



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA



MODELAMIENTO DE ESFUERZOS EN MINERAL QUEBRADO

POR

JOAKIN JOSE IGNACIO RODRIGUEZ SERRANO

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

Profesor guía:
Dr. René Gómez Puigpinos

Profesor Co-guía:
Dr. Raúl Castro Ruiz

Diciembre 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Joakin José Ignacio Rodríguez Serrano

© 2024 Joakin José Ignacio Rodríguez Serrano

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

AGRADECIMIENTOS

Al arribar a la culminación de este proceso académico, se hace imperativo, ineludible e irremediablemente justo reconocer la influencia, el apoyo y la incalculable paciencia de aquellos cuyas contribuciones, de manera directa o indirecta, han forjado el camino hacia la consumación de este humilde trabajo.

En primer lugar, a esa inalterable constelación de apoyo incondicional que es la familia, cuyos miembros han demostrado, en más de una ocasión, una tenacidad emocional digna de epopeya ante los embates de mis decisiones académicas. Habiendo transitado previamente por los venerables claustros de otra universidad, he tenido la inmensa fortuna de contar con su paciencia y su confianza en que, pese a los desvíos del destino, algún día lograría arribar a esta meta.

A continuación, un reconocimiento inquebrantable se extiende hacia aquellos compañeros y amigos que, con su excelsa combinación de camaradería y resistencia heroica ante mis divagaciones académicas, han transformado este proceso en una empresa menos árida y más enriquecedora. No solo hemos compartido el incesante vaivén del rigor académico, sino que, en un acto de sacrificio casi ritual, decidimos poner a prueba la resiliencia del cuerpo humano a través del consumo de ciertas sustancias embotelladas, en volúmenes que podrían considerarse preocupantes para la ciencia médica. Entre debates filosóficos de dudosa lucidez y risas que bordeaban lo absurdo, se forjaron lazos indisolubles que quedarán, al igual que este trabajo, grabados en el registro de lo imborrable.

Finalmente, pero de ninguna manera en un rango inferior de gratitud, es necesario destacar la invaluable orientación de mis profesores y compañeros del BClab, quienes, con su vasto conocimiento, paciencia sin parangón y genuino interés por la exploración intelectual, han servido de inspiración y guía en este arduo pero fascinante recorrido. Su capacidad de iluminar los senderos de la incertidumbre con la antorcha del conocimiento ha sido, sin duda, un pilar fundamental en la construcción de este estudio.

RESUMEN

La minería subterránea de *caving* presenta retos significativos en la modelación de esfuerzos en medios granulares, debido a la dinámica del hundimiento y la interacción entre las zonas en movimiento y estancadas. Este trabajo tiene como objetivo modelar y validar los esfuerzos inducidos durante el proceso de extracción en *caving*, utilizando un enfoque numérico basado en autómatas celulares. El estudio se basa en el modelo propuesto por Gómez en 2022, que ha sido recalibrado y evaluado con nuevos datos experimentales.

Se han llevado a cabo comparaciones entre los resultados simulados y experimentales en configuraciones como extracción aislada, tiraje múltiple uniforme y extracción múltiple no uniforme, reproduciendo de manera satisfactoria los patrones de concentración de esfuerzos y zonas de estancamiento observados en laboratorio. Adicionalmente se introduce un nuevo ajuste para un parámetro que cambia en función de las áreas tributarias, permitiendo replicar de forma más precisa los esfuerzos medidos en situaciones mixtas, donde la concentración de esfuerzos en zonas estancadas tiene mayor relevancia, mejorando la capacidad del modelo para reflejar esta realidad.

Finalmente, si bien se han detectado errores en torno al 10% en las comparaciones entre las simulaciones y los datos de mina real, bajo ciertos supuestos, el modelo constituye un buen primer paso para abordar el tema de los esfuerzos a escala mina. Aunque no es completamente preciso en su estado actual, ofrece una base sólida para futuras investigaciones. Aún son necesarios más experimentos y la recopilación de datos mina adicionales para lograr una modelación más completa y mejorar la capacidad predictiva del modelo en condiciones reales de minería.

ABSTRACT

Caving mining presents significant challenges in the modeling of stresses in granular media due to the dynamic nature of subsidence and the interaction between the movement and the stagnant zones. This work aims to model and validate the induced stresses during the ore extraction process in caving using a numerical approach based on cellular automata. The study is based on the model proposed by Gómez in 2022, which has been recalibrated with new experimental data.

Comparisons have been made between simulated and experimental results in configurations such as isolated extraction, uniform draw, and panel caving draw, successfully replicating the stress concentration patterns and stagnant zones observed in the laboratory. The model more accurately replicates the measured stresses in mixed conditions by introducing a new adjustment that varies based on tributary areas. Here, stress concentration in stagnant zones is more significant, improving the model's ability to reflect reality.

While errors have been detected in comparisons between simulations and real mine data, the model represents a good first step in addressing the issue of stresses on a mine-scale. Although not completely accurate in its current state, it provides a solid foundation for future research. More experiments and data collection are necessary to achieve a more comprehensive model and enhance the model's predictive capacity in real mining conditions.

Índice

1. Introducción:	1
1.1 Justificación de la investigación	2
1.2 Objetivos:	3
2. Revisión Bibliográfica	5
2.1 Flujo Gravitacional	5
2.1.1 Elipsoides de movimiento y de extracción	5
2.1.2 Modelos Físicos	7
2.1.3 Mecanismos de flujo en múltiples puntos de extracción	8
2.2 Modelación Numérica del Flujo Gravitacional	10
2.2.1 Modelos Dinámicos	10
2.2.2 Modelos Cinemáticos	10
2.3 Esfuerzos en Material Quebrado	14
2.3.1 Conceptos Básicos de Esfuerzos en Material Quebrado	14
2.3.2 Esfuerzos Verticales Asociados al Material Granular	14
2.3.3 Distribución de Esfuerzos	15
2.3.4 Comportamiento de los Esfuerzos en Situaciones de Flujo	15
2.4 Esfuerzos Verticales y Fragmentación Secundaria	18
3. Metodología	20
3.1 Simulador de Esfuerzos	21
3.1.1 Empuje o Porcentaje de Peso Transmitido (E)	23
3.1.2 Distribución de Fuerzas (s)	23
3.1.3 Relajación (R)	23

3.1.4 Empuje Mínimo o Porcentaje de Peso Transmitido en movimiento (E_{min}).....	24
3.1.5 Funcionamiento del Simulador de Esfuerzos	24
3.2 Calibración del Modelo	25
3.2.1 Calibración de la geometría de flujo.....	25
3.2.2 Calibración Estática de Esfuerzos	26
3.2.3 Calibración Dinámica de Esfuerzos	27
4. Resultados y Análisis.....	30
4.1 Resultados de los Parámetros Calibrados	30
4.2 Validación modelo de Esfuerzos: Réplica de Canales.....	31
4.2.1 Tiraje Aislado.....	32
4.2.2 Panel Caving.....	33
4.2.3 Tiraje Uniforme	35
4.2.3 Propuesta de Mejora	37
4.2.4 Réplica de Segovia 2022	40
4.2.5 Réplica de Díaz 2024.....	44
4.2.6 Modelado de Variables y Ajuste de Parámetros.	50
4.2.7 Modelo Sintético.	50
4.2.8 Tiempos de Simulación	53
4.3 Escala Mina	53
5. Discusión	56
6. Conclusiones y Recomendaciones.....	59
Referencias	1
7. Anexo:.....	7
7.1 Regresiones Logarítmicas para predecir Parámetros.....	7

7.2 Análisis de Sensibilidad.....	8
7.3 Base de Datos Completa.....	9
7.4 Tiempos de Simulación:	9
7.5 Error Escala mina:	10
7.6 Calibraciones	13
7.7 Programas utilizados para las simulaciones (Líneas de Código en Python)	15

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema explicativo de minería de caving. [4]	2
Figura 2: Desarrollo de la zona de movimiento (IMZ) de ancho W y altura H en un plano [16].	6
Figura 3: Flujo en masa [10].....	9
Figura 4: Redistribución de esfuerzos durante el flujo.....	9
Figura 5: Funcionamiento del Autómata Celular [40].....	13
Figura 6: Efecto Arco [10].....	17
Figura 7: Diferencias entre los tipos de Fragmentación en caving [53].....	19
Figura 8: Metodología del presente trabajo.	20
Figura 9: Esfuerzos verticales para distintas alturas de columna de material quebrado [10].	22
Figura 10: Ejemplo de Calibración de la Geometría de Flujo.....	26
Figura 11: Ejemplo de Calibración del Parámetro E.	27
Figura 12: Ejemplo de Calibración del Parámetro Emin.....	28
Figura 13: Ejemplo de Calibración del Parámetro R.....	28

Figura 14: Ejemplo de funcionamiento del Simulador de esfuerzos, vista frontal de flujo (izquierda) y esfuerzos (derecha) aplicado en extracción aislada de Canales [18].	29
Figura 15: Modelo físico a escala 1:200 utilizado en la fase experimental. 1 es la estructura metálica (de color rojo) que soporta y da estabilidad a las estructuras restantes; 2, es la base del modelo que representa el diseño del nivel de producción de la mina simulada; y 3, corresponde a las paredes del modelo que son instaladas en la base [18]......	31
Figura 16: Base del modelo físico. Cotas en [cm]. Vista en planta y puntos de extracción [18].	31
Figura 17: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Canales Experimento 0 Extracción Aislada.....	32
Figura 18: Disposición de las celdas de carga en el experimento 1, Los números representan la secuencia de apertura de los puntos de extracción [18]......	33
Figura 19: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) en las celdas 1, 2 y 3 Canales Experimento 1 Extracción por Panel caving.....	33
Figura 20: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) en las celdas 4, 5 y 6 Canales Experimento 1.....	34
Figura 21: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Canales Experimento 2, tiraje uniforme con zona inactiva.	35
Figura 22: Disposición de las celdas de carga en el experimento 3, en (1) se muestran los puntos de extracción activos y en (2) los inactivos [18].	35
Figura 23: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Canales Experimento 3, tiraje uniforme con zona inactiva.	36
Figura 24: Comparación Canales 2, habiendo implementado el empuje dinámico.	38
Figura 25: Comparación Canales 3, habiendo implementado el empuje dinámico.	39
Figura 26: Imagen del modelo físico utilizado por Segovia [22].	40
Figura 27: Distribución de las celdas de Carga en los experimentos 1 y 2 [22].	40
Figura 28: Distribución de las celdas de Carga en el experimento 3 [22].	41

Figura 29: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Segovia Experimento 1 Extracción Aislada	41
Figura 30: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Segovia Experimento 2 Extracción Aislada de columna mixta, fino y grueso.	42
Figura 31: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Segovia Experimento 3 Extracción Uniforme.....	43
Figura 32: Modelo Físico usado por Díaz, a la izquierda la disposición de material fino (naranja) y grueso (gris). A la izquierda el modelo físico de los experimentos 1 y 2, a la derecha los experimentos 3 y 4. Dimensiones del footprint y disposición de las celdas de carga para todos sus experimentos [23].....	45
Figura 33: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Díaz Experimento 1 Extracción Aislada.	46
Figura 34: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Díaz Experimento 2 Extracción Uniforme.....	47
Figura 35: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Díaz Experimento 3 Extracción Por paneles, secuencia de izquierda a derecha.	48
Figura 36: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Díaz Experimento 4 Extracción Por paneles, secuencia de derecha a izquierda.	49
Figura 37: Comparación de los esfuerzos simulados, en un sistema homogéneo (Izquierda) versus heterogéneo (Derecha). En A se muestra la distribución homogénea de densidad y los esfuerzos asociados a los 20 kg de extracción, y su caso contrario en B con la densidad variable aleatoriamente y su distribución de esfuerzos correspondiente.....	51
Figura 38: Tiempos de Simulación por Experimento.....	53
Figura 39: Modelo de bloques a escala mina mostrando densidad y sus dimensiones.	54
Figura 40: Esfuerzo simulado en función de la altura de columna	54
Figura 41: Ejemplo de las diferencias entre masas extraídas por punto de Extracción, en experimentos de extracción uniforme [22].	57

Índice de Tablas.

Tabla 1: Tabla Resumen de los principales modelos físicos y sus respectivos resultados relevantes.....	7
Tabla 2: Geometría de los experimentos replicados a través de simulaciones.....	30
Tabla 3: Calibración de los distintos experimentos.....	30
Tabla 4: Diferencias entre el empuje óptimo a medida que avanza la extracción.....	37
Tabla 5: Variación en una misma celda, comparando la situación heterogénea versus la homogénea.....	51

1. Introducción:

La minería de *caving* es una técnica subterránea de extracción de minerales que se basa en el colapso controlado de grandes bloques de roca para facilitar la recuperación del mineral [1]. Este método es eficaz en depósitos de gran volumen y baja ley, donde otras técnicas de minería resultan menos atractivas económicamente [1].

El principio fundamental de la minería de *caving* es inducir el colapso del macizo rocoso sobre el nivel de producción mediante la extracción de soporte subyacente [2]. Este proceso genera una zona de hundimiento que permite que el material fragmentado se desplace por gravedad hacia los puntos de extracción, donde es recuperado y transportado a la superficie [3].

En esta técnica, se delimita un área específica del yacimiento mineral, conocida como "bloque" o "panel", que se fragmenta mediante un colapso inducido controlado. El colapso se inicia al eliminar un soporte crítico en la base del bloque, lo que provoca que la roca suprayacente se fracture y colapse bajo su propio peso [2]. A medida que el material se fragmenta y se hunde, el mineral quebrado fluye por gravedad hacia los puntos de extracción ubicados en el nivel de producción. El *block caving* es particularmente adecuado para yacimientos masivos y de baja ley, como los depósitos de pórfido de cobre, donde la eficiencia en la recuperación y el bajo costo operativo son esenciales para la viabilidad económica del proyecto [4].

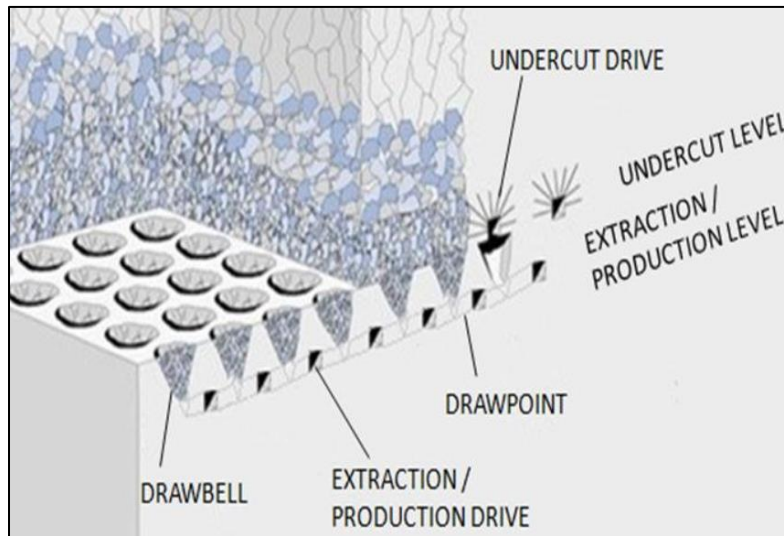


Figura 1: Esquema explicativo de minería de caving. [5]

1.1 Justificación de la investigación

La investigación sobre los esfuerzos en el mineral quebrado en el contexto de la minería de *block caving* está justificada por la necesidad de comprender y optimizar el comportamiento del material quebrado bajo condiciones de extracción. Conocer los esfuerzos en el mineral quebrado es fundamental por varias razones clave:

- Seguridad en las Operaciones Mineras: El control y la predicción de los esfuerzos en el mineral quebrado son cruciales para garantizar la estabilidad de la mina y la seguridad de los trabajadores. En el método de *caving*, el mineral se deja colapsar bajo su propio peso, lo que genera una redistribución compleja de esfuerzos. Comprender estos esfuerzos permite prever posibles fallas o colapsos no controlados que podrían poner en riesgo a los operarios y la infraestructura minera [6].
- Optimización de la Recuperación de Mineral: Conocer cómo se distribuyen y cambian los esfuerzos en el mineral quebrado ayuda a optimizar los patrones de extracción. Un control preciso de estos patrones permite maximizar la recuperación del mineral deseado, minimizando la dilución con materiales no deseados [7]. Esto es especialmente importante en operaciones de gran escala, donde pequeñas mejoras en la eficiencia de la extracción pueden traducirse en significativos aumentos en la rentabilidad [8].
- Modelado y Predicción del Comportamiento del Mineral: El estudio de los esfuerzos en el mineral quebrado facilita el desarrollo de modelos predictivos más precisos del

comportamiento del mineral durante la extracción en minería de *caving*. Estos modelos son fundamentales para simular diferentes escenarios de extracción y tomar decisiones informadas que minimicen los riesgos y maximicen la eficiencia de la operación. Un modelado preciso también permite predecir cómo el mineral quebrado se comportará bajo diferentes condiciones geomecánicas y de extracción, permitiendo diseñar estrategias de extracción más efectivas [9].

- Reducción de Costos Operacionales: Una comprensión clara de los esfuerzos permite una planificación más efectiva del proceso de extracción, reduciendo la necesidad de intervención adicional, como el refuerzo de túneles y la rehabilitación de áreas colapsadas [10].
- Control de la Fragmentación del Mineral: La fragmentación del mineral es un factor crítico en la minería de *block caving*, ya que afecta la eficiencia de la carga, el transporte y el procesamiento del mineral. Conocer los esfuerzos en el mineral quebrado ayuda a entender cómo se produce la fragmentación y cómo se puede controlar para optimizar el tamaño de las partículas resultantes, mejorando así los procesos de manejo y procesamiento posterior del mineral [11].

1.2 Objetivos:

Hipótesis:

“Es factible modelar esfuerzos mediante autómatas celulares en mineral quebrado a escala mina, basándose en parámetros geológicos y la extracción.”

Objetivo general:

Estudiar los esfuerzos dentro del material quebrado durante el flujo gravitacional en minería de *caving* utilizando un modelo basado en autómatas celulares.

Objetivos Específicos:

- Realizar un análisis exhaustivo de los parámetros que influyen en los esfuerzos, incluyendo variables como la geometría de la mina, las propiedades del material, y las condiciones de carga. Este análisis permitirá una mejor comprensión de las dinámicas del flujo gravitacional en diferentes escenarios.

- Estudiar los parámetros de calibración del modelo de esfuerzos y proponer modelos de ajuste generales.
- Evaluar la aplicabilidad del modelo de esfuerzos a escala mina, considerando la escalabilidad y la eficiencia computacional para su implementación práctica en entornos mineros reales.
- Actualizar la integración entre modelos de fragmentación secundaria y esfuerzos verticales.
- Verificar la factibilidad de modelar una situación minera real, en base a datos mina reales.

Alcances:

- El hundimiento se considera ya ocurrido, el estudio se enfoca en los esfuerzos en material granular ya quebrado, no en el proceso de hundimiento o propagación de este.
- No incluye dentro de la modelación diversos factores como la humedad, la geometría de las partículas, y el confinamiento lateral.

2. Revisión Bibliográfica

La revisión bibliográfica se estructurará en tres secciones principales para abordar de manera integral los conceptos fundamentales del estudio. Primero, se analizará el flujo gravitacional, destacando los principios físicos y mecánicos que rigen el comportamiento de los materiales granulares durante el proceso de extracción. A continuación, se presentará el modelamiento numérico, que incluye las diversas técnicas y simulaciones utilizadas para replicar el comportamiento del flujo y predecir su impacto en el sistema. Finalmente, se profundizará en los esfuerzos en mineral quebrado o medios granulares, donde se estudiará cómo estos esfuerzos se redistribuyen y afectan la estabilidad del material durante la extracción.

2.1 Flujo Gravitacional

El flujo gravitacional de materiales granulares se refiere al proceso mediante el cual estos materiales se trasladan desde su ubicación original bajo la influencia de la gravedad [12]. Este principio es fundamental para los métodos de extracción basados en el hundimiento, como el *block caving* o *panel caving*, donde la roca fragmentada se desplaza desde su posición original hacia los puntos de extracción en el nivel de producción [3]. El movimiento de los fragmentos dentro de la zona de extracción de una mina influye significativamente en la recuperación de mineral y en la dilución, lo que hace que su estudio sea de gran relevancia [9].

Para investigar el flujo gravitacional, se han empleado diferentes enfoques, como modelos físicos con arena, grava y roca fragmentada en ensayos de laboratorio [13], pruebas a escala de mina utilizando marcadores naturales (como madera y acero procedentes de niveles superiores), así como modelos matemáticos que se basan en la predicción estocástica y el análisis de ecuaciones de balance de masa y de esfuerzos [14].

2.1.1 Elipsoides de movimiento y de extracción

Se ha observado que cuando fluye material granular a través de un orificio, un volumen de material con forma elipsoidal se desplaza hacia abajo, justo por encima de los orificios de extracción. Este volumen de material en movimiento se conoce como la zona de movimiento aislada, o IMZ por sus siglas en inglés (*Isolated Movement Zone*) [15]. El material que permanece estático alrededor de la zona de movimiento se denomina zona estancada, zona

inactiva, o zona sin movimiento [16]. Cuando el material se extrae desde dos o más puntos, se habla simplemente de la zona de movimiento (MZ) [15].

La forma de la IMZ se puede describir por sus dimensiones, como su altura (H) y su ancho (W) o radio (r) [15]. La configuración de la zona de movimiento es crucial en minas que emplean métodos de hundimiento, ya que el ancho de la zona afecta la distancia entre los puntos de extracción [9], lo cual es necesario para asegurar que las zonas de movimiento se superpongan [17].

Determinar la forma de la zona de movimiento aislada implica medir la altura y el ancho de la IMZ. Sin embargo, como se muestra en la Figura 2, el límite entre la zona de movimiento y la zona estancada puede ser ambiguo. Esto convierte la medición en un proceso sujeto a errores y dependiente de la interpretación de quien realiza el análisis [17].

Por otra parte, la zona de extracción (EZ) se refiere al volumen que indica la posición original del material extraído de un punto de extracción para una cantidad específica de masa. Si el material se extrae desde un solo punto de extracción, este volumen se conoce como zona de extracción aislada (IEZ, por sus siglas en inglés, *Isolated Extracted Zone*) [17].

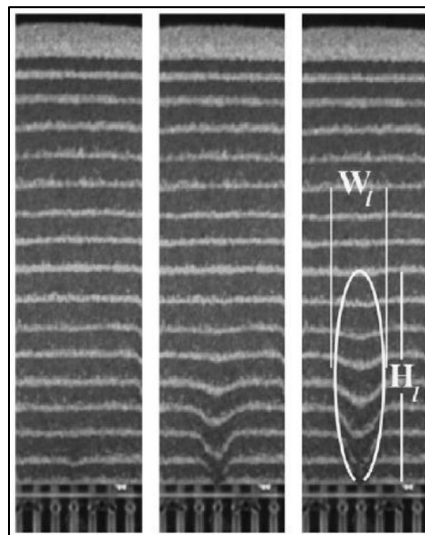


Figura 2: Desarrollo de la zona de movimiento (IMZ) de ancho W y altura H en un plano [18].

Los primeros estudios del flujo gravitacional establecen que el volumen del elipsoide de movimiento es aproximadamente quince veces mayor que el del elipsoide de extracción [19].

Además, la excentricidad del elipsoide está influenciada por varias variables, como el tamaño de las partículas y la cantidad de material extraída desde un punto de extracción aislado [19].

2.1.2 Modelos Físicos

Los modelos físicos son herramientas fundamentales en el estudio del flujo gravitacional en minería subterránea, ya que permiten simular y analizar el comportamiento del material granular bajo condiciones controladas [19]. Estos modelos proporcionan información valiosa sobre el comportamiento del material granular durante la extracción, así como sobre los esfuerzos inducidos por la operación [20].

Tabla 1: Tabla Resumen de los principales modelos físicos y sus respectivos resultados relevantes.

Autor	Año	Material	Tipo de Modelo	Resultados
Kvapil [19]	1965 - 1992	Arena	2D	Forma de zonas de flujo elipsoidales. Proporciona relaciones matemáticas asociadas al flujo de material granular en silos.
Peters [21]	1984	Grava	2D	No hay efecto del tamaño de partícula sobre la geometría de flujo. El ancho del tiraje depende del porcentaje de finos y las dimensiones del punto de extracción.
Power [22]	2004	Grava	3D	El tamaño de partícula tiene un efecto significativo sobre el alto y ancho de la zona de extracción y de movimiento. Cuestiona modelos 2D
Castro [12]	2006	Grava	3D	Los puntos de extracción deben estar espaciados a los menos el ancho de IMZ para que exista interacción. El ancho de la zona de extracción y movimiento en función de la masa extraída y su altura.

Orellana [23]	2011	Grava	3D	Modelos 2D son menos complejos y útiles para la evaluación preliminar cuando no se requiere gran precisión.
Canales [20]	2016	Grava	3D	Análisis de los esfuerzos inducidos en diferentes configuraciones de extracción, mostrando variaciones significativas en los resultados de esfuerzos en zonas estancadas y en movimiento.
Segovia [24]	2022	Grava y Arcilla	3D	Estudio de la influencia del material fino en los esfuerzos inducidos por el flujo gravitacional, Expande los resultados de Canales.
Díaz [25]	2024	Grava y Arcilla	3D	Evaluación de la migración de finos y su impacto en la recuperación de mineral y la dilución.

2.1.3 Mecanismos de flujo en múltiples puntos de extracción

Estudios recientes sobre el flujo gravitacional sostienen que los mecanismos de flujo que intervienen cuando hay tiraje desde múltiples puntos de extracción dependen tanto de la distancia entre estos puntos (d) como de las dimensiones de las zonas de flujo, específicamente el ancho y la altura [12], [17]. A partir de esto es posible catalogar los siguientes casos:

Caso 1: La distancia entre los puntos de extracción es menor al ancho de la zona de movimiento ($d < w_{IMZ}$). En esta situación el material situado entre los puntos de extracción se desplaza "en masa" hacia estos [12]. La columna de material entre los puntos de extracción desciende verticalmente a una velocidad constante por encima de la altura de interacción (HIZ) entre las zonas de movimiento aislado (IMZ). El flujo en masa se define como un mecanismo de flujo que ocurre en la parte superior del hundimiento, donde el asentamiento es uniforme. En este escenario, las partículas siguen trayectorias verticales, y no se produce mezcla vertical ni horizontal [26].

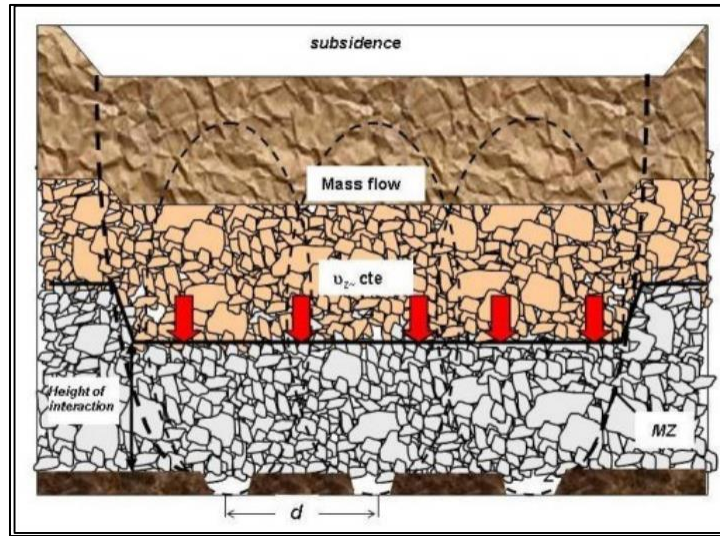


Figura 3: Flujo en masa [12].

Caso 2: La distancia entre los puntos de extracción es menor al ancho de la zona de movimiento ($d > w_{IMZ}$). En este caso se forman zonas sin movimiento entre ellos [15]. Esto provoca un aumento de los esfuerzos verticales en el volumen sin movimiento. Se sugiere que este incremento se debe a la redistribución de las cargas verticales dentro del flujo granular [9]. En este contexto, la IMZ se considera una zona de alta porosidad que no puede transmitir la totalidad de los esfuerzos desde arriba, lo que lleva a que parte de estos esfuerzos se redistribuyan a los volúmenes adyacentes más densos [9].

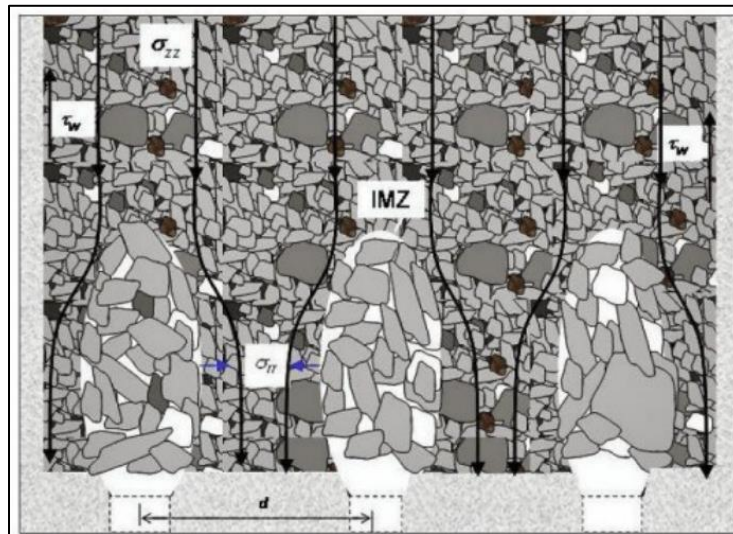


Figura 4: Redistribución de esfuerzos durante el flujo.

