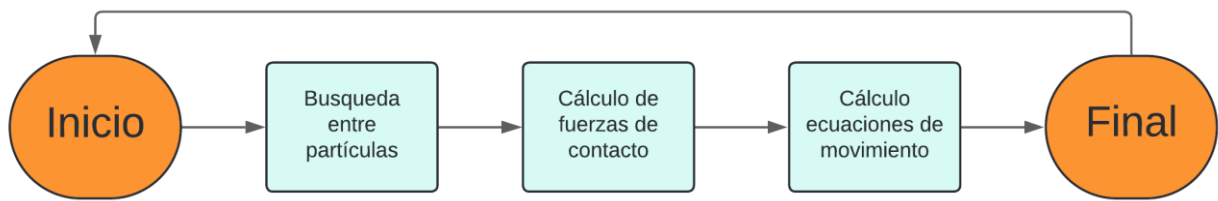


Figura 15: Diagrama de estructura de software DEM

2.5.1 Fuerzas de contacto entre partículas

Un aspecto fundamental del Método de Elementos Discretos (DEM) es que las partículas son consideradas indeformables. Sin embargo, cuando estas partículas entran en contacto, se produce una superposición, a partir de la cual se calculan las fuerzas de interacción entre ellas. Las fuerzas normales de contacto se determinan mediante los valores de superposición de partículas (S_n), mientras que las fuerzas tangenciales dependen del desplazamiento relativo de las partículas (S_t).

2.5.1.1 Fuerzas normales de contacto

Estas fuerzas surgen cuando las partículas chocan entre sí, generando una fuerza de repulsión mutua. Es importante considerar el factor de disipación de energía, representado por el coeficiente de restitución (ϵ), que varía entre 0 y 1. En Rocky, para el modelo histerético escogido estas fuerzas se expresan de la siguiente manera:

$$F_n = \min(K_{nl}S_n^t, F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta S_n) \text{ si } \Delta S_n \geq 0 \quad (5)$$

$$F_n = \max(F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta S_n, \lambda K_{nl}S_n^t) \text{ si } \Delta S_n < 0 \quad (6)$$

$$\Delta S_n = S_n^t * S_n^{t-\Delta t} \quad (7)$$

Donde,

- F_n y $F_n(t-\Delta t)$: representan las fuerzas elasto-plásticas de contacto en los momentos t y $t-\Delta t$ respectivamente, donde Δt es el paso de tiempo.
- ΔS_n : indica el cambio normal en la superposición de contacto de las partículas durante un período de tiempo dado. Es positivo cuando las partículas se acercan y negativo cuando se repelen.
- K_{nl} : es el factor de rigidez no lineal para el momento de impacto.
- K_{nu} : es el factor de rigidez no lineal para el momento de repulsión.
- λ : es una constante adimensional, que en Rocky tiene un valor de 0.0001, utilizada para que las fuerzas normales regresen a cero cuando la superposición de las partículas es cero.

La figura 16 muestra un ciclo de interacción y repulsión entre partículas. En los puntos A-B, se describe el proceso de contacto inicial, donde la fuerza normal aumenta linealmente con la superposición. Luego, una vez que se alcanza la superposición máxima, las partículas comienzan a repelerse (etapa B-C). Es importante destacar que cualquier deformación plástica se limita al período de contacto, y una vez que este cesa, todas las partículas regresan a su forma original. En términos de colisión, la energía disipada se puede calcular como el área bajo el diagrama presentado:

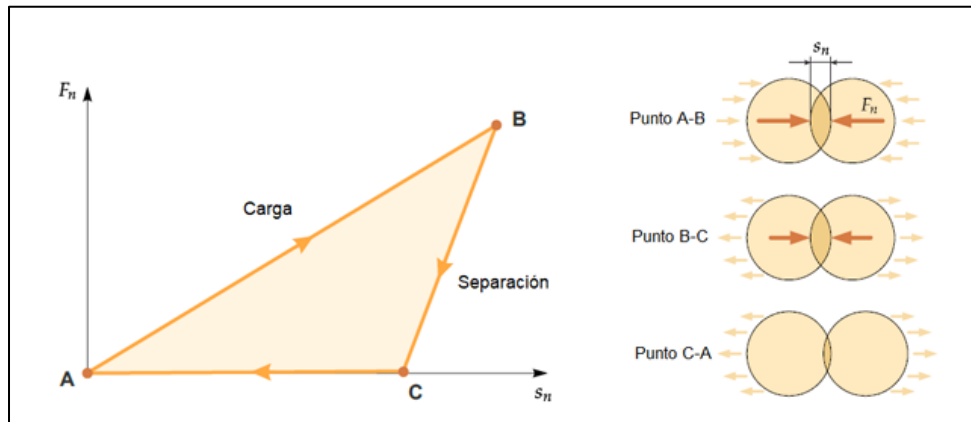


Figura 16: Esquema del comportamiento de la fuerza normal en el modelo histerético [44].

2.5.1.2 Fuerzas tangenciales de contacto

Las fuerzas tangenciales se pueden entender en términos de coeficientes de fricción estática y cinética. Rocky emplea las siguientes ecuaciones para describir estas fuerzas, derivadas del modelo de resorte límite de Coulomb:

Cuando no hay movimiento de partículas:

$$F_t = \min(F_t^{t-dt} + K_{nl}dS_t, \mu_s F_n) \quad (8)$$

Cuando hay movimientos de partículas:

$$F_t = \min(F_t^{t-dt} + K_{nl}dS_t, \mu_d F_n) \quad (9)$$

Donde:

- S_t : Desplazamiento tangencial relativo de la partícula.
- μ_s : Coeficiente de fricción estática.
- μ_d : Coeficiente de fricción dinámica.

2.5.2 Modelo de adhesión de partículas

La capacidad de un material a granel para cohesionarse o adherirse está influenciada por las fuerzas de tensión. En Rocky, se presentan las siguientes opciones de modelos de fuerzas adhesivas para abordar este fenómeno al ajustar la cohesión/adhesión en función de la fuerza de contacto correspondiente.

2.5.2.1 Modelo de fuerza adhesiva constante

Con la calibración adecuada, el modelo de fuerza adhesiva constante puede usarse para simular el comportamiento de materiales adhesivos que no presentan efectos de consolidación por esfuerzo.

$$F_{n,adh} = 0, \quad \text{si } S_n \geq \delta_{adh} \quad (10)$$

$$F_{n,adh} = f_{adh} g \min(m_1, m_2), \quad \text{si } S_n < \delta_{adh} \quad (11)$$

Donde:

- $F_{n,adh}$: Fuerza normal adhesiva de contacto.
- S_n : Superposición normal de contacto.
- m_1, m_2 : Masa de las partículas en contacto.
- g : Aceleración de gravedad.
- δ_{adh} : Distancia cohesiva. Si la distancia entre dos partículas o entre una partícula y una superficie límite está por debajo de δ_{adh} , se activará la fuerza adhesiva. En Rocky, el valor de este parámetro puede definirse en el panel del editor de interacción de materiales.
- f_{adh} : Fuerza de fricción. El valor de la fuerza adhesiva será igual a la fuerza de gravedad de la partícula multiplicada por el valor de f_{adh} . Si la fuerza de fricción es 1, eso significa que la fuerza adhesiva será igual a la fuerza de gravedad sobre la partícula. En el caso de contacto entre dos partículas de diferente masa, se considera la masa más pequeña para los cálculos de la fuerza de gravedad.

El modelo de fuerza adhesiva constante funciona con los tres tipos de modelos de fuerza normal en Rocky, incluyendo el modelo hysteretic linear spring, el modelo linear spring-dashpot y el modelo Hertzian spring dashpot.

2.5.2.2 Modelo de fuerza adhesiva lineal

Al igual que el modelo de fuerza adhesiva constante, el modelo de fuerza adhesiva lineal requiere la calibración del comportamiento del material. Este modelo es apropiado para materiales granulares con consolidación por estrés. El modelo de fuerza adhesiva lineal, tal como se implementa en Rocky, puede describirse mediante la siguiente expresión.

$$F_{n,adh} = 0, \quad \text{si } -S_n \geq \delta_{adh} \quad (12)$$

$$F_{n,adh} = r_{adh}K_{nl}(S_n + \delta_{adh}), \quad \text{cualquier otro caso} \quad (13)$$

Donde:

- $F_{n,adh}$: Fuerza normal adhesiva de contacto.
- S_n : Superposición normal de contacto en el momento actual. Se asume que es positivo cuando las entidades en colisión se tocan entre sí, y negativo cuando están separadas

pero cercanas. En este último caso, su valor absoluto dará la distancia de separación entre esas entidades (dos partículas o una partícula y una superficie límite).

- δ_{adh} : Distancia cohesiva. La fuerza adhesiva entre dos entidades vecinas será mayor que cero si y solo si la distancia de separación entre ellas es menor que el valor de δ_{adh} .
- r_{adh} : Fracción de rigidez. Este parámetro se define como la relación entre la rigidez adhesiva y la rigidez de carga de contacto.
- K_{nl} : Rigidez normal de contacto.

El modelo adhesivo lineal, en esencia, se comporta como un resorte lineal atractivo. Cuando dos entidades vecinas están separadas pero cercanas, la fuerza adhesiva es cero si la distancia real entre ellas es mayor que la distancia adhesiva. Cuando se supera ese umbral y las entidades se acercan, la fuerza adhesiva aumenta proporcionalmente a la diferencia entre la distancia adhesiva y la distancia de separación real. Si se alcanza el contacto físico, la fuerza adhesiva aumenta aún más, esta vez proporcionalmente a la suma de la distancia adhesiva y la superposición. El coeficiente de proporcionalidad se define en ambos casos como la rigidez adhesiva, dada por $r_{adh}K_{nl}$.

2.5.2.3 Modelo de fuerza adhesiva JKR

El modelo Johnson-Kendall-Roberts (JKR) introduce el efecto de la adhesión en el modelo de contacto Hertziano. En el modelo JKR, el área de contacto entre dos partículas es ligeramente mayor que la predicha por la teoría Hertziana.

La parte adhesiva de la fuerza normal cuando se emplea el modelo JKR se da por:

$$F_{n,adh} = \sqrt{8\pi\Gamma E * a^3} \quad (14)$$

Donde:

- Γ : Energía superficial. El valor de este parámetro puede introducirse en un panel del editor de interacción de materiales.

- E: Módulo de Young efectivo.
- a : es el radio de contacto entre partículas o entre una partícula y una superficie límite.

El modelo JKR tiene una sólida base teórica y es ampliamente aceptado para esferas elásticas adhesivas. Dado que la energía superficial puede medirse experimentalmente, este modelo podría usarse sin calibración, en principio, para simular esferas perfectas. En cualquier otro caso, aún se necesitará calibración. En Rocky, el modelo de fuerza adhesiva JKR solo funciona con el modelo Hertzian spring-dashpot.

2.5.3 Tipo de partículas disponibles en Rocky.

Una de las ventajas distintivas de Rocky frente a otros programas DEM es su habilidad para adaptarse a variaciones en la geometría de las partículas. Esto significa que se pueden seleccionar formas específicas de un catálogo o incluso crear formas personalizadas según las necesidades del usuario. La utilización de partículas con formas diversas tiene como objetivo lograr resultados de simulación más precisos y realistas.

En Rocky, se dispone de las siguientes partículas para utilizar:

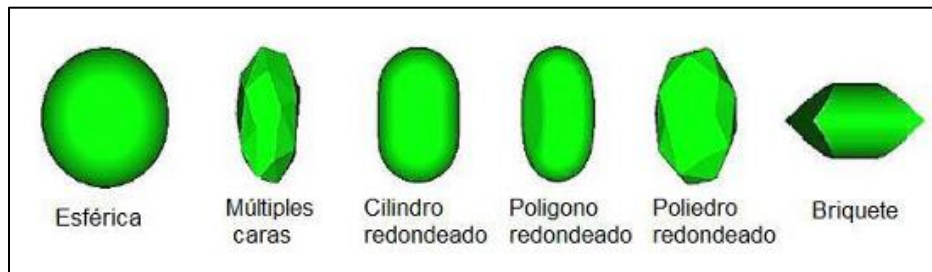


Figura 17: Partículas disponibles en Rocky

Para finalizar, una vez que se ha entendido el funcionamiento del software, es importante describir cómo se desarrolla el proceso de trabajo con Rocky. Este proceso se puede dividir en tres etapas, como se muestra en el diagrama a continuación:

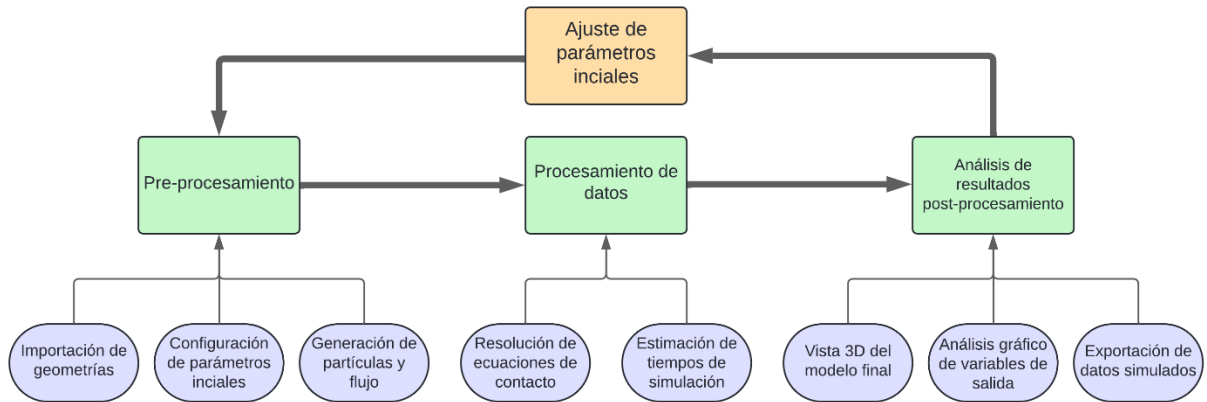


Figura 18: Diagrama de trabajo de Rocky.

- **Preprocesamiento:** En esta fase, se ajustan todos los parámetros de entrada necesarios, como la gravedad, el tamaño y la densidad de las partículas, los coeficientes de fricción y las formas de las partículas, entre otros. Además, se importan las geometrías requeridas y se configura un punto inicial para el flujo de partículas, el cual se desarrollará según las indicaciones del usuario.
- **Procesamiento de datos:** En esta etapa, el software realiza los cálculos internos de las fuerzas de contacto. La duración de estas simulaciones depende de varios factores, como la cantidad de partículas, la complejidad de sus formas, las condiciones de contorno aplicadas y factores que afectan la interacción entre partículas.
- **Análisis de resultados:** Una vez completada la simulación, se obtiene una visualización completa del flujo de partículas. Además, se pueden emplear diversas herramientas gráficas para analizar e interpretar las variables de salida, lo que permite obtener información valiosa.

Parámetros de entrada del modelo

A continuación, se describen los parámetros que se pueden editar en Rocky para realizar la simulación correspondiente. Como se ha mencionado, el enfoque principal del software está en el cálculo de las fuerzas de contacto entre partículas. Algunos de estos parámetros son:

- Resistencia a la rodadura: Se emplea para calcular la fuerza que hace que el objeto pierda energía mientras rueda, impidiendo que continúe su movimiento indefinidamente.
- Módulo de elasticidad: Propiedad mecánica que caracteriza la capacidad de un material para resistir la deformación bajo carga.
- Tangencial Stiffness: Se emplea para calcular la fuerza necesaria para generar un desplazamiento relativo entre las dos superficies en contacto en la dirección tangencial.
- Restitution Coefficient: Se emplea para calcular la elasticidad de una colisión entre dos cuerpos.
- Dynamic Friction: Se utiliza para calcular la fuerza de fricción (μS) cuando las partículas están en movimiento.
- Static Friction: Se emplea para calcular la fuerza de fricción (μD) cuando las partículas no están en movimiento.

3. Metodología

Para lograr los objetivos propuestos, es imprescindible desarrollar una metodología experimental que permita planificar el trabajo a realizar. Esta metodología no solo debe establecer un cronograma de las actividades, sino que también debe detallar minuciosamente todas las variables claves que serán fundamentales para el éxito de las simulaciones. Entre estas variables, se debe definir el modelo numérico que se utilizará, especificando sus dimensiones y parámetros técnicos, ya que esto servirá como base para la simulación de los fenómenos a estudiar.

Además, es necesario describir en detalle los equipos que se emplearán para la extracción del material, asegurando que su capacidad y funcionamiento se ajusten a los requerimientos del experimento. Las características del material son otro aspecto por considerar, ya que influirán directamente en los resultados de las simulaciones. Esto incluye la definición de las curvas granulométricas para representar la distribución de tamaño de las partículas en el material a ser analizado.

Asimismo, es fundamental proporcionar una descripción detallada de la construcción de las simulaciones, abordando tanto la fase inicial de diseño como las etapas posteriores de desarrollo. Esto implica detallar los pasos necesarios para la configuración de los modelos, los ajustes específicos que deberán realizarse durante el proceso, y las estrategias para asegurar que las simulaciones se desarrollen conforme a los parámetros definidos.

3.1 Procedimiento experimental

A continuación, se presenta un esquema del procedimiento experimental que se implementará en este trabajo, acompañado de una descripción de cada etapa clave en el proceso. Este

esquema tiene como objetivo guiar el desarrollo de las simulaciones y asegurar que cada fase se ejecute conforme a lo planeado. Asimismo, se establecen los principales objetivos que deberán alcanzarse en cada una de las etapas, garantizando que todos los aspectos críticos del procedimiento estén contemplados. Desde la preparación inicial de los modelos y la calibración de los equipos, hasta el desarrollo y análisis de las simulaciones, cada fase estará orientada a cumplir con los parámetros previamente definidos, asegurando de esta forma que los resultados sean precisos y acordes a los objetivos planteados en la investigación.

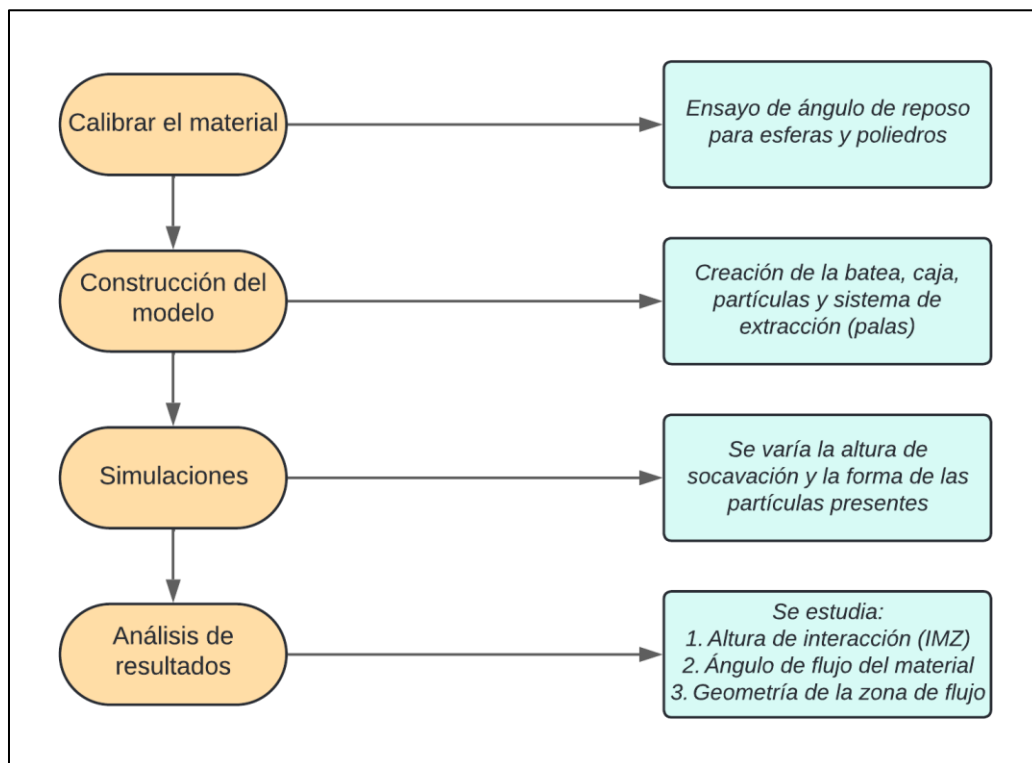


Figura 19: Procedimiento experimental

A continuación, se detalla el paso a paso en la construcción de las simulaciones:

- La primera etapa consiste en el llenado de la batea con sus respectivos materiales (socavado y primario), donde se incorporan los detalles de cada una de las simulaciones en cuanto a forma y cohesión, los cuales serán detallados posteriormente.
- Luego, se da comienzo a la simulación, donde el tiempo de ciclo de las palas es de 9.3 [s] individualmente para todas las simulaciones.

- Posteriormente, comienza la etapa de extracción, donde alternadamente se extrae material desde cada punto de extracción a través del movimiento continuo de palas.
- El experimento terminaba al realizar 1000 [s] de simulación.

Más adelante se detalla cada una de las variables en el proceso.

3.2 Diseño del modelo numérico

3.2.1 Dimensiones de la caja

Las dimensiones de la caja corresponden a la representación de una columna de extracción de 50 m a escala mina, como se muestra en la figura 20, la cual es un esquema en dos dimensiones del modelo numérico, con sus respectivas dimensiones.

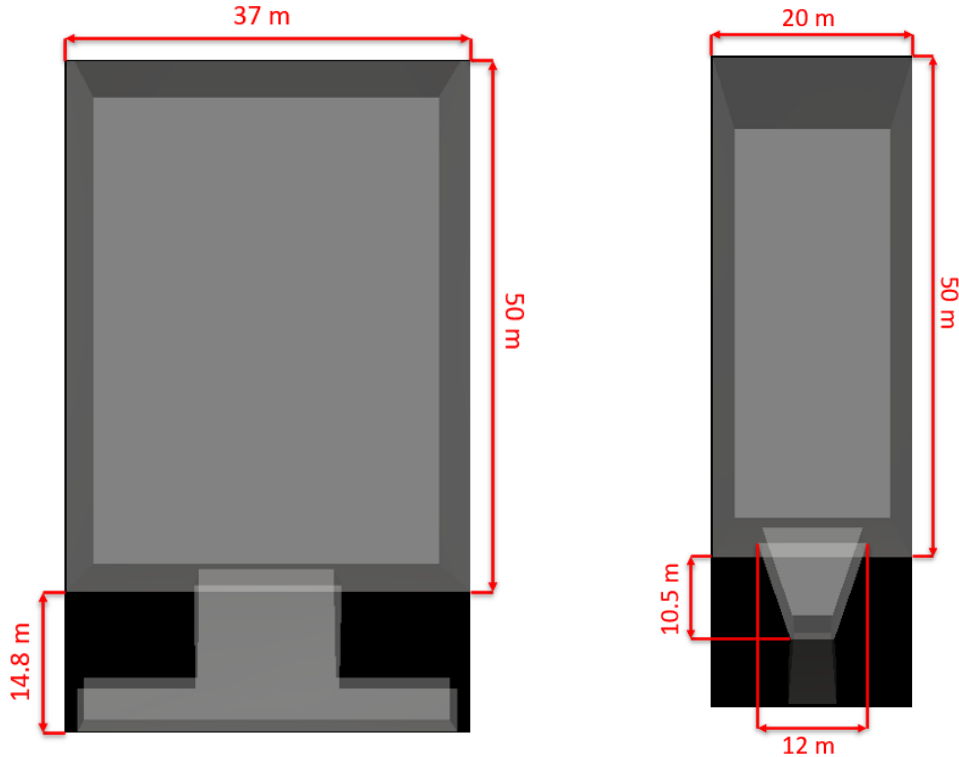


Figura 20: Esquema del modelo numérico a escala mina

3.2.2 Dimensiones de la batea

Las dimensiones de la batea a escala mina se muestran a continuación en la figura 21:

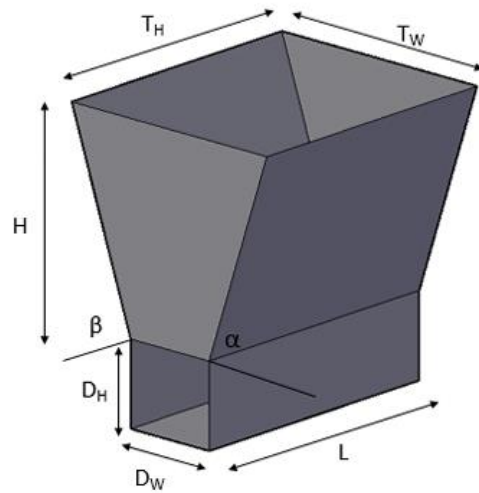


Figura 21: Dimensiones de la batea

Tabla 1: Dimensiones de la batea

L	H	Tw	TH	Dw	DH	Alpha	Beta
14 m	10.5 m	12 m	14 m	4.8 m	4.25 m	71.1°	90.0°

3.3 Sistema de extracción

El sistema de extracción utilizado en esta investigación emula el funcionamiento de una pala LHD (Load-Haul-Dump), que opera en un punto de extracción. Este tipo de equipo es ampliamente utilizado en la minería subterránea debido a su capacidad para cargar, transportar y descargar material de manera eficiente en espacios reducidos. En el contexto del experimento realizado para este estudio, se ha replicado de manera precisa el comportamiento de la pala LHD dentro de la infraestructura de extracción diseñada.

Para llevar a cabo el experimento, se han tomado en cuenta las dimensiones de la galería en los puntos de extracción, las cuales están detalladas en la tabla 2. Estas medidas son de importancia, ya que permiten ajustar el sistema de extracción a las condiciones reales del entorno minero. La configuración dimensional de la galería influye directamente en la maniobrabilidad de la pala LHD y, por ende, en la eficiencia global del proceso de extracción.

Tabla 2: Dimensiones galerías de extracción

Variable	Ancho	Alto
Dimensiones	4.8 m	4.25 m

De esta forma se considera un equipo de extracción de 15.2 yd³ correspondiente a un equipo CAT R3000H como se muestra en la figura 22.



Figura 22: Geometría del LHD en el modelo numérico.

El sistema de extracción utilizado en este proyecto se basa en un mecanismo de palas que opera con un tiempo de ciclo de 9.3 segundos por cada extracción. Este proceso se lleva a cabo de manera alternada desde dos puntos específicos de extracción. La secuencia de extracción sigue un patrón uniforme, lo que significa que el material es extraído de un solo punto a la vez, siguiendo un ritmo constante. Esta metodología está ilustrada en la figura 23, donde se puede observar de manera detallada el esquema de trabajo y la coordinación entre los puntos de extracción.

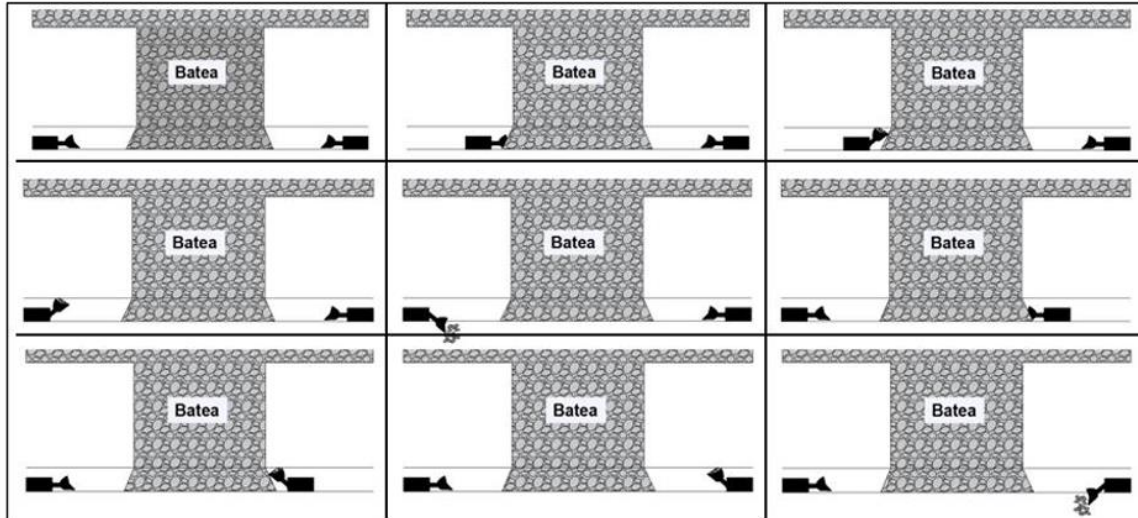


Figura 23: Secuencia de extracción en la simulación [45].

3.4 Material granular

Para la ejecución de las simulaciones de este proyecto, se utilizaron como punto de partida las curvas granulométricas del material socavado y de la fragmentación primaria empleadas por Henríquez [45]. Sin embargo, estas curvas fueron modificadas específicamente para reducir la presencia de material fino, con el propósito de optimizar los tiempos de simulación. Este ajuste resultó necesario tanto para adecuarse a las limitaciones de la capacidad computacional disponible como para cumplir con los plazos establecidos para la realización del presente trabajo.

En la figura 24 se presenta un análisis detallado de las curvas granulométricas utilizadas en las diferentes simulaciones. Estas incluyen las curvas aplicadas en los experimentos 1 y 2, las cuales comparten características similares debido a sus objetivos comunes. No obstante, también se incluye la curva correspondiente al experimento 3.

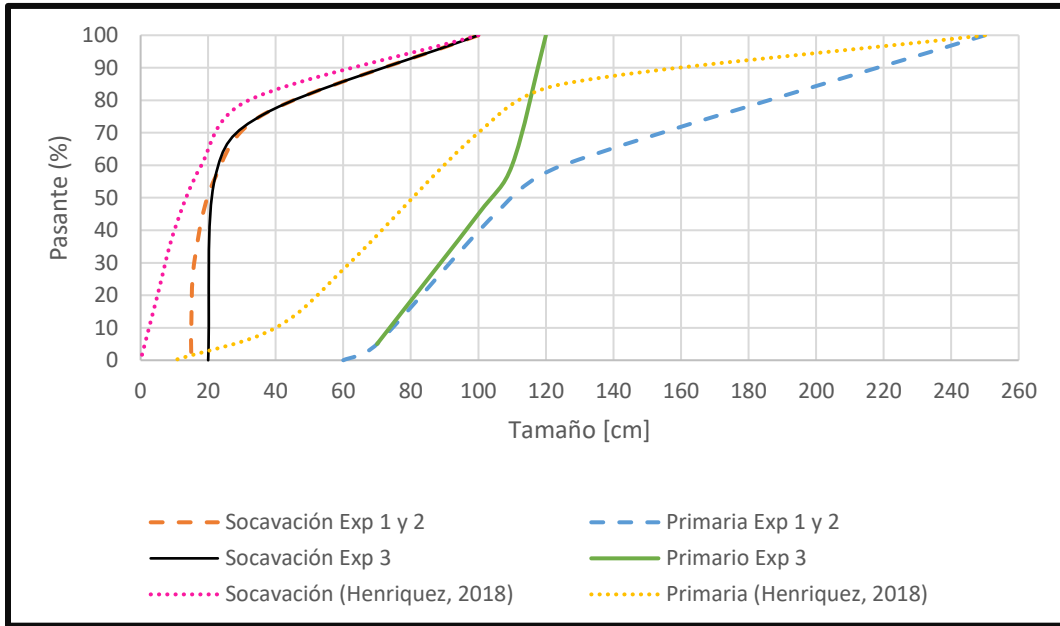


Figura 24: Curvas granulométricas para los experimentos

El ajuste implementado para las curvas asociadas a los experimentos 1 y 2 se centró en reducir el volumen de material socavado, con especial énfasis en disminuir la cantidad de partículas de menor tamaño. Estas partículas son las principales responsables del incremento en el tiempo de procesamiento durante las simulaciones. A continuación, en la figura 25, se presenta un detalle de este ajuste.

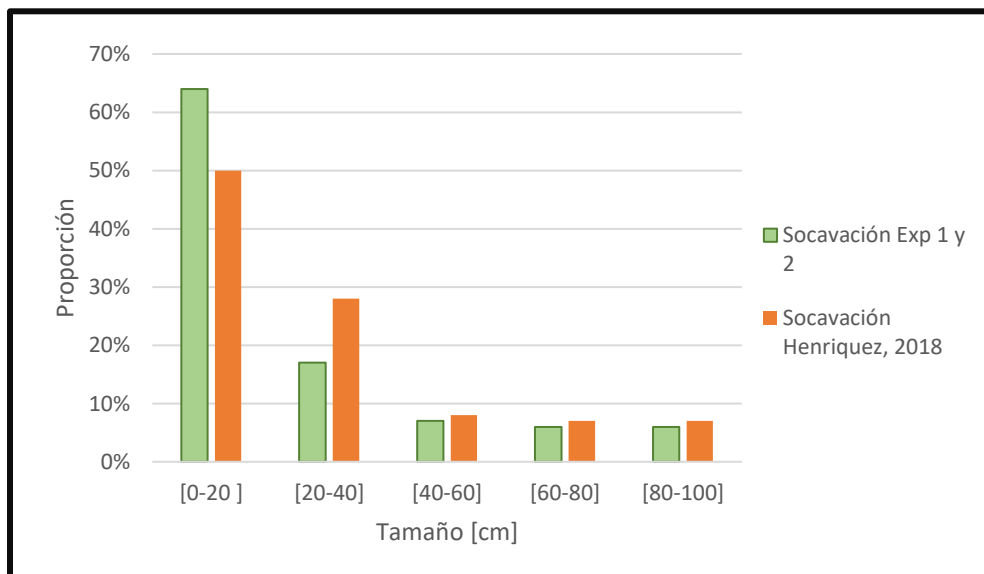


Figura 25: Distribución granulométrica del material socavado

Como se observa en la figura 25, el cambio en la distribución granulométrica del material socavado se enfocó en reducir la proporción de partículas en el rango de 0 a 20 cm, al mismo tiempo que se incrementó la proporción de partículas entre 20 y 40 cm. Sin embargo, este ajuste no se realizó de manera aleatoria, sino que se prestó especial atención en mantener una alta similitud entre ambas curvas granulométricas. Para lograrlo, se utilizó como referencia la relación entre el D_{50} del material socavado y el D_{50} de la fragmentación primaria, la cual se detalla en la tabla 3.

Tabla 3: Valores de comparación de curvas

Variable	Valor	Unidad
D_{50} Socavación (Henríquez [45])	13	cm
D_{50} Socavación Exp 1 y 2	19	cm
D_{50} Primaria (Henríquez [45])	80	cm
D_{50} Primaria Exp 1 y 2	110	cm
Relación real	6.2	-
Relación modificada	5.8	-

Como se puede observar de la tabla 3, la relación real es de 6.2, mientras que la relación modificada es de 5.8 a cuál equivale a un porcentaje de diferencia inferior al 10%, lo cual se considera aceptable de acuerdo con los límites de este proyecto. Por otro lado, las curvas de distribución granulométrica empleadas en los experimentos 1 y 2 pueden ser caracterizadas a través de dos parámetros clave: el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura. Estos coeficientes proporcionan información sobre la variabilidad en el tamaño de las

partículas y la forma en que se distribuyen dentro de la muestra, aspectos fundamentales para comprender el comportamiento del material en las simulaciones.

A continuación, se presentan los tamaños característicos de las partículas utilizados para calcular estos coeficientes, como el tamaño de partícula que corresponde al 10%, 30% y 60% de la muestra acumulada (D_{10} , D_{30} y D_{60} , respectivamente). Con base en estos valores, se estiman tanto el coeficiente de uniformidad como el coeficiente de curvatura, proporcionando así una visión detallada de la granulometría del material simulado y su influencia en los resultados obtenidos.