2.2 Modelación Numérica del Flujo Gravitacional

Un modelo numérico es esencialmente un modelo matemático diseñado para predecir, mediante reglas, ecuaciones, teorías o leyes, el comportamiento de un fenómeno cuyo resultado se desea conocer [27]. En la actualidad, el desarrollo de herramientas numéricas y los avances tecnológicos en equipos que permiten resolver problemas de alta complejidad en un tiempo reducido han facilitado el progreso en metodologías de resolución basadas en software, proporcionando resultados de manera eficiente [28]. Sin embargo, estos resultados solo son válidos si están respaldados por una base teórica y descriptiva sólida, y si permiten la modelación de condiciones específicas y casos complejos [29].

Existen diversos modelos matemáticos que representan el comportamiento del mineral durante su extracción mediante técnicas de minería como el *block caving* o *panel caving* [29]. Algunos de estos modelos han sido creados específicamente para la industria minera, mientras que otros se han desarrollado principalmente para fines de investigación [30]. La necesidad de una comprensión más detallada del flujo gravitacional, junto con una mayor capacidad para procesar datos, ha impulsado la creación de simuladores de flujo gravitacional basados en modelos matemáticos [12].

2.2.1 Modelos Dinámicos

Los modelos dinámicos representan el flujo gravitacional siguiendo las leyes de la mecánica, es decir, describen el movimiento y el flujo mediante el desarrollo de ecuaciones que equilibran las fuerzas entre las partículas [31]. Este tipo de simulaciones es crucial para obtener aproximaciones del comportamiento del flujo gravitacional [9]. Sin embargo, no son prácticas para validaciones a escala de mina, ya que el número de partículas que pueden simularse está limitado por la capacidad actual de los computadores. Además, su utilidad es restringida debido a los largos tiempos de simulación que requieren [32].

2.2.2 Modelos Cinemáticos

Los modelos cinemáticos están diseñados para replicar el movimiento del material granular sin tener en cuenta los detalles específicos de las fuerzas y las interacciones dinámicas entre las partículas [33]. A diferencia de los modelos dinámicos, los modelos cinemáticos simplifican este proceso al centrarse únicamente en la trayectoria del movimiento sin analizar

los mecanismos de fuerza subyacentes [32]. Estos modelos son útiles para predecir el flujo en situaciones donde los detalles dinámicos no son críticos y permiten realizar simulaciones más rápidas con menor demanda computacional [32].

Los simuladores cinemáticos se clasifican en dos tipos principales: estocásticos y empírico-analíticos. Los modelos estocásticos utilizan métodos probabilísticos para predecir el comportamiento del material granular, basándose en datos históricos y patrones observados, lo que permite una aproximación a la distribución del material sin requerir una comprensión detallada de las fuerzas involucradas [32]. Por otro lado, los modelos empírico-analíticos se basan en observaciones experimentales y utilizan ecuaciones derivadas empíricamente para describir el flujo, proporcionando una representación más directa del comportamiento del material basado en datos específicos de experimentos previos o estudios de caso [34].

2.2.2.1 Autómatas Celulares (CA)

Los autómatas celulares son un tipo de modelo matemático utilizado para simular el comportamiento de sistemas complejos compuestos por múltiples componentes interactuantes, como el flujo de materiales granulares en minería [35]. En el contexto de la minería subterránea, los autómatas celulares se utilizan para modelar el flujo gravitacional en métodos como el *block/panel caving* [36]. Estos modelos dividen el espacio de simulación en una red de celdas discretas, donde cada celda puede estar en diferentes estados. Las reglas de transición definen cómo cambia el estado de cada celda en función de los estados de las celdas vecinas, permitiendo así una simulación del movimiento de partículas a lo largo del tiempo [37].

Los autómatas celulares se clasifican dentro de los modelos cinemáticos, ya que se centran en la descripción del movimiento y la distribución del material sin una consideración detallada de las fuerzas internas o las interacciones dinámicas complejas entre las partículas [35]. Una de las principales fortalezas de los modelos basados en autómatas celulares es su capacidad para simular sistemas complejos de manera computacionalmente eficiente, lo que permite estudiar grandes volúmenes de material y condiciones variadas sin la necesidad de recursos de cálculo excesivamente elevados [38]. Además, estos modelos son fácilmente adaptables y pueden incorporar diversos parámetros, como el tamaño y la forma de las partículas, la porosidad del material, y las condiciones de contorno del sistema [37].

Sin embargo, los autómatas celulares también presentan debilidades. Al no considerar las interacciones de fuerza detalladas entre partículas individuales, estos modelos pueden no capturar ciertos comportamientos dinámicos críticos, como la propagación de ondas de esfuerzo o la compactación bajo carga [32]. Esto limita su aplicabilidad para simulaciones que requieren un entendimiento más detallado del comportamiento dinámico de los materiales [36]. A pesar de estas limitaciones, los autómatas celulares son herramientas valiosas para obtener una comprensión general del flujo de materiales y para estudios preliminares donde la simplicidad y la rapidez son factores clave [37].

2.2.2.2 FlowSim BC

FlowSim BC es una herramienta numérica que emplea el enfoque de autómatas celulares para simular el flujo gravitacional en el marco de la planificación a largo plazo de *Block Caving* [39]. En este método, el macizo rocoso se modela como una red regular de bloques discretos, con las siguientes características:

Espacio/Grilla: El espacio se divide en bloques de tamaño uniforme, con dimensiones de menor tamaño que el bloque inicial. Al utilizar bloques más pequeños, se puede obtener una representación más detallada del flujo gravitacional, aunque esto incrementa significativamente el tiempo de cálculo [40].

Estado: Cada bloque puede estar en uno de tres estados: granular, sólido o vacío. Los bloques en estado granular tienen la capacidad de moverse y fluir; los bloques en estado sólido permanecen inmóviles, incluso cuando hay espacio disponible; y los bloques vacíos, que tienen una densidad cero, se generan en los puntos de extracción durante el proceso de extracción [40].

Vecindario: El vecindario se refiere a la disposición de las celdas alrededor de una celda vacía donde se aplican las reglas de transición. Esta disposición incluye un total de 17 bloques: 9 del nivel superior ($k+1$) y 8 alrededor de la celda en el nivel actual (k) [40].

Función de transición: La función de transición es una regla matemática local que se utiliza durante la simulación para definir el movimiento de los bloques. En el caso del flujo gravitacional, esta función se establece en términos de la probabilidad de flujo, definida por la siguiente ecuación:

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

Donde:

d_i = Distancia entre el bloque vacío i y los bloques en el nivel superior.

n = Constante de ajuste relacionada con el comportamiento general del flujo de la roca. El aumento de estos parámetros conduce a una zona de extracción/movimiento más estrecho.

m = Parámetro de flujo preferencial relacionado con el potencial de migración de finos. Cuando

mayor sea el valor m , mayor será la probabilidad de migración.

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

A continuación, se muestra cómo el material granular desciende a medida que se intercambia con los espacios vacíos, los cuales se incrementan conforme se extrae material desde la base.

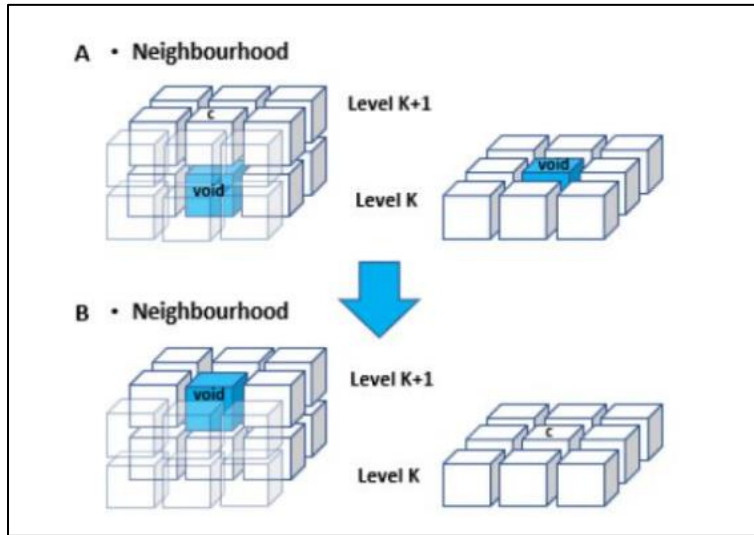


Figura 5: Funcionamiento del Autómata Celular [41].

Es importante destacar que la función de transición se activa únicamente cuando se cumple con un requisito mínimo de espacios vacíos, denominado C_v (Condición de vacíos). Este parámetro permite controlar el proceso de difusión de los espacios vacíos. Este mecanismo

ha demostrado ser efectivo para simular la evolución de la zona de movimiento, además de estar relacionado con el factor de esponjamiento y la porosidad del material [40].

2.3 Esfuerzos en Material Quebrado

2.3.1 Conceptos Básicos de Esfuerzos en Material Quebrado

En minería subterránea los esfuerzos en el material granular, como el mineral quebrado, son fundamentales para entender la estabilidad y el comportamiento del sistema durante la extracción [4]. Los esfuerzos pueden definirse como las tensiones internas que experimenta un material cuando está sometido a fuerzas o cargas externas. Estas tensiones se distribuyen a lo largo del material, afectando su estructura y su capacidad de soportar o ceder ante el peso o las condiciones circundantes [4].

Los esfuerzos en el material granular pueden clasificarse en dos categorías principales: esfuerzos iniciales y esfuerzos inducidos [4]. Los esfuerzos iniciales son aquellos presentes en el material antes de que comience cualquier actividad de extracción. Estos esfuerzos están asociados a las tensiones naturales debido al peso del material sobre sí mismo, la presión de confinamiento, y las características geomecánicas del entorno [42]. Por su parte, los esfuerzos inducidos son los que se generan como consecuencia directa del proceso de extracción [43]. Durante la excavación, el flujo del material cambia la distribución de tensiones en la roca circundante, provocando que algunas zonas del macizo rocoso se vean sometidas a mayores cargas, mientras que otras experimenten una liberación de esfuerzos [9], [43].

2.3.2 Esfuerzos Verticales Asociados al Material Granular

Método de Janssen: Este método considera el efecto arco y proporciona una estimación del esfuerzo vertical inicial en función de la densidad aparente del material, el radio hidráulico y la fricción entre partículas y paredes del modelo [44].

$$\sigma_v = \frac{\rho R_h g}{\mu k} \left(1 - e^{-\frac{\mu k z}{R_h}} \right) \quad (2)$$

Método de Walker: Amplía el modelo de Janssen incorporando la sobrecarga vertical inicial, proporcionando una fórmula ajustada para diferentes profundidades del material granular [45].

$$\sigma_v = \frac{\rho R_h g}{\mu k} \left(1 - e^{-\frac{\mu k z}{R_h}} \right) + Q \left(e^{-\frac{\mu k z}{R_h}} \right) \quad (3)$$

Donde ρ es la densidad aparente del material, g es la aceleración debida a la gravedad, R es el radio hidráulico del contenedor, H es la altura de la columna de material, k representa la relación entre los esfuerzos horizontales y verticales en el material granular, μ_w es el coeficiente de fricción entre el material granular y las paredes del contenedor.

2.3.3 Distribución de Esfuerzos

Esfuerzos Verticales: Son las tensiones que actúan en la dirección vertical, influyendo directamente en la estabilidad de los pilares y en la eficacia del hundimiento [4].

Esfuerzos Horizontales: Son tensiones perpendiculares a la dirección vertical que interactúan con los esfuerzos verticales para determinar la resistencia general del material granular [4].

Para calcular la razón entre esfuerzo vertical y horizontal (k), se han propuesto varios enfoques a lo largo del tiempo debido a la variabilidad de los esfuerzos en materiales granulares [46]. Uno de los métodos más comúnmente utilizados es el enfoque de Jaky, que relaciona k con el ángulo de fricción interna del material. Este método es sencillo y ampliamente aceptado en la ingeniería geotécnica [46]. Además, se han introducido otros enfoques, como el de Walker, que amplía la ecuación de Jaky considerando los esfuerzos horizontales y verticales bajo diferentes condiciones, y el enfoque de Nedderman, que también aporta ecuaciones para los casos activos y pasivos [33]. Estos enfoques permiten ajustar la estimación de k en función de las condiciones específicas del material granular y las interacciones con las paredes del sistema [47].

2.3.4 Comportamiento de los Esfuerzos en Situaciones de Flujo

- **Zonas de Concentración y Relajación:** Dentro del flujo de material granular, los esfuerzos tienden a concentrarse en cadenas de fuerza, que son caminos preferenciales a través de los cuales se transmiten las cargas, particularmente en las zonas estancadas [48].
- **Distribución Heterogénea de Esfuerzos:** La heterogeneidad en la distribución de esfuerzos puede llevar a variaciones locales en la tasa de fragmentación. Áreas de alta densidad pueden experimentar mayores concentraciones de esfuerzo, mientras que zonas menos densas permiten una redistribución más uniforme [49].

Esfuerzos en Función del Movimiento

Para entender y cuantificar los esfuerzos en el material quebrado, se utilizan diversos modelos y teorías, los cuales permiten predecir el comportamiento del material bajo condiciones de extracción [9].

Esfuerzos en la Zona Estancada (SZ)

La zona estancada (SZ) es la región donde el material no se mueve. Los esfuerzos en esta zona son más altos debido a la redistribución de cargas desde la zona de movimiento. Se ha propuesto que la teoría de área tributaria puede aplicarse para entender mejor esta redistribución de esfuerzos [9].

Esfuerzos en la Zona de Movimiento (MZ)

La zona de movimiento (MZ) es la región donde el material granular se desplaza activamente durante la extracción [9]. Los esfuerzos en esta zona tienden a ser menores en comparación con la zona estancada (SZ) debido a la transferencia de esfuerzos a través de fuerzas de corte en los bordes entre el material que fluye y el estancado [20]. Se ha planteado que la magnitud media de las presiones al interior de la zona en movimiento es independiente de la profundidad [9].

Efecto Arco

Desde los primeros estudios en materiales granulares se ha reportado que los materiales granulares pueden desarrollar elevadas tensiones de arqueo cuando se almacenan en un contenedor [50]. Estas tensiones generan que las fuerzas verticales en el fondo del recipiente,

en este caso el modelo físico, representen solo una fracción del peso total del material, que normalmente se calcularía multiplicando el peso específico del material por su altura [30]. El grado de arqueado de la tensión está influenciado por factores como la geometría del recipiente y las propiedades de corte del material y de las paredes, las cuales se describen como condiciones de contorno [1]. La tensión de arqueado también podría desempeñar un papel importante en las geometrías de colapso de bloques reales, ya que las fuerzas de corte actúan en direcciones opuestas a la gravedad sobre el muro colgante y la base del colapso[12]. La figura 6 muestra a continuación muestra las fuerzas que afectan la roca fragmentada una vez que la socavación ha progresado o conectado con la superficie. La magnitud de estas fuerzas de corte y, por lo tanto, el grado de tensión de arqueado en el *Caving* dependerá de la rugosidad de las paredes, las propiedades de corte del material y la geometría del modelo físico [1].

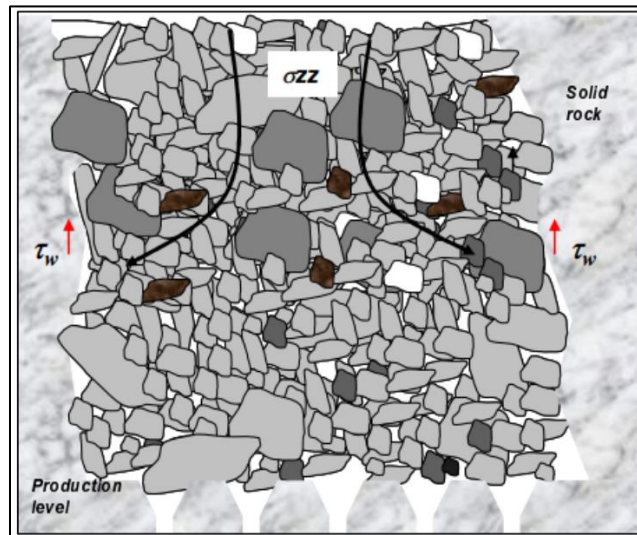


Figura 6: Efecto Arco [12].

Factores que Afectan los Esfuerzos en Material Quebrado

Densidad y Factor de Esponjamiento: La densidad del material quebrado y su factor de esponjamiento varían a lo largo de la columna de extracción, influenciando los esfuerzos verticales [16].

Granulometría y Forma de los Fragmentos: El tamaño y la forma de los fragmentos afectan la interacción entre las partículas y, por lo tanto, la distribución de los esfuerzos [32].

Altura de la Columna: La altura del material granular sobre el punto de extracción determina la magnitud de los esfuerzos verticales inducidos [50].

Fricción Interna y con las Paredes: La fricción entre las partículas y entre las partículas y las paredes del contenedor influye en el efecto arco y en la distribución de los esfuerzos [30].

Estrategias de Extracción: Diferentes estrategias de extracción pueden resultar en diferentes distribuciones de esfuerzos y, por lo tanto, deben ser cuidadosamente analizadas en las simulaciones [20].

2.5 Colapsos y Fragmentación Secundaria

2.5.1 Colapsos

Los colapsos pueden ser eventos complejos y multicausales que afectan la estabilidad y operatividad de las minas [4]. El avance de los frentes de socavación o hundimiento en direcciones paralelas a las estructuras geológicas mayores puede activar fallas u otras estructuras y provocar deformaciones significativas en los pilares del nivel de producción [1]. La orientación del frente de socavación influye en la distribución de esfuerzos y en la estabilidad de los pilares [17]. Avances irregulares y no planificados pueden generar acumulación de esfuerzos locales que comprometen la integridad estructural de los pilares [17]. Además, la presencia de pilares remanentes en el nivel de socavación puede transmitir cargas locales importantes hacia los pilares del nivel de producción, aumentando el riesgo de inestabilidad y colapso [51].

2.4 Esfuerzos Verticales y Fragmentación Secundaria

Los esfuerzos verticales tienen un impacto significativo en la fragmentación secundaria[52]. La energía de conminución aplicada al material durante su desplazamiento a través de la columna de extracción contribuye a la fractura adicional de los bloques [52]. Esto significa que los esfuerzos verticales más altos pueden resultar en una mayor fragmentación secundaria, produciendo fragmentos más pequeños y aumentando la cantidad de finos en los puntos de extracción [53].

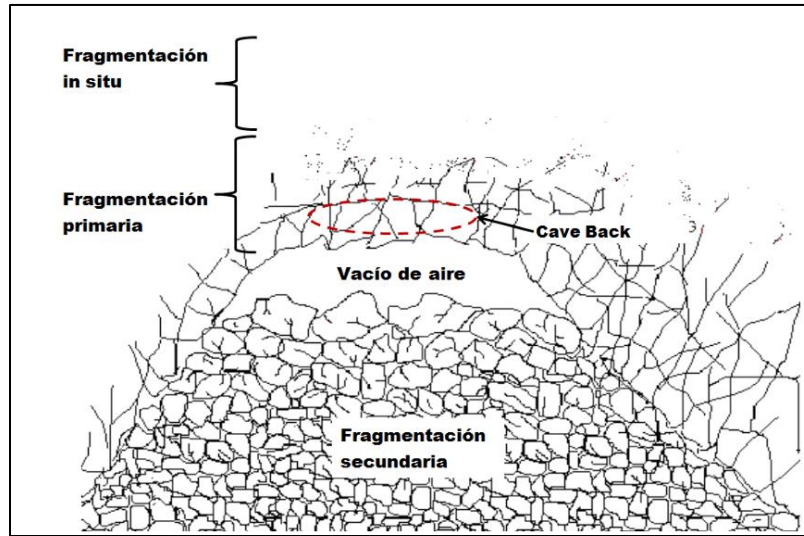


Figura 7: Diferencias entre los tipos de Fragmentación en caving [54].

Los esfuerzos verticales son tensiones que actúan en la dirección vertical sobre los bloques de roca dentro de la columna de extracción. Estos esfuerzos pueden inducir fracturas adicionales en los bloques de roca, contribuyendo a la fragmentación secundaria [4]. Varios factores intrínsecos de los bloques, como la dureza, la forma y la rugosidad, así como la densidad del material, el esponjamiento, la altura de la columna y la tasa de extracción, interactúan con los esfuerzos verticales para determinar el grado de fragmentación secundaria [49].

En ese sentido, se han planteado modelos de fragmentación secundaria en la que se tiene como principal variable de entrada el esfuerzo vertical [52]. Un ejemplo de aquello es el modelo propuesto por Castro [49], en la que presenta una ecuación conectando directamente una tasa de reducción con el esfuerzo vertical aplicado:

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

Otro factor por considerar suele ser la distancia recorrida por los fragmentos antes de alcanzar los puntos de extracción [55].

3. Metodología

Con la intención de lograr los objetivos descritos se ha propuesto la siguiente metodología:

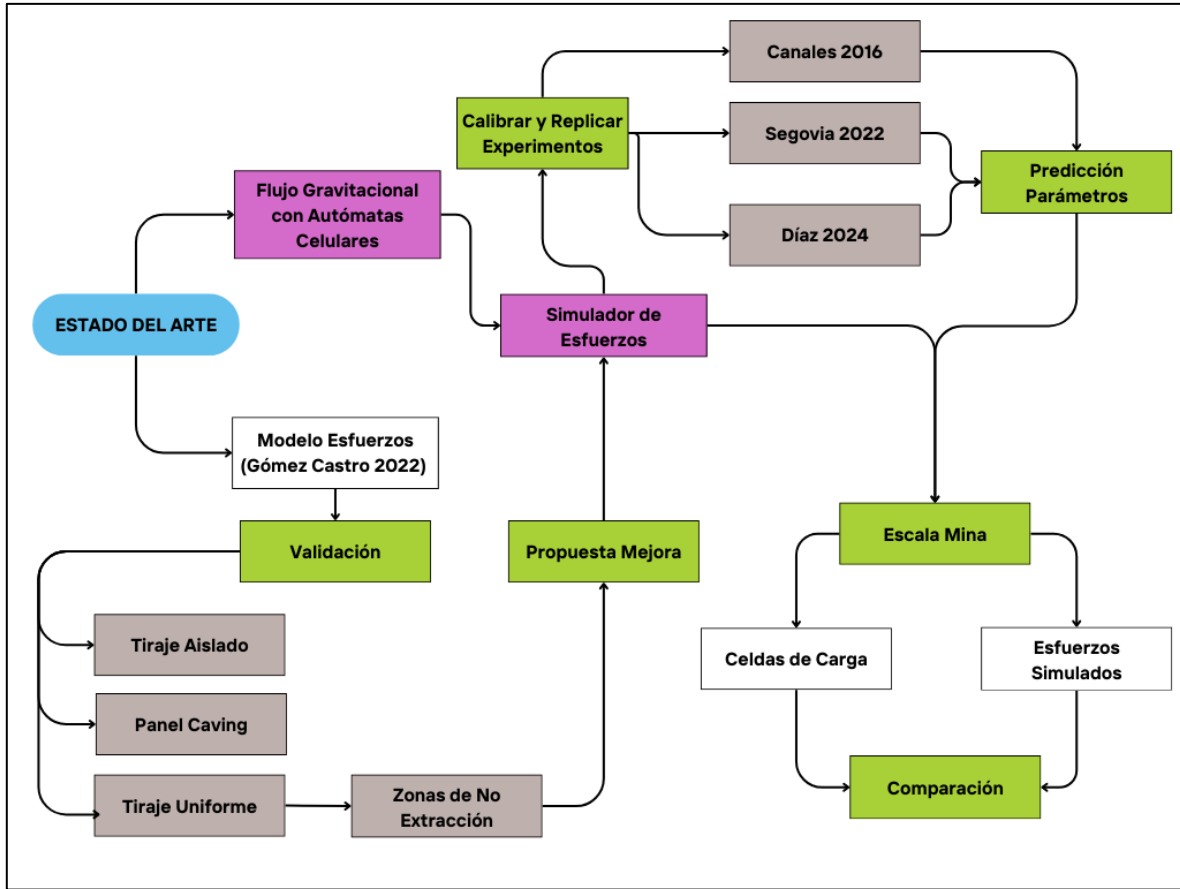


Figura 8: Metodología del presente trabajo.

En primer lugar, se desarrolló un código en Python que replica el funcionamiento del simulador de flujo gravitacional granular FlowSim, cuyo funcionamiento se describió anteriormente. Posteriormente, este código fue acoplado con la lógica de esfuerzos propuesta por Gómez y Castro [57], integrando ambos modelos.

Validación del Modelo de Esfuerzos en Diferentes Tipos de Tiraje: Una vez establecido el acoplamiento entre flujo y esfuerzos, se procede a la validación del proceso de esfuerzos. Esta validación se lleva a cabo replicando los experimentos de Canales [20], lo que permite examinar tres tipos de tiraje: tiraje aislado, *panel caving*, y tiraje uniforme. La validación en múltiples escenarios de extracción es esencial para confirmar que el modelo numérico puede replicar con precisión los patrones de esfuerzo observados en cada configuración de tiraje.

Propuesta de Mejora para la Predicción de Esfuerzos: Después de la validación, se formula una propuesta de mejora con el objetivo de refinar la capacidad del modelo para predecir los esfuerzos inducidos por el flujo gravitacional. Esta propuesta se centra en ajustar los parámetros y métodos de simulación para reducir la brecha entre los datos simulados y los obtenidos experimentalmente. La mejora se enfoca en la configuración de tiraje uniforme, donde se identifican zonas de no extracción que pueden influir significativamente en la distribución de esfuerzos.

Calibración y Replicación de Situaciones Experimentales: Se procede posteriormente a la calibración y replicación de situaciones experimentales específicas basadas en modelos físicos, como los de Segovia [24] y Díaz [25]. Estas situaciones experimentales representan diferentes configuraciones, permitiendo testear los resultados del simulador, pudiendo comparar con los valores empíricos.

Evaluación de Datos a Escala Mina: Finalmente, se realiza una evaluación exhaustiva de los datos a escala mina, comparando los esfuerzos simulados por el modelo numérico con los datos reales obtenidos de celdas de carga instaladas en la mina. Esta comparación es una etapa crítica, ya que proporciona una validación directa de la precisión y relevancia del modelo numérico en un entorno operativo real.

3.1 Simulador de Esfuerzos

A continuación, se presentan los parámetros clave considerados en el modelo de esfuerzos. Estos parámetros, fundamentales para entender la transmisión y distribución de esfuerzos en medios granulares, se han tomado del modelo de esfuerzos propuesto por Gómez como base [56], ajustándolo para simular con mayor precisión el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones.

Los esfuerzos en medios granulares son transmitidos a través de cadenas de fuerza debido a la no homogeneidad del material, lo que genera una distribución estocástica de esfuerzos [48]. En ese sentido, se utilizan reglas estocásticas para simular la distribución de peso y fuerzas entre partículas. Las cadenas de fuerza se forman en función de la disposición aleatoria de las partículas y de los puntos de contacto entre ellas, lo que crea un patrón de distribución de fuerzas altamente variable y complejo [20].

Durante la extracción, las zonas de movimiento presentan una densidad menor debido a la disminución de puntos de contacto entre partículas, lo que reduce la transmisión de fuerzas [9]. Para modelar aquel fenómeno, se introduce un parámetro de Relajación (R) para modelar la distribución de peso entre zonas de movimiento y zonas estancadas. Este parámetro ajusta la probabilidad de que una celda transmita su peso a las celdas adyacentes, disminuyendo en las zonas de movimiento debido a la menor densidad y a la menor cantidad de puntos de contacto efectivos para la transmisión de fuerzas.

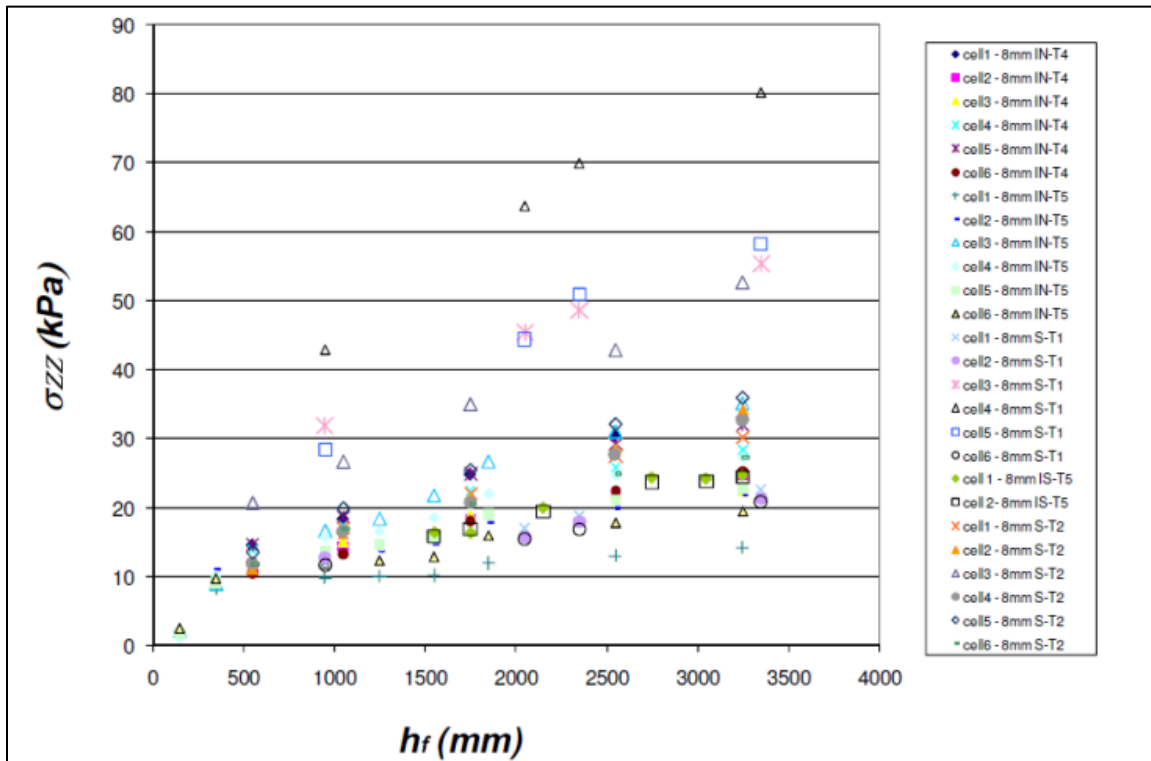


Figura 9: Esfuerzos verticales para distintas alturas de columna de material quebrado [12].

La dimensión vertical del material granular simulado influye en el porcentaje de peso transmitido, esto se representa por el parámetro Empuje (E), afectando la distribución de esfuerzos verticales. A mayor altura, la presión y el peso acumulado sobre las celdas inferiores aumentan, modificando la manera en que estas celdas distribuyen su peso a las celdas subyacentes.

Siguiendo con el mismo razonamiento, se define un parámetro llamado Empuje mínimo (E_{min}) para representar el porcentaje mínimo de peso transmitido en zonas de movimiento, dependiendo de la altura de estas zonas. Este parámetro se ajusta para reflejar cómo la

acumulación de peso y la presión en columnas más altas afectan la distribución de fuerzas en las celdas inferiores.

El modelo se calibra utilizando datos experimentales de diferentes modelos físicos, ajustando los siguientes parámetros clave:

3.1.1 Empuje o Porcentaje de Peso Transmitido (E)

Representa la fracción del peso de una celda que se transmite a las celdas inferiores, afectado por la fricción interna. Este parámetro es ajustado comparando las tensiones verticales medias simuladas con las medidas experimentales en condiciones estáticas.

Este parámetro refleja cómo el peso se transmite verticalmente a través del modelo granular. La densidad del material influye directamente en la transmisión de peso; materiales más densos ejercen una mayor presión vertical. La geometría del modelo, la distribución del peso, y la altura de la columna también influyen. A medida que la altura aumenta, la fricción interna soporta más peso, disminuyendo la fracción que se transfiere. El valor de $(1 - E)$ refleja el peso soportado por la fricción interna entre partículas. La cohesión del material también afecta esta distribución.

3.1.2 Distribución de Fuerzas (s)

El parámetro s en el modelo de esfuerzos hace referencia a una variable utilizada para generar la variabilidad estocástica en la distribución de los esfuerzos a través de funciones aleatorias, específicamente, en la modelación de materiales granulares. En este caso, el modelo emplea una distribución normal para definir la influencia de la distancia entre partículas y cómo estas afectan los esfuerzos verticales en el sistema. La variabilidad aleatoria aplicada mediante este s ayuda a replicar las fluctuaciones naturales que ocurren en los materiales no homogéneos o en aquellos sujetos a condiciones irregulares, logrando así que el modelo pueda capturar los efectos estocásticos que se producen en entornos mineros.

3.1.3 Relajación (R)

Modela la distribución del peso entre zonas de movimiento y estancadas, simplificando de esta manera la interacción entre las partículas al encontrar una zona de menor presión, donde se puede generar flujo. Se calibra este parámetro utilizando datos de experimentos dinámicos,

como el flujo durante la extracción. Se compara la distribución de fuerzas observada experimentalmente con la simulada, ajustando para mejorar la coincidencia.

A través de este parámetro se pretende reflejar la disminución en la transmisión de peso a través de la zona de estancamiento hacia las zonas de movimiento. La geometría del sistema, propiedades del material (fricción interna y cohesión), y la altura de la columna influyen en cómo el peso se distribuye y se concentra en las zonas de estancamiento. Columnas más altas y materiales más densos aumentan la concentración de peso en las zonas de estancamiento debido a R , afectando la capacidad de estas zonas para soportar cargas adicionales.

3.1.4 Empuje Mínimo o Porcentaje de Peso Transmitido en movimiento (E_{min})

Representa el valor mínimo del porcentaje de peso transmitido en zonas de movimiento.

Es ajustado utilizando experimentos dinámicos, calibrando según la altura de las zonas de movimiento. Este parámetro se ajusta para reflejar cómo la disminución de puntos de contacto en zonas de flujo afecta la distribución de fuerzas.

Refleja la reducción de densidad aparente y los puntos de contacto entre partículas durante el flujo de material granular. A menor densidad aparente, mayor es la reducción en la fracción de peso distribuido, ya que disminuyen los puntos de contacto entre partículas. E_{min} depende de la fricción interna, cohesión y la altura de la zona de movimiento. Un valor bajo de E_{min} indica menor contacto entre partículas, reduciendo la fricción y la cohesión. También varía en función de la estructura y configuración del modelo granular.

3.1.5 Funcionamiento del Simulador de Esfuerzos

El Simulador Consiste en la integración de la lógica del modelo de esfuerzos con un código de flujo por autómatas celulares. Esta integración permite simular cómo los movimientos del material afectan la distribución de esfuerzos. El funcionamiento de este acople se puede explicar en una serie de pasos:

Paso 1: Preparación de los Datos de Entrada necesarios para ambos modelos.

Estos datos incluyen la geometría del modelo, las propiedades del material, y las condiciones iniciales y de frontera. Como entrada se tiene un modelo de bloques con información esencial sobre las coordenadas (x , y , z), propiedades del material (como la densidad), y otros

parámetros relevantes para cada bloque del modelo. Estos datos son utilizados por el modelo de flujo para simular el movimiento del material granular.

Paso 2: Simulación del Flujo de Material con Flowmark4.py

El modelo de flujo (Flowmark) utiliza autómatas celulares para simular el movimiento del material granular bajo condiciones de extracción. Este modelo se encarga de determinar las posiciones finales y los estados de los bloques después del flujo. El resultado de esta simulación incluye un modelo de flujo actualizado que refleja el estado del material después del movimiento debido a la extracción. Además, se cuantifica la distancia recorrida por los bloques no vacíos.

Paso 3: Integración con el Modelo de Esfuerzos (PLOAD.py)

Una vez que se ha completado la simulación del flujo, los resultados se utilizan como entrada para el modelo de esfuerzos (PLOAD). El modelo de esfuerzos calcula las tensiones en el material granular basándose en las nuevas posiciones y estados de los bloques.

Paso 4: Análisis y Visualización de Resultados

Una vez que se han calculado los esfuerzos, los resultados pueden ser analizados y visualizados para obtener una comprensión completa del comportamiento del sistema bajo condiciones de extracción.

3.2 Calibración del Modelo

Es necesario calibrar tanto los parámetros del modelo de esfuerzos como la geometría del flujo para asegurar que el modelo numérico capture de forma realista las dinámicas de extracción de cada uno de los experimentos replicados con el simulador. Esta calibración permite validar el modelo replicando condiciones similares a las observadas en experimentos físicos, garantizando que la distribución de esfuerzos y el comportamiento del flujo representen adecuadamente la realidad.

3.2.1 Calibración de la geometría de flujo

Antes de realizar cualquier calibración de parámetros, es fundamental replicar correctamente la geometría del flujo. Para lograr esto, se utiliza un programa que ajusta los valores de N y MV (parámetros que controlan la geometría y el comportamiento del flujo en el autómata).

El proceso comienza generando un modelo de bloques inicial, estableciendo zonas de movimiento, vacíos, y bloques en reposo. Luego, se define la geometría del flujo, en particular, el ancho de la zona de movimiento W_{IMZ} y la altura del flujo H_{IMZ} , calibrando estos valores hasta que se ajusten a los datos experimentales de ancho de zona conocidos.

Este proceso garantiza que, antes de proceder con las calibraciones dinámicas o estáticas de los esfuerzos, la simulación refleje correctamente el comportamiento del flujo en condiciones controladas, lo cual es esencial para que los resultados de la simulación posterior de esfuerzos sean fiables.

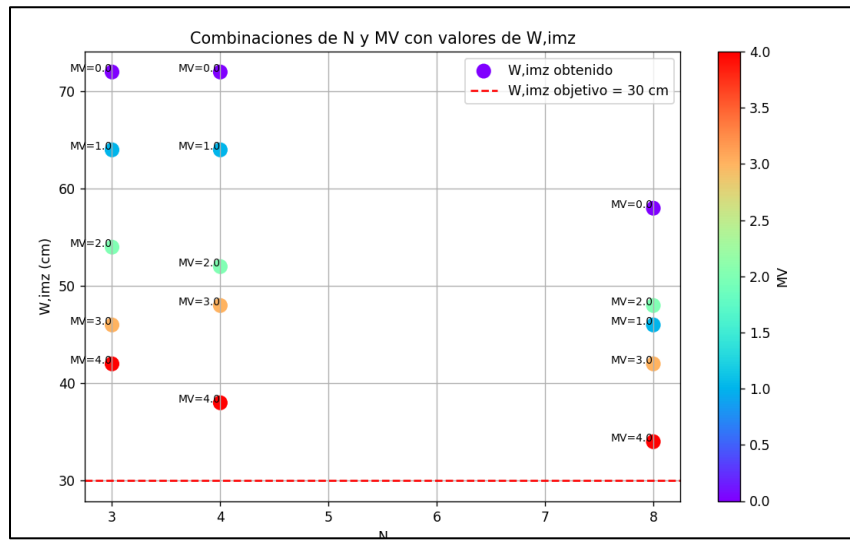


Figura 10: Ejemplo de Calibración de la Geometría de Flujo.

3.2.2 Calibración Estática de Esfuerzos

La calibración estática es realizada utilizando un modelo de simulación que replica los esfuerzos en las celdas de carga conocidas en función de diferentes valores de empuje. El proceso involucra la implementación de una función objetivo que mide la diferencia entre los esfuerzos simulados y los esfuerzos conocidos para las celdas de carga específicas utilizadas en cada experimento.

Para cada valor de empuje probado, el modelo realiza múltiples corridas (cinco en total) y se calcula el promedio de los esfuerzos resultantes para cada celda. La función objetivo calcula la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores simulados y los reales, con el objetivo de minimizar esta suma. Se utilizaron valores de empuje con una precisión de tres

decimales, probando un rango entre 0.98 y 1.0. El empuje óptimo fue identificado como aquel que minimiza el error cuadrático respecto al valor medido en laboratorio. Finalmente, se graficó la relación entre el valor de empuje y el valor objetivo, destacando el mejor empuje encontrado.

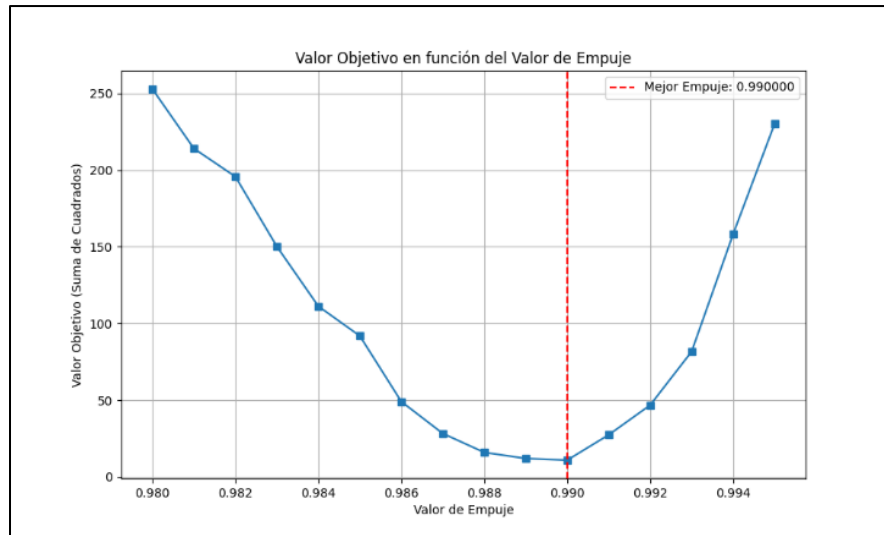


Figura 11: Ejemplo de Calibración del Parámetro E .

3.2.3 Calibración Dinámica de Esfuerzos

La calibración en condición dinámica para obtener los parámetros E_{min} y R se realizó mediante un proceso iterativo que simula los esfuerzos en diferentes celdas de carga bajo condiciones de flujo. En primer lugar, se establecieron valores conocidos de esfuerzo para varias celdas de referencia. Luego, se implementó una función objetivo que busca minimizar la diferencia entre los esfuerzos simulados y los reales.

La calibración de estos parámetros se ha realizado replicando el experimento de extracción aislada, tomando como base los esfuerzos medidos experimentalmente en un punto cercano al 50% de extracción del experimento.

Para E_{min} , se realizaron múltiples simulaciones variando este parámetro en intervalos pequeños y se promediaron los resultados a lo largo de varias corridas para mejorar la precisión. El proceso consideró diferentes configuraciones de la extracción y parámetros del flujo, ajustando el modelo para obtener el valor óptimo de E_{min} que minimizara la suma de los cuadrados de las diferencias entre los esfuerzos simulados y los conocidos.

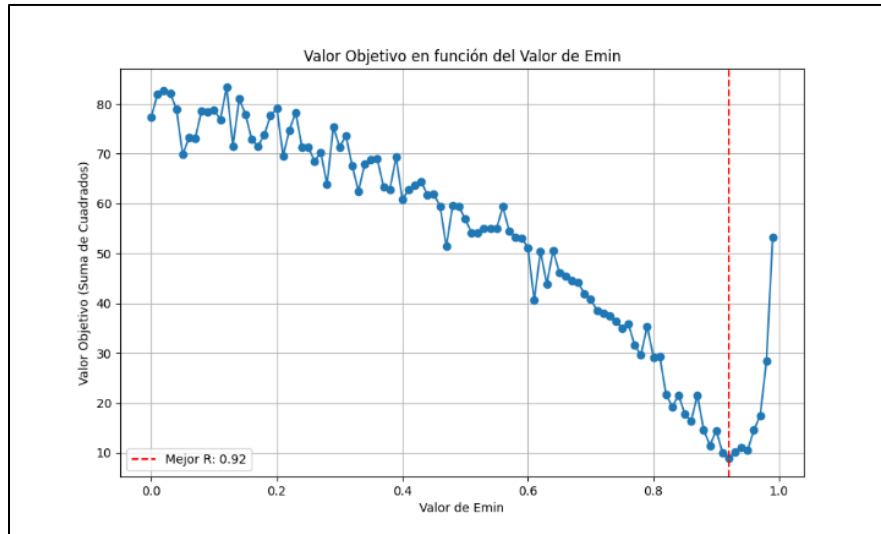


Figura 12: Ejemplo de Calibración del Parámetro Emin.

En el caso de R , la calibración siguió una estrategia similar. Se probaron varios valores de R en condiciones dinámicas para evaluar cómo este parámetro afecta la distribución de esfuerzos a lo largo del modelo. La función objetivo, nuevamente, minimizaba la diferencia entre los valores simulados y los reales. Se probaron varios valores de R en un rango definido y se graficaron los resultados para identificar el valor que mejor ajusta el comportamiento real.

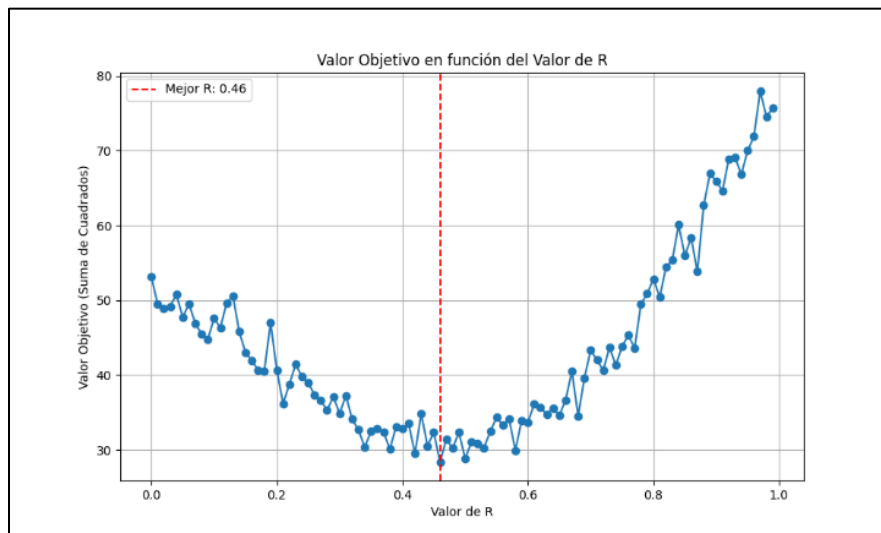


Figura 13: Ejemplo de Calibración del Parámetro R.

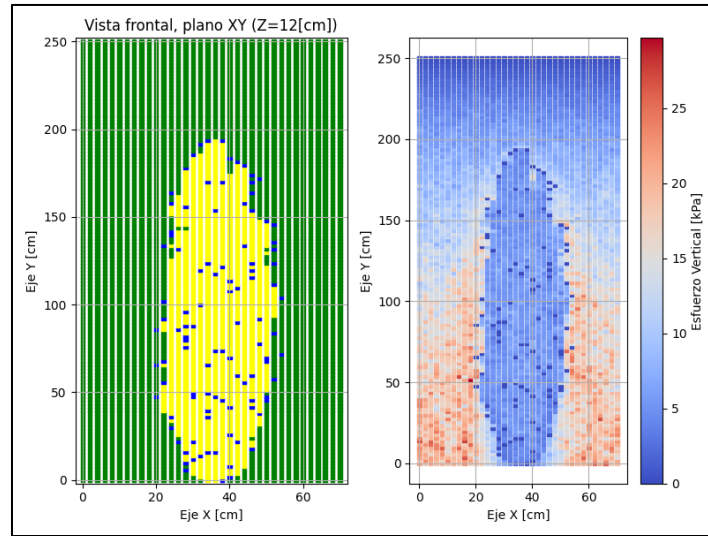


Figura 14: Ejemplo de funcionamiento del Simulador de esfuerzos, vista frontal de flujo (izquierda) y esfuerzos (derecha) aplicado en extracción aislada de Canales [20].

4. Resultados y Análisis

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la calibración de varios modelos físicos utilizados para estudiar el comportamiento de materiales granulares en minería de *caving*. Se evaluaron seis modelos diferentes, cada uno con características y geometrías específicas. Los resultados se muestran en términos de los parámetros calibrados

Tabla 2: Geometría de los experimentos replicados a través de simulaciones.

Experimento	Largo[m]	Alto[m]	Ancho[m]	Discretización [cm]
Canales	0.70	2.50	0.24	2.00
Diaz	0.70	0.80 (exp 3y4) - 1.00 (exp 1y2)	0.22	2.00
Segovia	1.50	1.80(1) - 2.60 (2y3)	0.32	2.00

Cada modelo se caracteriza por diferentes materiales granulares, dimensiones y un nivel de discretización específico. Estos factores influyen en los resultados de la calibración y la distribución de los esfuerzos en los experimentos.

4.1 Resultados de los Parámetros Calibrados

Los resultados de los parámetros calibrados E , R y E_{min} para cada modelo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3: Calibración de los distintos experimentos.

Experimento	E	R	E_{min}
Canales	98.94%	46.00%	93.00%
Diaz exp 3y4	98.60%	8.00%	99.00%
Diaz exp 1y2	98.60%	8.00%	99.00%
Segovia exp 1	99.90%	23.00%	98.00%
Segovia exp 2y3	98.80%	99.00%	98.00%

4.2 Validación modelo de Esfuerzos

Para realizar el análisis de validación experimental del modelo se ha optado por replicar los experimentos de Canales, en aquel estudio se llevaron a cabo varios experimentos que simulan estrategias de extracción en minería de *block caving* y *panel caving* para medir los esfuerzos inducidos en un modelo físico a escala (1:200). En los experimentos de *block caving*, se evaluaron estrategias de tiraje con zonas sin extracción de 30 y 15 cm de ancho, tiraje uniforme, *panel caving* y tiraje aislado. En cada experimento, se midieron los esfuerzos verticales inducidos sobre el pilar mayor utilizando celdas de carga instaladas estratégicamente.

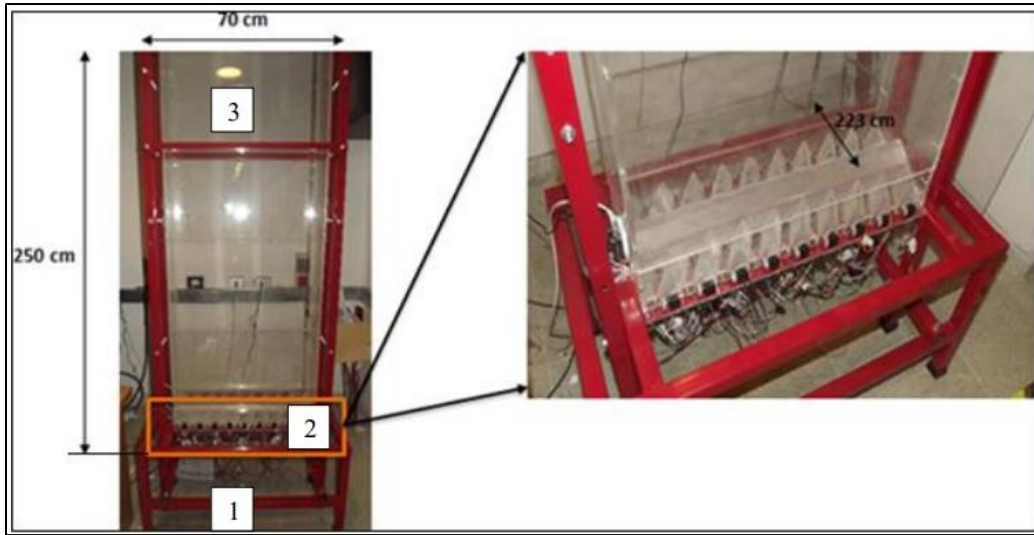


Figura 15: Modelo físico a escala 1:200 utilizado en la fase experimental. 1 es la estructura metálica (de color rojo) que soporta y da estabilidad a las estructuras restantes; 2, es la base del modelo que representa el diseño del nivel de producción de la mina simulada; y 3, corresponde a las paredes del modelo que son instaladas en la base [20].

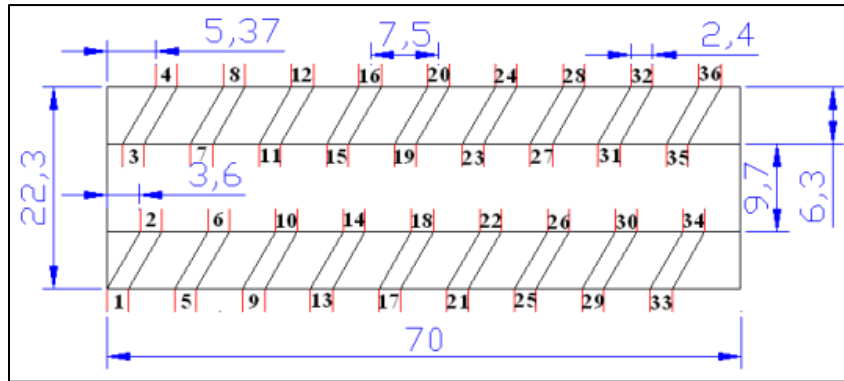


Figura 16: Base del modelo físico. Cotas en [cm]. Vista en planta y puntos de extracción [20].

4.2.1 Tiraje Aislado

A continuación, se presenta el análisis del tiraje aislado obtenido a partir del experimento realizado por Canales. Permitiendo comparar los resultados experimentales con las predicciones del modelo. La comparación busca destacar las similitudes y diferencias, así como identificar posibles ajustes necesarios para mejorar la precisión del modelo.

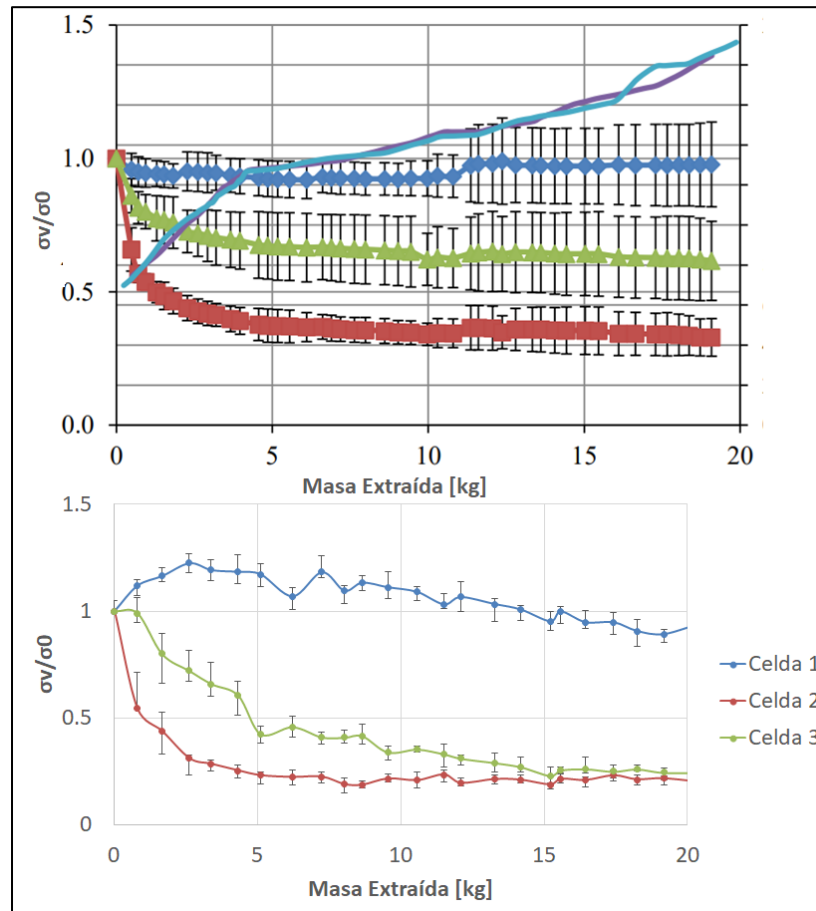


Figura 17: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Canales Experimento 0 Extracción Aislada.

En la figura 17, se logra capturar de manera adecuada el comportamiento general de los esfuerzos. En ambos casos, la celda 1 mantiene un esfuerzo relativamente constante durante la extracción, lo que sugiere que esta zona soporta una mayor carga y se ve menos afectada por el flujo de material.

Por otro lado, tanto en los resultados experimentales como en los simulados, las celdas 2 y 3 muestran una disminución de los esfuerzos conforme avanza la extracción. Este

comportamiento refleja correctamente la relajación del material en esas zonas a medida que se libera el peso y se redistribuyen las tensiones. Aunque puede haber ligeras variaciones en magnitud entre las curvas, la tendencia general se reproduce bien en los simulados.

4.2.2 Panel Caving

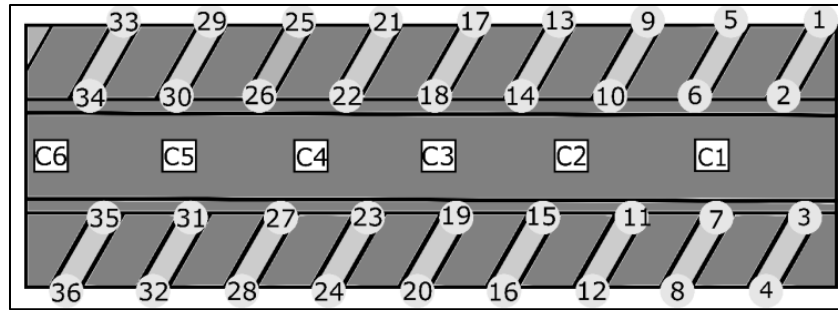


Figura 18: Disposición de las celdas de carga en el experimento 1, Los números representan la secuencia de apertura de los puntos de extracción [20].

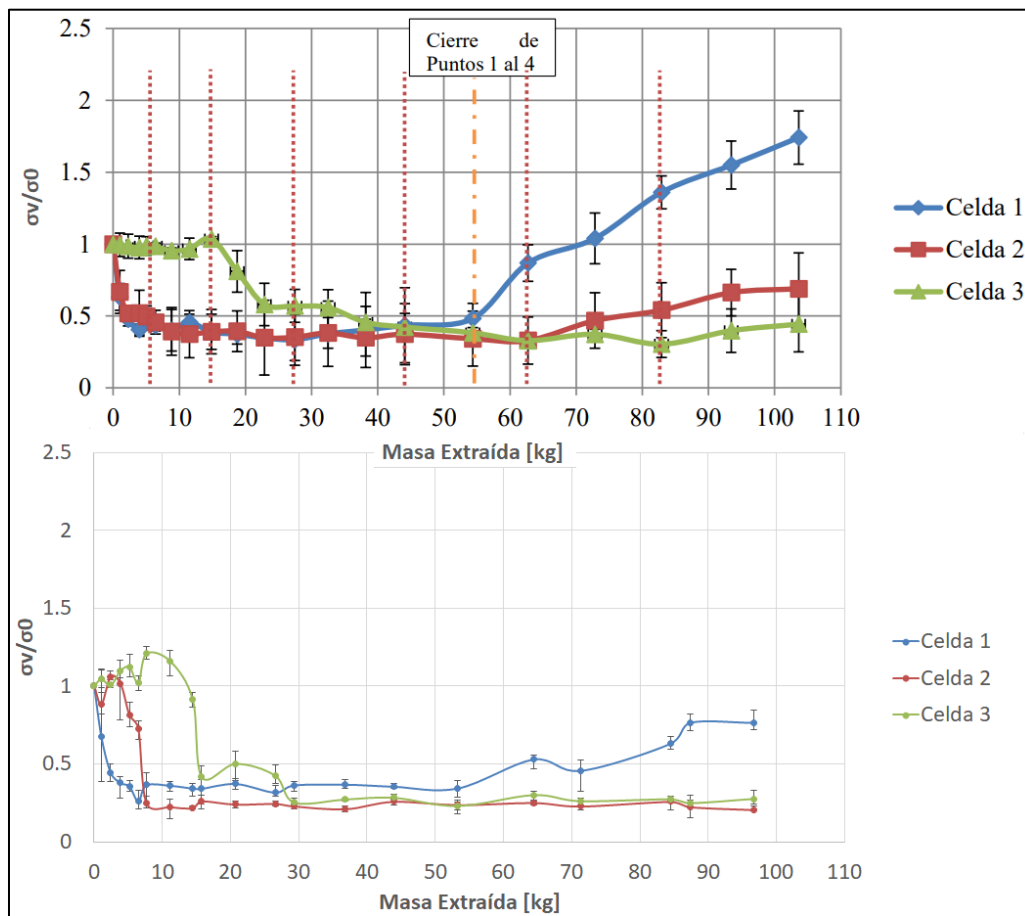


Figura 19: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) en las celdas 1, 2 y 3 Canales Experimento 1 Extracción por Panel caving.