Tabla 4: Índice de uniformidad y curvatura

Tamaño/Curva	Socavación	Primaria
D_{10}	7.5 cm	75 cm
D_{30}	12.5 cm	92 cm
D_{60}	24 cm	125 cm
Cu	3.2	1.67
Cz	0.87	0.9

De lo observado en la tabla 4, se concluye que el material socavado presenta una mayor heterogeneidad que en el material primario.

El material que utilizó para la calibración es el sulfuro de cobre proveniente del proyecto Chuquicamata subterráneo en el cual las propiedades que se tomaron como base de calibración fueron las reportadas por Henriquez [45] como se puede observar en la tabla 5.

Tabla 5: Características del mineral [45].

Factor	Valor	Unidad
Densidad del mineral	2600	kg/m ³
Densidad aparente	1420	kg/m ³
Factor de esponjamiento	0.55	-
Porosidad	44	%
Coefficiente de uniformidad (Cu)	2.0	-
Ángulo de reposo del mineral	29.31 ± 1.22	°

Como se mencionó anteriormente, Rocky DEM ofrece la posibilidad de trabajar con una amplia gama de formas de partículas, lo que permite adaptar las simulaciones según las necesidades específicas de cada proyecto o usuario. Esta flexibilidad es clave para ajustar los modelos a las características reales del material o proceso que se está estudiando.

Para este proyecto en particular, se seleccionaron dos tipos de partículas principales: esferas y poliedros. Estos tipos de partículas fueron elegidos en función de los requerimientos del estudio, es importante tener en cuenta que la forma y complejidad de las partículas tienen un impacto directo en los tiempos de simulación. A medida que la geometría de las partículas se vuelve más irregular, especialmente cuando incluyen bordes afilados o esquinas, el tiempo necesario para completar las simulaciones aumenta considerablemente. Esto se debe a que las partículas con formas más complejas requieren un mayor número de cálculos para simular con precisión sus interacciones dinámicas, lo que eleva la demanda computacional. Es por esto, y con el objetivo de optimizar los tiempos de simulación, se decidió utilizar esferas en la mayoría de las simulaciones. Las esferas, al ser geoméricamente más simples y carecer

de esquinas o bordes afilados, permiten una simulación más eficiente, lo que resulta en una reducción significativa del tiempo de procesamiento. Esta estrategia fue fundamental para poder llevar a cabo múltiples simulaciones en un tiempo razonable, sin perder de vista los objetivos del proyecto.

A continuación, se detallan las figuras utilizadas en las simulaciones, junto con los parámetros de forma utilizados específicamente en las partículas poliédricas.

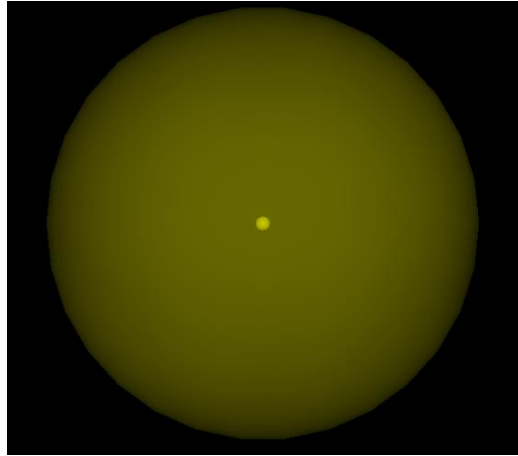


Figura 26: Esferas a utilizar

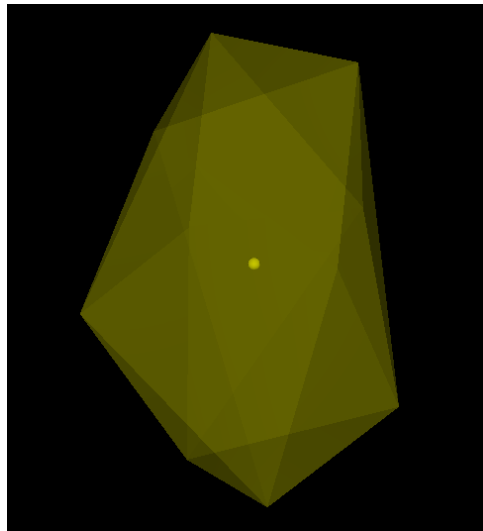


Figura 27: Poliedros a utilizar

Tabla 6: Parámetros de forma de las partículas poliédricas.

Variable	Valor
Número de esquinas	10
Relación de aspecto vertical	1.5
Relación de aspecto horizontal	0.75
Superquadric degree	2

Donde:

Superquadric degree: Relacionado a la curvatura de la superficie. Valores más bajos entregan formas más esféricas.

3.5 Plan experimental

En la tabla 7 se presentan de manera detallada los experimentos planificados, junto con sus respectivos objetivos y configuraciones específicas. Cada experimento está diseñado para abordar distintos aspectos del estudio, de modo que se puedan obtener resultados que aporten a una comprensión del desarrollo de las operaciones de hundimiento. Los objetivos descritos en la tabla permiten identificar claramente qué se espera analizar en cada prueba, mientras que las configuraciones detallan los parámetros y condiciones bajo las cuales se llevarán a cabo los experimentos.

Por otro lado, en la figura 28 se proporciona un esquema visual del modelo físico empleado en las simulaciones. En este esquema se puede observar de manera clara la representación de la geometría y los elementos claves que intervienen en el modelo. Este esquema facilita la comprensión del diseño experimental y permite una mejor visualización de las condiciones bajo las cuales se llevan a cabo los experimentos, ofreciendo así una representación clara de cómo se manipulan los factores físicos dentro del modelo.

Tabla 7: Plan experimental

Experimento	Características	Partículas por utilizar en socavado/primario	Altura de socavación (Hsoc)	VARIABLES por analizar
1	Flujo gravitacional con material no cohesivo	Esferas/Esferas	4 m (Ridgeway deeps)	Ángulo de flujo del material.
2		Esferas/Poliedros		Altura de interacción (HIZ). Geometría de zona de flujo. Comportamiento visual del flujo.
3 (varias pruebas)	Flujo gravitacional con material cohesivo	Esferas/Esferas (primario con cohesión para replicar caving)		Desplazamiento del macizo Interacción de bloques Fragmentación inicial

--	--	--	--	--

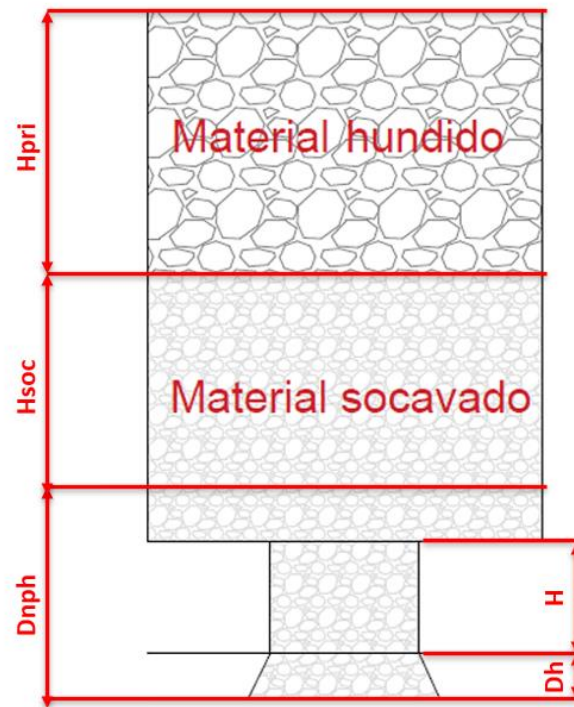


Figura 28: Esquema del modelo numérico.

Donde,

H_{soc} : es la altura de material socavado.

H_{pri} : es la altura de material primario y donde se usará cohesión en el experimento 3.

D_{nph} : corresponde a la distancia entre el nivel de producción y hundimiento, igual a 18 m.

H : es la altura de la batea, igual a 10.5 m.

Dh: altura de la galería, igual a 4.25 m.

4. Calibración parámetros del material

Antes de iniciar las simulaciones, los parámetros del material deben ser calibrado con el fin de lograr un comportamiento que se asemeje al que tendría en condiciones normales. Para esta calibración, se utilizará sulfuro de cobre proveniente del proyecto Chuquicamata subterráneo. Este proceso debe realizarse con la mayor rigurosidad posible, ya que es un factor determinante para asegurar la validez de los resultados que se obtengan en los ensayos posteriores. El valor que se busca alcanzar durante la calibración es el presentado en la tabla 8, sirviendo como referencia para los resultados obtenidos en las simulaciones.

Tabla 8: Ángulo de reposo a calibrar [45].

Ángulo de reposo del mineral	29.31 ± 1.22	°
------------------------------	------------------	---

Las variables que se modificarán son las siguientes:

- Resistencia a la rodadura: Se emplea para calcular la fuerza que hace que el objeto pierda energía mientras rueda, impidiendo que continúe su movimiento indefinidamente.
- Coeficiente de roce estático (Partícula-Partícula; Partícula-Boundary): Se emplea para calcular la fuerza de fricción cuando las partículas no están en movimiento.
- Dynamic Friction (Partícula-Partícula; Partícula-Boundary): Se emplea para calcular la fuerza de fricción cuando las partículas están en movimiento.
- Restitution Coefficient (Partícula-Partícula; Partícula-Boundary): Se emplea para calcular la elasticidad de una colisión entre dos cuerpos.

4.1 Ensayo de ángulo de reposo para esferas

Para el ensayo del ángulo de reposo utilizando esferas, se realizaron un total de 9 simulaciones como parte del proceso de calibración. Los detalles específicos de cada simulación, incluidos los parámetros y resultados obtenidos, se presentan en la tabla 9.

Tabla 9: Calibración ángulo de reposo en esferas.

Parámetros	Valores								
Simulación	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rolling Resistance	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.36	0.3	0.2	0.3
Static Friction P-P	0.62	0.7	0.6	0.55	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
Dynamic Friction P-P	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5
Static Friction P-B	0.53	0.53	0.53	0.53	0.45	0.35	0.3	0.3	0.3
Dynamic Friction P-B	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
Angulo de reposo	30.4°	31.1°	30.6°	32°	30.1°	32.4°	30.3°	27.9°	30.5°

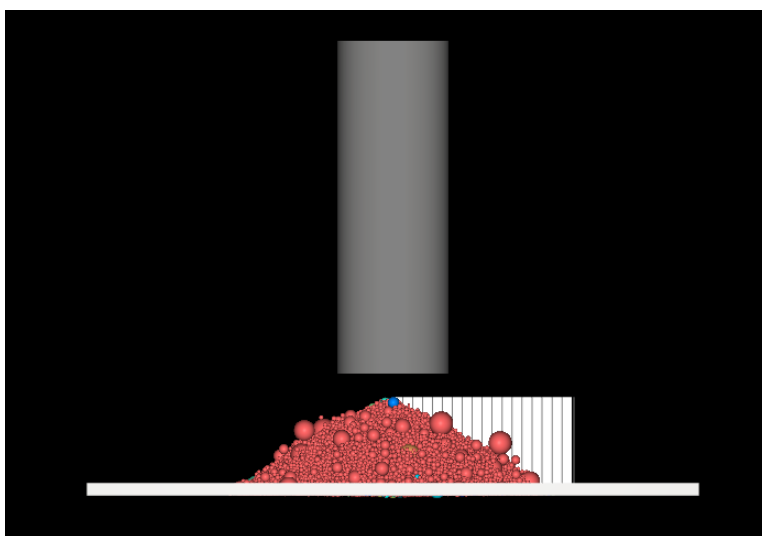


Figura 29: Ensayo de ángulo de reposo para esferas

Finalmente, se seleccionó la simulación que arrojó un ángulo de reposo de 30.1° como referencia para establecer los parámetros que se utilizarán en las simulaciones posteriores. Este valor, que fue el más cercano al esperado, presenta una diferencia del 2.7% con respecto al valor original de referencia. Tras analizar esta discrepancia, se consideró que dicha variación se encuentra dentro de un margen aceptable para los fines del estudio.

4.2 Ensayo de ángulo de reposo para poliedros

En el ensayo del ángulo de reposo utilizando poliedros, el proceso de calibración incluyó un total de 2 simulaciones. Los detalles completos de cada una, junto con los parámetros y resultados obtenidos, se encuentran especificados en la tabla 10.

Tabla 10: Calibración ángulo de reposo para poliedros.

Parámetros	Valores	
	1	2
Simulación	1	2
Rolling Resistance	0.3	0.3
Static Friction P-P	0.62	0.62
Dynamic Friction P-P	0.5	0.5
Static Friction P-B	0.53	0.53
Dynamic Friction P-B	0.36	0.45
Ángulo de reposo	21.5°	29.9°

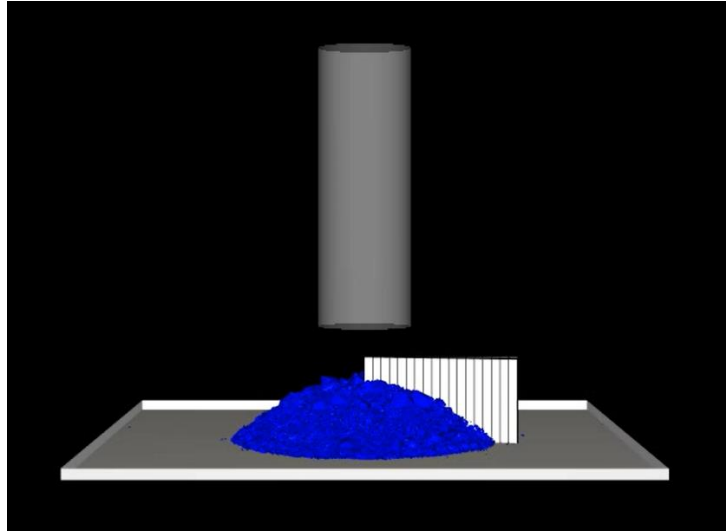


Figura 30: Ensayo de ángulo de reposo para poliedros

Finalmente, se seleccionó la simulación que proporcionó un ángulo de reposo de 29.9° como la base para establecer los parámetros definitivos que se utilizarán en las simulaciones subsiguientes. Este valor fue elegido debido a su proximidad al valor de referencia, con una diferencia del 2% respecto al valor original esperado. Tras un análisis detallado, se concluyó que esta discrepancia está dentro de un margen aceptable para los fines del estudio.

Es importante destacar que, en estudios de este tipo, la calibración y el ajuste de parámetros siempre implican cierto nivel de tolerancia, ya que es casi imposible replicar exactamente las condiciones reales. Sin embargo, al encontrarse la variación dentro de un rango razonable, se puede asegurar que los resultados obtenidos en las simulaciones serán representativos y útiles para los objetivos del proyecto. Este enfoque equilibrado entre precisión y eficiencia garantiza que los análisis realizados a partir de estas simulaciones proporcionen información válida para la toma de decisiones y la evaluación de escenarios futuros.

5. Resultados y análisis

5.1 Flujo gravitacional con materiales no cohesivo

En el siguiente capítulo se muestran los resultados y análisis correspondientes a los experimentos realizados en base al plan experimental mostrado anteriormente, donde se obtuvieron resultados de zonas de extracción, altura de extracción (HIZ) y diámetro máximo del elipsoide.

En los experimentos 1 y 2 se presenta una comparación con los resultados del modelo físico desarrollado por Henríquez [45], específicamente en cuanto a las zonas y alturas de extracción (HIZ). Esta comparación se realiza con el objetivo de validar los resultados obtenidos en el modelo numérico, que presenta condiciones similares.

El montaje experimental se muestra en la figura 31. En ella se puede apreciar ambas granulometrías con sus respectivos tamaños característico d_{80} , los puntos de extracción y los LHD incorporados para esta finalidad.

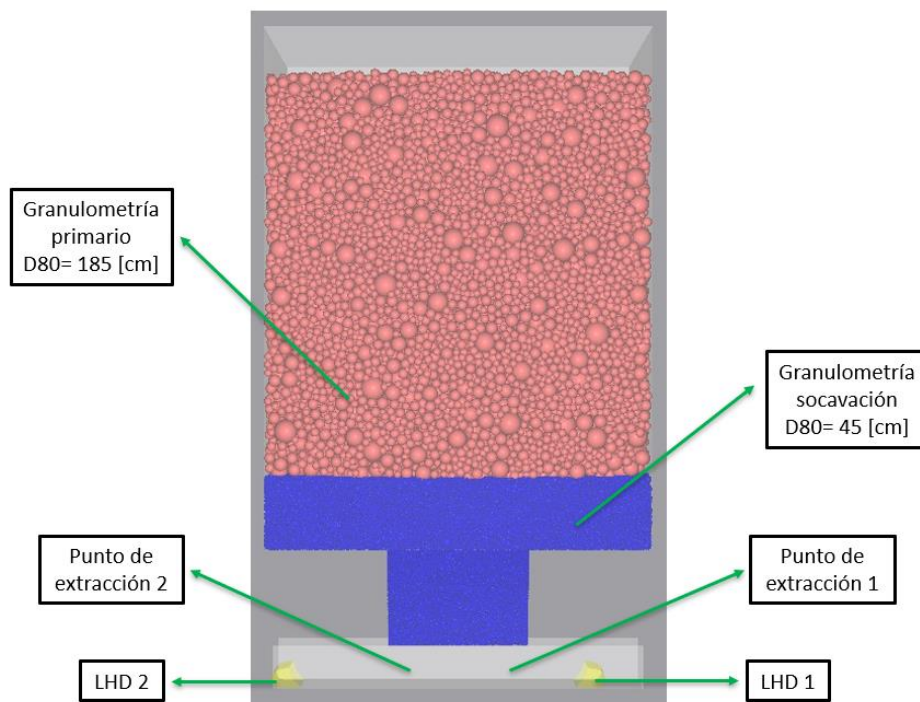


Figura 31: Montaje experimental, simulación 1 (esferas/esferas)

5.1.1 Ángulo de flujo para el Pilar mayor y Pilar menor.