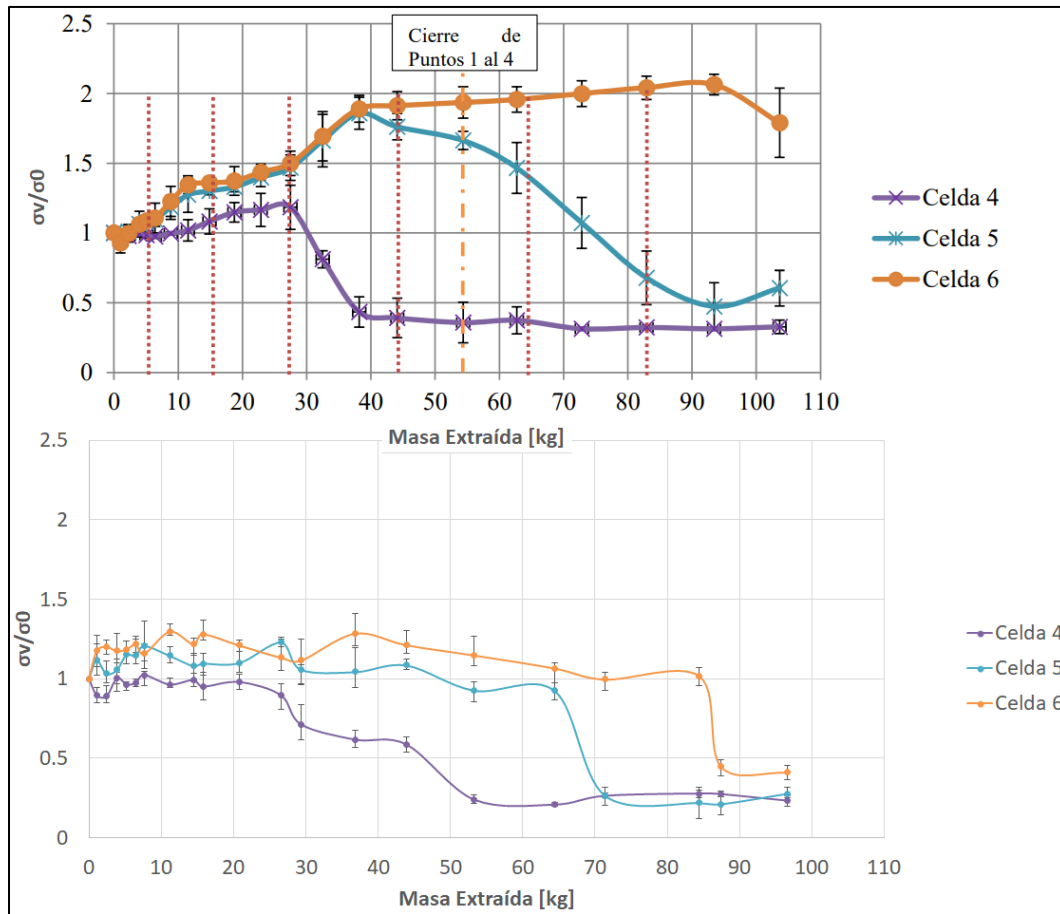


Figura 20: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) en las celdas 4, 5 y 6 Canales Experimento 1.

En la figura 19, los esfuerzos en la celda 1 aumentan después de un cierto umbral de masa extraída, mientras que los esfuerzos en las celdas 2 y 3 tienden a disminuir y estabilizarse alrededor de 0.5 a 1.0 veces el esfuerzo inicial. Este comportamiento se reproduce de manera similar en las simulaciones, aunque los valores de la celda 1 en los simulados presentan una tendencia ligeramente más pronunciada al aumento, y las celdas 2 y 3 se estabilizan de manera más abrupta.

En la figura 20, el comportamiento es más variado. Los esfuerzos medidos muestran un descenso en la celda 4, mientras que la celda 6 mantiene un nivel elevado hasta los 60 kg, después de lo cual desciende. Los resultados simulados replican bien este comportamiento, con la celda 6 mostrando un descenso similar después de los 60 kg. Sin embargo, la celda 5 en los simulados muestra un descenso más rápido en comparación con los medidos.

4.2.3 Tiraje Uniforme

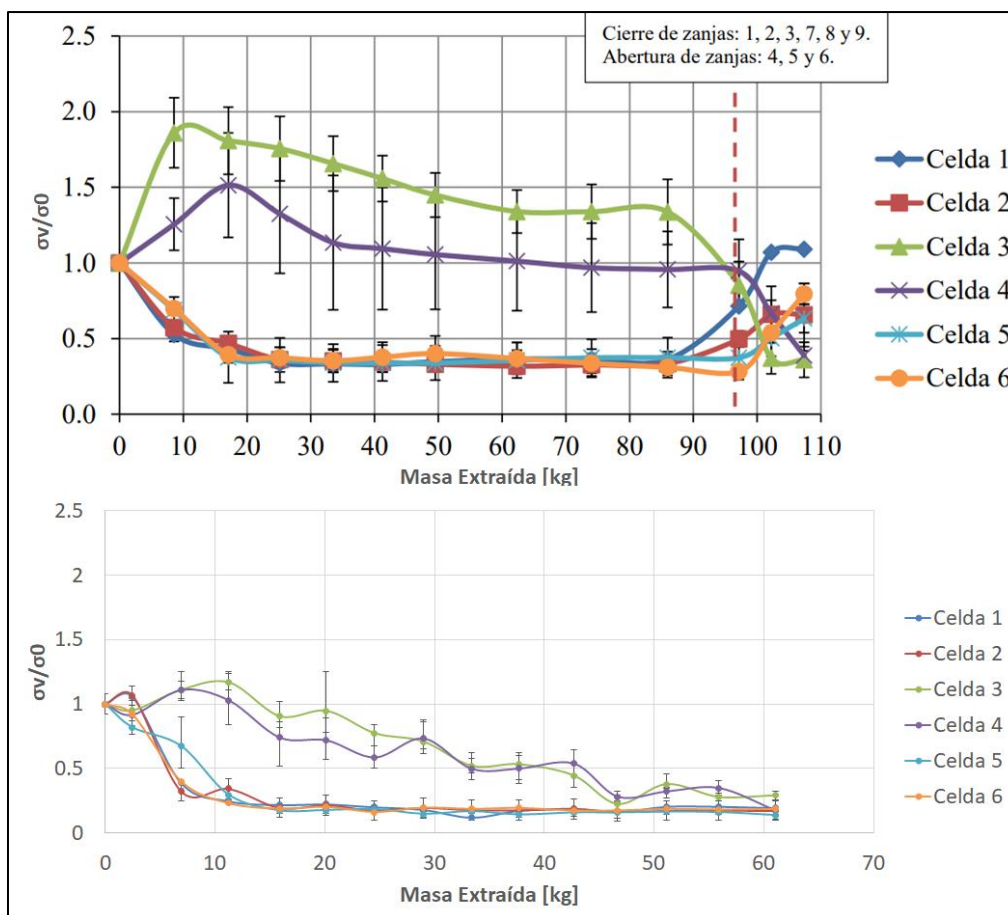


Figura 21: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Canales Experimento 2, tiraje uniforme con zona inactiva.

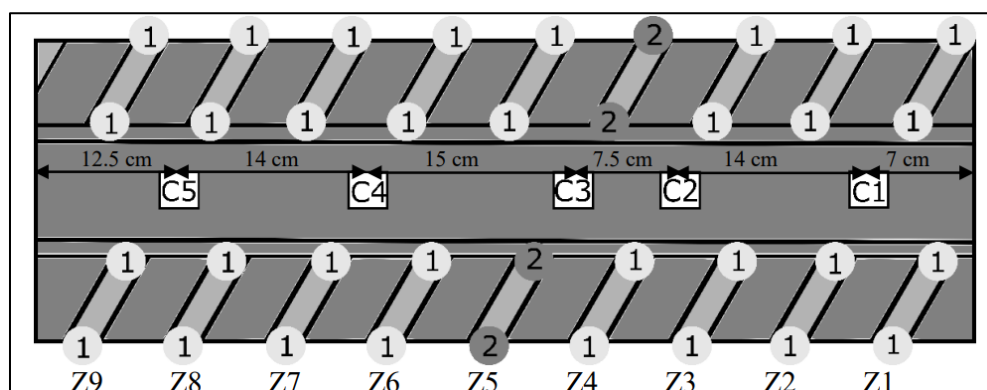


Figura 22: Disposición de las celdas de carga en el experimento 3, en (1) se muestran los puntos de extracción activos y en (2) los inactivos [20].

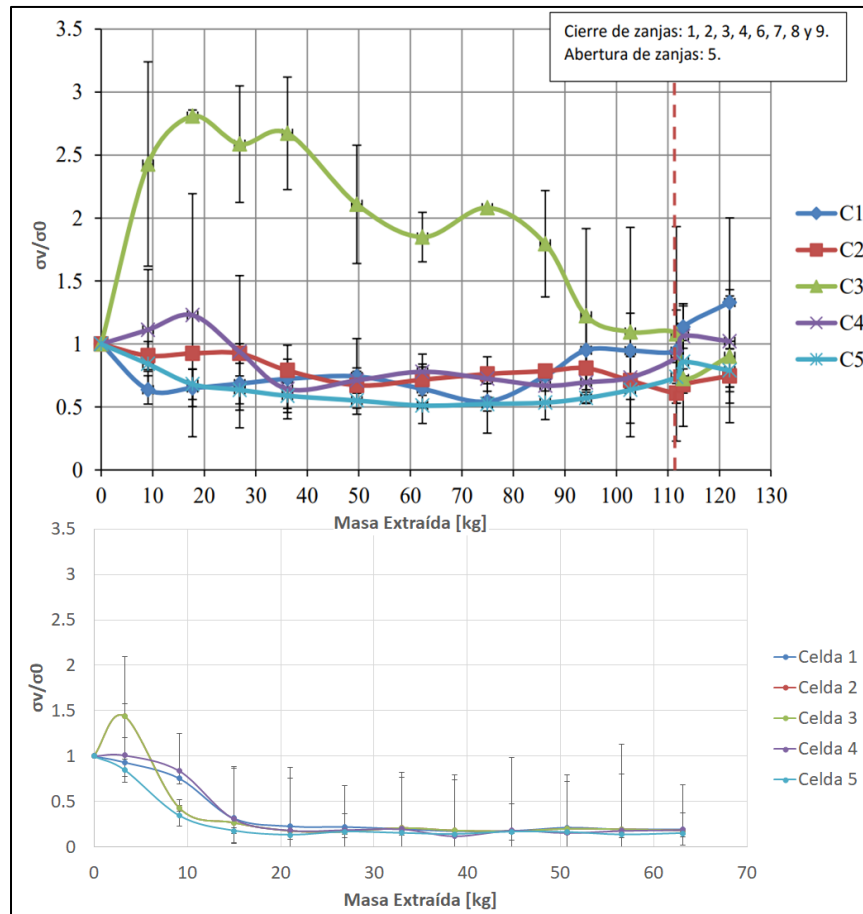


Figura 23: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Canales Experimento 3, tiraje uniforme con zona inactiva.

En las figuras 21 y 23 se puede observar que, aunque el modelo simulado representa correctamente la tendencia general de los esfuerzos en las primeras etapas de la extracción, con un aumento inicial en las zonas estancadas, no logra capturar adecuadamente el comportamiento posterior observado en el experimento. En el modelo experimental, los esfuerzos se estabilizan progresivamente en un nivel más alto, mientras que en la simulación disminuyen demasiado rápido, esto es mucho más notorio en la figura 23, donde el aumento de esfuerzos en zonas estancadas ni siquiera logra mantenerse después de los 5 kilos de extracción, lo que sugiere que el modelo actual no alcanza a reproducir completamente la dinámica observada. Esta discrepancia indica que, aunque el modelo tiene un buen desempeño inicial, es necesario realizar ajustes adicionales para que sea útil en la representación de esfuerzos a lo largo de todo el proceso, asegurando que los resultados sean más consistentes con los datos experimentales.

4.2.3 Propuesta de Mejora

La falta de similitud entre los gráficos indica que el modelo simulado no está capturando adecuadamente la dinámica del flujo ni la distribución de los esfuerzos medidos en la realidad, especialmente en la zona estancada. Este contraste sugiere que el modelo requiere ajustes adicionales para reflejar con mayor precisión la distribución de cargas en las diferentes celdas.

Tabla 4: Diferencias entre el empuje óptimo a medida que avanza la extracción.

Área IMZ [m^2]	Área IMZ / Área Total	Celda 3 – 4 Empuje Promedio Óptimo
0.00	0.00	0.9894
0.53	0.30	0.9910
1.13	0.65	0.9970
1.68	0.96	0.9980
1.75	1.00	0.9983

Realizando un análisis de parámetros a medida que avanza la extracción, se puede apreciar cómo el empuje óptimo varía a medida que esta avanza. Este ajuste dinámico del empuje está fundamentado en la teoría de las áreas tributarias, como se ha expuesto anteriormente en revisión bibliográfica, las zonas estancadas disminuyen y el área que soporta la carga también se reduce, generando una mayor concentración de esfuerzos. Corroborando lo propuesto por Pierce [9], la teoría de las áreas tributarias permitiría modelar con mayor precisión las zonas estancadas del material, especialmente en procesos como el *caving*. Esta teoría fue aplicada en el presente caso, donde los valores simulados mostraron un ajuste más realista al variar el empuje en función de la extracción.

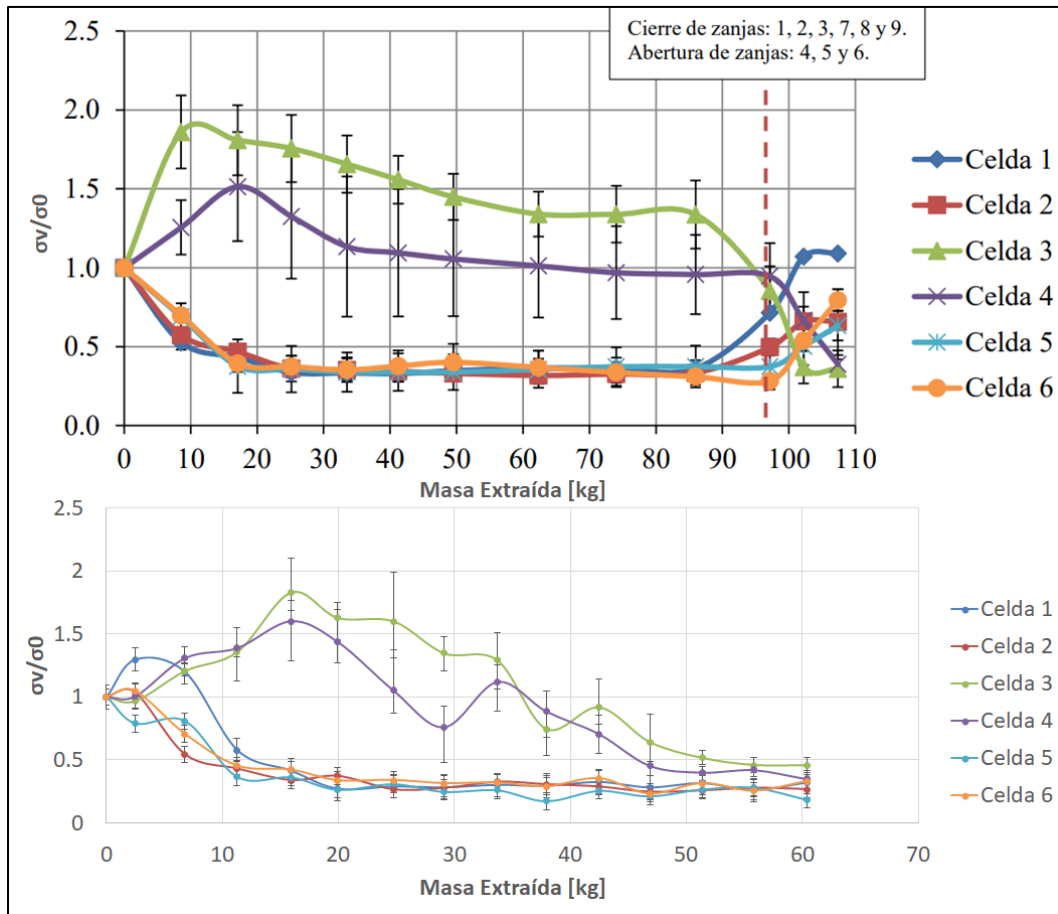


Figura 24: Comparación Canales 2, habiendo implementado el empuje dinámico.

En la Figura 21, el modelo subestima significativamente los esfuerzos relativos, especialmente en la etapa inicial, donde no logra captar los picos observados en las Celdas 3 y 4. Por otro lado, en la Figura 24, el modelo se ajusta mucho mejor a los valores experimentales, reproduciendo con mayor precisión las tendencias iniciales y el comportamiento hacia el final del proceso. Aunque aún persisten ligeras discrepancias, especialmente en los máximos iniciales, los ajustes realizados lograron una mejora significativa en la representación numérica del fenómeno observado experimentalmente.

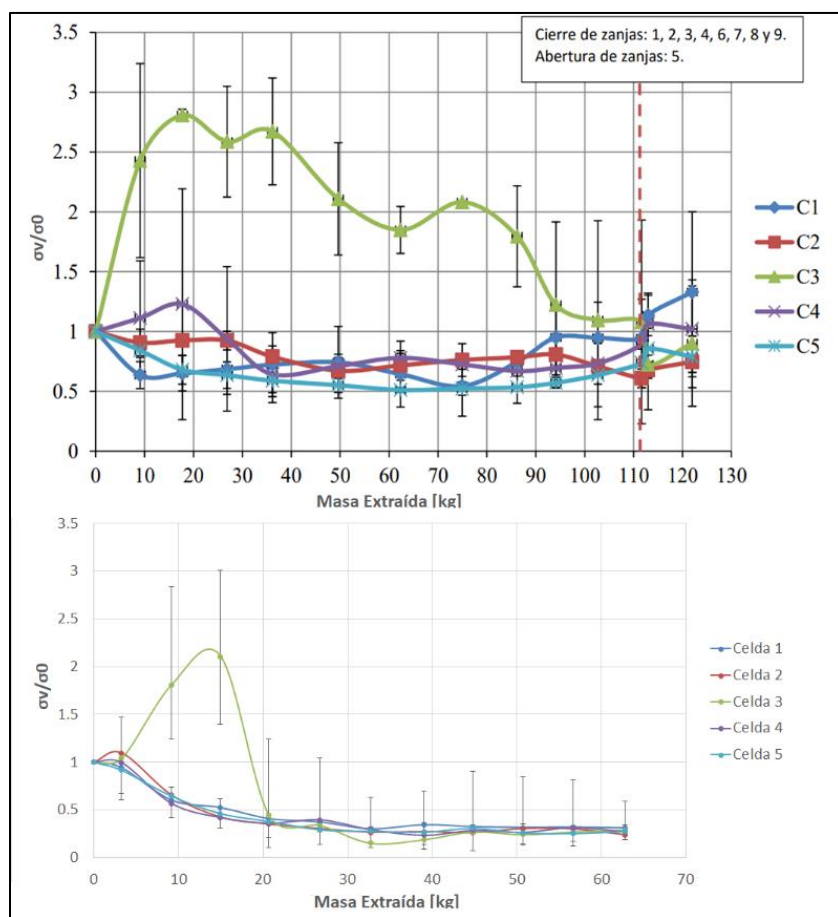


Figura 25: Comparación Canales 3, habiendo implementado el empuje dinámico.

En esta nueva comparación de los experimentos 2 y 3 de Canales, se puede observar que el comportamiento inicial de los esfuerzos se replica mucho mejor que en los análisis anteriores. Los primeros momentos del proceso de extracción muestran un ajuste más preciso entre los esfuerzos simulados y los experimentales, con tendencias similares en las celdas en términos de incrementos y disminuciones iniciales.

Sin embargo, a medida que avanza la extracción, se empieza a perder esta similitud. Esto se debe a la falta de sensibilidad del modelo para simular el flujo de manera precisa, especialmente al comparar los dos sets de extracción (uno con 30 cm y otro con 15 cm de no extracción). En ambos casos, el flujo tiende a ser sobredimensionado en el modelo de esfuerzos, lo que genera discrepancias en la magnitud de los esfuerzos y las fluctuaciones observadas a lo largo de la extracción. Esta sobreestimación del flujo impacta la capacidad del modelo para predecir correctamente cómo se redistribuyen los esfuerzos en las celdas,

especialmente en las últimas etapas del proceso, este efecto se detalla en el capítulo de Discusión.

4.2.4 Réplica de Segovia 2022

En el estudio realizado por Segovia, se llevaron a cabo tres experimentos utilizando un modelo físico a escala 1:200, que representa una columna de extracción de 600 metros, con una base diseñada para simular el nivel de producción de 32 x 20 metros, tipo malla Teniente. Estos experimentos se realizaron para analizar los esfuerzos verticales inducidos en el pilar corona del nivel de producción bajo diferentes condiciones de flujo. El primer experimento se centró en un tiraje aislado de mineral fino fragmentado, mientras que el segundo utilizó una columna mixta de mineral grueso y fino. Finalmente, en el tercer experimento se empleó un tiraje uniforme con múltiples puntos de extracción. En cada uno de los experimentos, se utilizaron celdas de carga para medir los esfuerzos verticales inducidos por el flujo gravitacional. Los resultados mostraron cómo los esfuerzos varían en función de la masa extraída y la disposición de los puntos de extracción.



Figura 26: Imagen del modelo físico utilizado por Segovia [24].

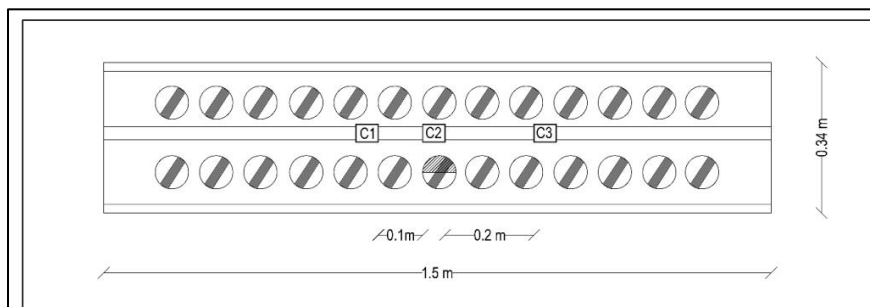


Figura 27: Distribución de las celdas de Carga en los experimentos 1 y 2 [24].

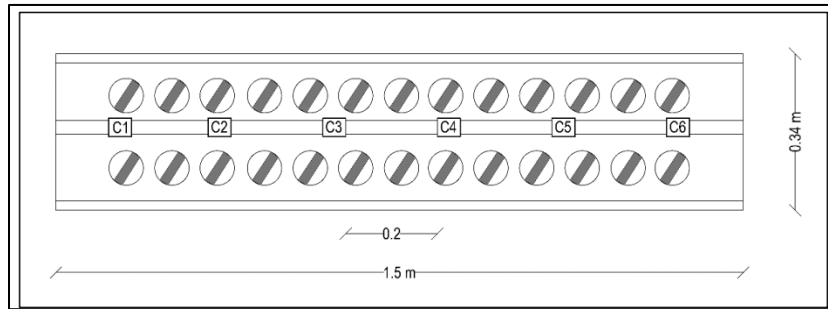


Figura 28: Distribución de las celdas de Carga en el experimento 3 [24].

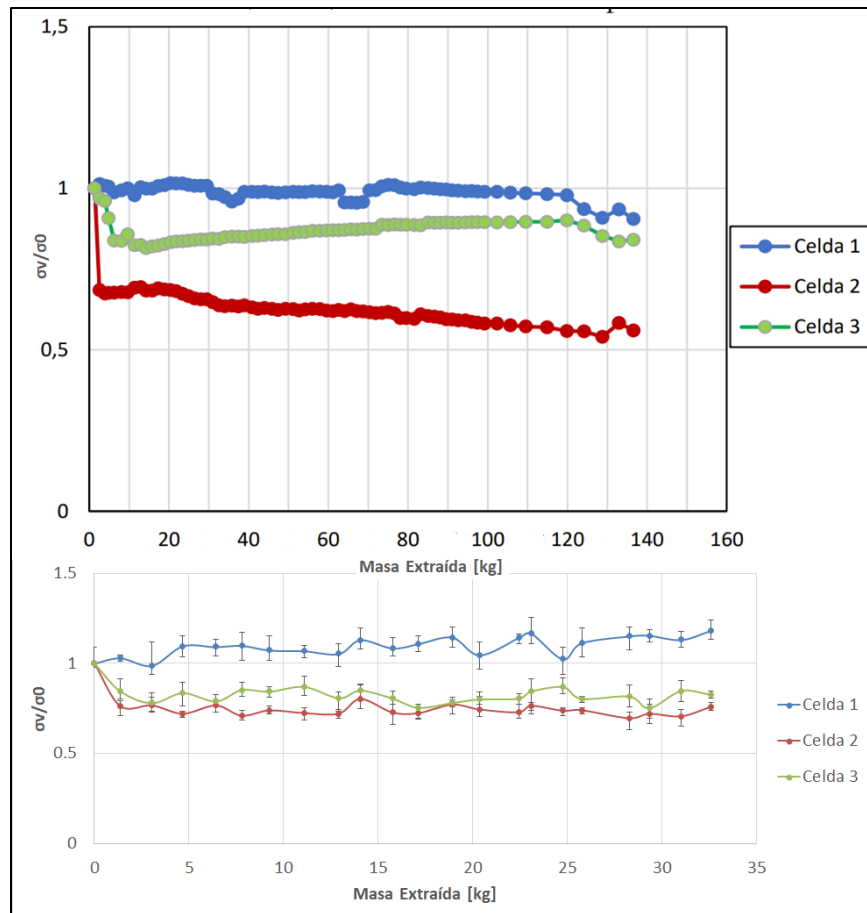


Figura 29: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Segovia Experimento 1 Extracción Aislada

Como se observa en el gráfico experimental, las celdas 1 y 3 muestran una estabilización hacia esfuerzos cercanos a 1, mientras que la celda 2 mantiene un valor más bajo, alrededor de 0.5, a lo largo del proceso de extracción. Este comportamiento es bastante estable después de la primera fase de extracción, con ligeras fluctuaciones en las tres celdas.

Los esfuerzos simulados presentan un comportamiento similar en términos de tendencia general. Las celdas 1 y 3 fluctúan alrededor de 1 y 0.9 respectivamente, mientras que la celda 2 permanece más baja, cerca de 0.7. Sin embargo, se observan más variaciones en las primeras etapas del proceso, antes de que los esfuerzos se estabilicen.

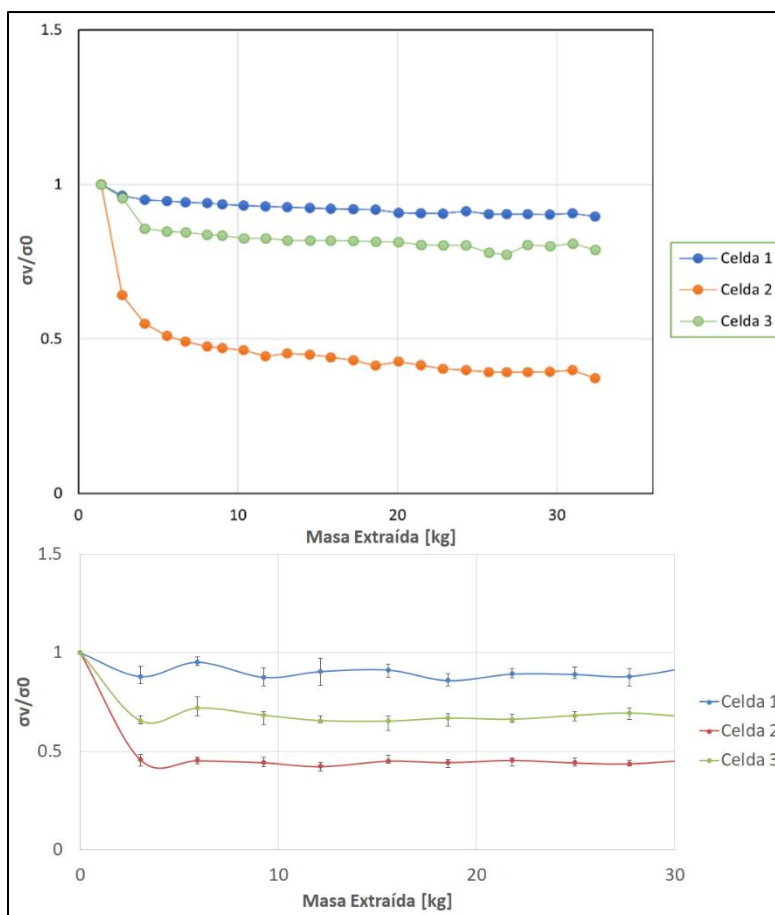


Figura 30: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Segovia Experimento 2 Extracción Aislada de columna mixta, fino y grueso.

En el gráfico experimental las tres celdas muestran un comportamiento relativamente estable después de una rápida disminución en los esfuerzos iniciales, con las celdas 1 y 3 manteniéndose cercanas a un valor de 1 y la celda 2 estabilizándose por debajo de 0.5.

Por su parte, los esfuerzos simulados también muestran una rápida caída inicial en los esfuerzos, pero con un mayor nivel de fluctuación en las tres celdas, especialmente en las primeras etapas. Aunque las celdas tienden a estabilizarse de manera similar a los datos experimentales, las fluctuaciones son levemente más pronunciadas en la simulación.

La capa de material fino no parece tener un impacto significativo en el comportamiento general de los esfuerzos observados, ya que, tanto en el gráfico experimental como en el simulado, los esfuerzos se estabilizan de manera similar después de una rápida caída inicial. Las fluctuaciones que se observan son consistentes con las del experimento anterior, lo que indica que el material fino no está generando alteraciones mayores en la distribución de los esfuerzos.

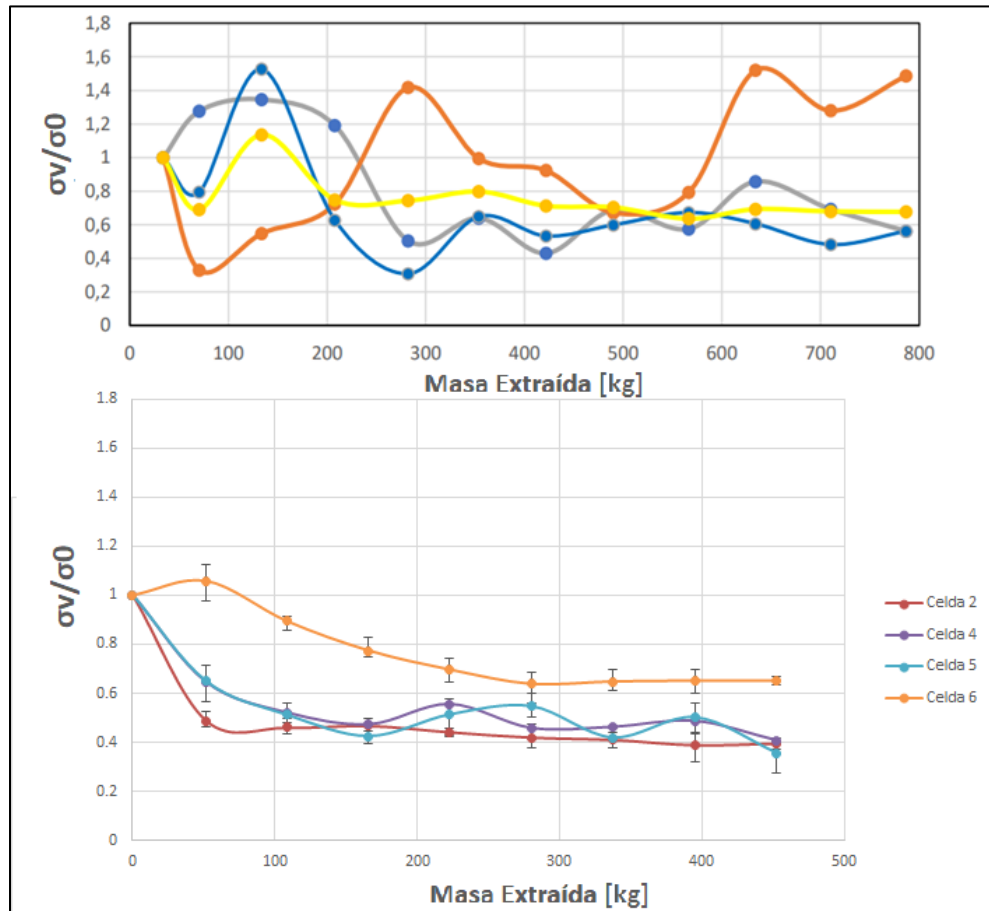


Figura 31: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Segovia Experimento 3 Extracción Uniforme.

En el gráfico experimental, las celdas presentan fluctuaciones bastante significativas a lo largo del proceso de extracción, especialmente las celdas 4 y 6, que muestran picos y caídas a medida que avanza la extracción, alcanzando valores máximos cercanos a 1.6. Las celdas 2 y 5 tienen comportamientos más estables, pero también con fluctuaciones importantes, lo que sugiere una redistribución dinámica de los esfuerzos.

En la simulación los esfuerzos en las celdas son más uniformes y muestran una tendencia a la estabilización, con fluctuaciones mucho menores. Las celdas 4 y 6, que presentaban más variabilidad en el experimento, muestran un comportamiento mucho más estable en la simulación, con menores fluctuaciones.

Esto sugiere que el modelo de simulación no está logrando capturar adecuadamente la tendencia general de la disminución de los esfuerzos, ya que las fluctuaciones observadas en el experimento no se reflejan con precisión. No obstante, es fundamental señalar que, aunque se buscaba lograr un tiraje uniforme en el experimento, esto no se consiguió completamente, lo que generó zonas de estancamiento y relajación. Estas irregularidades son propias de la realización del experimento en un modelo físico y dieron lugar a un error experimental significativo en la toma de datos. Por lo tanto, la discrepancia observada se debe en gran medida a estas limitaciones experimentales, más que a deficiencias del modelo de simulación. Este punto se abordará con mayor detalle en el capítulo de Discusión.

4.2.5 Réplica de Díaz 2024

En el estudio de Díaz, se realizaron cuatro experimentos utilizando un modelo físico a escala 1:200 para analizar la migración lateral de finos y los esfuerzos verticales inducidos durante la extracción de mineral en minería de *caving*. Los experimentos emplearon diferentes estrategias de tiraje. El primer experimento se enfocó en un tiraje aislado, midiendo los esfuerzos y la zona de movimiento generada por un único punto de extracción activo. El segundo experimento utilizó un tiraje uniforme en un esquema de *Block Caving* para evaluar el impacto del punto de entrada de dilución (PED) al modificar la altura de columna. Los dos últimos experimentos simulaban un tiraje múltiple, en configuraciones de *Panel Caving*, donde se estudiaron las secuencias de extracción de izquierda a derecha y viceversa, respectivamente. En todos los experimentos, se usaron celdas de carga para medir los esfuerzos verticales inducidos por el flujo gravitacional.

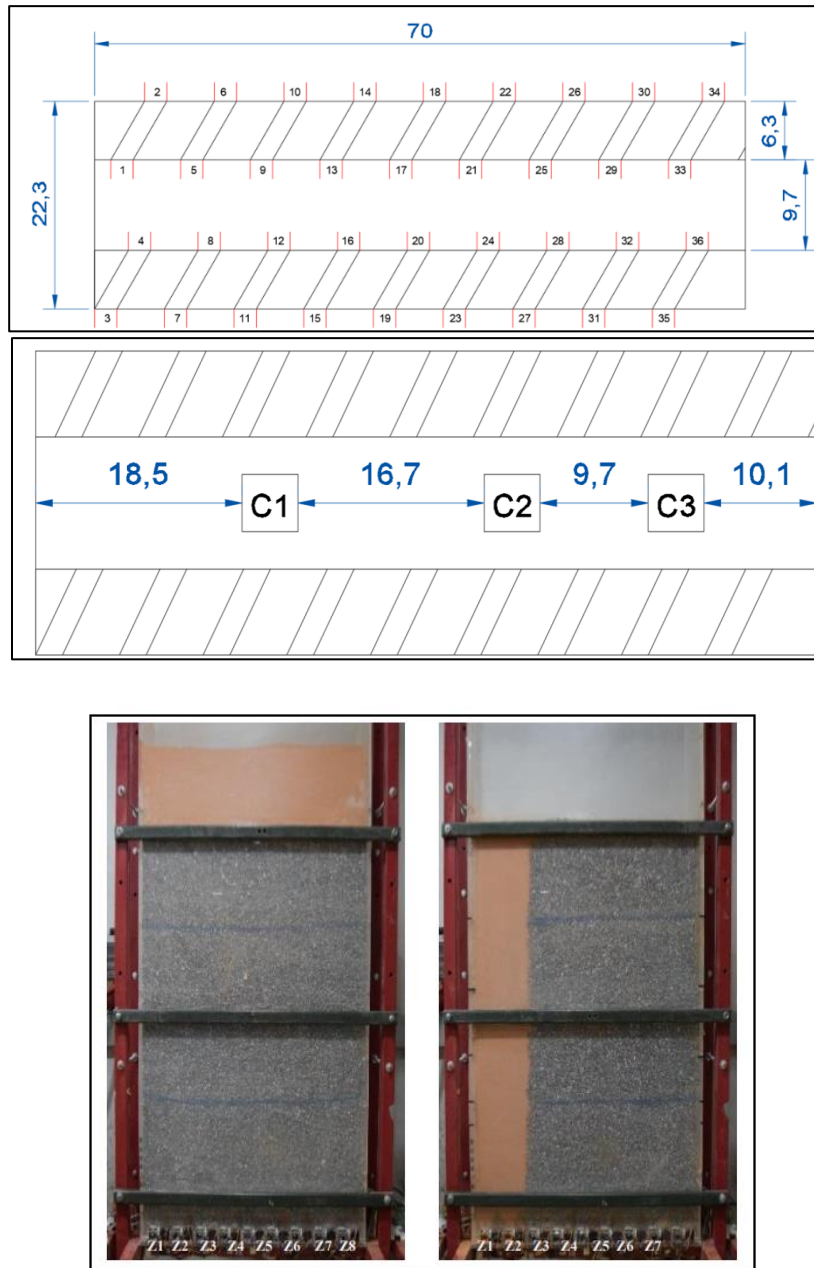


Figura 32: Modelo Físico usado por Díaz, a la izquierda la disposición de material fino (naranja) y grueso (gris). A la izquierda el modelo físico de los experimentos 1 y 2, a la derecha los experimentos 3 y 4. Dimensiones del footprint y disposicion de las celdas de carga para todos sus experimentos [25].

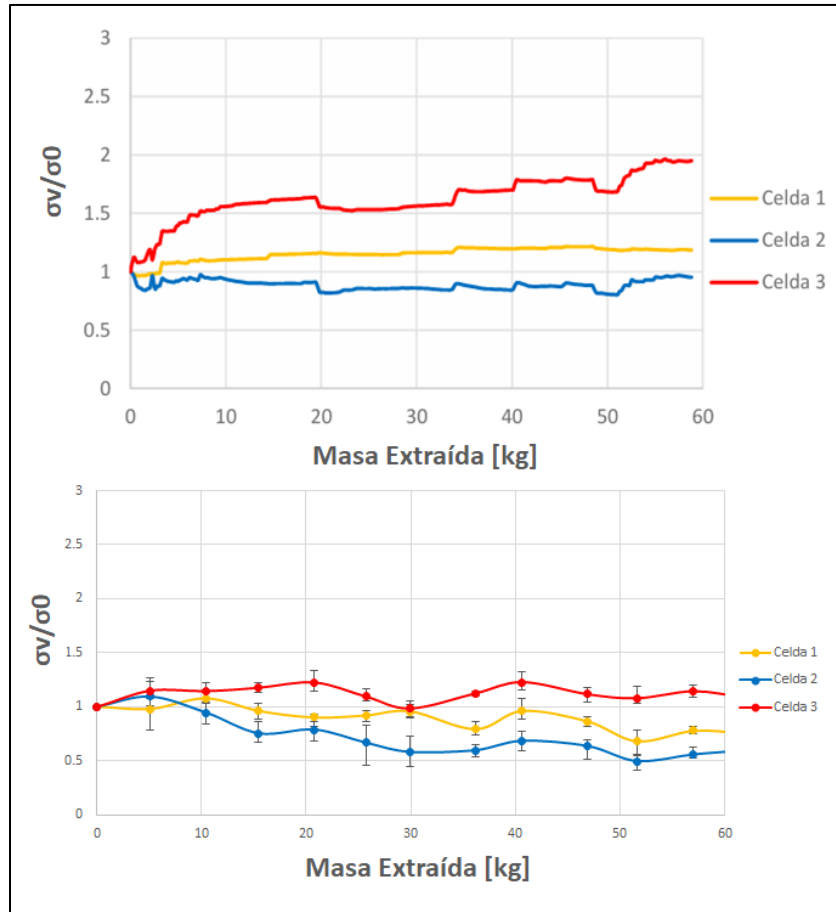


Figura 33: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Diaz Experimento 1 Extracción Aislada.

Se observa que, en el caso experimental, el aumento de los esfuerzos en la celda 3 es leve y progresivo, con variaciones pequeñas pero continuas a medida que avanza la extracción. Este comportamiento refleja un incremento moderado en los esfuerzos que se mantiene estable alrededor de valores de 1.5.

En el gráfico simulado, este comportamiento se captura correctamente, replicando la tendencia de la celda 3 a aumentar los esfuerzos, aunque con un patrón más suavizado. Las celdas 1 y 2 también muestran un comportamiento similar en ambos casos, manteniéndose estables en sus respectivos valores, lo que indica que el modelo de simulación está logrando replicar adecuadamente el comportamiento de los esfuerzos observados experimentalmente, con pequeñas diferencias en magnitud.

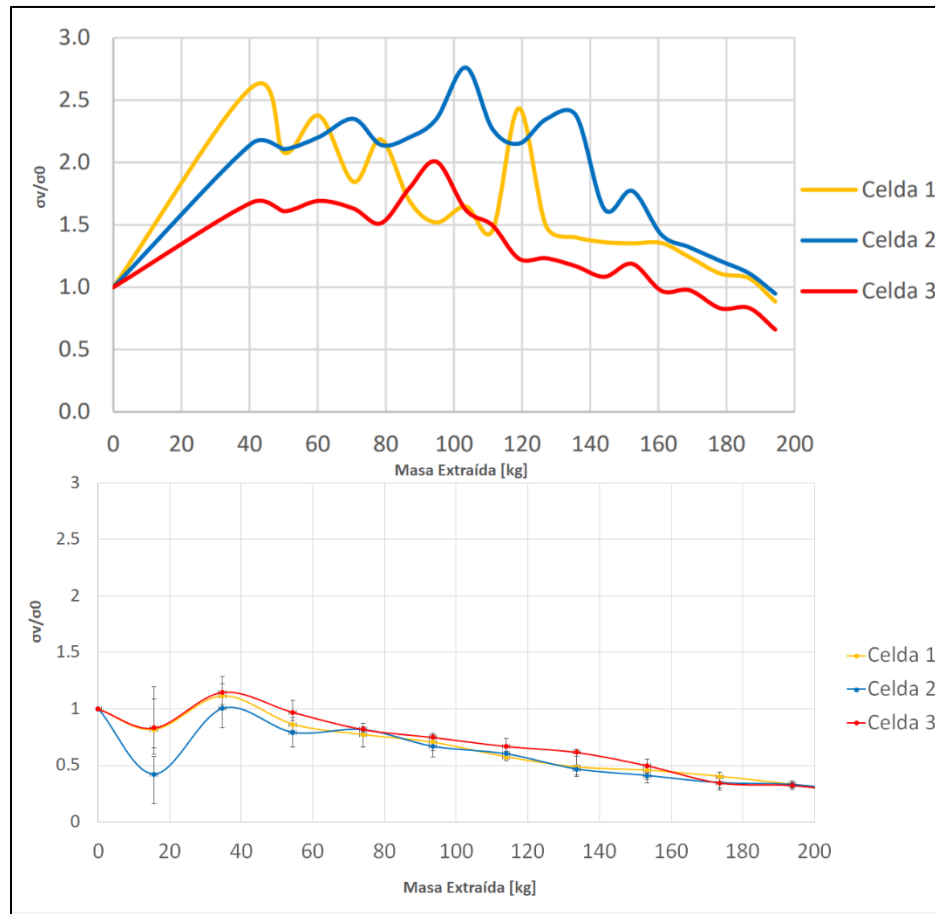


Figura 34: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Diaz Experimento 2 Extracción Uniforme.

En el gráfico experimental, las celdas 1 y 2 muestran fluctuaciones significativas en los esfuerzos a lo largo del proceso de extracción, alcanzando picos de hasta 2.5 y luego disminuyendo progresivamente. Estas variaciones son más notorias en las primeras fases del tiraje, especialmente entre los 50 y 120 kg de masa extraída. La celda 3, por su parte, presenta una tendencia más estable y constante, con incrementos y descensos más moderados a lo largo de todo el proceso. Sin embargo, es importante señalar que, aunque se buscaba un tiraje uniforme, este no se logró completamente durante el experimento, lo que generó zonas de estancamiento y relajación que introdujeron un error experimental significativo en la toma de datos.

En contraste, el gráfico simulado muestra un comportamiento mucho más uniforme y estable. Los esfuerzos en las tres celdas disminuyen progresivamente y de manera más lineal, sin los picos y fluctuaciones observados en el caso experimental. Se sostiene en ese sentido que las

discrepancias no necesariamente se deben a deficiencias del modelo, sino más bien a las limitaciones inherentes al experimento físico y los errores en la medición de los datos. Se ha reportado en este experimento en el modelo original la dificultad que implicaba hacer un tiraje uniforme en un modelo físico, lo que no ha podido efectuar totalmente, este efecto en los experimentos en tiraje uniforme se explica con mayor profundidad en el capítulo Discusión.

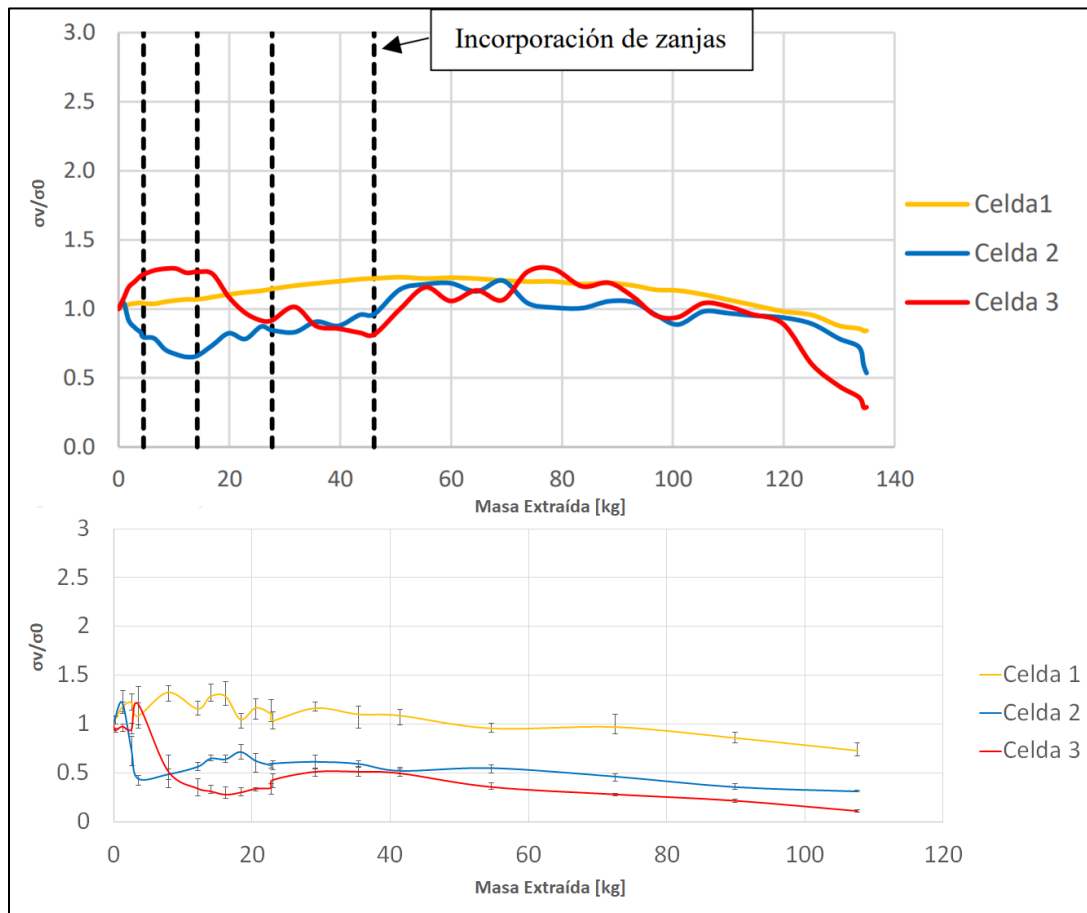


Figura 35: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Diaz Experimento 3 Extracción Por paneles, secuencia de izquierda a derecha.

En el gráfico experimental (primero), las celdas 1, 2 y 3 muestran un comportamiento con pequeñas fluctuaciones en los esfuerzos durante las primeras etapas de la extracción (hasta alrededor de los 40 kg), coincidiendo con la incorporación de zanjas. Posteriormente, los esfuerzos tienden a disminuir gradualmente, aunque con algunos picos notables en las celdas 2 y 3.

En el gráfico simulado (segundo), se observa una tendencia más regular, donde las celdas 2 y 3 experimentan una disminución más progresiva y continua desde los primeros kilogramos de extracción. La celda 1 muestra una tendencia más estable en ambos casos, aunque con mayores fluctuaciones en los datos experimentales.

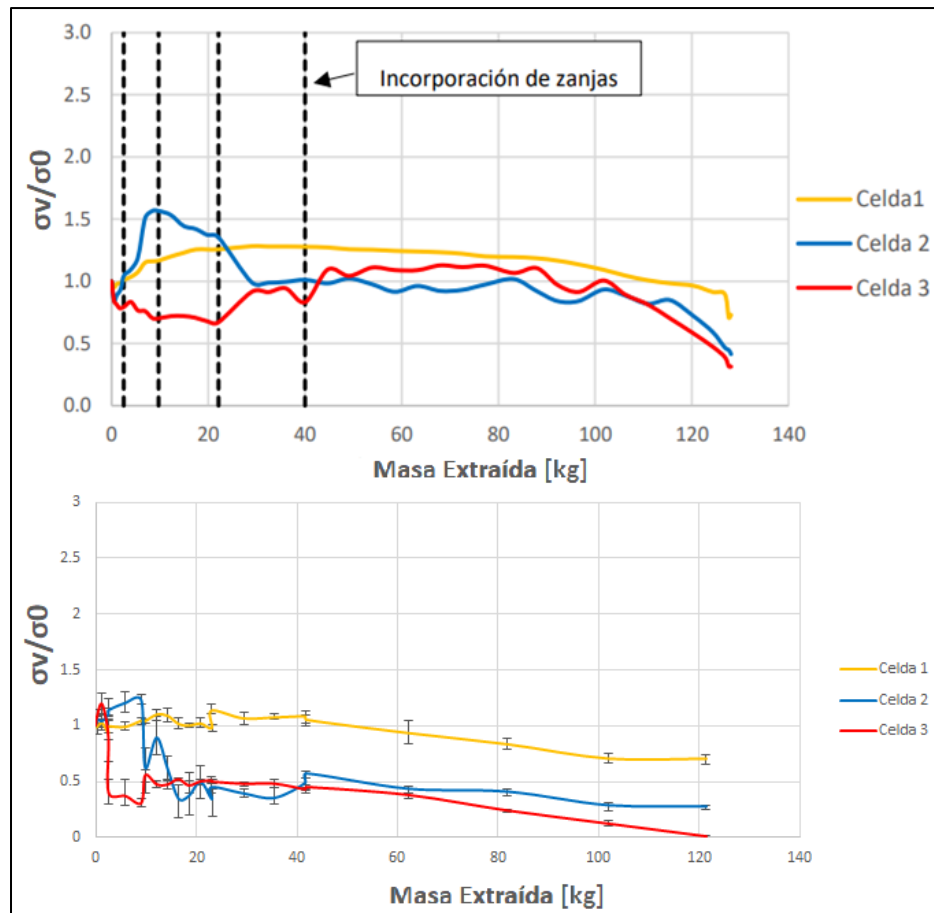


Figura 36: Comparación entre esfuerzos Experimentales (arriba) y Simulados (abajo) Diaz Experimento 4 Extracción Por paneles, secuencia de derecha a izquierda.

En el gráfico experimental las celdas 1, 2 y 3 muestran un comportamiento más fluctuante en los esfuerzos durante las primeras etapas de extracción, especialmente antes de los 40 kg, que coincide con la incorporación de zanjas. A partir de este punto, los esfuerzos tienden a estabilizarse, con una disminución gradual que se mantiene hasta los 120 kg.

En el gráfico simulado, el comportamiento de las tres celdas es más estable desde el principio, con una tendencia más suave y progresiva en la disminución de los esfuerzos, notar que en la celda 2 no alcanza a cruzar la línea de 1.5, pero se captura una concentración local de

esfuerzos, es decir, no se observan tantas fluctuaciones como en los resultados experimentales, pero captura las tendencias generales de los esfuerzos a medida que avanza la extracción y se incorporan las zanjas.

4.2.6 Modelado de Variables y Ajuste de Parámetros.

Se ha realizado un ajuste mediante regresión logarítmica multivariable para obtener ecuaciones que describen parámetros críticos como el empuje (E), el mínimo empuje (E_{min}) y la relajación (R) (anexo 7.1). Estos parámetros se ajustaron utilizando las calibraciones de los experimentos replicados en el presente trabajo, además de los replicados por Gómez en 2022, (anexo 7.3) considerando variables como la cohesión, el ángulo de fricción interna, la densidad aparente y el tamaño de discretización utilizado (el tamaño de cada uno de los cubos para generar flujo en el autómata).

El objetivo de este ajuste es generar ecuaciones precisas que puedan describir el comportamiento de estos parámetros en diferentes condiciones, lo que permite llevar el modelo de esfuerzos a una nueva situación, ya sea un modelo sintético para estudiar el efecto de alguna de sus posibles variaciones o bien exportar a escala mina. Una vez obtenidas las ecuaciones ajustadas para E , E_{min} , y R , estas se pueden aplicar en simulaciones de mayor escala, garantizando que los parámetros se adapten correctamente a las condiciones específicas. Esto es esencial para optimizar la utilización del modelo y evaluar con mayor precisión los esfuerzos inducidos.

4.2.7 Modelo Sintético.

Para avanzar en el entendimiento de los esfuerzos en un sistema no homogéneo, se ha decidido replicar el modelo de Canales [20], centrándose en el experimento 2. Estos experimentos permiten una evaluación más clara de la separación entre las zonas en movimiento y las zonas estancadas, lo cual es crucial para estudiar cómo las variaciones en densidad afectan la distribución de los esfuerzos. Al aplicar este modelo con materiales de diferentes densidades, se busca simular condiciones más realistas que reflejen mejor el comportamiento del macizo rocoso en escenarios de *caving*, donde lo más común es la heterogeneidad del material.

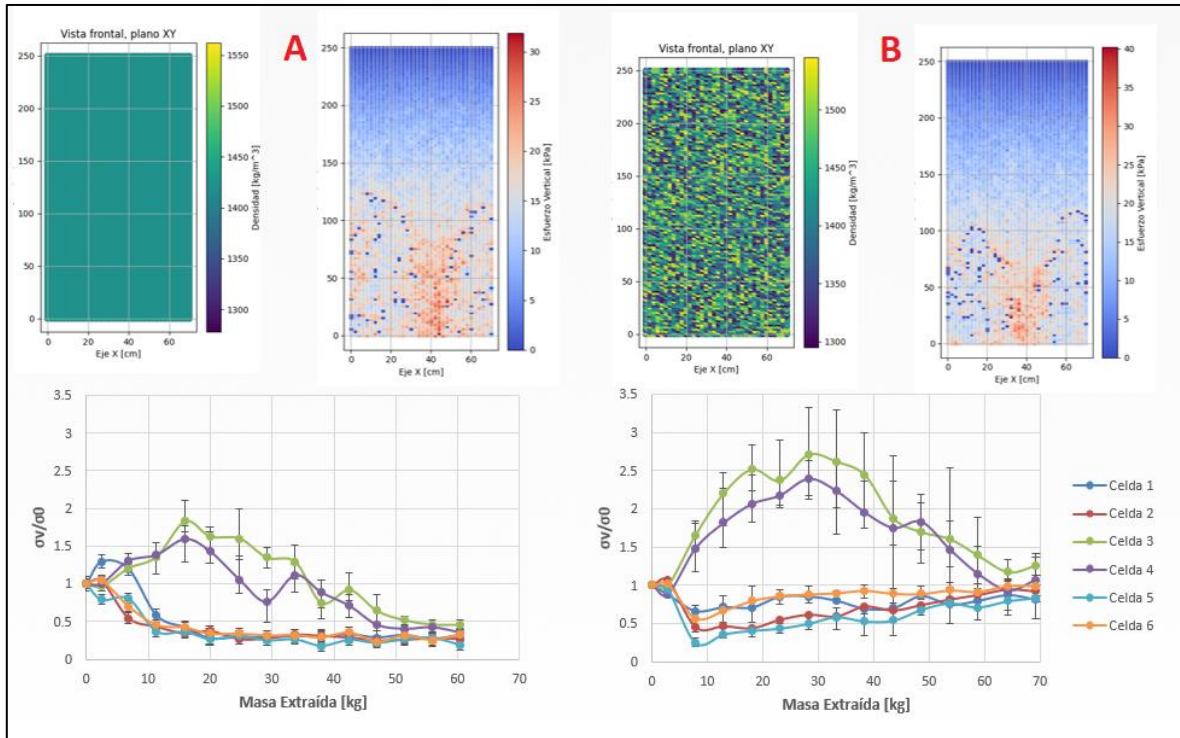


Figura 37: Comparación de los esfuerzos simulados, en un sistema homogéneo (Izquierda) versus heterogéneo (Derecha). En A se muestra la distribución homogénea de densidad y los esfuerzos correspondientes a los 20 kg de extracción, y su caso homólogo en B con la densidad variable aleatoriamente y su distribución de esfuerzos.

En esta comparación, se observa un comportamiento significativamente distinto entre los dos sistemas, uno con material homogéneo y otro con densidades variables (heterogéneo).

En el caso del material homogéneo, los esfuerzos son más uniformes y consistentes entre las diferentes celdas, lo que sugiere que el sistema distribuye los esfuerzos de manera más uniforme. Esto se refleja en las fluctuaciones menores a lo largo del proceso de extracción, lo que indica que los esfuerzos en las celdas responden de manera predecible a la extracción de masa. En este caso, la homogeneidad del material facilita una redistribución más equilibrada de los esfuerzos, permitiendo que el sistema mantenga un comportamiento más estable.