A partir de los elipsoides de extracción que se visualizan en las figuras 32 y 33, es posible realizar una estimación del ángulo de flujo del mineral tanto sobre el pilar mayor como sobre el pilar menor. Estos elipsoides proporcionan información sobre la dinámica del material extraído, permitiendo calcular cómo se comporta el flujo del mineral en relación con las geometrías y características de cada experimento. Los valores correspondientes a los ángulos de flujo han sido recopilados y se presentan de forma detallada en la tabla 11, la cual ofrece una comparación entre ambas simulaciones y sus respectivos comportamientos bajo las condiciones de extracción.

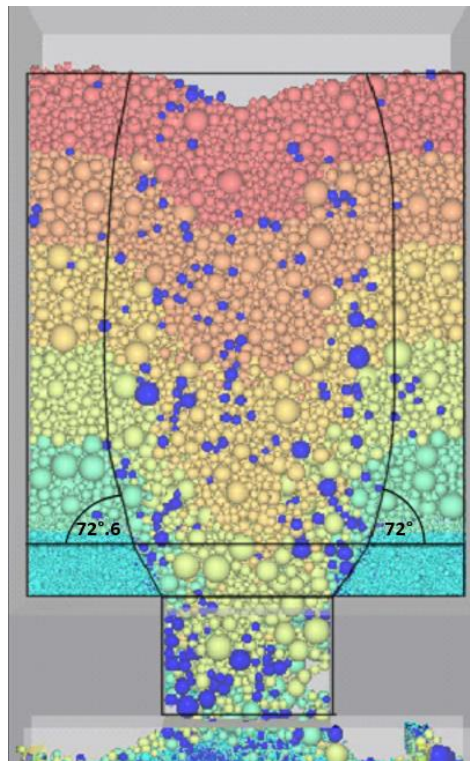


Figura 32: Visualización ángulo de flujo sobre CP (experimento 1)

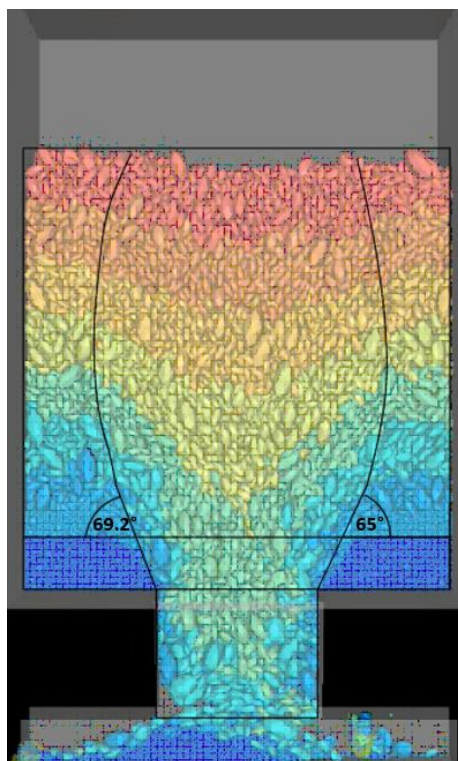


Figura 33: Visualización ángulo de flujo sobre CP (experimento 2)

La gama de colores mostrada en las figuras 32 y 33 fue seleccionada de manera aleatoria y se utiliza únicamente con fines referenciales. Su propósito es diferenciar las partículas a distintas alturas, facilitando así la observación de su desplazamiento en un tiempo determinado.

Por otro lado, las partículas de color azul que se observan en la figura 32 corresponden a un grupo separado utilizando un cubo (disponible en Rocky) para determinar un corte en el punto central de la columna. Al iniciar el movimiento, algunas partículas que inicialmente estaban fuera de este cubo ingresan a él, y durante este proceso se marcan con dicho color.

Tabla 11: Resumen ángulos de flujo Crown Pilar y Pilar Menor.

Variable/Autor	Henríquez 2018	Experimento 1	Diferencia	Experimento 2	Diferencia
Ángulo de flujo Pilar Mayor	$73.5^\circ \pm 2.1^\circ$	$72.3^\circ \pm 2.3^\circ$	1.7%	$67.1 \pm 2.3^\circ$	9.5%

Ángulo de flujo Pilar Menor	$66.5^\circ \pm 0.7^\circ$	$67.3^\circ \pm 1.3^\circ$	1.2%	$61.5^\circ \pm 1.3^\circ$	8.1%
--------------------------------	----------------------------	----------------------------	------	----------------------------	------

Los resultados obtenidos a partir del experimento 1 y el experimento 2 permiten concluir que el primero es el que más se aproxima a lo observado en las pruebas de laboratorio. Sin embargo, es importante señalar que este resultado debe ser analizado con ciertas consideraciones que podrían haber afectado la fidelidad del modelo en comparación con el comportamiento real del material. Un factor relevante a tener en cuenta es la ausencia de partículas poliédricas en el material socavado. Este detalle, aunque aparentemente menor, podría haber tenido un impacto significativo en la interacción y el comportamiento global de las partículas dentro del experimento.

En el contexto de una simulación en la que interactúan dos tipos de partículas con características distintas, por un lado, partículas poliédricas que imitan la geometría de los fragmentos rocosos reales, y por otro, partículas de formas más simples, la falta de poliédricas en el material socavado puede haber limitado la precisión del modelo. Las partículas poliédricas tienden a generar un comportamiento más cercano al real debido a su capacidad para formar enlaces y arcos complejos, influyendo en la estabilidad del material y en su capacidad de flujo. Por tanto, su ausencia podría haber modificado la dinámica de las partículas en el experimento, generando una ligera desviación respecto a lo que se observó en las pruebas físicas.

Esta omisión no fue intencional, sino más bien una consecuencia de las limitaciones en los tiempos de simulación que se enfrentaron durante el desarrollo del experimento. La inclusión de partículas poliédricas habría requerido tiempos de procesamiento mucho más largos, lo que, en este caso, superaba considerablemente los tiempos previstos para la realización de este trabajo. Las simulaciones con formas geométricas más complejas implican cálculos más detallados y procesos computacionales más extensos, lo que hubiera incrementado los plazos de manera significativa y dificultado la entrega de resultados dentro del cronograma estipulado.

A pesar de esta limitación, los resultados obtenidos en el experimento 1 ofrecen una aproximación razonable a las pruebas de laboratorio y proporcionan una base sólida para futuros experimentos. No obstante, es evidente que incorporar partículas poliédricas en simulaciones futuras podría mejorar aún más la precisión del modelo y su capacidad para replicar fielmente el comportamiento del material en condiciones reales.

5.1.2 Altura de interacción (HIZ).

A partir de los resultados obtenidos en etapas previas, se procede a estimar la altura de interacción (HIZ) mediante la proyección del ángulo de flujo del mineral, considerando tanto el Pilar Mayor (Crown Pillar) como el Pilar Menor. Este cálculo se realiza para comprender cómo interactúa el material con la geometría de los pilares durante el proceso de extracción. Para llevar a cabo esta estimación, se realiza un análisis de los perfiles correspondientes a cada pilar.

En la figura 34, se presenta una vista en planta de la disposición de la malla, que cuenta con dimensiones de 16x15 metros, proporcionando una referencia de la estructura general. Además, se incluye la ubicación exacta de la caja del modelo numérico utilizado en el análisis, lo que permite contextualizar la representación geométrica de los pilares en cuestión. Asimismo, en dicha figura se destacan los perfiles AA' y BB', que corresponden a los cortes transversales sobre el Pilar Mayor y el Pilar Menor, respectivamente. Estos perfiles permiten evaluar cómo varía la altura de interacción (HIZ) en cada caso.

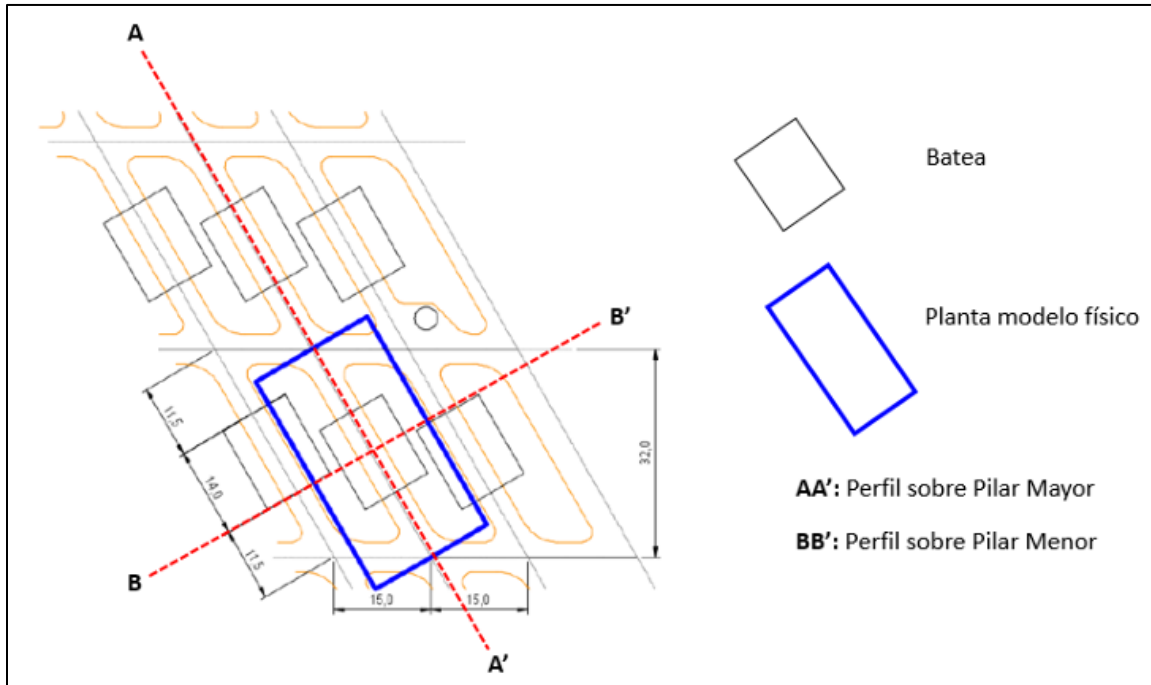


Figura 34: Representación de los perfiles sobre el Pilar Mayor y Pilar Menor [45].

Para estimar la altura de interacción (HIZ), se realizó un ajuste a la fórmula propuesta por Castro [6], permitiendo calcular la HIZ a partir del nivel de hundimiento (UCL).

Por lo tanto, a partir de:

$$HIZ_{cp} = \left[\frac{D_{cz} - L_b}{2} \right] \tan(\alpha) \quad (15)$$

Donde:

- HIZ_{cp} : Altura de interacción sobre Crown Pilar.
- D_{cz} : Distancia entre puntos de extracción (vista CP).
- L_b : Ancho del punto de extracción (vista CP).
- α : Ángulo de flujo del material (vista CP).

$$HIZ_{pm} = \left[\frac{d_p - w}{2} \right] \tan(\alpha) \quad (16)$$

Donde:

- HIZ_{pm} : Altura de interacción sobre el Pilar Menor.
- d_p : Distancia entre puntos de extracción (vista PM).
- w : Ancho del punto de extracción (vista PM).
- α : Ángulo de flujo del material (vista PM).

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \quad (17)$$

Donde:

- ϕ : Ángulo de fricción interna del material.

Podemos hacer el reajuste para encontrar HIZ_{UCL} . Para ello, debemos considerar la distancia entre el techo del nivel de producción hasta el UCL y restársela a la calculada anteriormente, para el caso del Pilar Menor; y para el caso del Crown Pillar, se resta la distancia entre el punto más alto de la batea y el piso del Nivel de Hundimiento. Es decir, para el caso del Pilar Mayor y Menor, se tendría:

$$HIZ^*_{cp} = HIZ_{cp} - 3.25 \quad (15)$$

$$HIZ^*_{pm} = HIZ_{pm} - 13.75 \quad (16)$$

En la tabla 12, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 12: Resumen HIZ para Crown Pilar y Pilar Menor.

Variable/Autor	Henríquez [45]	Experimento 1	Diferencia	Experimento 2	Diferencia
HIZ Pilar Mayor [m]	36 ± 5.3	32.8 ± 5.7	9.8%	24 ± 5.7	33.3%

HIZ Pilar Menor [m]	0	0	No aplica	0	No aplica
------------------------	---	---	-----------	---	-----------

De manera similar a los análisis y conclusiones obtenidos en los resultados previos, se puede determinar que el experimento que muestra la mayor concordancia con los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio es el experimento 1. Este experimento no solo se acerca de manera notable a los valores medidos, sino que también proporciona una aproximación sólida y confiable. Al considerar el margen de error, que siempre es un factor a tener en cuenta en cualquier ensayo experimental, podemos concluir que dicho margen se encuentra dentro de parámetros razonables y aceptables.

5.1.3 Diámetro máximo del elipsoide de movimiento.

Para establecer un punto de comparación adecuado entre las simulaciones y el trabajo realizado por Henríquez [45], se tomó en cuenta el diámetro máximo del elipsoide en el borde de la pared del modelo. Además, se realizó una comparación específica de los experimentos, evaluando el diámetro máximo del elipsoide real mediante un corte en la zona central del modelo.

Tabla 13: Resumen diámetro máx del elipsoide.

Variable/Autor	Henríquez (2018)	Experimento 1	Diferencia	Experimento 2	Diferencia
Diámetro máx del elipsoide (borde de la pared) [m]	24.6 ± 2.1	23.1 ± 2.1	6.5%	23.9 ± 2.1	2.9%
Diámetro máx del elipsoide (corte zona central)	No registra	27.3 ± 2.3	No aplica	27.7 ± 2.3	No aplica

A diferencia de otros resultados, ambos experimentos en este caso arrojan valores que son muy similares a los obtenidos en las pruebas de laboratorio, específicamente en relación con el diámetro máximo del elipsoide en la zona del borde de la pared. No obstante, es crucial tener en cuenta que el modelo físico utilizado presenta una limitación significativa: no proporciona los valores reales del elipsoide en la región central, donde se espera que dicho diámetro sea alrededor de un % mayor (esto según los resultados obtenidos en el modelo numérico). Esta deficiencia representa una importante restricción de los modelos físicos, ya que en dicha zona central es donde se concentraría la mayor deformación, lo cual podría influir considerablemente en la interpretación final de los resultados. La incapacidad del modelo para capturar esta información esencial subraya la necesidad de seguir explorando otras metodologías o ajustes que permitan obtener una representación más precisa del comportamiento en el centro del elipsoide.

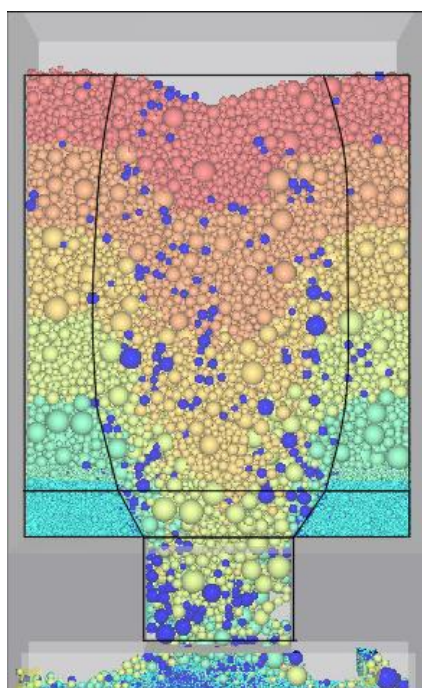


Figura 35: Visualización del elipsoide de movimiento (Simulación 1).

5.1.4 Evolución del ángulo de flujo y diámetro máximo del elipsoide sobre el Crown Pilar con respecto a la masa extraída.

En esta sección se realiza un análisis detallado e individualizado de cada uno de los experimentos, con el objetivo de evaluar nuevas variables que no fueron estudiadas en el

modelo físico propuesto por Henríquez [45]. Este desglose tiene como propósito principal ampliar el alcance de los resultados, poniendo especial énfasis en dos aspectos clave: el desarrollo del ángulo de flujo sobre el CP y el diámetro máximo del elipsoide. Ambos parámetros son comparados rigurosamente con la masa extraída durante los experimentos, lo que permite una comprensión más profunda del comportamiento observado.

En las figuras 36 y 37 se presenta la evolución de las elipses de extracción obtenidos de manera visual.

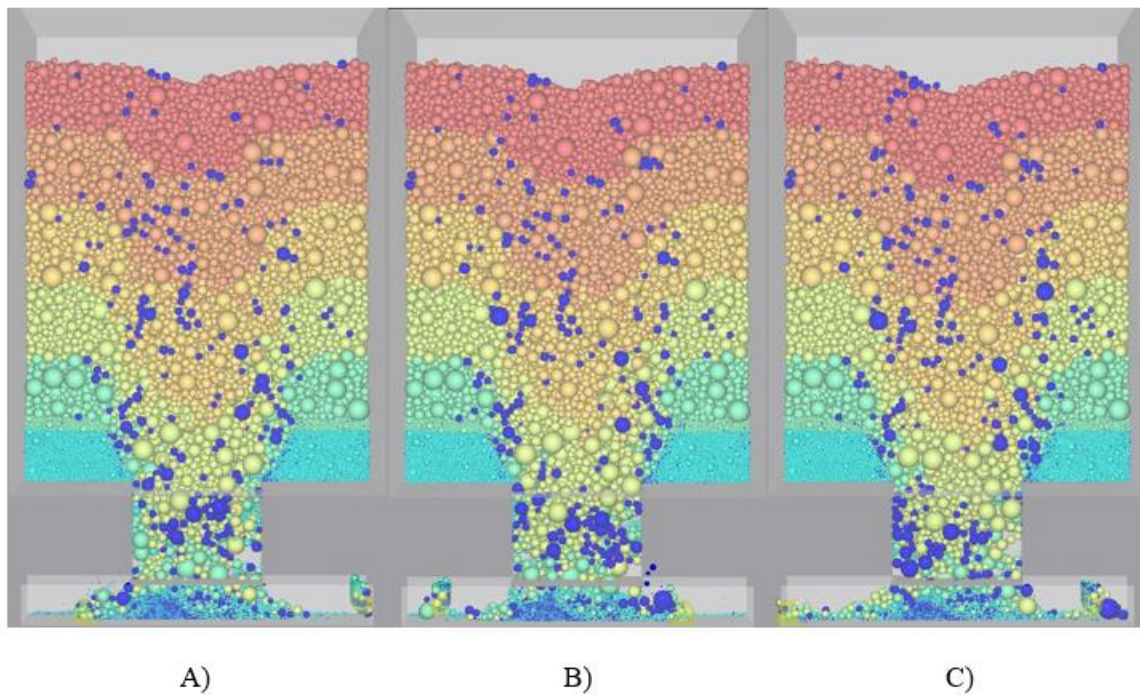


Figura 36. Evolución de la elipse de extracción del experimento 1. A) 3700 ton de extracción. B) 3950 ton de extracción. C) 4200 ton de extracción.