Tabla 5: Variación en una misma celda, comparando la situación heterogénea versus la homogénea.

Varianza [kPa]	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	9.53	49.73	115.85	193.79	13.67	6.80

Se ha realizado el cálculo de las varianzas de las diferencias entre los resultados obtenidos del modelo homogéneo y el modelo heterogéneo para cada una de las seis celdas de medición. Este análisis se llevó a cabo utilizando la metodología de diferencias punto a punto y la varianza, con el objetivo de evaluar la magnitud de las variaciones en el comportamiento de los esfuerzos simulados entre ambos modelos. Para cada celda, se calculó la varianza de las diferencias a lo largo de toda la extracción de masa, permitiendo identificar cuáles celdas presentan mayor variabilidad entre ambos.

El modelo numérico considera la densidad de cada bloque como un parámetro fundamental en la simulación, lo que permite calcular el peso de cada bloque y, por ende, la transmisión de esfuerzos a través del sistema. Sin embargo, las diferencias locales de densidad no se modelan explícitamente como un factor que genere acumulaciones de esfuerzos específicas; en su lugar, los efectos de la densidad, la cohesión y la fricción interna se reflejan en los parámetros ajustados E , E_{min} y R . Estos parámetros capturan de forma simplificada cómo las propiedades físicas del material influyen en la distribución de los esfuerzos durante la extracción. Por ejemplo, un mayor valor de densidad o fricción interna reduce la capacidad del material para transmitir peso hacia las celdas inferiores, disminuyendo el valor de E . De forma similar, las zonas con mayor fricción tienden a acumular más esfuerzos estancados, lo que se refleja en un aumento de la influencia del parámetro R en esas zonas. De esta manera, aunque la teoría del arco de esfuerzos (efecto Janssen) no se modela directamente, los parámetros calibrados permiten reproducir la redistribución de esfuerzos de forma coherente con el comportamiento observado en las simulaciones. Por lo tanto, los picos de esfuerzo observados son una consecuencia del ajuste de estos con base en las propiedades físicas del material, no solo de una modelación explícita de la densidad variable.

4.2.8 Tiempos de Simulación

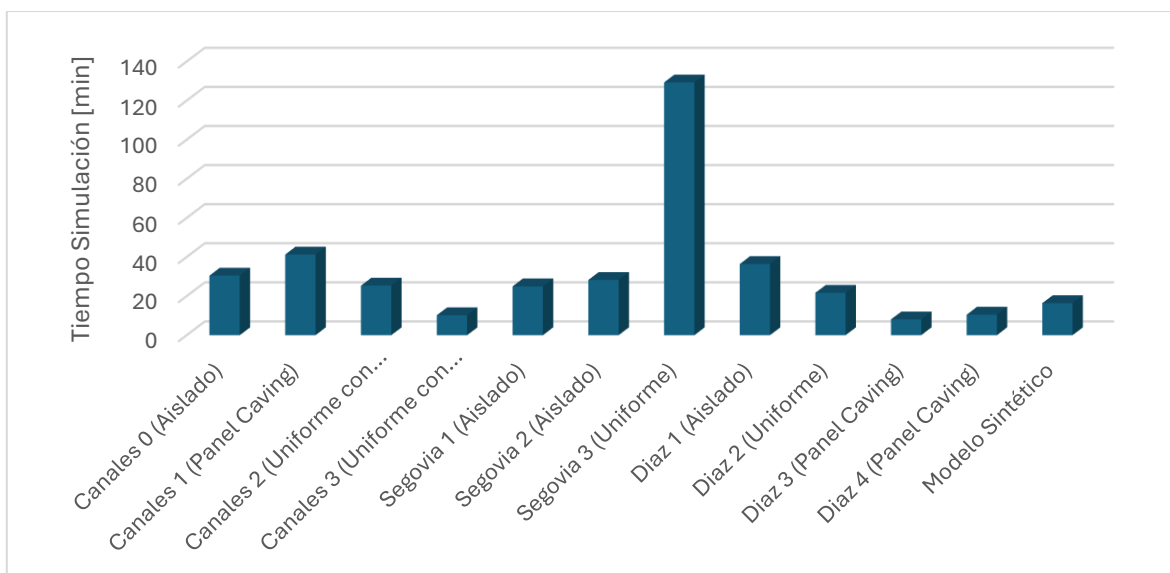


Figura 38: Tiempos de Simulación por Experimento.

En los experimentos de mayor complejidad, como el *panel caving* en el caso de Segovia 3 y Canales 1, requieren tiempos significativamente más largos, lo que refleja la mayor cantidad de interacciones y ajustes en el flujo y los esfuerzos. En contraste, las simulaciones aisladas o con zonas estáticas tienden a ser más rápidas, como se ve en Canales 3 y Diaz 3. Además, se observa que los tiempos de simulación para los experimentos de Segovia tienden a ser más largos, lo cual se puede atribuir a que este modelo es más grande y contiene una mayor cantidad de cubos en comparación con los demás. Esto incrementa la complejidad del cálculo, ya que el modelo necesita procesar más interacciones entre los bloques, lo que prolonga el tiempo requerido para obtener resultados

4.3 Escala Mina

Para realizar este análisis, se obtuvieron datos directamente de una mina, donde se midieron los esfuerzos verticales en cinco celdas de carga distribuidas a diferentes profundidades. Estos datos fueron promediados en función de la altura de la columna de extracción, lo que permitió generar una visión general de cómo se comportan los esfuerzos en función de una altura de mineral quebrado.

Adicionalmente, se desarrolló un modelo sintético de mina, en el cual se simulaban los esfuerzos cada 2 metros de profundidad, bajo condiciones estáticas (sin extracción). Los

esfuerzos simulados obtenidos de este modelo fueron graficados junto con los datos reales de la mina para compararlos y analizar la precisión del modelo sintético frente a las condiciones in situ. En el gráfico que se presenta a continuación, se observan estas comparaciones, donde los esfuerzos simulados permiten predecir el comportamiento esperado del macizo rocoso antes de iniciar actividades de extracción. El modelo utilizado para simular la densidad en minería genera valores aleatorios de densidad, con un promedio ajustado a 2.25 kg/m^3 , que equivale a una densidad de 2.7 kg/m^3 con un esponjamiento del 20%. Este enfoque asegura que no haya sesgo en la distribución de densidades, ya que los valores se generan aleatoriamente dentro de un rango, manteniendo un comportamiento uniforme. Representando que es común que las densidades varíen levemente de manera aleatoria debido a las condiciones naturales del mineral fragmentado, por lo que esta simulación refleja de manera realista esa variabilidad.

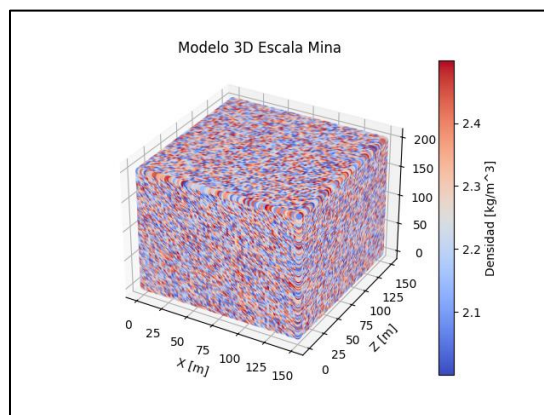


Figura 39: Modelo de bloques a escala mina mostrando densidad y sus dimensiones.

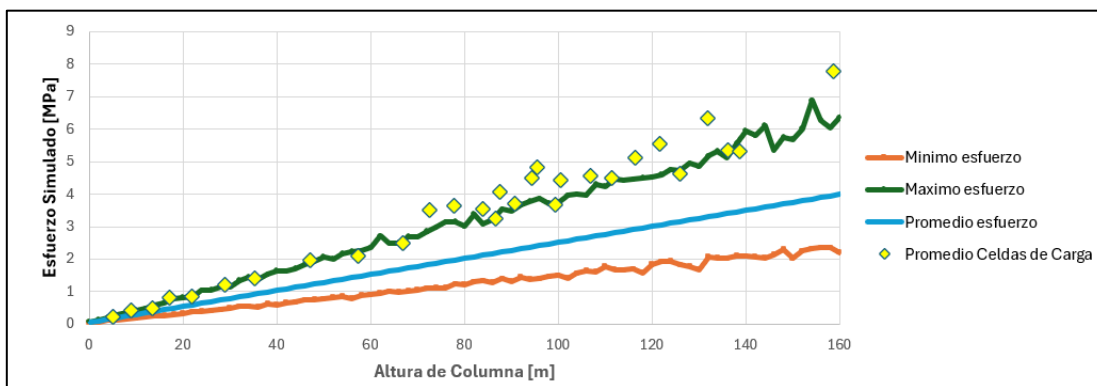


Figura 40: Esfuerzo simulado en función de la altura de columna

En el modelo tridimensional de bloques que se muestra en la figura 39 se ha realizado el cálculo de esfuerzos bajo condiciones estáticas. Cada cota, o altura de columna, contiene una serie de valores de esfuerzo mínimo, máximo y promedio, los cuales han sido graficados en la figura 40 para ofrecer una visión clara del comportamiento del material a distintas alturas. El modelo fue diseñado con un área amplia de 150 x 150 metros en cada cota, utilizando bloques cúbicos de 2x2x2 metros. Por lo tanto, cada cota contiene un total de 5625 bloques. Así, para cada altura de columna se han calculado 5625 esfuerzos, uno por cada celda. Este enfoque permite obtener un modelo representativo y detallado del comportamiento modelo, ya que abarca una gran cantidad de datos en cada nivel.

Posteriormente se observa la aplicabilidad del modelo a escala mina, donde se muestran tanto los esfuerzos simulados como los medidos a través de celdas de carga. A pesar de que los valores simulados no coinciden perfectamente con los datos experimentales, el modelo logra captar el orden de magnitud de los esfuerzos, lo cual es un indicador de su utilidad potencial en condiciones mineras reales. Aunque las discrepancias existen (cuantificadas en anexo 7.5) alcanzando un promedio de 0,41 [MPa] (equivalente casi al 10% en error porcentual), el hecho de que el modelo siga una tendencia similar y se mantenga dentro de rangos razonables permite inferir que, con ajustes adicionales y calibraciones más precisas, podría ser una herramienta confiable para predecir esfuerzos en operaciones de *block caving*. Esto sugiere que el modelo tiene la capacidad de proporcionar una aproximación inicial útil que podría optimizarse para mejorar su precisión a medida que se avanza en el análisis y la planificación de operaciones subterráneas.

5. Discusión

La lógica implementada simula los esfuerzos en materiales granulares a través de un enfoque basado en la interacción entre celdas vecinas. Para calcular los esfuerzos, se toma una vecindad de hasta 9 bloques adyacentes a un bloque en movimiento, distribuyendo las masas hacia las celdas inferiores en función de una ponderación basada en la distancia. Sin embargo, este método tiende a sobredimensionar el efecto de las zonas en movimiento, ya que asigna un factor de relajación en estas celdas que puede no reflejar completamente la realidad de la interacción granular. Este enfoque simplificado puede generar errores en la simulación, como se observa en el experimento 3 de Canales, donde una pequeña columna de material estancado muestra una rápida caída en los esfuerzos. Esto explica también el descenso temprano de los esfuerzos simulados frente a los experimentales en prácticamente todos los experimentos replicados, los esfuerzos simulados disminuyen antes de tiempo frente a los experimentales debido a este efecto.

La alta variabilidad experimental observada al medir esfuerzos en condiciones de laboratorio se debe en gran parte a factores estocásticos que influyen en el comportamiento del material granular. A pesar de los esfuerzos por mantener condiciones controladas, existen múltiples fuentes de error, como la distribución no homogénea del material o pequeñas inconsistencias en el proceso de carga o descarga. Esto provoca que los esfuerzos medidos presenten una alta dispersión. Si bien el modelo numérico también integra esta variabilidad en su cálculo, no es capaz de compensar completamente los errores asociados a las condiciones experimentales. A largo plazo, esta integración de la aleatoriedad estocástica puede llevar a discrepancias entre los resultados experimentales y simulados, debido a la imposibilidad de predecir con precisión la distribución exacta de los esfuerzos en el material bajo diferentes condiciones.

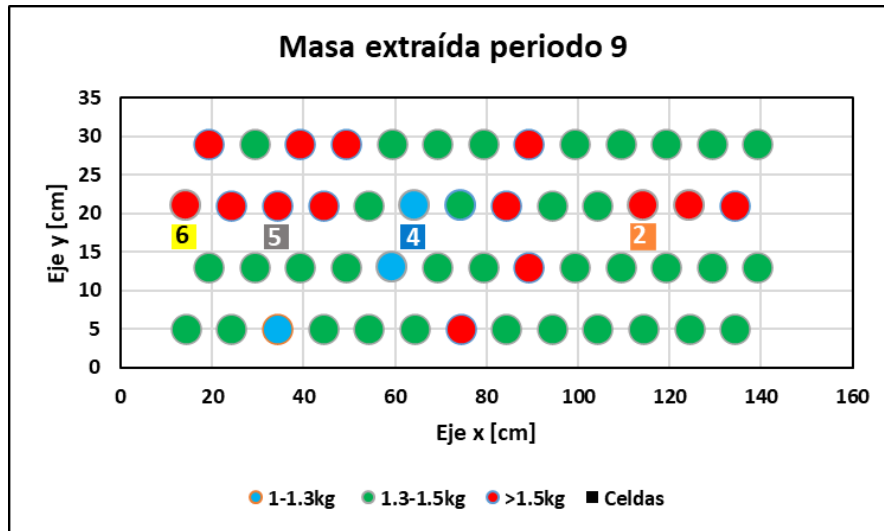


Figura 41: Ejemplo de las diferencias entre masas extraídas por punto de Extracción, en experimentos de extracción uniforme [24].

Los errores encontrados en los experimentos de tiraje uniforme parecen estar directamente relacionados con las dificultades inherentes a replicar un flujo completamente uniforme en los modelos experimentales. Como se muestra en la figura 41, las cantidades de material extraídas de los distintos puntos varían considerablemente, lo que sugiere que la distribución teórica del tiraje no se refleja de manera precisa en la práctica. Esta variabilidad genera zonas de estancamiento en ciertas áreas del sistema, lo que lleva a una concentración de esfuerzos en puntos específicos.

El acople entre el modelo de esfuerzos y el de flujo no está completamente integrado, lo que representa una limitación. Actualmente, los esfuerzos simulados no afectan el comportamiento del flujo ni la manera en que este se desarrolla dentro del sistema, como se ha mencionado anteriormente esto es propio de los modelos cinemáticos. Esta desconexión impide modelar completamente el flujo del material granular, ya que no considera cómo los esfuerzos inducidos por el flujo modifican las condiciones en las distintas zonas del sistema, en particular la migración de finos en experimentos cuyos materiales corresponden a la mezcla de finos y grueso. Aunque el modelo utilizado es un autómatas y ha demostrado ser efectivo en la replicación de diversas situaciones, para aumentar su exactitud sería necesario implementar una interacción entre los esfuerzos y el flujo. De esta manera, los resultados obtenidos podrían acercarse más a la realidad, permitiendo una representación más fiel del comportamiento del material bajo condiciones de operación más complejas.

Respecto a la comparación en escala mina, las discrepancias observadas entre el modelo predictivo y los datos reales pueden deberse al efecto arco, cuyo resultado puede estar sobredimensionado en el modelo numérico debido a la mayor fricción entre el material granular y las paredes del contenedor, que se han replicado antes de llevar el modelo a escala mina. En condiciones mineras reales, es probable que la fricción con las paredes sea considerablemente menor, lo que ocasionaría que los esfuerzos verticales fueran mayores de lo previsto. Además, falta información específica sobre las condiciones exactas del *caving* en la mina, como la fricción real con las paredes o si esta fricción está presente en todas las zonas.

6. Conclusiones y Recomendaciones

El modelamiento de esfuerzos ha demostrado ser efectivo para la simulación en distintos escenarios de laboratorio, proporcionando resultados coherentes con la variabilidad esperada en medios granulares. El modelo permite replicar de manera satisfactoria la evolución de los esfuerzos en situaciones controladas, como el tiraje uniforme, extracción en paneles y la extracción aislada, reproduciendo patrones de concentración y estancamiento observados experimentalmente. Si bien el modelo capta con precisión el comportamiento inicial de los esfuerzos y sus tendencias generales, existen ciertas limitaciones cuando se trata de capturar efectos más complejos, como la interacción entre los esfuerzos y el flujo de material. El modelo es útil para identificar zonas estancadas y en movimiento, y destacar picos de esfuerzos, sin buscar necesariamente replicar a la perfección el comportamiento experimental.

Los ajustes realizados al modelo, específicamente el uso de un empuje en función del área de la zona en movimiento, han permitido replicar de manera más precisa los esfuerzos medidos experimentalmente. Este enfoque mejora la correspondencia entre los resultados simulados y los observados en el laboratorio, corroborando lo propuesto por Pierce, quien sugiere que el análisis basado en el método de las áreas tributarias es clave para entender el comportamiento de las zonas estancadas. Al incorporar este concepto, el modelo ha logrado representar mejor las concentraciones de esfuerzo que se producen en estas áreas, especialmente en condiciones de extracción heterogénea.

Los materiales no homogéneos presentan una distribución de esfuerzos mucho más variable y menos predecible en comparación con sistemas homogéneos. Esta variabilidad se refleja en una mayor concentración de esfuerzos en zonas estancadas, estos tienden a acumularse debido a las diferencias en la densidad y las propiedades del material. En estos sistemas heterogéneos, las fluctuaciones de los esfuerzos son más pronunciadas y difíciles de anticipar.

El modelo es escalable y tiene potencial para su aplicación en la planificación de operaciones mineras. Aunque los experimentos replicados en laboratorio no contemplan del todo la heterogeneidad de los materiales, el modelo sintético permite observar de manera detallada cómo esta heterogeneidad afecta la distribución de esfuerzos. En situaciones reales de

minería subterránea, la variabilidad en las propiedades del material puede generar importantes diferencias en la forma en que los esfuerzos se distribuyen a lo largo de las estructuras. En ese sentido, realizar experimentos en laboratorio con material no homogéneo y luego replicar esos experimentos utilizando el modelo presentado sería una estrategia ideal para llevar los resultados a escala mina. El uso de materiales no homogéneos en el laboratorio permitiría capturar la variabilidad real que ocurre en las condiciones geomecánicas de una mina, donde las propiedades del material pueden variar significativamente. De este modo, el modelo ofrecería una herramienta que, con las adecuadas calibraciones, puede proporcionar información valiosa para mejorar la eficiencia y seguridad de las operaciones mineras.

El modelo ajustado no solo es capaz de evaluar los esfuerzos en los entornos donde ha sido calibrado, sino que también tiene el potencial de operar en nuevos escenarios con variabilidad en el material. Notar que la cohesión y la fricción interna son los parámetros que más influyen en la predicción de los esfuerzos. Estos parámetros definen cómo se comportan los materiales bajo carga y, al ajustar correctamente sus valores, el modelo puede adaptarse para prever la distribución de esfuerzos en condiciones geológicas completamente diferentes. Para un análisis más completo se propone realizar modelaciones utilizando el Método de Elementos Discretos (DEM) para comparar los esfuerzos del modelo de autómatas celulares con los obtenidos en simulaciones DEM. Esto permitiría una evaluación numérica más exhaustiva de la validez del modelo de esfuerzos, ya que el DEM es ampliamente utilizado para simular el comportamiento de materiales granulares con mayor detalle, considerando las interacciones entre partículas individuales. Al comparar los resultados de ambos modelos, se podría identificar con mayor precisión las limitaciones y ventajas del modelo propuesto, y determinar si es capaz de reproducir de manera fiel los patrones de distribución de esfuerzos observados en entornos con alta variabilidad de material.

Referencias

- [1] E. T. Brown, *Block caving geomechanics*, Second edi. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2007.
- [2] E. T. Brown, “Cave initiation by undercutting,” in *Block Caving Geomechanics*, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2007, pp. 229–287.
- [3] D. Laubscher, *Block cave manual*. Brisbane: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2000.
- [4] B. Brady and E. T. Brown, *Rock Mechanics for Underground Mining*, Third edit. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [5] B. H. G. Brady and E. T. Brown, *Rock Mechanics for underground mining: Third edition*. 2006. doi: 10.1007/978-1-4020-2116-9.
- [6] E. Hoek and E. T. Brown, “Practical estimates of rock mass strength,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 34, no. 8, pp. 1165–1186, Dec. 1997, doi: 10.1016/S1365-1609(97)80069-X.
- [7] F. Armijo, S. Irribarra, and R. Castro, “Experimental study of fines migration for caving mines,” in *Proceedings of the 3rd international symposium on block and sublevel caving, Caving 2014*, 2014, pp. 356–362.
- [8] G. P. Chitombo, “Cave mining: 16 years after Laubscher’s 1994 paper ‘Cave mining - State of the art,’” *Trans. Institutions Min. Metall. Sect. A Min. Technol.*, vol. 119, no. 3, pp. 132–141, 2010, doi: 10.1179/174328610X12820409992255.
- [9] M. Pierce, “A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines,” University of Queensland, 2010.
- [10] G. Flores and A. Karzulovic, “Benchmarking Report, prepared for the International Caving Study Stage 2 (ICS-II),” Brisbane, 2002.
- [11] M. Pierce and M. Fuenzalida, “Application of a methodology for secondary

fragmentation prediction in cave mines,” in *3rd International symposium on block and sublevel caving*, 2014, pp. 318–327.

- [12] R. Castro, “Study of the Mechanisms of Gravity Flow for Block Caving,” University of Queensland, 2007.
- [13] R. Kvapil, “Gravity flow of granular materials in Hoppers and bins in mines-II. Coarse material,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 277–292, 1965, doi: 10.1016/0148-9062(65)90029-X.
- [14] G. Shekhar, A. Gustafson, H. Schunnesson, and Luleå tekniska universitet. Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser., “Draw Control Strategy and Resource Efficiency in Sublevel Caving State-Of-the-Art.,” 2016.
- [15] R. Kvapil, *Gravity Flow in Sublevel and Panel caving*. Lulea University of Technology Press, 2008.
- [16] I. Janelid and R. Kvapil, “Sublevel caving,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 129–132, 1966, doi: 10.1016/0148-9062(66)90004-0.
- [17] R. Trueman, R. Castro, and A. Halim, “Study of multiple draw-zone interaction in block caving mines by means of a large 3D physical model,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 45, no. 7, pp. 1044–1051, 2008, doi: 10.1016/j.ijrmms.2007.11.002.
- [18] F. Melo, F. Vivanco, and C. Fuentes, “Calculated isolated extracted and movement zones compared to scaled models for block caving,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 46, no. 4, pp. 731–737, 2009, doi: 10.1016/j.ijrmms.2008.09.012.
- [19] R. Kvapil, “Gravity flow of granular materials in hoppers and bins - Part I,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 35–41, 1965, doi: 10.1016/0148-9062(65)90020-3.
- [20] J. Canales, “Análisis experimental de esfuerzos inducidos por flujo gravitacional en minería de block / panel caving,” Universidad de Chile, 2016. [Online]. Available: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/138558>
- [21] D. C. Peters, “Physical modeling of the draw behavior of broken rock in caving,”

Color. Sch. Mines Q., vol. 79, no. 1, p. 1, 1984.

- [22] G. Power, “Full scale SLC draw trials at Ridgeway Gold Mine,” in *Massmin 2004*, 2004, pp. 225–230.
- [23] L. F. Orellana, “Evaluación de variables de Diseño del Sistema de Minería Continua a Partir de Experimentación en Laboratorio,” Universidad de Chile, 2012.
- [24] C. Segovia, “Análisis de esfuerzos verticales inducidos por flujo gravitacional en minería de block caving,” Universidad de Talca, 2022.
- [25] T. Diaz, “Estudio experimental de migración lateral de finos en minería de caving,” Universidad de Concepcion, 2024.
- [26] D. Laubscher, “Draw strategy,” in *Block cave manual*, Brisbane: International Caving Study (1997-2000), 2000.
- [27] F. Fernández, “Modelación Numérica de Flujo Gravitacional,” Universidad de Chile, 2009.
- [28] R. Castro and W. Whiten, “A new cellular automaton to model gravity flow in block caving based on physical modelling observation,” in *APCOM 2007*, 2007, pp. 233–241.
- [29] L. Jing, “A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 40, no. 3, pp. 283–353, 2003, doi: 10.1016/S1365-1609(03)00013-3.
- [30] R. M. Nedderman, *Statics and Kinematics of Granular Materials*. Cambridge University Press, 1992.
- [31] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, “A discrete numerical model for granular assemblies,” *Geotechnique*, vol. 29, no. 1, pp. 47–65, 1979.
- [32] P. W. Cleary and M. L. Sawley, “DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge,” *Appl. Math. Model.*, vol. 26, no. 2, pp. 89–111, 2002, doi: 10.1016/S0307-904X(01)00050-6.
- [33] R. M. Nedderman and U. Tüzün, “A kinematic model for the flow of granular

materials,” *Powder Technol.*, vol. 22, no. 2, pp. 243–253, 1979, doi: 10.1016/0032-5910(79)80030-3.

- [34] F. Melo, F. Vivanco, C. Fuentes, and V. Apablaza, “Kinematic model for quasi static granular displacements in block caving: Dilatancy effects on drawbody shapes,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 45, no. 2, pp. 248–259, 2008, doi: 10.1016/j.ijrmms.2007.07.005.
- [35] D. Deserable, “A versatile two-dimensional cellular automata for granular flow,” *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 62, no. 4, pp. 1414–1436, 2002.
- [36] J. Kozicki and J. Tejchman, “Application of a cellular automaton to simulations of granular flow in silos,” *Granul. Matter*, vol. 7, no. 1, pp. 45–54, 2005, doi: 10.1007/s10035-004-0190-x.
- [37] M. E. Valencia, “Desarrollo e implementación de FlowSim para su aplicación en minería de Block/Panel Caving,” Universidad de Chile, 2014.
- [38] J. Kozicki and J. Tejchman, “Application of a Cellular Automata Model To Granular Flow,” 2002.
- [39] R. Gonzalez, “Desarrollo de FlowSim 3.0: Simulador de flujo gravitacional para minería de Block/Panel Caving,” Universidad de Chile, 2014.
- [40] BCTEC, “FlowSim BC v5.0 User’s Manual.” Santiago, 2018. [Online]. Available: <https://bctec.cl/bctec/flowsim/>
- [41] R. L. Castro, F. Gonzalez, and E. Arancibia, “Development of a gravity flow numerical model for the evaluation of drawpoint spacing for block/panel caving,” *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 109, no. 7, pp. 393–400, 2009.
- [42] B. Brady and E. Brown, “Premining state of the stress analysis,” in *Rock mechanics for Underground Mining*, Third edit., Kluwer Academic Publishers, 2004, pp. 142–164.
- [43] H. M. Jaeger and S. R. Nagel, “Physics of the Granular State,” *Science (80-.)*, vol. 255, no. 5051, pp. 1523–1531, 1992.

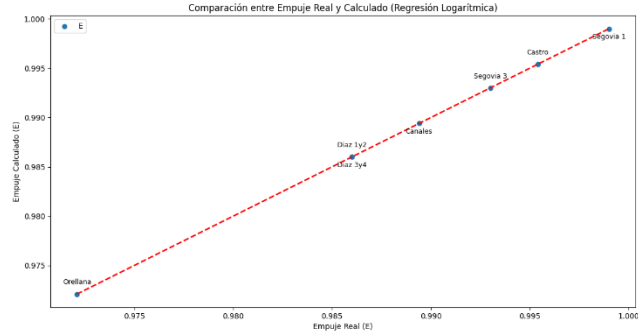
- [44] V. Sundaram and S. C. Cowin, "A reassessment of static bin pressure experiments," *Powder Technol.*, vol. 22, no. 1, pp. 23–32, 1979, doi: 10.1016/0032-5910(79)85004-4.
- [45] D. M. Walker and M. H. Blanchard, "Pressures in experimental coal hoppers," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 22, no. 12, pp. 1713–1745, 1967, doi: 10.1016/0009-2509(67)80206-9.
- [46] D. M. Walker, "An approximate theory for pressures and arching in hoppers," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 21, no. 11, pp. 975–997, 1966, doi: 10.1016/0009-2509(67)80145-3.
- [47] L. J. Lorig, "Relation between Caved Column Height and Vertical Stress at the Cave Base," 2000.
- [48] C. H. Liu *et al.*, "Force fluctuations in bead packs," *Science (80-.)*, vol. 269, no. 5223, pp. 513–515, 1995, doi: 10.1126/science.269.5223.513.
- [49] R. Castro, R. Gómez, J. Castillo, and O. Jerez, "Fragmentation model integrated in a gravity flow simulator for block caving planning," *Granul. Matter*, vol. 26, no. 1, pp. 20–22, 2024, doi: 10.1007/s10035-024-01396-5.
- [50] D. F. Bagster, "A note on the pressure ratio in the Janssen equation," *Powder Technol.*, vol. 4, pp. 235–237, 1971.
- [51] C. Bravo, "Recuperación de reservas colapsadas en minas panel caving," Universidad de Chile, 2010.
- [52] L. Dorador, "Alternativas de predicción de fragmentación secundaria en minería de hundimiento masivo (Block/Panel Caving)," 2013. [Online]. Available: <http://vu2018.admin.hosting.ing.udec.cl/descargas/33.pdf>
- [53] L. Dorador, E. Eberhardt, and D. Elmo, "Procedure for estimating broken ore density distribution within a draw column during block caving," *Min. Technol. Trans. Inst. Min. Metall.*, vol. 130, no. 3, pp. 131–145, 2021, doi: 10.1080/25726668.2021.1886544.
- [54] L. Dorador, "Alternativas de predicción de fragmentación secundaria en minería de hundimiento masivo (block/panel caving)," *Golder Assoc. Ltd. Burn. BC, Canadá*,

2013.