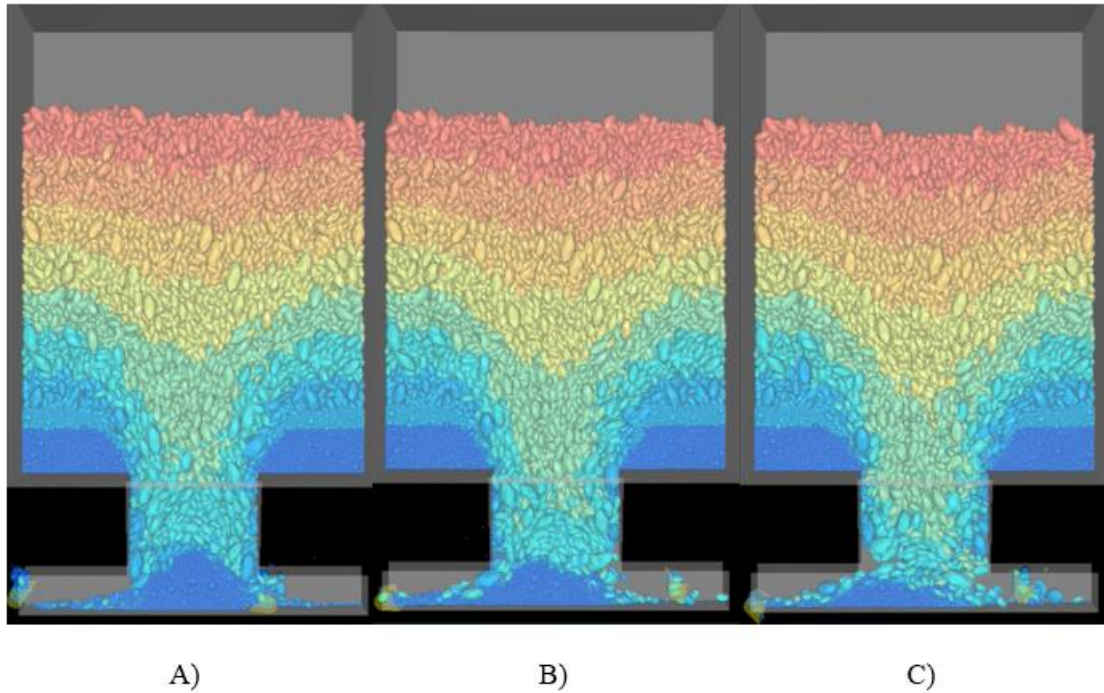


Figura 37: Evolución de la elipse de extracción del experimento 2. A) 3700 ton de extracción. B) 3950 ton de extracción. C) 4200 ton de extracción.

En las figuras 38 y 39 se puede observar unos gráficos detallando el desarrollo de estas elipsoides durante la extracción facilitando la visualización y comparación de los datos. La inclusión de estas nuevas variables puede contribuir a mejorar la precisión del modelo en futuras investigaciones, al abordar aspectos que previamente no habían sido considerados.

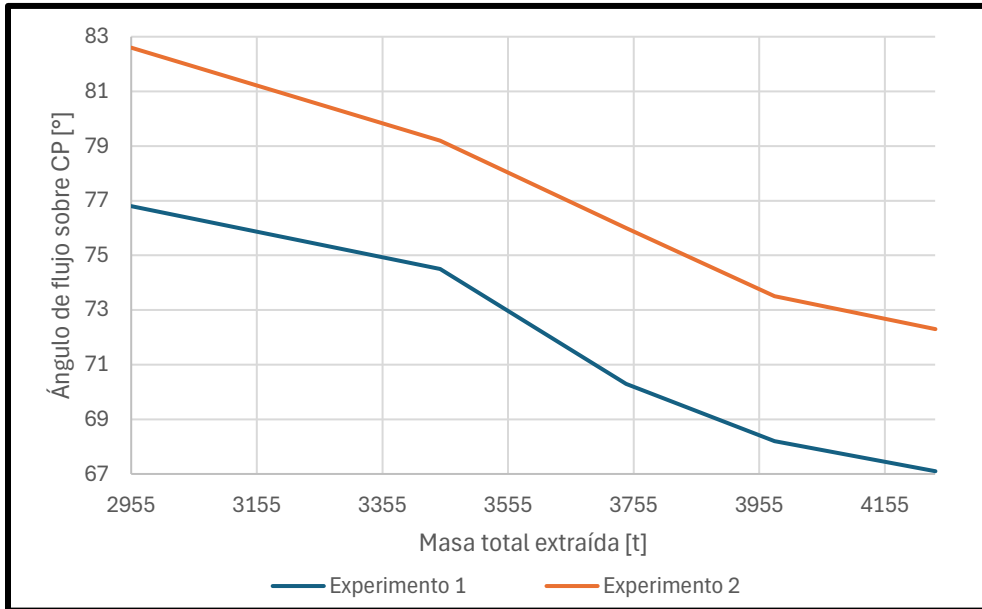


Figura 38: Evolución del ángulo de flujo sobre CP en relación con la masa extraída.

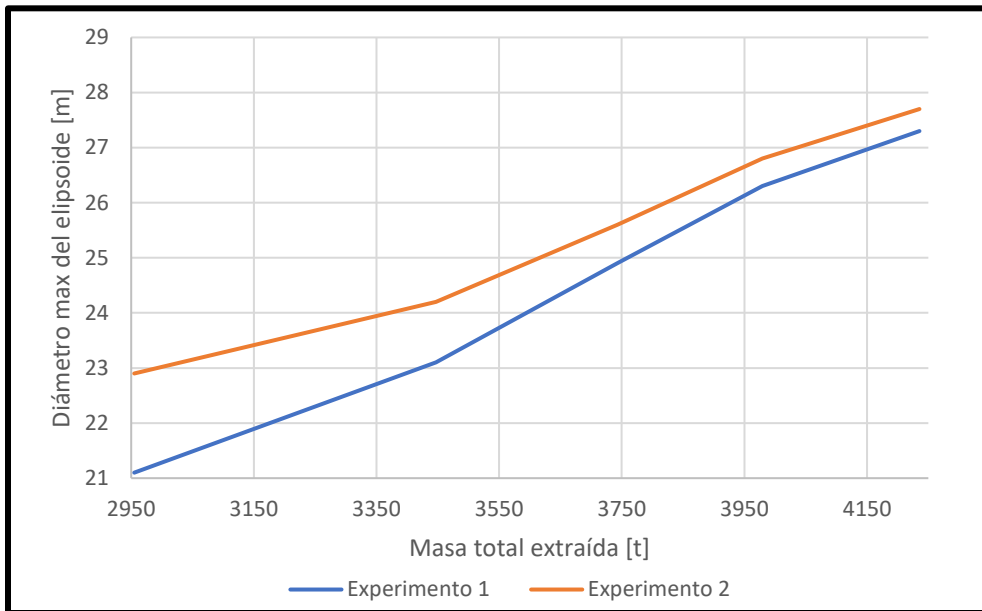


Figura 39: Evolución del diámetro del elipsoide en relación con la masa extraída.

Se puede observar una relación entre el ángulo de flujo y el diámetro máximo del elipsoide en ambos casos analizados. A medida que el ángulo de flujo incrementa, se evidencia un comportamiento inversamente proporcional en la segunda variable, es decir, el diámetro máximo del elipsoide tiende a disminuir. Esta tendencia sugiere que el aumento en el ángulo

de flujo genera una mayor concentración de material en ciertas zonas, lo que podría estar provocando una compresión en la geometría del elipsoide, reduciendo su diámetro máximo. Este comportamiento es relevante, ya que permite inferir que los cambios en el ángulo de flujo no solo afectan la distribución del material, sino también las deformaciones observadas en la estructura del elipsoide. Comprender esta relación inversa entre ambas variables es fundamental para ajustar modelos físicos y predecir con mayor precisión el comportamiento del material en condiciones similares, lo que a su vez puede tener implicaciones significativas para el diseño y la evaluación de estructuras sometidas a este tipo de fenómenos.

5.2 Flujo gravitacional con material cohesivo

Este experimento fue evaluado de manera independiente, a diferencia de los experimentos anteriores el experimento 3 tuvo como objetivo acercarse a lo que ocurre en el fenómeno de caving en sus etapas iniciales en el campo cercano a través del colapso inicial del cave-back. Para lograr esto, se añadió cohesión a las partículas mediante modelo de adhesión constante disponible en Rocky (el cual fue descrito previamente), permitiendo que se comportaran como rocas de mayor tamaño y replicaran algunas condiciones del proceso.

5.2.1 Parte 1: Pruebas de cohesión sin extracción.

Para la construcción del modelo, el primer paso fue realizar una serie de pruebas preliminares utilizando diferentes valores de cohesión, con el objetivo de identificar aquellos que resultaran más adecuados para simular el comportamiento del material en estudio.

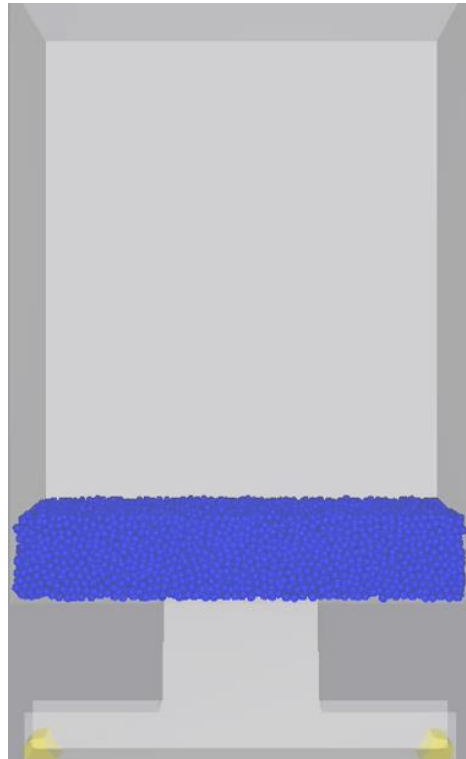


Figura 40: Estado inicial de las partículas

Durante este proceso, se emplearon cohesiones con valores de 0, 3, 6, 8 y 10 lo que permitió evaluar cómo la variación en la cohesión afectaba la respuesta del sistema en términos de estabilidad y deformación. La elección de este rango de valores responde a la necesidad de cubrir un espectro amplio de comportamientos, desde escenarios con cohesiones bajas, representativas de materiales más sueltos o menos compactos, hasta aquellas con cohesiones más altas, correspondientes a materiales más rígidos y cohesionados.

El análisis comparativo de los resultados obtenidos con cada uno de estos valores permitió identificar las cohesiones más apropiadas para el modelo definitivo. Esta etapa de calibración es crucial, ya que asegura que el modelo pueda replicar de mejor forma las condiciones geomecánicas del entorno, lo que a su vez influirá en la precisión de las simulaciones y en la validez de los resultados obtenidos a lo largo del estudio. A continuación, se muestran los resultados de las pruebas realizadas:

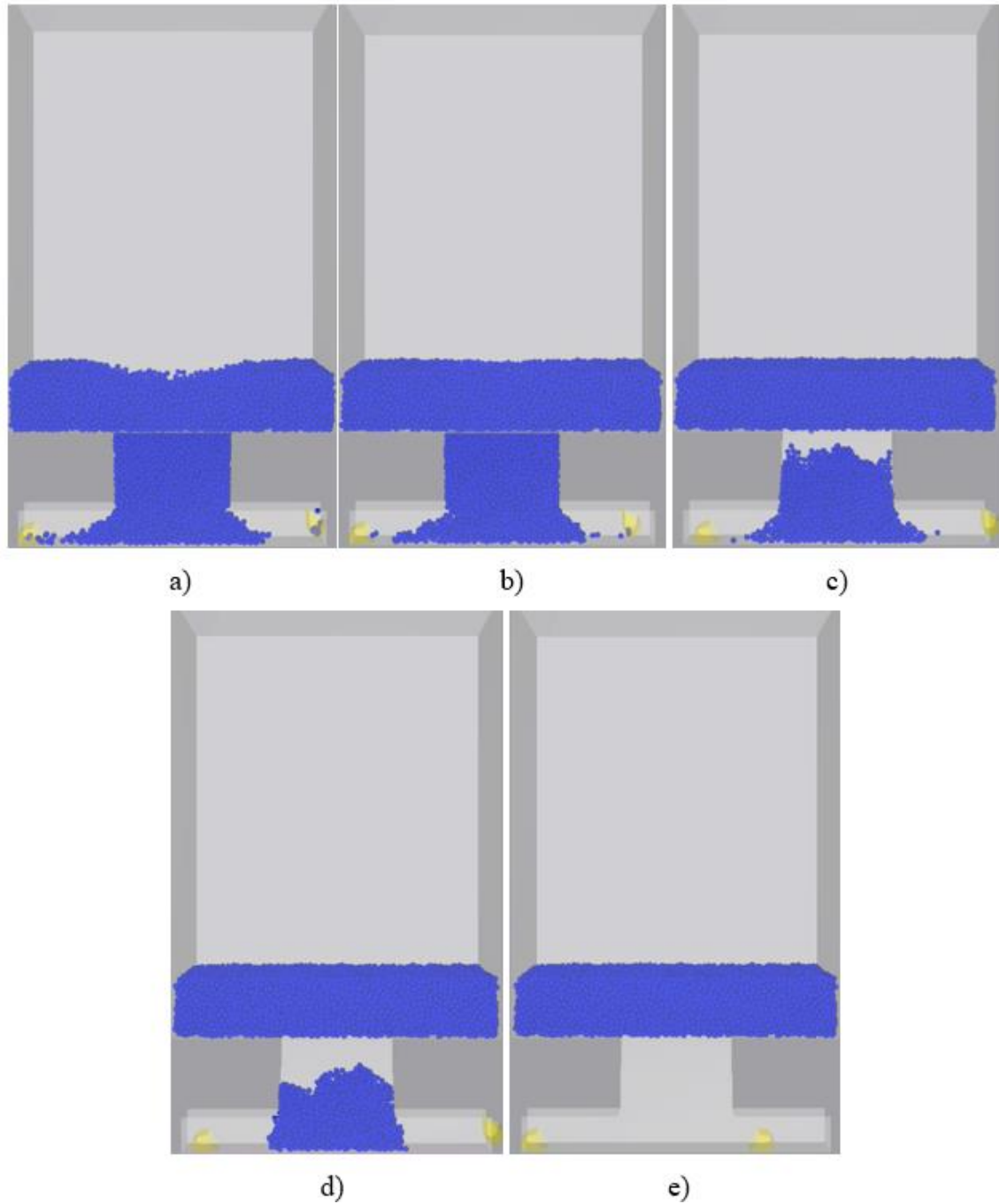


Figura 41: Pruebas de cohesión de a) 0 b) 3 c) 6 d) 8 e) 10

A partir de las pruebas de cohesión realizadas sin extracción, se pudo observar un comportamiento distintivo del material dependiendo del valor de cohesión utilizado. En el caso de las cohesiones de 0 y 3, el material no formaba bloques, sino que las partículas se comportaban como si ya estuvieran fragmentadas (sin cohesión/adhesión), presentando

características similares a un material completamente desagregado. Debido a esta falta de cohesión estructural, estos valores fueron descartados para ensayos posteriores, ya que no cumplían con los requisitos necesarios para la formación de bloques coherentes en el modelo.

Por otro lado, cuando se utilizó una cohesión de 10, el comportamiento del material fue opuesto. En lugar de fragmentarse o fluir adecuadamente, el material se comportó como un bloque único y sólido que no caía a través de la batea de extracción, lo cual era un resultado indeseado. Dado que el objetivo del ensayo es que los bloques generados por la cohesión puedan caer por la batea para simular adecuadamente el proceso de colapso por gravedad, este valor de cohesión también fue descartado.

Finalmente, las pruebas realizadas con cohesiones de 6 y 8 ofrecieron los resultados esperados. Con estos valores, se logró un equilibrio ideal: el material mostraba una cohesión suficiente para formar bloques más grandes, pero sin impedir que cayeran a través de la batea de extracción. Este comportamiento era el más adecuado para los objetivos del experimento, ya que reproducía de manera más realista el proceso de fragmentación y extracción de bloques. Por esta razón, se decidió continuar trabajando dentro de este rango de cohesión (6-8) para las pruebas posteriores, con el fin de obtener resultados consistentes y representativos del comportamiento deseado del material.

5.2.2 Parte 2: Pruebas de cohesión con extracción.

En una segunda fase del experimento, se realizaron pruebas de cohesión enfocadas en el rango de valores entre 6 y 8. En estas pruebas, se agregó la presencia de material socavado, el cual había sido descartado en la parte 1 de las pruebas. El proceso de extracción de material se llevó a cabo utilizando dos palas de forma simultánea. El principal objetivo de estas pruebas era identificar el punto exacto en el que la cohesión entre las partículas favoreciera la formación de rocas de mayor tamaño, un fenómeno que buscaba replicar el comportamiento en etapas iniciales del caving en el campo cercano.

Además de generar bloques de mayor tamaño, era fundamental asegurar que dichos bloques no produjeran una colgadura significativa, es decir, que no quedaran suspendidos en la estructura de la galería de forma que dificultaran o bloquearan el flujo continuo del material extraído. Este balance entre la cohesión suficiente para la formación de bloques grandes y la

capacidad de dichos bloques para fluir sin obstrucciones era clave para lograr los objetivos buscados.

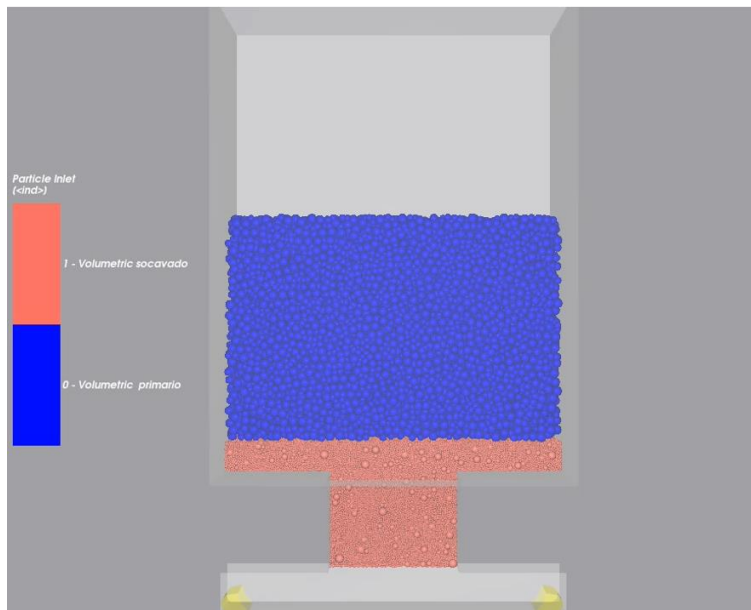


Figura 42: Estado inicial del modelo

La figura 43 muestra los resultados detallados de las simulaciones, donde se observa el comportamiento del material bajo distintas condiciones de cohesión y su influencia en el flujo y la formación de bloques. Las simulaciones se completaron tras la extracción de 610 toneladas.

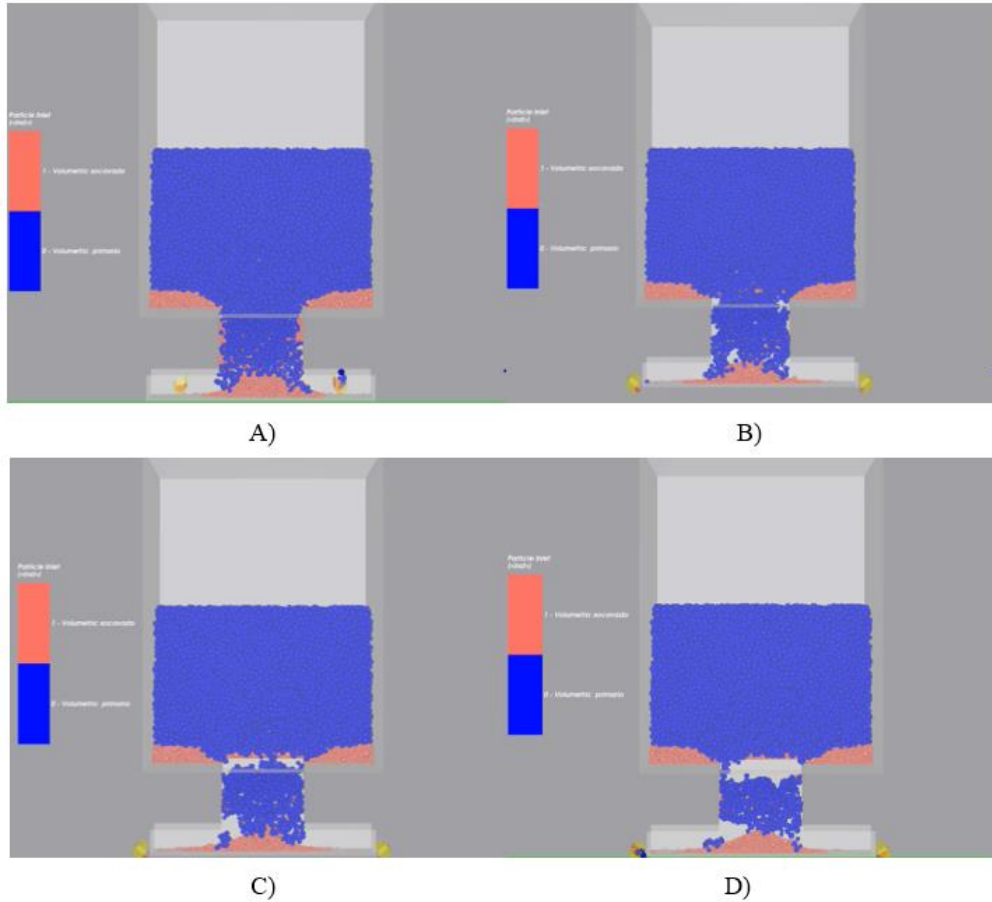


Figura 43: Modelo con cohesión a) 6. b) 7. c) 7.5. d) 8.

La figura 44 ofrece un resumen de los resultados obtenidos en las pruebas, los cuales se registraron tras alcanzar una extracción de 610 toneladas de material en cada una de las simulaciones.

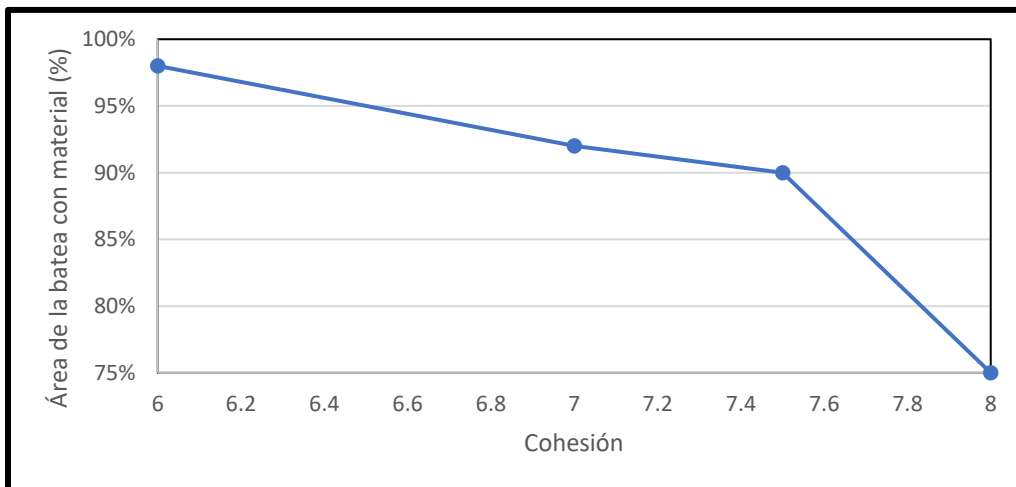


Figura 44: Comparación del área de la batea con material a diferentes cohesiones.

En las simulaciones realizadas con una cohesión de 6, se observó que el área de la batea estaba casi completamente cubierta, alcanzando alrededor del 100% de ocupación por material. Esto indicaba que el material no formaba bloques de tamaño considerable, sino que permanecía demasiado fragmentado. Por tanto, se decidió no continuar con esta cohesión, ya que no cumplía con los requisitos establecidos para el experimento.

Por otro lado, en la simulación realizada con un valor de cohesión de 8, el comportamiento del material presentó un problema opuesto. En este caso, las rocas formadas eran demasiado grandes en relación con el tamaño de la batea, como se puede observar en la figura 45, lo que generaba colgadas significativas, las cuales impedían el flujo continuo del material a través de la batea, deteniendo el proceso de extracción mucho antes de lo esperado y causando un bloqueo anticipado. Este comportamiento que, si bien es realista, puesto que se puede observar en el inicio del caving era también indeseado, ya que dificultaba proseguir con la extracción al no existir un sistema de descuelgue.

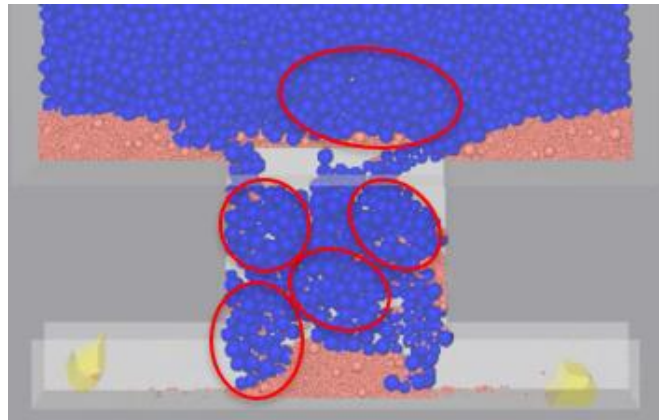


Figura 45: Bloques de sobre tamaño formados con cohesión 8.

Dado que las cohesiones de 6 y 8 no lograban un equilibrio adecuado entre la formación de bloques y la fluidez del material, se optó por no continuar su análisis, ya que complicaban la consecución de los objetivos del experimento.

En base a estas observaciones y resultados, se determinó que los valores de cohesión que permitían observar el colapso del cave-back, con bloques manejables se encontraban en un rango intermedio, específicamente en 7 y 7.5. Estos valores de cohesión se seleccionaron

para continuar con las simulaciones, ya que se esperaba que proporcionaran el equilibrio adecuado entre la formación de bloques de tamaño moderado y un flujo controlado y continuo del material a través de la batea. Este enfoque permitirá optimizar la representación de etapas iniciales del caving en el campo cercano y avanzar en la construcción de un modelo más preciso y eficiente para futuras pruebas.

5.2.3 Parte 3: Pruebas de extracción aislada

Para las pruebas de extracción aislada, se decidió continuar exclusivamente con los valores de cohesión de 7 y 7.5, dado que estos habían demostrado ser los más adecuados en etapas previas. En estas simulaciones, se mantuvo la presencia de material socavado y material primario, aunque es importante señalar que, debido a limitaciones relacionadas con el tiempo de simulación, estos no llegaron a rellenar por completo el modelo.

El propósito principal de estas pruebas era analizar varios factores clave en el proceso de extracción. En primer lugar, se buscaba determinar si el material primario lograba llegar a la batea, lo cual era fundamental para entender el comportamiento del material. Adicionalmente, se pretendía identificar si se producía una propagación significativa en la zona más alta de la batea. Otro de los objetivos cruciales era detectar la presencia de arcos en la batea, un fenómeno que podría generar obstrucciones o colgaduras no deseadas, afectando el flujo del material.

Finalmente, uno de los aspectos más importantes de la prueba era calcular el tamaño promedio de los bloques que se formaban durante el proceso de extracción. Este dato resultaría clave para evaluar si el sistema de cohesión empleado permitía la formación de bloques de dimensiones adecuadas para el estudio de inicio del caving en el campo cercano, sin comprometer el flujo continuo del material.

En las figuras 46 y 47 se puede observar la visualización granulométrica correspondiente a las simulaciones en su etapa final. Estas imágenes permiten apreciar con mayor detalle la distribución de los tamaños de bloque y su comportamiento en la batea. Además, en la tabla 14 se presenta un resumen de los resultados obtenidos, lo que incluye datos sobre la presencia de material primario, la propagación observada, la formación de arcos, y el tamaño promedio

de los bloques. Estos resultados serán esenciales para ajustar y optimizar futuras simulaciones, con miras a mejorar la eficiencia y realismo del modelo de extracción.

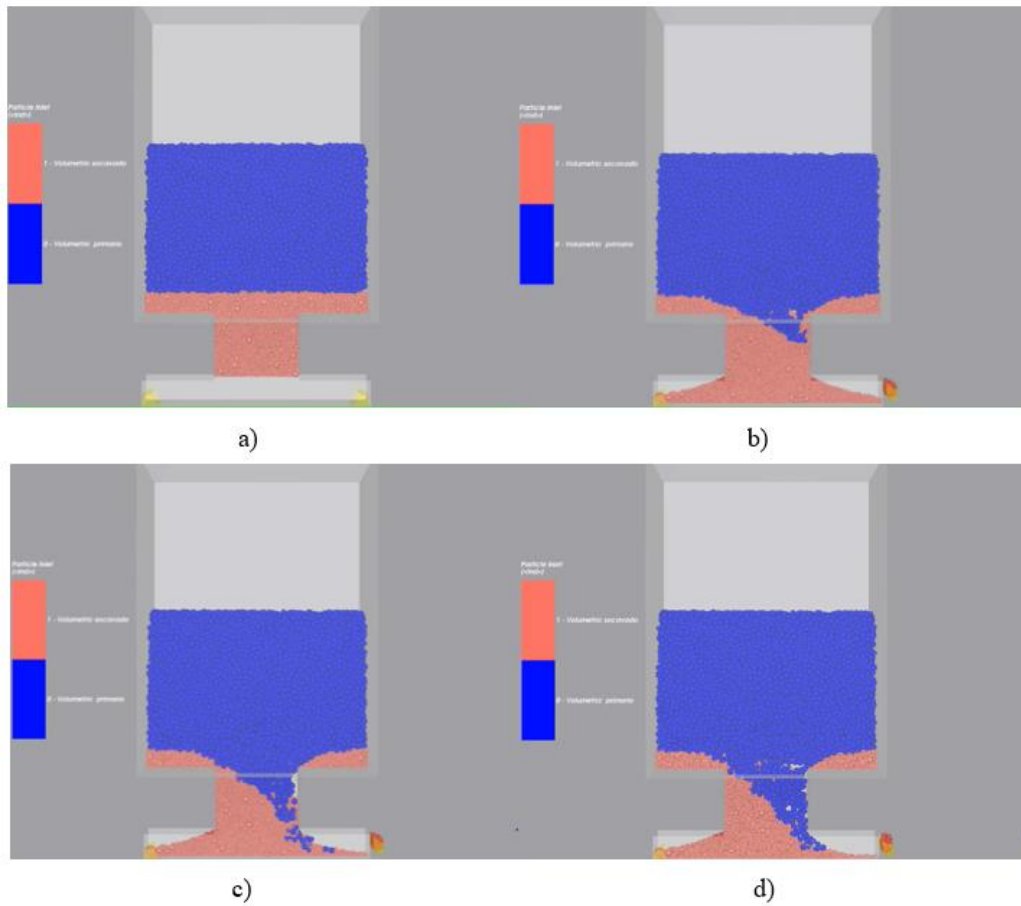


Figura 46: Simulación con cohesión 7 (Extracción aislada). A) 0 ton de extracción. B) 200 ton de extracción. C) 400 ton de extracción. D) 600 ton de extracción.

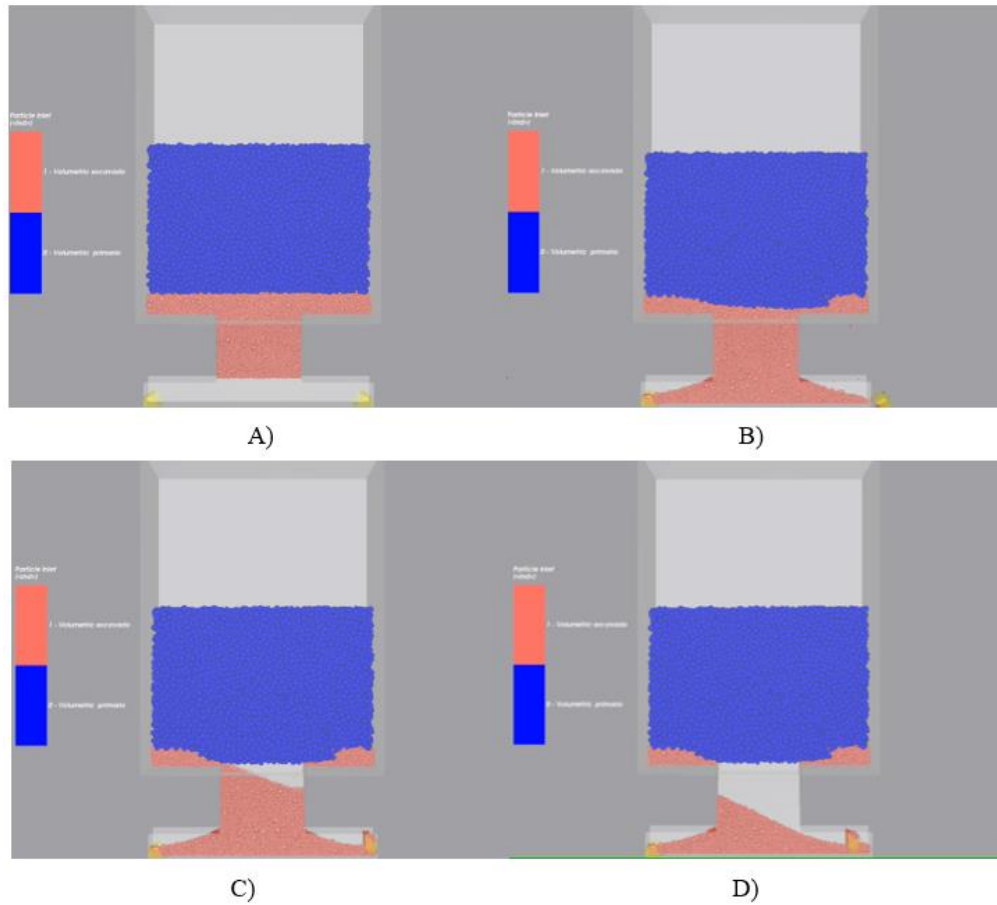


Figura 47: Simulación con cohesión 7.5 (Extracción aislada). A) 0 ton de extracción. B) 200 ton de extracción. C) 400 ton de extracción. D) 600 ton de extracción.