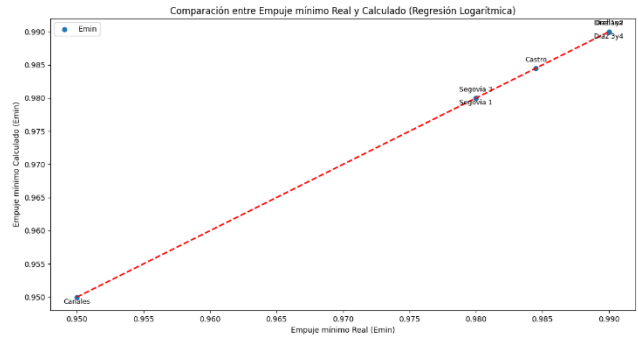
- [55] P. Cortez, “Influencia de la distancia de transporte de materiales granulares en la fragmentación secundaria,” Universidad de Concepción, 2023.
- [56] R. Gómez and R. Castro, “Stress modelling using cellular automata for block caving applications,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 154, p. 105124, 2022, doi: 10.1016/j.ijrmms.2022.105124.

7. Anexo:

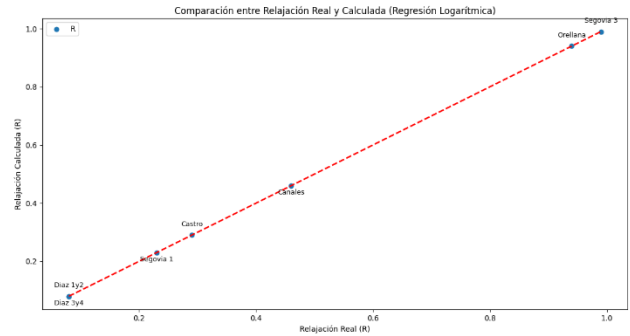
7.1 Regresiones Logarítmicas para predecir Parámetros.



$$E = -12.25 - 0.02\log(Rh) - 0.16\log(\rho) + 0.02\log(x) + 1.96\log(c) + 2.25\log(\phi)$$



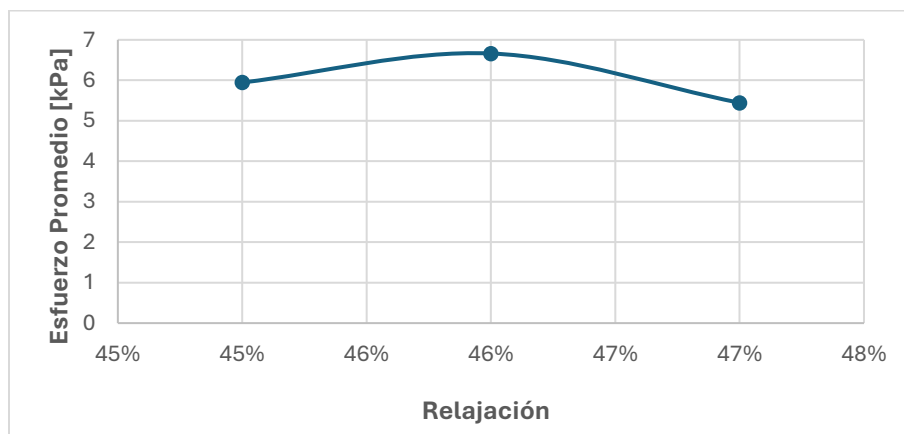
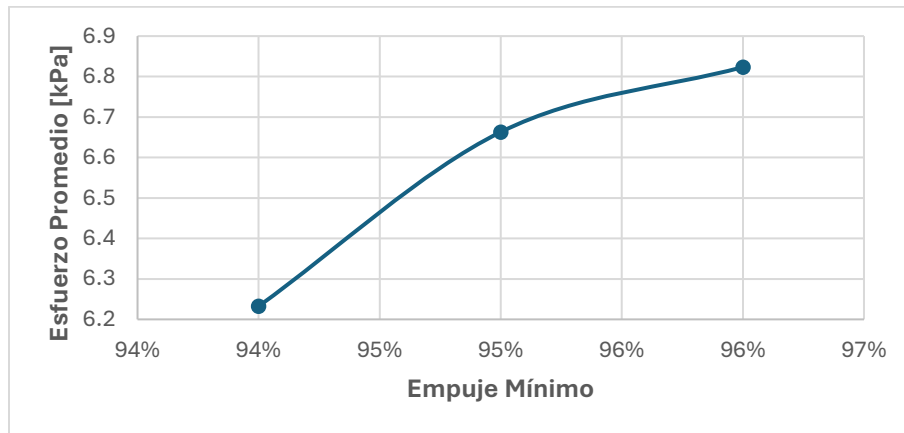
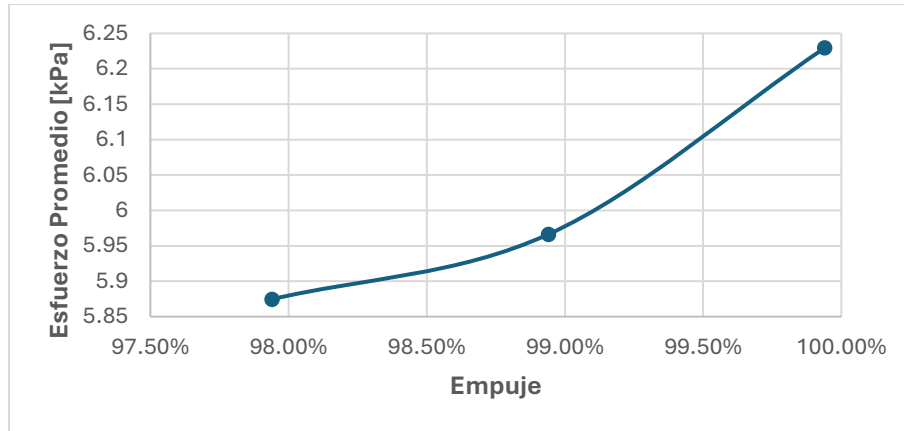
$$E_{min} = 18.90 + 0.01\log(Rh) + 0.34\log(\rho) + 0.01\log(x) - 2.72\log(c) - 3.28\log(\phi)$$



$$R = -750.13 + 2.06\log(Rh) - 8.44\log(\rho) - 4.03\log(x) + 124.18\log(c) + 119.10\log(\phi)$$

7.2 Análisis de Sensibilidad

A continuación, se muestra la variación producida al variar un 1% la magnitud de cada uno de los parámetros del modelo de esfuerzos, en base a la extracción media del experimento 0 de Canales (tiraje aislado):



7.3 Base de Datos Completa

Tabla 6: Base de Datos de todos los experimentos Calibrados.

Experimento	Discretización [cm]	Rh [m]	Cohesión [kPa]	Ángulo F.I. [°]	Densidad $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	E	R	Emin
Orellana	2.00	0.11	22.72	37.89	1610	97.21%	94.00 %	99.00 %
Canales	2.00	0.09	21.90	39.00	1420	98.94%	46.00 %	95.00 %
Castro	10.00	0.69	22.72	39.00	1900	99.54%	29.00 %	98.45 %
Diaz 3y4	2.00	0.08	22.17	39.19	1851	99.90%	8.00%	97.50 %
Diaz 1y2	2.00	0.08	22.17	39.19	1851	98.80%	8.00%	99.00 %
Segovia1	2.00	0.13	19.95	44.39	2515	99.90%	23.00 %	98.00 %
Segovia3	2.00	0.13	21.02	41.89	2188	99.30%	99.00 %	98.00 %

7.4 Tiempos de Simulación:

Tabla 7: Tiempos de Simulación para cada uno de los experimentos.

Experimento	Tiempo Simulación [min]
Canales 0 (Aislado)	30.47
Canales 1 (<i>Panel Caving</i>)	41.25
Canales 2 (Uniforme con Zona Estática)	25.37
Canales 3 (Uniforme con Zona Estática)	10.22

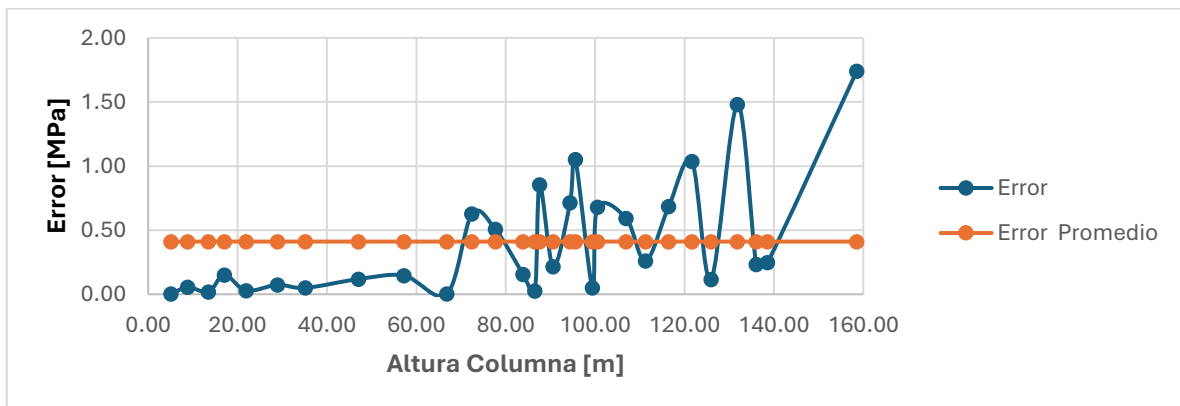
Segovia 1 (Aislado)	24.96
Segovia 2 (Aislado)	28.24
Segovia 3 (Uniforme)	129.28
Diaz 1 (Aislado)	36.41
Diaz 2 (Uniforme)	21.65
Diaz 3 (<i>Panel Caving</i>)	8.06
Diaz 4 (<i>Panel Caving</i>)	10.49
Modelo Sintético	26.38

7.5 Error Escala mina:

Tabla 8: Error de la Simulación en Escala Mina.

Altura	Esfuerzo Real [MPa]	Máximo Esfuerzo [MPa]	Error [MPa]	Error %
5.11	0.21	0.21	0.00	0.86%
8.86	0.42	0.36	0.06	13.22%
13.52	0.50	0.48	0.02	3.71%
17.06	0.81	0.66	0.15	18.68%
21.94	0.85	0.82	0.03	3.37%
28.95	1.21	1.14	0.07	6.08%
35.16	1.40	1.45	0.05	3.57%
47.04	1.96	1.84	0.12	6.03%
57.23	2.09	2.24	0.15	6.98%
66.83	2.50	2.49	0.00	0.07%
72.44	3.49	2.87	0.63	17.92%
77.69	3.65	3.15	0.51	13.85%
83.89	3.54	3.39	0.16	4.40%

86.52	3.25	3.23	0.03	0.78%
87.60	4.08	3.23	0.86	20.94%
90.63	3.71	3.49	0.22	5.83%
94.38	4.49	3.78	0.71	15.91%
95.58	4.83	3.78	1.05	21.79%
99.41	3.66	3.71	0.05	1.34%
100.53	4.43	3.75	0.68	15.34%
106.95	4.55	3.96	0.59	13.00%
111.31	4.50	4.24	0.26	5.79%
116.48	5.13	4.45	0.69	13.35%
121.65	5.55	4.51	1.04	18.70%
125.94	4.63	4.75	0.12	2.49%
131.85	6.32	4.84	1.48	23.42%
136.06	5.36	5.13	0.23	4.35%
138.57	5.30	5.55	0.25	4.68%
158.55	7.80	6.05	1.74	22.34%
Error Promedio			0.41	9.96%



Se ha calculado el error como la distancia entre el valor real y el simulado:

$$\mathbf{Error} = |\mathbf{Valor}_{Real} - \mathbf{Valor}_{Simulado}| \quad (5)$$

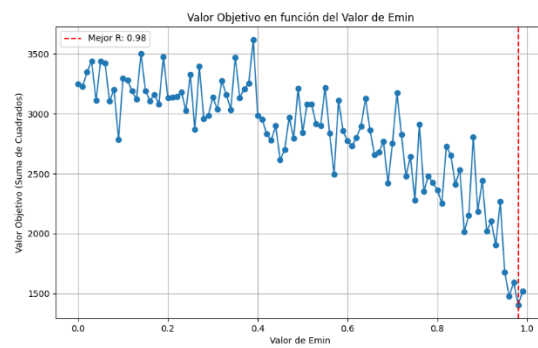
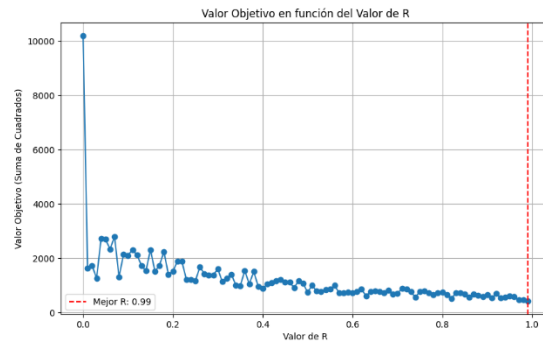
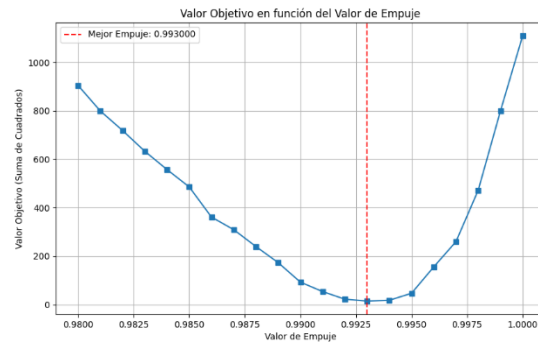
Y error porcentual como:

$$\mathbf{Error} \% = \mathbf{100\%} \left| \frac{\mathbf{Valor}_{Real} - \mathbf{Valor}_{Simulado}}{\mathbf{Valor}_{Real}} \right| \quad (6)$$

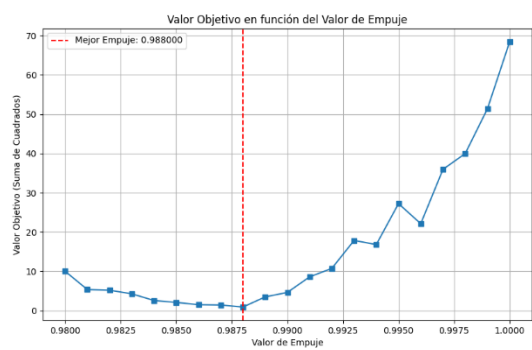
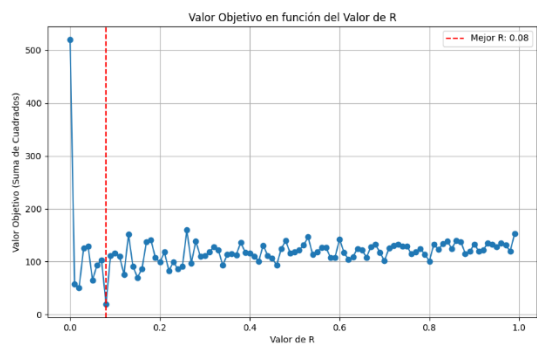
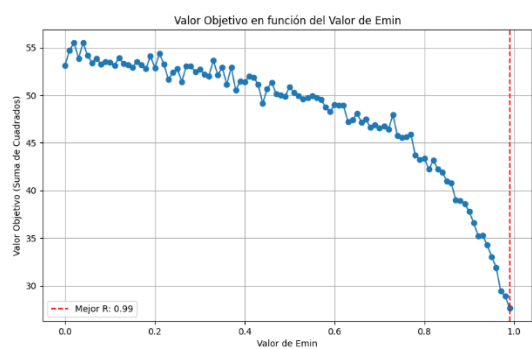
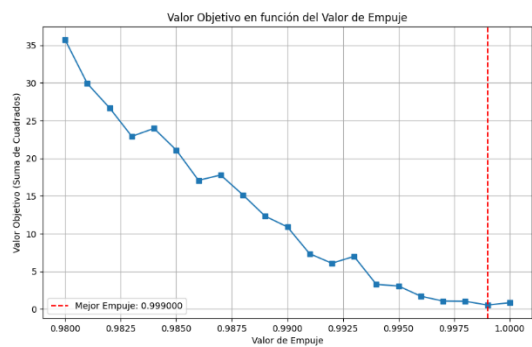
7.6 Calibraciones

Los ejemplos presentados en el informe correspondían a la calibración de los experimentos de Canales, a continuación, se muestran los otros experimentos calibrados en el trabajo.

Calibración experimentos de Segovia:



Calibración experimentos de Díaz



7.7 Programas utilizados para las simulaciones (Líneas de Código en Python)

SimuladorNuevo.py

#Codigo principal Actualizado

import os

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

import pandas as pd

from random import random

from math import sqrt

import csv

from MovementZone import geometry

from color import col

from searchvoids import search

from schvoid import search2

from flowmark4 import draw1

from time import time

import sys

from contextlib import redirect_stdout

import datetime

method = int(input("Ingrese metodo de explotacion (1 = bc o 2 = pc): "))

min_ext = int(input("Ingrese la minima extraccion: "))

```

max_ext = int(input("Ingrese la maxima extraccion: "))

dif_ext = int(input("Ingrese los tramos que se llevaran entre extracciones: "))

N = float(input("Ingrese N inicial: "))

N_final = N

MVC = float(input("Ingrese MV inicial: "))

MVC_final = MVC

num_sim = int(input("Ingrese numero de simulaciones: "))

class Tee:

    def __init__(self, *files):

        self.files = files

    def write(self, obj):

        for f in self.files:

            f.write(obj)

    def flush(self):

        for f in self.files:

            f.flush()

# Abre el archivo en modo de escritura, la salida estándar escribe en consola y también en el
archivo.

with open('muchotexto.txt', 'w') as f:

    tee = Tee(sys.stdout, f)

    with redirect_stdout(tee):

```

```

try:

    for i in range(num_sim):

        mvc = MVC

        while mvc <= MVC_final:

            n = N

            while n <= N_final:

                ext = min_ext

                while ext <= max_ext:

                    t0 = time()

#dcell:tamano bloques en cada eje (m)

                    dcell = [2,2,2]

                    d1 = dcell[0] #mismo dcell para todos los ejes

                    print("\n")

                    print("n simulacion=",i + 1)

                    print('n=',n)

                    print('mv>=',mvc)

                    print('ext=',ext)

#creacion de modelo de bloques inicial

#estados; 0: fijo, 1: vacio, 2: en movimiento, 3: pueden moverse

                    blockmodel = np.loadtxt('Random.csv',dtype=float,skiprows=1)

                    predf = pd.DataFrame(blockmodel)

                    column_names = ["x", "y", "z", "state", "d50", "id", "dist", "distacum",
"ley", "densidad", "mi"]

```



```

predf.columns = column_names

#densidad = predf['densidad'].iloc[0]

densidad = predf['densidad'].mean()

x = blockmodel[:,0]

y = blockmodel[:,1]

z = blockmodel[:,2]

h = max(y)

l = max(x)

w = max(z)

minx = min(x)

miny = min(y)

minz = min(z)

#cut_y = 50 #corte eje y calibracion

#cut_y = 10 #corte eje y Orellana (2012)

cut_x = 0

cut_z = 12


cut_y = 0 #corte eje y tiraje aislado Canales (2016)

#cut_y = 20 #corte eje y Panel Caving Canales (2016)

# Ubicacion punto de extraccion

#block caving

if method == 1:

    #PE = [[7500,0,7500]] #Chuq

```

#PE = [[35,0,12]] #punto extraccion calibracion exp1

#Segovia3

#PE = [15, 0, 2], [23, 0, 2], [31, 0, 2], [39, 0, 2], [47, 0, 2], [55, 0, 2], [63, 0, 2], [71, 0, 2], [79, 0, 2], [87, 0, 2], [95, 0, 2], [103, 0, 2], [111, 0, 2], [19, 0, 8], [27, 0, 8], [35, 0, 8], [43, 0, 8], [51, 0, 8], [59, 0, 8], [67, 0, 8], [75, 0, 8], [83, 0, 8], [91, 0, 8], [99, 0, 8], [107, 0, 8], [115, 0, 8], [15, 0, 20], [23, 0, 20], [31, 0, 20], [39, 0, 20], [47, 0, 20], [55, 0, 20], [63, 0, 20], [71, 0, 20], [79, 0, 20], [87, 0, 20], [95, 0, 20], [103, 0, 20], [111, 0, 20], [19, 0, 26], [27, 0, 26], [35, 0, 26], [43, 0, 26], [51, 0, 26], [59, 0, 26], [67, 0, 26], [75, 0, 26], [83, 0, 26], [91, 0, 26], [99, 0, 26], [107, 0, 26], [115, 0, 26]

#PE=[[67, 0, 20], [65, 0, 15], [66, 0, 5], [64, 0, 0], [59, 0, 20], [57, 0, 15], [58, 0, 5], [56, 0, 0], [51, 0, 20], [49, 0, 15], [50, 0, 5], [48, 0, 0], [43, 0, 20], [41, 0, 15], [42, 0, 5], [40, 0, 0], [35, 0, 20], [33, 0, 15], [34, 0, 5], [32, 0, 0], [27, 0, 20], [25, 0, 15], [26, 0, 5], [24, 0, 0], [19, 0, 20], [17, 0, 15], [18, 0, 5], [16, 0, 0], [11, 0, 20], [9, 0, 15], [10, 0, 5], [8, 0, 0], [2, 0, 5], [0, 0, 0], [0, 0, 15], [2, 0, 20]]

#PE = [[26,0,18]] #punto extraccion Orellana (2012)

#test 2 canales

PE =

[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,6],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,6],[56,0,0],[50,0,6],[48,0,0],
[27,0,20],[25,0,15],[19,0,20],[17,0,15],[18,0,6],[16,0,0],[11,0,20],[9,0,15],[10,0,6],[8,0,0],[
3,0,20],[1,0,15],[2,0,6],[0,0,0]]

#test 3 canales

#PE =

[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,6],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,6],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,1
5],[50,0,6],[48,0,0],[42,0,6],[40,0,0],[35,0,20],[33,0,15],[27,0,20],[25,0,15],[26,0,6],[24,0,0
],[19,0,20],[17,0,15],[18,0,6],[16,0,0],[11,0,20],[9,0,15],[10,0,6],[8,0,0],[3,0,20],[1,0,15],[2,
0,6],[0,0,0]]

#DIAZ BC

#PE=[[0,0,0],[8,0,0],[17,0,0],[25,0,0],[33,0,0],[41,0,0],[50,0,0],[58,0,0],[66,0,0],[2,0,6],[11,0,6],[19,0,6],[28,0,6],[36,0,6],[45,0,6],[53,0,6],[62,0,6],[70,0,6],[0,0,16],[8,0,16],[17,0,16],[25,0,16],[33,0,16],[41,0,16],[50,0,16],[58,0,16],[66,0,16],[2,0,22],[11,0,22],[19,0,22],[28,0,22],[36,0,22],[45,0,22],[53,0,22],[62,0,22],[70,0,22]]

*****EXP 4 DIAZ: HACEMOS EL PANEL POR TRAMOS*****

#PE = [[66,0,5],[64,0,0]] #PE HASTA 2.5KG EXT N13

#PE = [[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0],[58,0,5],[56,0,0]] #9.7KG
EXT N 4 A 12

#PE =
[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[50,0,5],[48,0,0]]
#22KG N10 A 17

#PE =
[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,15],[50,0,5],[48,0,0],[42,0,5],[40,0,0]] #40KG N12 A 21

#PE =
[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,15],[50,0,5],[48,0,0],[43,0,20],[41,0,15],[42,0,5],[40,0,0],[34,0,5],[32,0,0]] #128KG N17 A 52

#E3 Diaz

#PE = [[32, 0, 0], [34, 0, 5]] # Paso 1

#PE = [[32, 0, 0], [34, 0, 5], [40, 0, 0], [42, 0, 5], [48, 0, 0], [50, 0, 5], [41, 0, 20], [43, 0, 15]] # Paso 2

#PE = [[32, 0, 0], [34, 0, 5], [40, 0, 0], [42, 0, 5], [48, 0, 0], [50, 0, 5], [41, 0, 20], [43, 0, 15], [56, 0, 0], [58, 0, 5]] # Paso 3

#PE = [[32, 0, 0], [34, 0, 5], [40, 0, 0], [42, 0, 5], [48, 0, 0], [50, 0, 5], [41, 0, 20], [43, 0, 15], [56, 0, 0], [58, 0, 5], [64, 0, 0], [66, 0, 5], [57, 0, 15], [59, 0, 20]] #
Paso 4

#PE = [[32, 0, 0], [34, 0, 5], [40, 0, 0], [42, 0, 5], [48, 0, 0], [50, 0, 5],
[41, 0, 20], [43, 0, 15], [56, 0, 0], [58, 0, 5], [64, 0, 0], [66, 0, 5], [57, 0, 15], [59, 0, 20], [65,
0, 15], [67, 0, 20]] # Paso 5

#Segovia3

#PE = [15, 0, 2], [23, 0, 2], [31, 0, 2], [39, 0, 2], [47, 0, 2], [55, 0, 2], [63,
0, 2], [71, 0, 2], [79, 0, 2], [87, 0, 2], [95, 0, 2], [103, 0, 2], [111, 0, 2], [19, 0, 8], [27, 0, 8],
[35, 0, 8], [43, 0, 8], [51, 0, 8], [59, 0, 8], [67, 0, 8], [75, 0, 8], [83, 0, 8], [91, 0, 8], [99, 0, 8],
[107, 0, 8], [115, 0, 8], [15, 0, 20], [23, 0, 20], [31, 0, 20], [39, 0, 20], [47, 0, 20], [55, 0, 20],
[63, 0, 20], [71, 0, 20], [79, 0, 20], [87, 0, 20], [95, 0, 20], [103, 0, 20], [111, 0, 20], [19, 0,
26], [27, 0, 26], [35, 0, 26], [43, 0, 26], [51, 0, 26], [59, 0, 26], [67, 0, 26], [75, 0, 26], [83, 0,
26], [91, 0, 26], [99, 0, 26], [107, 0, 26], [115, 0, 26]

#Canales 1

#PE = [[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0]] #PE 1 al 4 6.35kg ext0-
20

#PE =
[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0]] #PE 1 al
8 14.86kg ext12-22

#PE =
[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,1
5],[50,0,5],[48,0,0]] #PE 1 al 12 27.46kg ext16-26

#PE =
[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,1
5],[50,0,5],[48,0,0],[43,0,20],[41,0,15],[42,0,5],[40,0,0]] #PE 1 al 16 44.09kg ext22-32

#PE =
[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,1

5],[50,0,5],[48,0,0],[43,0,20],[41,0,15],[42,0,5],[40,0,0],[35,0,20],[33,0,15],[34,0,5],[32,0,0]] #PE 1 al 20 54.36kg ext31

#PE =

[[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,15],[50,0,5],[48,0,0],[43,0,20],[41,0,15],[42,0,5],[40,0,0],[35,0,20],[33,0,15],[34,0,5],[32,0,0]] #PE 5 al 20 62.72kg ext46

#PE =

[[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,15],[50,0,5],[48,0,0],[43,0,20],[41,0,15],[42,0,5],[40,0,0],[35,0,20],[33,0,15],[34,0,5],[32,0,0],[27,0,20],[25,0,15],[26,0,5],[24,0,0]] #PE 5 al 24 82.91

#PE =

[[51,0,20],[49,0,15],[50,0,5],[48,0,0],[43,0,20],[41,0,15],[42,0,5],[40,0,0],[35,0,20],[33,0,15],[34,0,5],[32,0,0],[27,0,20],[25,0,15],[26,0,5],[24,0,0],[19,0,20],[17,0,15],[18,0,5],[16,0,0]] #PE 9 al 28 103.56kg

PE_x = PE[0][0]

PE_y = PE[0][1]

PE_z = PE[0][2]

#panel caving

elif method == 2:

PE = [[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0]] #PE 1 al 4

PE02 =

[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0]] #PE 1 al 8

PE03 =

[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,15],[50,0,5],[48,0,0]] #PE 1 al 12

PE04 =
[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,15],[50,0,5],[48,0,0],[43,0,20],[41,0,15],[42,0,5],[40,0,0]] #PE 1 al 16

PE05 =
[[67,0,20],[65,0,15],[66,0,5],[64,0,0],[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,15],[50,0,5],[48,0,0],[43,0,20],[41,0,15],[42,0,5],[40,0,0],[35,0,20],[33,0,15],[34,0,5],[32,0,0]] #PE 1 al 20

PE06 =
[[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,15],[50,0,5],[48,0,0],[43,0,20],[41,0,15],[42,0,5],[40,0,0],[35,0,20],[33,0,15],[34,0,5],[32,0,0]] #PE 5 al 20

PE07 =
[[59,0,20],[57,0,15],[58,0,5],[56,0,0],[51,0,20],[49,0,15],[50,0,5],[48,0,0],[43,0,20],[41,0,15],[42,0,5],[40,0,0],[35,0,20],[33,0,15],[34,0,5],[32,0,0],[27,0,20],[25,0,15],[26,0,5],[24,0,0]] #PE 5 al 24

PE08 =
[[51,0,20],[49,0,15],[50,0,5],[48,0,0],[43,0,20],[41,0,15],[42,0,5],[40,0,0],[35,0,20],[33,0,15],[34,0,5],[32,0,0],[27,0,20],[25,0,15],[26,0,5],[24,0,0],[19,0,20],[17,0,15],[18,0,5],[16,0,0]] #PE 9 al 28

#PE = [[40,0,0],[41,0,6],[47,0,14],[48,0,20]] #PE 1 al 4

#PE02 =
[[40,0,0],[41,0,6],[47,0,14],[48,0,20],[47,0,0],[48,0,6],[54,0,14],[56,0,20]] #PE 1 al 8