Tabla 14: Resultados de extracción aislada

Variable/Experimento	Simulación 1	Simulación 2
Cohesión	7	7.5
¿Entra material primario en la batea?	Sí	No
¿Existe propagación en la zona más alta de la columna?	Sí	No
¿Se producen arcos en la batea?	Sí	No aplica
Tamaño promedio de los bloques que se desprenden [m]	2.5	No aplica

Los resultados obtenidos a partir de estas pruebas revelaron un comportamiento particular en el modelo que utilizaba una cohesión de 7.5. En este caso, se observó que el material primario no logró ingresar a la batea de extracción, un fenómeno que puede explicarse por varias razones interrelacionadas. En primer lugar, la cohesión de 7.5 promovió la formación de bloques de mayor tamaño, lo cual, al combinar esta cohesión con el método de extracción utilizando una sola pala, se generaron bloques que resultaron ser demasiado grandes en relación con las dimensiones de la batea de extracción.

Este desajuste en las proporciones del material respecto a la infraestructura de extracción tuvo como consecuencia la formación prematura de un arco en la batea. Este arco, compuesto por bloques de gran tamaño, bloqueó el paso del material, creando una colgadura temprana en el proceso y, por lo tanto, impidiendo que cualquier partícula de material primario fluyera de manera efectiva a través de la batea. Este comportamiento subraya la importancia de ajustar cuidadosamente tanto los valores de cohesión como el método de extracción, ya que una combinación inapropiada puede dar lugar a colgaduras y obstrucciones que impactan negativamente el proceso.

5.2.4 Parte 4: Pruebas de extracción alternada.

En las pruebas de extracción alternada, de manera similar a lo realizado en las pruebas de extracción aislada, el objetivo principal fue analizar el comportamiento del material bajo los valores de cohesión de 7 y 7.5. En estas simulaciones, se centró la atención en varios aspectos clave para el proceso de extracción. Uno de los objetivos era evaluar la entrada de material primario en la batea. Además, se examinó la propagación del material en la zona superior de la columna, con el fin de comprender cómo se distribuía el material a medida que avanzaba en la batea.

Otro aspecto crucial del análisis fue identificar la presencia de arcos en la batea, los cuales podrían causar colgaduras o interrupciones en el flujo del material. Adicionalmente, se calculó el tamaño promedio de los bloques formados durante el proceso, ya que esto proporcionaría información importante sobre el comportamiento del material en diferentes puntos de la extracción.

Un objetivo adicional en estas pruebas fue establecer una comparación directa entre los resultados obtenidos en las pruebas de extracción aislada y las de extracción alternada. Esto permitiría evaluar cómo el cambio en el método de extracción afecta el comportamiento del material y si la alternancia en el proceso mejora o empeora la eficiencia en términos de entrada de material, propagación, formación de arcos y tamaño de los bloques.

En las figuras 48 y 49 se presenta una visualización granulométrica que muestra el estado final de las simulaciones, lo que proporciona una representación visual clara de la distribución del material y el tamaño de los bloques en cada caso. Además, en la tabla 15 se presenta un resumen detallado de los resultados obtenidos, incluyendo comparaciones entre las pruebas de extracción aislada y alternada. Estos resultados servirán para ajustar el modelo y optimizar el proceso de extracción en futuros ensayos, permitiendo una mayor eficiencia y fiabilidad en las simulaciones.

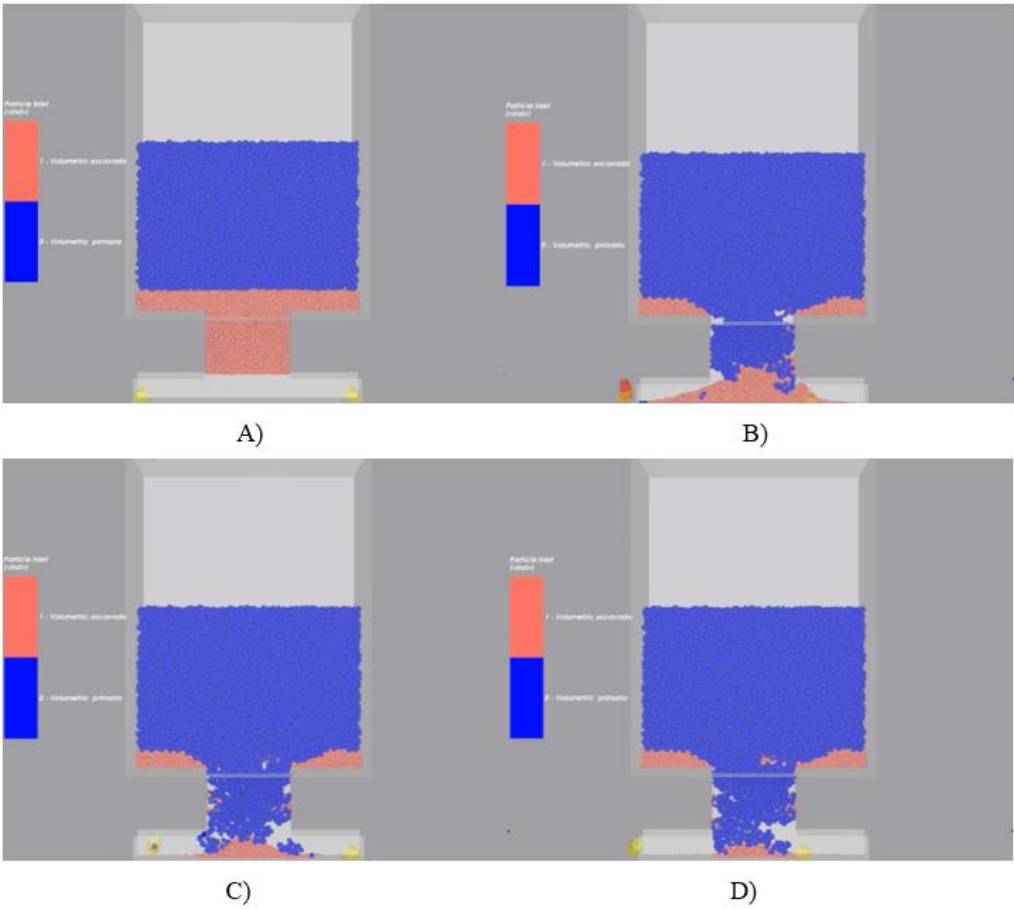


Figura 48: Simulación con cohesión 7 (Extracción alternada). A) 0 ton de extracción. B) 400 ton de extracción. C) 800 ton de extracción. D) 1200 ton de extracción.

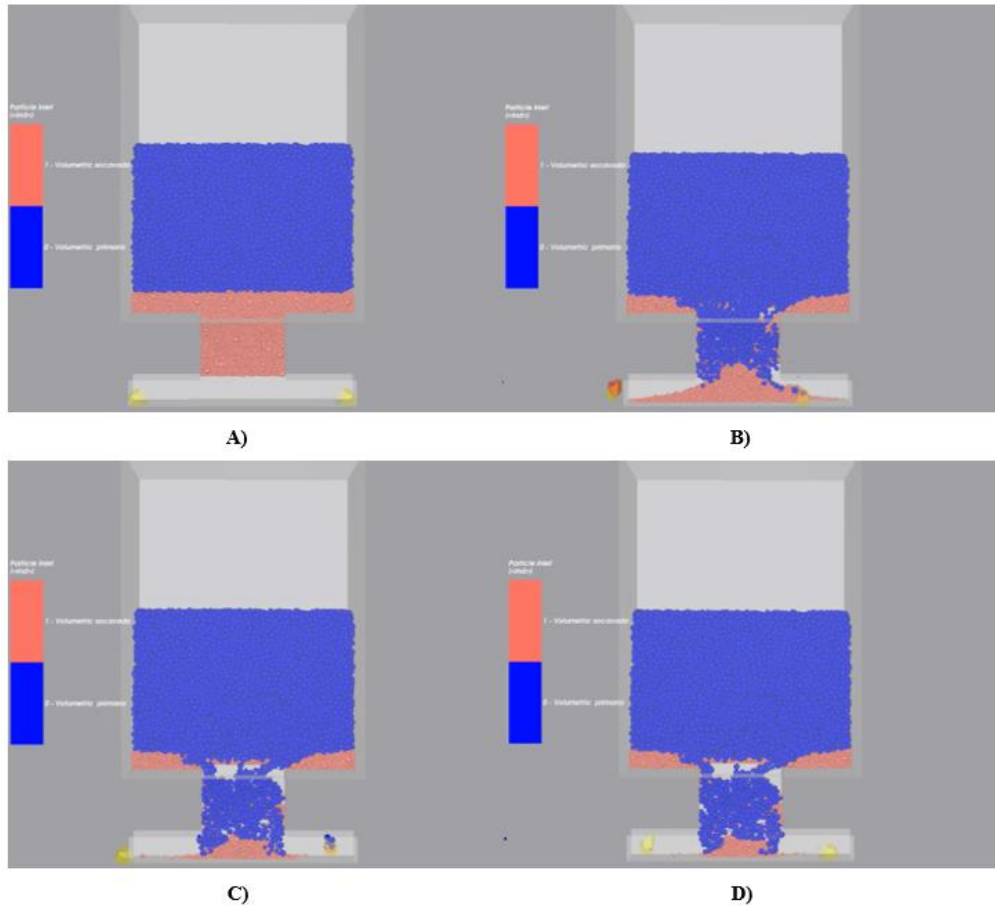


Figura 49: Simulación con cohesión 7.5 (Extracción alternada). A) 0 ton de extracción. B) 400 ton de extracción. C) 800 ton de extracción. D) 1200 ton de extracción.

Tabla 15: Resultados de la extracción alternada

Variable/Experimento	Simulación 1	Simulación 2
Cohesión	7	7.5
¿Entra material primario en la batea?	Sí	No
¿Existe propagación en la zona más alta de la columna?	Sí	Sí

¿Se producen arcos en la batea?	Sí	Sí
Tamaño promedio de los bloques que se desprenden [m]	2.9	3.2

El análisis detallado de estas simulaciones revela que el cambio en el método de extracción, al pasar de la utilización de dos palas a una sola, tiene un impacto considerable en el comportamiento del material durante el proceso. Este efecto se observó de manera particularmente evidente en la simulación realizada con una cohesión de 7.5.

En simulaciones anteriores con el mismo valor de cohesión, donde se empleaban dos palas de extracción, el material mostraba un flujo constante a través de la batea, lo que permitía una entrada adecuada de partículas, incluyendo el material primario. Sin embargo, al modificar la configuración para operar con una sola pala, el comportamiento del material cambió. En esta nueva simulación, se formó una colgadura significativa en la batea, lo que impidió por completo el ingreso de cualquier partícula de material primario. Este fenómeno de colgadura no solo interrumpió el flujo continuo del material, sino que también alteró el equilibrio que se había alcanzado con dos palas.

Por lo tanto, el cambio en el número de palas utilizado no solo afecta la cantidad de material que puede extraerse, sino también la forma en que el material se comporta dentro de la batea, modificando su flujo y la posibilidad de formación de bloques.

Este hallazgo permite concluir que, para la simulación del modelo completo, la cohesión más adecuada para la formación de bloques de sobre tamaño es la de 7.

5.2.5 Parte 5: Simulación del modelo completo.

Las simulaciones previas permitieron establecer que el valor de cohesión más adecuado para llevar a cabo una simulación con el modelo completamente lleno de material, tanto socavado como primario, era la cohesión de 7. Este valor se eligió después de analizar múltiples pruebas y concluir que ofrecía el mejor equilibrio en términos de formación de bloques de tamaño adecuado y un flujo relativamente estable del material.

Para esta nueva simulación, se decidió mantener la altura de socavación en 4 metros. Esta decisión no fue arbitraria, sino que tuvo como principal objetivo evitar el incremento en la cantidad de partículas más finas en el modelo. La generación de partículas más pequeñas habría aumentado significativamente los tiempos de simulación debido a la mayor complejidad en el cálculo de interacciones y el manejo de estas partículas, lo que podría haber entorpecido la obtención de resultados dentro de los plazos previstos.

Los objetivos centrales de este experimento eran varios y de suma importancia para evaluar el comportamiento del material. En primer lugar, se buscaba estudiar el ingreso del material primario en la batea de extracción, con el fin de determinar si este fluía correctamente a través del sistema. Además, se puso especial énfasis en analizar si existía una propagación significativa en la zona más alta de la batea. Otro de los puntos críticos fue identificar la presencia de arcos en la batea, ya que estos pueden generar colgaduras y obstaculizar el flujo natural del material. Adicionalmente, se evaluó el tamaño promedio de los bloques de sobredimensionado que se desprendían durante la simulación. Este factor es importante, ya que bloques demasiado grandes pueden causar bloqueos o ralentizar la operación. Finalmente, también se examinó la existencia de migración lateral de finos, lo que podría afectar el comportamiento general del material.

En la figura 50 se presenta una visualización granulométrica del estado final de la simulación, donde se puede observar la distribución y comportamiento del material en el modelo al finalizar la prueba.

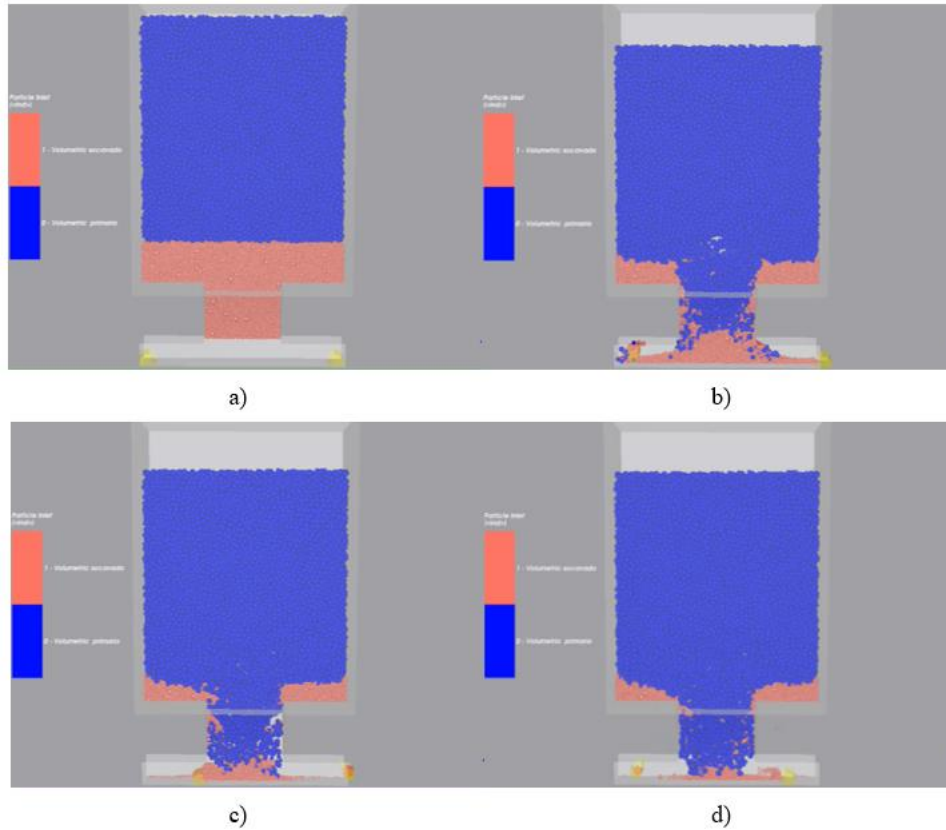


Figura 50: Modelo numérico de la simulación 3. A) 0 ton de extracción. B) 6400 ton de extracción. C) 12800 ton de extracción. D) 19700 ton de extracción.

Tabla 16: Resumen de los resultados de la simulación 3.

Variable/Experimento	Extracción con columna completa
Cohesión	7
Masa total extraída [Ton]	4155
¿Existe propagación en la zona más alta de la batea?	Sí
¿Se producen arcos en la batea?	Sí
Tamaño promedio de los bloques que se desprenden [m]	2.9

¿Existe migración lateral de finos?	Sí
¿Ingresa material primario a la batea?	Sí

En las figuras 51, 52 y 53 se observa de manera visual los resultados obtenidos en la tabla 17.

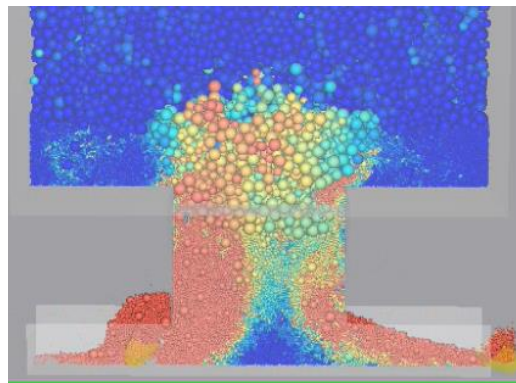


Figura 51: Momento de la propagación en la zona más alta de la batea.

En la figura 51 se puede observar como se propaga el material dentro de la batea y en las zonas cercanas a esta. Esta propagación es un indicador clave de que el material no solo se desplaza de manera efectiva a través del sistema, sino que también alcanza los niveles superiores de la batea, lo cual es crucial para mantener un flujo constante de material

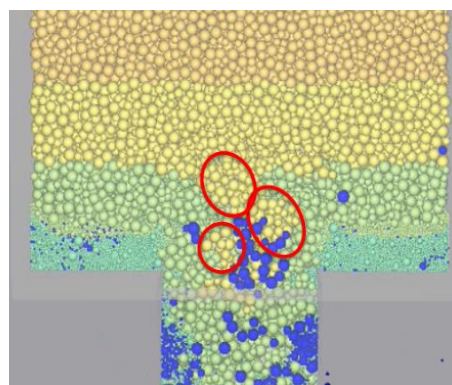


Figura 52: Bloques de tamaño considerable que se descuelgan.

Por otro lado, en la figura 52 se puede observar con detalle el cumplimiento de uno de los objetivos principales planteados en estas simulaciones: la formación de bloques rocosos de

gran tamaño, aproximadamente 2.9 metros), y su posterior ingreso exitoso en la batea. Este proceso es especialmente relevante, ya que demuestra la capacidad del sistema para generar y manejar fragmentos de roca de dimensiones considerables, lo que refuerza la eficacia del modelo. Además, la simulación confirma que el uso de una cohesión de valor 7 ha resultado ser una elección adecuada y eficiente para facilitar la formación de estos grandes fragmentos, así como su correcta disposición en la batea.

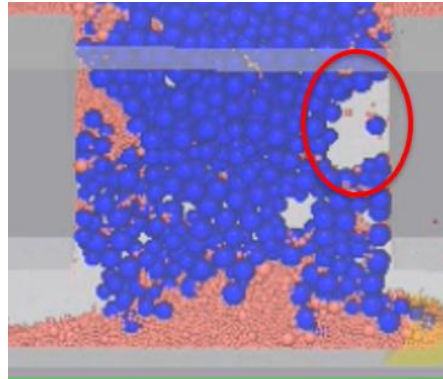


Figura 53: Arcos observas en la batea.

En relación con la figura 53, se puede apreciar claramente la formación de arcos dentro de la batea. Este fenómeno se debe principalmente a la presencia de bloques de mayor tamaño que, al agruparse, generan un estancamiento del material en determinadas zonas. Dichos bloques actúan como barreras temporales que dificultan el flujo continuo del material, limitando su avance de manera uniforme. No obstante, es importante destacar que estos arcos tienden a ser de carácter transitorio. En la mayoría de los casos, no provocan una obstrucción significativa ni impiden de forma considerable la salida del material desde los puntos de extracción. Aunque su aparición puede ralentizar el proceso, su impacto global en la eficiencia de la extracción es limitado y no representa un obstáculo permanente en el sistema de transporte del material.

Finalmente, el análisis detallado de estos resultados permite concluir que el uso de la cohesión, especialmente con un valor de 7, facilita la formación de bloques de tamaño considerable. Este comportamiento es fundamental para replicar condiciones que ocurren en las etapas iniciales del proceso de "caving" en el campo cercano, donde es esencial que se

generen bloques suficientemente grandes como para imitar el comportamiento de las rocas durante el colapso controlado.

El valor de cohesión seleccionado no solo demostró ser adecuado para la formación de estos bloques, sino que también permitió mantener un equilibrio entre la creación de arcos y la fluidez del material en la batea. Esta característica es particularmente relevante, ya que los arcos formados no resultaron en colgaduras permanentes que pudieran obstaculizar el flujo de material de manera crítica, lo cual indica que el modelo refleja un escenario donde los arcos se forman de manera transitoria, permitiendo que el material continúe su movimiento a medida que se liberan.

6. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo permiten confirmar que los resultados obtenidos en laboratorio pueden ser replicados de manera efectiva mediante modelos numéricos, especialmente en simulaciones de esferas/esferas. Aunque uno de los principales potenciales del Método de Elementos Discretos (DEM) es la posibilidad de incorporar partículas poliédricas en las simulaciones, las limitaciones de tiempo impidieron modelar adecuadamente la interacción del material socavado con poliedros. Esto derivó en resultados que, si bien son consistentes, presentan desviaciones con respecto a los obtenidos en

laboratorio, subrayando la importancia de contar con condiciones más cercanas a la realidad en futuras simulaciones.

Un aspecto clave que destaca el uso del DEM es su capacidad para estudiar variables que no son accesibles a través de los modelos físicos tradicionales. En este trabajo, por ejemplo, fue posible analizar el diámetro real del elipsoide en la zona central, así como el comportamiento del material en esa área entre el material primario y el socavado. Estos resultados aportan un nivel de detalle que no se puede obtener mediante experimentos en condiciones controladas de laboratorio, lo que refuerza el valor del DEM como herramienta complementaria en la investigación de procesos complejos.

Asimismo, los resultados demuestran que una cohesión con valor de 7 es una solución adecuada para cumplir con los objetivos de formación de bloques de mayor tamaño, replicando de manera eficiente las condiciones del caving en las fases iniciales del colapso controlado. Este nivel de cohesión asegura la continuidad del flujo de material sin generar interrupciones graves, lo cual es crucial para mantener la estabilidad del sistema y garantizar la eficiencia operativa. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para optimizar el modelo y avanzar hacia simulaciones más complejas, que representen de manera más realista las condiciones operativas a mayor escala.

Finalmente, se puede concluir que la capacidad del modelo para replicar algunas de las condiciones presentes en las etapas iniciales del caving en el campo cercano resalta su potencial como una herramienta avanzada de simulación. A través de la correcta elección de los parámetros de cohesión, no solo se consigue la formación de bloques adecuados para el colapso, sino también una propagación consistente en la zona superior y la creación controlada de arcos, factores clave para la estabilidad del macizo rocoso. Esto establece una base robusta para investigaciones futuras, que estarán orientadas a mejorar la precisión del modelo y su capacidad para predecir con mayor exactitud el comportamiento de los materiales durante procesos reales de extracción minera. Además, es fundamental seguir explorando las limitaciones inherentes al DEM, como el alto costo computacional y la necesidad de calibraciones precisas, para asegurar que las simulaciones sean lo más cercanas posible a las condiciones reales.

7. Recomendaciones para trabajos futuros

El DEM se ha mostrado como una herramienta con gran potencial para replicar las primeras etapas del caving en el campo cercano en simulaciones numéricas, gracias a su capacidad de modelar el comportamiento granular de los materiales. Sin embargo, los modelos actuales aún presentan oportunidades de mejora que permitirían una representación más fiel de los procesos que ocurren en la realidad. Por lo tanto, en el marco de trabajos futuros, se sugiere

la inclusión de varios elementos y modificaciones que podrían optimizar los resultados obtenidos y acercarlos aún más a las condiciones experimentales y operativas reales en la minería subterránea.

En primer lugar, se propone la incorporación de esfuerzos adicionales en las paredes del modelo de simulación. En los modelos actuales de Rocky DEM, las interacciones del material con las paredes son limitadas o idealizadas, lo que puede no reflejar adecuadamente las condiciones de confinamiento y las tensiones a las que están sometidos los materiales en un entorno de minería real. Las operaciones de hundimiento en minería subterránea implican que el macizo rocoso esté sometido a múltiples fuerzas provenientes de las paredes del macizo rocoso, la masa circundante de roca, y las estructuras subterráneas. La adición de esfuerzos en las paredes del modelo permitiría capturar de manera más precisa las tensiones y deformaciones que se generan durante el colapso y el flujo del material. Esta modificación podría mejorar sustancialmente la precisión del modelo en la predicción de la propagación del hundimiento y el comportamiento del material en áreas críticas, como los puntos de extracción y las zonas de interacción entre el material colapsado y la roca circundante.

Además, se recomienda la inclusión de otros modelos de cohesión disponibles en Rocky DEM. En el presente trabajo, se ha utilizado un único modelo de cohesión que ha permitido replicar de forma satisfactoria las primeras fases del colapso controlado en términos de formación de bloques y propagación del material. Sin embargo, la inclusión de modelos alternativos de cohesión ofrecería la posibilidad de explorar cómo diferentes niveles de cohesión afectan la estabilidad del colapso y el flujo de material a lo largo del tiempo. Esto es particularmente relevante en escenarios donde las condiciones del macizo rocoso y el tipo de mineral varían significativamente, ya que distintos modelos de cohesión podrían ser más adecuados para replicar materiales con diferentes propiedades físicas.

Finalmente, una mejora crucial para las simulaciones futuras sería la incorporación de partículas poliédricas en el material socavado. Hasta ahora, los modelos han utilizado esferas para representar las partículas en la simulación, lo que facilita los cálculos, ya que las esferas no representan de manera adecuada la geometría irregular y angulosa de los fragmentos reales de roca. La posibilidad de utilizar partículas poliédricas en Rocky DEM representaría un avance significativo, permitiendo una simulación más fiel del comportamiento real de los

fragmentos de roca durante el colapso. La inclusión de partículas con formas más complejas podría mejorar la precisión en la simulación de interacciones entre partículas, tales como fricción y bloqueo, que son fundamentales en la predicción del flujo de material en procesos de etapas iniciales del caving.

Referencias

[1] Brown, E. Block Caving Geomechanics, Second Edition. Brisbane, Australia: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2007.

[2] Laubscher, D. A practical manual on Block Caving. International caving study (1997-2000).

JKRMC, 2000.

[3] Brunton, I., Sharrock, G., & Lett, J. Full scale near field flow behaviour at the Ridgeway Deeps Block Cave operation, 2012.

[4] Power, G. R. Modelling granular flow in caving mines: large scale physical modelling and full-scale experiments, 2004.

[5] Kvapil, R. Gravity flow of granular materials in hoppers and bins. *Int J. Rock Mech. Mining Sci* 2, pp. 35-41, 1964.

[6] Castro, R. A study of isolated drawing zones in block caving mines. Ph.D. thesis, The University of Queensland, 2006.

[7] Peters, D. Physical modeling of the draw behaviour of broken rock in caving. *Quarterly of the Colorado School of Mines* 79 (1), pp. 148, 1984.

[8] Cundall, P., Strack, O. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29, pp. 476-51, 1979.

[9] O'Sullivan, C. *Particulate discrete element modelling: a geomechanics perspective*. CRC Press, 2011.

[10] Castro, R., Trueman, R. An experimental review and simulations of gravity flow in coarse materials for block/panel caving. In: *MassMin 2008 Proceedings*. Lulea, Sweden, pp. 1043-1052, 2008.

[11] Halim, A. 3d large scale physical modelling for studying interactive drawing and drawpoint spacing in block caving mines. Ph.D. thesis, The University of Queensland, 2004.

[12] Laubscher, D. Cave mining- the state of the art. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 279-293, 1994.

[13] Brady, B., Brown, E. *Rock Mechanics*. Springer, Netherlands, 2006.

[14] Janelid, I. Study of the gravity flow process in sublevel caving. In: *International Sublevel Caving Symposium*. Atlas Copco, Stockholm, 1972.

- [15] Yenge, L. Analysis of bulk flow of materials under gravity caving proceedings: Part i sublevel caving in relation to flow in bins and bunkers. Quarterly of the Colorado School of Mines 75 (4), no. 3, 1980.
- [16] Castro, R., Trueman, R., Halim, A. A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3d physical model. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44, pp. 860870, 2007.
- [17] Trueman, R., Castro, R., Halim, A. Study of multiple draw-zone interaction in block caving mines by means of a large 3d physical model. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 45 (7), pp. 10441051, 2008.
- [18] Sahupala, H., Szwedzicki, T., Prasetyo, R., Diameter of a draw zone, a case study from a block caving mine, deep ore zone, pt freeport indonesia. In: Caving 2010. ACG, Perth, pp. 633646, 2010.
- [19] Gustafsson, P. Waste rock content variations during gravity flow in sublevel caving: Analysis of full-scale experiments and numerical simulations (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet), 1998.
- [20] Garcés Alarcón, D. L. C Estudio de flujo gravitacional de material hundido por medio de trazadores inteligentes, 2015.
- [21] Nedderman, R. M. Statics and Kinematics of Granular Materials. Cambridge, 1992.
- [22] Lorig, L., Cundall, P. A rapid gravity flow simulator, final report. Report to international caving study, JKMRRC and Itasca Consulting Group, inc., Brisbane, 2000.
- [23] Pierce, M. A model for gravity flow in block caving mines. Ph.D. thesis, The University of Queensland, 2009.
- [24] Rycroft, C. H., Kamrin, K., Bazant, M. Z. Assessing continuum postulates in simulations of granular flow. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 57 (5), pp. 828839, 2009.
- [25] Dai, C., Muhlhaus, H., Meek, J., Fama, M. D. Modelling of blocky rock masses using the Cosserat method. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts 33 (4), pp. 425432, 1996.

- [26] Von Neumann, J. Theory of self-reproducing automata. University of Illinois Press, London, 1966.
- [27] Sharrock, G., Beck, D., Booth, G., Sandy, M. Simulating gravity ow in sub-level caving with cellular automata. In: MassMin 2004 Proceedings. Santiago, Chile, pp. 189194, 2004.
- [28] Rycroft, C. H., Bazant, M. Z., Grest, G. S., Landry, J. W. Dynamics of random packings in granular ow. Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics) 73 (5), 051306, 2006.
- [29] K., Rycroft, C. H., Bazant, M. Z. The stochastic ow rule: A multi-scale model for granular plasticity. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng 15, pp. S449S464, 2007.
- [30] Cundall, P., Strack, O. A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique 29, pp. 4765, 1979.
- [31] Herrmann, H., Luding, S. Modelling granular media on the computer. Continuum Mech. Ther modyn 10, pp. 189231, 1998.
- [32] Martin, C., Bouvard, D., Shima, S. Study of particle rearrangement during powder compaction by the discrete element method. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 51, pp. 667693, 2003.
- [33] Potyondy, D., Cundall, P. A bonded-particle model for rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41 (8), pp. 13291364, 2004.
- [34] Alford, C. Computer simulation models of the gravity ow of ore in sublevel caving. Master's thesis, University of Melbourne, 1978.
- [35] Sharrock, G., Beck, D., Booth, G., Sandy, M. Simulating gravity ow in sub-level caving with cellular automata. In: MassMin 2004 Proceedings. Santiago, Chile, pp. 189194, 2004.
- [36] Pierce, M., Cundall, P., van Hout, G., Lorig, L. Pfc3d modeling of caved rock under draw. In: Konietzky, H. (Ed.), Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods (Proceedings of the 1st International PFC Symposium, November 2002). Balkema, Gelsenkirchen, Germany, pp. 211217, 2003.

- [37] Coetzee, C.J. Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape. Powder Technol. 2016.
- [38] William F. Riley, Leroy D. Sturges, Ingeniería Mecánica: Dinámica, 1994.
- [39] A. Jin, H. Sun, G. Ma, Y. Gao, S. Wu, X. Meng. A study on the drawing laws of caved ore and rock using the discrete element method, Computers and Geotechnict 80, pp. 59-70, 2016.
- [40] Martínez C, Modelamiento numérico de colgaduras en minería de Caving mediante elementos discretos, Memoria de Ingeniero Civil de Minas, Tesis Magister en Minería, Universidad de Chile, Chile, 2020.
- [41] Hadjigeorgiou J, Lessard J. F. Numerical investigation of ore pass hang-up phenomena. Department of Mining, Metallurgical and Materials Engineering, Univertité Laval, Quebec City, Canada. 2017.
- [42] Lazo R, Modelamiento de acopio de mineral mediante el método de elementos discretos, Memoria de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Concepción, Chile, 2022.
- [43] Y. Yu, J. Zhang, J. Zhang, and H. Saxén, DEM and experimental studies on pellet segregation in stockpile build-up, Ironmaking and Steelmaking, vol. 45, no. 3, pp. 264–271, 2018.
- [44] O. R, Walton B. R. L, Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks, Journal of Rheology, pp. 984–980, 1986.
- [45] Henríquez, J. Evaluación de la Altura de Socavación en la Productividad de la Minería de Block/Panel Caving, 2018.

Anexos



Anexo A: Variables de simulación.

En este anexo se presentan variables relevantes de cada simulación que se pueden tener en consideración para trabajos futuros.

Tabla 17: Parámetros de las simulaciones

Variable	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Nº de partículas	1,559,840	1,680,358	689,372
T de simulación	2 días y 20 hrs.	10 días.	4 días y 4 hrs.
Altura de socavación	4 m	4 m	4 m
Simulación	1000 [s]	1000 [s]	1000 [s]
T ciclo palas	9.3 [s]	9.3 [s]	9.3 [s]
Extracciones	215	215	215
Tamaño	1.91 TB	1.3 TB	0.84 TB
GPU	NVIDIA GeForce RTX4080	NVIDIA GeForce RTX4080	NVIDIA GeForce RTX4080

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

Título: Simulación numérica de flujo gravitacional a escala mina mediante DEM		
Nombre Memorista: NICOLAS MIJAIL MANSILLA CANESSA		
Modalidad	INVESTIGACIÓN	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	MUY BUENO	 Prof. René Gómez P.
Calificación	6.7	
Fecha	20.12.2024	
  Prof. Ramón Díaz N.		
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
Prof. Manuel Mondaca		 Prof. Roberto Fustos T.
Resumen		
<p>La investigación de las operaciones de <i>block caving</i> ha dependido tradicionalmente de modelos físicos y el uso de marcadores, que, aunque aportan información valiosa, tienen limitaciones como la escala y la incapacidad para captar la complejidad del comportamiento del material en condiciones mineras reales. En este contexto, el Método de Elementos Discretos (DEM) emerge como una alternativa, la cual permite simular interacciones entre partículas individuales. No obstante, las simulaciones DEM requieren equipos de alta capacidad y dependen en gran medida de la calidad de los datos de entrada. Este estudio se enfoca en la simulación del flujo gravitacional en bateas de extracción mediante el DEM, con el objetivo de desarrollar un modelo numérico que considere la heterogeneidad de tamaños de bloques en operaciones de hundimiento. Para ello, se realizaron tres experimentos: los dos primeros sin material cohesivo, comparando los resultados con un modelo físico de referencia, y un tercero donde se añadió cohesión para formar bloques de mayor tamaño, replicando las etapas iniciales del caving en el campo cercano.</p> <p>En la primera fase, se compararon los datos de las simulaciones físicas con los resultados de los modelos numéricos. Se observó que el modelo numérico reproduce de manera satisfactoria la dinámica del flujo de material, con similitudes clave respecto al modelo físico. Sin embargo, al usar partículas poliédricas, los resultados variaron debido a la mezcla entre el material socavado y el primario. Un hallazgo destacado es que una cohesión de valor 7 permite la formación de bloques grandes, lo que facilita un colapso consistente en la parte superior de la batea sin interrupciones. Para futuros estudios, se sugiere el uso de partículas poliédricas para mejorar la precisión geométrica del material socavado, además de incluir esfuerzos en las paredes del modelo para simular mejor las tensiones presentes en el entorno minero.</p>		