#PE03 =
[[40,0,0],[41,0,6],[47,0,14],[48,0,20],[47,0,0],[48,0,6],[54,0,14],[56,0,20],[55,0,0],[56,0,6],[62,0,14],[63,0,20]] #PE 1 al 12

#PE04 =
[[40,0,0],[41,0,6],[47,0,14],[48,0,20],[47,0,0],[48,0,6],[54,0,14],[56,0,20],[55,0,0],[56,0,6],[62,0,14],[63,0,20]] #PE 1 al 12

```
#PE05 =
[[40,0,0],[41,0,6],[47,0,14],[48,0,20],[47,0,0],[48,0,6],[54,0,14],[56,0,20],[55,0,0],[56,0,6],
[62,0,14],[63,0,20]] #PE 1 al 12
```

```
#PE06 =
[[40,0,0],[41,0,6],[47,0,14],[48,0,20],[47,0,0],[48,0,6],[54,0,14],[56,0,20],[55,0,0],[56,0,6],
[62,0,14],[63,0,20]] #PE 1 al 12
```

```
#PE07 =
[[40,0,0],[41,0,6],[47,0,14],[48,0,20],[47,0,0],[48,0,6],[54,0,14],[56,0,20],[55,0,0],[56,0,6],
[62,0,14],[63,0,20]] #PE 1 al 12
```

```
#PE08 =
[[40,0,0],[41,0,6],[47,0,14],[48,0,20],[47,0,0],[48,0,6],[54,0,14],[56,0,20],[55,0,0],[56,0,6],
[62,0,14],[63,0,20]] #PE 1 al 12
```

```
PE_final = [PE,PE02,PE03,PE04,PE05,PE06,PE07,PE08]
```

```
PEx = PE[1][0]
```

```
PEz = PE[1][2]
```

```
PEy = PE[1][1]
```

```
#busqueda de vacios y cambio de estado, generacion del flujo
```

```
#block caving
```

```
if method == 1:
```

```
    wr = -99
```

```
    num_extraction_total = ext * len(PE)
```

```
    flujo = draw1(blockmodel,PE,dcell,6,6,n,0,mvc,ext,-99,wr) #Los números
4,4 son las dimensiones del P.E.
```

```
    bmodel=flujo[0]
```

```
#panel caving
```

```
#wr: zona inactiva (de no movimiento)
```

```
elif method == 2:
```

```
WR = [108, 94, 74, 62, 57, 52, 35, 23]
```

```
blockmodel2a = blockmodel
```

```
extraction = ext
```

```
num_extraction_total = 0
```

```
for q in range(len(WR)):
```

```
    wr = WR[q]
```

```
    PEs = PE_final[q]
```

```
    flujo = draw1(blockmodel2a, PEs, dcell, 6, 6, n, 0, mvc, extraction, -99, wr)
```

```
    bmodel = flujo[0]
```

```
    extraction = extraction - flujo[3]
```

```
    num_extraction_total = num_extraction_total + flujo[3] * len(PEs)
```

```
    if min(blockmodel2a[flujo[4], 0]) > wr:
```

```
        print("NO pasa a Wr= " + str(wr))
```

```
        break
```

```
if q == 0:
```

```
    print("PE abiertos= 1-4")
```

```
elif q == 1:
```

```
    print("PE abiertos= 1-8")
```

```
elif q == 2:
```

```
    print("PE abiertos= 1-12")
```



```

elif q == 3:

    print("PE abiertos= 1-16")

elif q == 4:

    print("PE abiertos= 1-20")

elif q == 5:

    print("PE abiertos= 5-20")

elif q == 6:

    print("PE abiertos= 5-24")

elif q == 7:

    print("PE abiertos= 9-28")

```

#posicion en mb (indi) y estado (state) de bloques con corte en x,y,z

```

indx = [n1 for n1 in range(0,len(bmodel)) if x[n1]==cut_x]

indiz = [n2 for n2 in range(0,len(bmodel)) if z[n2]==cut_z]

indiy = [n3 for n3 in range(0,len(bmodel)) if y[n3]==cut_y]

statex = bmodel[indix,3]

statez = bmodel[indiz,3]

statey = bmodel[indiy,3]

```

#kk: vector posicion de bloques vacios (estado 1) y en movimiento (estado 2)

```

kk=[ii for ii in range(0,len(bmodel)) if bmodel[ii,3]==2 or bmodel[ii,3]==1]

```

#Wmz y Hmz

```

Mzone = geometry(bmodel,kk,dcell,PEx,PEz)

WMzonex = Mzone[1]

```

```

WMzonez = Mzone[2]

WIMZ = (WMzonex + WMzonez) / 2

HMzone = Mzone[0]

print(HMzone)

print('W,imz =', WIMZ, 'cm', 'H,imz =', HMzone, 'cm')

#Guardamos en Esf.csv

headers = ["x", "y", "z", "state", "d50", "id", "dist", "distacum", "ley",
"densidad", "esfuerzo_v"]

np.savetxt('Esf.csv', bmodel, delimiter=',', header=','.join(headers),
comments="", fmt='%s')

df = pd.read_csv('Esf.csv')

#Masa extraida, contando los vacios ***OJO LAS UNIDADES

cont_v = df[df['state'] == 1].shape[0]

masa_extraida = 1000*cont_v*densidad*((d1/100)**3)

print('masa_extraida =',masa_extraida,'[g]')

##Graficos de flujo

#area=10

#colorx = list(statex)

#ci = 0

#while ci<len(indix):

#   colorx[ci]=col(bmodel[indix[ci],3])

#   ci=ci+1

#colorz = list(statez)

```

```

#ci = 0

#while ci<len(indiz):

#   colorz[ci]=col(bmodel[indiz[ci],3])

#   ci=ci+1

#colory = list(statey)

#ci = 0

#while ci<len(indiy):

#   colory[ci]=col(bmodel[indiy[ci],3])

#   ci=ci+1


#Graficos de flujo y esfuerzo

#corte eje z


#plt.figure(figsize=(8, 6))

#plt.subplot(1,2,1)

#plt.title('Vista frontal, plano XY (Z=' + str(cut_z) + '[cm]')

#plt.ylabel('Eje Y [cm]')

#plt.xlabel('Eje X [cm]')

#plt.axis([-2, 1 + 2, -2, h + 2])

#plt.grid()

#plt.scatter(x[indiz], y[indiz], s=area, c=colorz,marker='s', alpha=1)


# Graficar esf el corte en el plano XY, mismo corte

```

```

#cut_data = df[df['z'] == cut_z]

#x_values = cut_data['x']

#y_values = cut_data['y']

#esfuerzo_v_values = cut_data['esfuerzo_v']

#d50_values = cut_data['d50']

#plt.subplot(1,2,2)

#plt.xlabel('Eje X [cm]')

#plt.ylabel('Eje Y [cm]')

#plt.grid()

#plt.scatter(x[indiz], y[indiz], s=area, c=esfuerzo_v_values,
cmap='coolwarm', marker='s', alpha=1)

#plt.colorbar(label='Esfuerzo Vertical [kPa]')

#plt.tight_layout()

#plt.show()

#plt.savefig(f'grafico1extraccion_{ext}.png')

#plt.close()

```

#Graficos fragmentacion

#Graficamos una cara en el plano XY donde se vea el d50 en el medio de
la dimension z

```
#x_min, x_max = df['x'].min(), df['x'].max()
```

```
#y_min, y_max = df['y'].min(), df['y'].max()
```

```

#z_min, z_max = df['z'].min(), df['z'].max()

#filtered_df = df[(df['state'] != 1)]

#z_medio = df['z'].max() / 2

#df_filtrado_z = filtered_df[np.isclose(filtered_df['z'], z_medio)]

#df_filtrado_y = filtered_df[filtered_df['y'] == 10]

#fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2, figsize=(8, 6))

#Gráfico xy al valor medio de z

#sc1 = ax1.scatter(df_filtrado_z['x'], df_filtrado_z['y'],
c=df_filtrado_z['d50'], cmap='rainbow', marker='s', s=area)

#ax1.set_xlabel('x')

#ax1.set_ylabel('y')

#ax1.set_title(f'Valores de d50 z = {z_medio:.2f}')

#ax1.grid(True)

#fig.colorbar(sc1, ax=ax1, label='d50')

#ax1.set_xlim(x_min, x_max)

#ax1.set_ylim(y_min, y_max)

# Gráfico xz donde y=10 usando marcadores grandes

#sc2 = ax2.scatter(df_filtrado_y['x'], df_filtrado_y['z'],
c=df_filtrado_y['d50'], cmap='rainbow', marker='s', s=area)

#ax2.set_xlabel('x')

```

```

#ax2.set_ylabel('z')

#ax2.set_title('Valores de d50 y=10')

#ax2.grid(True)

#fig.colorbar(sc2, ax=ax2, label='d50')

#ax2.set_xlim(x_min, x_max)

#ax2.set_ylim(z_min, z_max)


# Ajustar la disposición y guardar el gráfico

#plt.tight_layout()

#plt.show()

****Para guardar los graf usar las lineas de abajo y borrar los .show()

#plt.savefig(f'grafico2extraccion_{ext}.png')

#plt.close()

#

t = time() - t0

print("tiempo Simulador3D = " + str(round(t, 2)) + " s")

ext += dif_ext

n += 1

mvc += 1

i += 1

except Exception as e:

    print("Ocurrió un error:", e)

```

```
flowmark4.py
```

```
from schvoid import search2
```

```
from random import random
```

```
import numpy as np
```

```
import math as mt
```

```
from time import time
```

```
from MovementZone import geometry
```

```
from itertools import repeat
```

```
import pandas as pd
```

```
from KLOAD import stress
```

```
def draw1(bmodel, PE, dcell, ancho, largo, n, m, mvc, extractions, simula, wr):
```

```
    t1 = time()
```

```
    d1x = dcell[0]
```

```
    d1y = dcell[1]
```

```
    d1z = dcell[2]
```

```
    d2xz = mt.sqrt((d1x * d1x) + (d1z * d1z))
```

```
    d2xy = mt.sqrt((d1x * d1x) + (d1y * d1y))
```

```
    d2yz = mt.sqrt((d1y * d1y) + (d1z * d1z))
```

```
    d3 = mt.sqrt((d1x * d1x) + (d1y * d1y) + (d1z * d1z))
```

```
    x = list(set(bmodel[:,0] / d1x))
```

```
    y = list(set(bmodel[:,1] / d1y))
```

```
    z = list(set(bmodel[:,2] / d1z))
```

```
a1 = 1
```

```
b1 = len(x)
```

```
c1 = len(z) * b1
```

```
cc2 = 0
```

```
h = max(bmodel[:,1])
```

```
ul = 0
```

```
void8 = np.zeros((len(bmodel),1))
```

```
p1 = 0.05
```

```
p2 = 0.1
```

```
p3 = p1
```

```
p4 = p2
```

```
p5 = 0.4
```

```
p6 = p2
```

```
p7 = p1
```

```
p8 = p2
```

```
p9 = p1
```

```
p01 = p1
```

```
p02 = p2
```

```
p03 = p3
```

```
p04 = p4
```

```
p05 = p5
```

```
p06 = p6
```

```
p07 = p7
```



```

p08 = p8

p09 = p9

r = 0

d12 = [d3, d2xy, d3, d2yz, d1y, d2yz, d3, d2xy, d3]

ext = extractions

PEx = int((PE[0][0]-min(x)*d1x) / d1x)

PEy = int((PE[0][1]-min(y)*d1y) / d1y)

PEz = int((PE[0][2]-min(z)*d1z) / d1z)

tp1 = int(largo / d1z)

tp2 = int(ancho / d1x)

perten = -99 * np.ones((len(bmodel),1))

kk0x = list(range(PEx, PEx + tp2))

kk0y = list(range(PEy, PEy + 1))

kk0z = list(range(PEz, PEz + tp1))

kk0 = [[0, 0, 0]] * len(kk0x) * len(kk0y) * len(kk0z)

kk02 = [0] * len(kk0)

contador = 0

iezi = [-99] * len(bmodel)

for kk in range(len(kk0y)):

    for ll in range(len(kk0x)):

        for zzz in range(len(kk0z)):

            kk0[contador] = [kk0x[ll], kk0y[kk], kk0z[zzz]]

            kk02[contador] = a1 * (kk0x[ll]) + c1 * (kk0y[kk]) + b1 * (kk0z[zzz])

```

```

        iezi[kk02[contador]] = 1

        contador = contador + 1

void2 = np.array(kk02)

void2m = kk0

extraido = [-99] * (len(void2) * ext + 0)

leyy = [-99] * (len(void2) * ext + 0)

perten[void2] = 1 * np.ones((len(void2),1))

for ij in range(1, len(PE)):

    PEx = int((PE[ij][0]-min(x)*d1x) / d1x)

    PEy = int((PE[ij][1]-min(y)*d1y) / d1y)

    PEz = int((PE[ij][2]-min(z)*d1z) / d1z)

    kk0x = list(range(PEx, PEx + tp2))

    kk0y = list(range(PEy, PEy + 1))

    kk0z = list(range(PEz, PEz + tp1))

    kk0 = [[0, 0, 0]] * len(kk0x) * len(kk0y) * len(kk0z)

    kk02 = [0] * len(kk0)

    contador = 0

    for kk in range(0, len(kk0y)):

        for ll in range(0, len(kk0x)):

            for zzz in range(0, len(kk0z)):

                kk0[contador] = [kk0x[ll], kk0y[kk], kk0z[zzz]]

                kk02[contador] = a1 * (kk0x[ll]) + c1 * (kk0y[kk]) + b1 * (kk0z[zzz])

                contador = contador + 1

```

```

b = np.array(kk0)

bb = np.array(kk02)

perten[kk02] = (ij + 1) * np.ones((len(kk02),1))

void2 = np.concatenate((void2, bb), axis=0)

void2m = np.concatenate((void2m, b), axis=0)

dilo = list(range(len(bmodel)))

dilo2 = dilo

leyex = bmodel[:,8]

leyex2 = bmodel[:,8]

extraido[0:len(void2)] = void2

leyy[0:len(void2)] = bmodel[void2,8]

void5 = void2

void3 = void2

void4 = np.array(void2)

bmodel[void2,3] = np.ones((1,len(void2)))

iiii = 1

possc = [0] * 9

posic = [0] * 8

audio2 = 0

void55 = np.array(void5)

num_extraction = 0

for i in repeat(None, ext - 1):

    p = 0

```

```

v = 0

a = np.array(void5)

b = np.array(void3)

void4 = np.concatenate((void4, b), axis=0)

void4 = sorted(list(set(void4)))

void2 = np.concatenate((a, b), axis=0)

void2 = sorted(list(set(void2)))

m22 = [None] * len(void2)

void3 = void2

bmodel[void2,3] = np.ones((1,len(void2)))

cota = list(set(bmodel[:,1]))

void_auxiliar = void2

for cc in cota:

    v1 = 0

    cota_v = pd.DataFrame(bmodel[void3,1])

    voidc = list(cota_v[cota_v[0] == cc].index)

    void2c = [aux2 for aux2 in voidc]

    if void3 == void_auxiliar and max(bmodel[void3,1]) < cc:

        break

    else:

        void_auxiliar = void3

for v1 in void2c:

    if v1 > len(bmodel):

```

continue

else:

d1d1 = [-1, 0, 1]

conta = 0

conta2 = 0

for ab in d1d1:

for abc in d1d1:

mm = void3[v1]

aic2 = mm

v22m = [int(mm - c1 * int(mm/c1) - b1 * (int((mm - c1 * int(mm / c1)) /
b1))),

int(mm / c1), int((mm - c1 * int(mm / c1)) / b1)]

possc[conta] = (v22m[0] + ab) * 1 + c1 * (v22m[1] + 1) + b1 * (v22m[2] +
abc)

if possc[conta] > len(bmodel) or (v22m[0] + ab) > max(x) or \

(v22m[0] + ab) < min(x) or \

(v22m[1] + 1) > max(y) or (v22m[1] + 1) < min(y) or \

(v22m[2] + abc) > max(z) or \

(v22m[2] + abc) < min(z):

possc[conta] = -1

conta = conta + 1

if ab == 0 and abc == 0:

conta2 = conta2 - 1

else:

posic[conta2] = (v22m[0] + ab) * 1 + \

c1 * (v22m[1]) + b1 * (v22m[2] + abc)

if possc[conta2] > len(bmodel) or \

(v22m[0] + ab) > max(x) or \

(v22m[0] + ab) < min(x) or \

(v22m[2] + abc) > max(z) or (v22m[2] + abc) < min(z):

posic[conta2] = -1

conta2 = conta2 + 1

r = 0

aux = search2(bmodel, possc, posic)

mv = aux[0]

m22[v1] = mv[0]

pos = aux[1]

if bmodel[void3[v1],3] == 1 and mv[0] > mvc:

audio2 = audio2 + 1

if mv[1] + mv[2] + mv[3] + mv[4] + mv[5] + mv[6] + mv[7] + \

mv[8] + mv[9] == 9:

r = 99

pass

if mv[1] * mv[2] * mv[3] * mv[4] * mv[5] * mv[6] * \

mv[7] * mv[8] * mv[9] == 0:

denominador = (d12[0] ** -n) + (d12[1] ** -n) + (d12[2] ** -n) + \

$$(d12[3] ** -n) + (d12[4] ** -n) + \backslash$$

$$(d12[5] ** -n) + (d12[6] ** -n) + (d12[7] ** -n) + (d12[8] ** -n)$$

$$p1 = (d12[0] ** -n) / \text{denominador}$$

$$p2 = (d12[1] ** -n) / \text{denominador}$$

$$p3 = (d12[2] ** -n) / \text{denominador}$$

$$p4 = (d12[3] ** -n) / \text{denominador}$$

$$p5 = (d12[4] ** -n) / \text{denominador}$$

$$p6 = (d12[5] ** -n) / \text{denominador}$$

$$p7 = (d12[6] ** -n) / \text{denominador}$$

$$p8 = (d12[7] ** -n) / \text{denominador}$$

$$p9 = (d12[8] ** -n) / \text{denominador}$$

$$p01 = p1$$

$$p02 = p2$$

$$p03 = p3$$

$$p04 = p4$$

$$p05 = p5$$

$$p06 = p6$$

$$p07 = p7$$

$$p08 = p8$$

$$p09 = p9$$

$$\text{zero} = \text{np.ones}((9,1))$$

for im in range(1,10):

$$\text{if pos[im - 1] == -1 or mv[im] == 1 or zero[im - 1] == 0:}$$

if im == 1:

p1 = 0

if im == 2:

p2 = 0

if im == 3:

p3 = 0

if im == 4:

p4 = 0

if im == 5:

p5 = 0

if im == 6:

p6 = 0

if im == 7:

p7 = 0

if im == 8:

p8 = 0

if im == 9:

p9 = 0

p12 = [0, p1, p1 + p2, p1 + p2 + p3, p1 + p2 + p3 + p4, p1 + p2 + p3 + p4 +

p5,

p1 + p2 + p3 + p4 + p5 + p6,

p1 + p2 + p3 + p4 + p5 + p6 + p7, p1 + p2 + p3 + p4 + p5 + p6 + p7 + p8,

p1 + p2 + p3 + p4 + p5 + p6 + p7 + p8 + p9]


```

p12 = list(np.array(p12) / p12[9])

p = random()

for ii in range(9):

    if r < 1.0:

        if p < p12[ii + 1] and p >= p12[ii]:

            #Distancias recorridas, se calculan solo Verticalmente

            prev_y_pos = bmodel[void3[v1], 1]

            new_y_pos = bmodel[pos[ii], 1]

            distance_moved = new_y_pos - prev_y_pos

            bmodel[void3[v1], 6] += abs(distance_moved)

            bmodel[void3[v1], 7] += abs(distance_moved)


            dilo[void3[v1]] = dilo2[pos[ii]]

            perten[pos[ii]] = perten[void3[v1]]

            dilo2[pos[ii]] = void3[v1]

            leyex[void3[v1]] = leyex2[pos[ii]]

            leyex2[pos[ii]] = -99

            for alau in void5:

                if void3[v1] == alau:

                    lp = np.array([dilo[void3[v1]]])

                    iezi[int(lp)] = 1

                    void55 = np.concatenate((void55, lp), axis=0)

                    void55 = list(set(void55))

```

```
bmodel[void3[v1], 3] = 2
```

```
bmodel[pos[ii], 3] = 1
```

```
void3[v1] = pos[ii]
```

```
p1 = p01
```

```
p2 = p02
```

```
p3 = p03
```

```
p4 = p04
```

```
p5 = p05
```

```
p6 = p06
```

```
p7 = p07
```

```
p8 = p08
```

```
p9 = p09
```

```
b = np.array(void3)
```

```
boid4 = np.concatenate((void4, b), axis=0)
```

```
boid4 = sorted(list(set(boid4)))
```

```
void8[boid4] = 1 + void8[boid4]
```

```
iiii = iiii + 1
```

```
num_extraction += 1
```

```
if (min(bmodel[void3, 0]) <= wr) and (wr != -99):
```

```
    print("Pasa a Wr= " + str(wr) + "!!!!!!")
```

```
    break
```

```
flowmodel = bmodel
```

```

blocksmoved = len(void4)

flowmodel[:, 8] = leyex

#Aplicamos esfuerzos

kk=[ii for ii in range(0,len(bmodel)) if bmodel[ii,3]==2 or bmodel[ii,3]==1]

#Wmz y Hmz

Mzone = geometry(bmodel, kk, dcell, PEx, PEz)

HMzone = Mzone[0]

Himzf = HMzone/h

if Himzf > 1:

    Himzf = 1

esfuerzos = stress(flowmodel, d1y, 0, 0, Himzf)

ultimo=esfuerzos[0]

# Convertir el numpy array a un DataFrame de pandas

df = pd.DataFrame(ultimo)

column_names = ["x", "y", "z", "state", "d50", "id", "dist", "distacum", "ley", "densidad",
"esfuerzo_v"]

df.columns = column_names

#FRAG2

# Definir los valores de alpha, beta y Ucs

alpha = 4.45

beta = 0.75

Ucs = 100

esf = df.iloc[:, 10]

```

```

# Calcular R50

R50 = alpha * (df['esfuerzo_v'] / Ucs) ** beta

df['R50'] = R50

df['esf_frag'] = 0.0

distancia_min = 1000 # Definir la distancia mínima para aplicar FRAG2 ***OJO, SI EL
VALOR ES MUY BAJO SE RALENTIZA MUCHO EL CÓDIGO***

filtered_df = df[df['dist'] >= distancia_min]

for index, row in filtered_df.iterrows():

    x, y, z = row['x'], row['y'], row['z']

    dist = row['dist']

    esfuerzo_vals = []

    for i in range(0, int(dist)+1, 2): # Incrementar y en pasos de 2

        y_nuevo = y + i

        esfuerzo_vals.extend(df[(df['x'] == x) & (df['y'] == y_nuevo) & (df['z'] ==
z)][['esfuerzo_v']].values)

    if esfuerzo_vals:

        promedio_esfuerzo = sum(esfuerzo_vals) / len(esfuerzo_vals)

        df.at[index, 'esf_frag'] = promedio_esfuerzo

#Aplicamos Formula

df.loc[df['dist'] >= distancia_min, 'd50f'] = df['d50'] - df['R50'] * df['dist']/1000
#*****Aqui cambiar segun las unidades*****

#Copiar para los d20 y 280 y lo que sea

```

```
#Actualizamos
```

```
df.loc[df['d50f'] < 0, 'd50f'] = 0
```

```
df.loc[df['d50'] < 0, 'd50'] = 0
```

```
df.loc[df['d50f'].notna(), 'd50'] = df['d50f']
```

```
#Eliminamos las columnas auxiliares, para solamente retornar los valores actualizados.
```

Importante borrar lo que no queremos retornar

```
df.drop(columns=['d50f'], inplace=True)
```

```
df.drop(columns=['R50'], inplace=True)
```

```
df.drop(columns=['esf_frag'], inplace=True)
```

```
#volvemos a numpyarray para poder retornar la funcion (Obligatorio)
```

```
dff = df.to_numpy()
```

```
t2 = time() - t1
```

```
print(f"Tiempo de procesamiento: {t2} segundos")
```

```
return dff,void4,blocksmoved,num_extraction,void3
```

KLOAD.py

```
import numpy as np
```

```
import math as mt
```

```
import statistics as st
```

```
from time import time
```

```
from random import random
```

```
#logica para calcular esf en la base del material particulado
```

```
def stress(model, d, cortez, cortej,x):
```

```

t1 = time()

swell = 0.0 #seditest

#Ahora empuje es una funcion del porcentaje de extraccion

empuje = #(-0.0074*x + 0.0537*(x**2) - 0.0374*(x**3) + 0.986) #Diaz

empujemin = 0.95

relajacion = 0.47

xl = int(max(model[:,0]) / d)

yl = int(max(model[:,1]) / d)

zl = int(max(model[:,2]) / d)

massmodel = model

#calculamos distancias iniciales de un bloque superior hacia 9 bloques inferiores

mi = 0

xx = list(set((model[:,0] / d) + 1))

yy = list(set((model[:,1] / d) + 1))

zz = list(set((model[:,2] / d) + 1))

b2 = len(xx)

c2 = len(zz) * b2

#vector que disminuye el empuje en zona de movimiento

emp = np.ones((len(model),1))

em = 0

while em < len(model):

    if model[em,3] == 2:

```

```
emp[em] = empujemin
```

```
else:
```

```
emp[em] = empuje
```

```
em = em + 1
```

```
#masas iniciales pasadas a kPa
```

```
while mi < len(model):
```

```
    if model[mi,3] != 1:
```

```
        massmodel[mi,10] = (((model[mi,9] / (1 + swell)) * ((d/100) ** 3)) * 9.8 / ((d**2)/10000) / 1000)
```

```
    else:
```

```
        massmodel[mi,10] = 0
```

```
    mi = mi + 1
```

```
#bajamos sumando masas superiores sobre las inferiores (ordenado vista en planta de arriba a derecha)
```

```
pox = [-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1]
```

```
pond = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
```

```
mii = len(model) - 1
```

```
while mii > 0:
```

```
    if massmodel[mii,3] != 1:
```

```
        pox[0] = int((massmodel[mii,0] / d - 1) + (b2 * (massmodel[mii,2] / d + 1)) + (c2 * (massmodel[mii,1] / d - 1)))
```

```
pox[1] = int((massmodel[mii,0] / d) + (b2 * (massmodel[mii,2] / d + 1)) + (c2 *  
(massmodel[mii,1] / d - 1)))
```

```
pox[2] = int((massmodel[mii,0] / d + 1) + (b2 * (massmodel[mii,2] / d + 1)) + (c2 *  
(massmodel[mii,1] / d - 1)))
```

```
pox[3] = int((massmodel[mii,0] / d - 1) + (b2 * (massmodel[mii,2]) / d) + (c2 *  
(massmodel[mii,1] / d - 1)))
```

```
pox[4] = int((massmodel[mii,0] / d) + (b2 * (massmodel[mii,2]) / d) + (c2 *  
(massmodel[mii,1] / d - 1)))
```

```
pox[5] = int((massmodel[mii,0] / d + 1) + (b2 * (massmodel[mii,2]) / d) + (c2 *  
(massmodel[mii,1] / d - 1)))
```

```
pox[6] = int((massmodel[mii,0] / d - 1) + (b2 * (massmodel[mii,2] / d - 1)) + (c2 *  
(massmodel[mii,1] / d - 1)))
```

```
pox[7] = int((massmodel[mii,0] / d) + (b2 * (massmodel[mii,2] / d - 1)) + (c2 *  
(massmodel[mii,1] / d - 1)))
```

```
pox[8] = int((massmodel[mii,0] / d + 1) + (b2 * (massmodel[mii,2] / d - 1)) + (c2 *  
(massmodel[mii,1] / d - 1)))
```

```
#si una posicion esta fuera del mb se saca (-1)
```

```
limit = 0
```

```
while limit < 9:
```

```
    if pox[limit] > len(model) - 1:
```

```
        pox[limit] = -1
```

```
    pass
```

```
    limit = limit + 1
```


#se calcula la funcion de distribucion como un poderador de las masas

```
s = np.random.normal(2,1)
```

```
m1 = (1 / d) ** s
```

```
m2 = (1 / (d * mt.sqrt(2))) ** s
```

```
m3 = (1 / (d * mt.sqrt(3))) ** s
```

```
mdistance = [m3, m2, m3, m2, m1, m2, m3, m2, m3]
```

#Se les baja ponderacion a las celdas en movimiento

```
varcons = 0
```

```
while varcons < 9 :
```

```
    if massmodel[int(pox[varcons]),3] == 2:
```

```
        mdistance[varcons] = mdistance[varcons] * relajacion
```

```
    varcons = varcons + 1
```

#se actualiza denominador

```
var3 = 0
```

```
totaldist = sum(mdistance)
```

```
while var3 < 9:
```

```
    if pox[var3] == -1 or massmodel[int(pox[var3]),3] == 1:
```

```
        totaldist = totaldist - mdistance[var3]
```

```
    var3 = var3 + 1
```

```
if totaldist == 0:
```

```
    totaldist = 100
```

MB #se calcula el ponderador inverrso a la dist restando vacios o celdas fuera de

```
var4 = 0
```

```
while var4 < 9:
```

```
    pond[var4] = mdistance[var4] / totaldist
```

```
    if pox[var4] == -1 or massmodel[pox[var4],3] == 1:
```

```
        pond[var4] = 0
```

```
    var4 = var4 + 1
```

```
aux9 = 0
```

```
while aux9 < 9:
```

```
    if pond[aux9] > 1:
```

```
        pond[aux9] = 1
```

```
    aux9 = aux9 + 1
```

```
#print(pond)
```

```
apond = np.random.multinomial(n=100, pvals = pond, size = 1) / 100.0
```

```
pon = apond.tolist()
```

```
var5 = 0
```

```
while var5 < 9:
```

```
    pond[var5] = pon[0][var5]
```

```
    var5 = var5 + 1
```

```

    if pox[0] > -1:

        massmodel[pox[0],10] = massmodel[pox[0],10] + ((massmodel[mii,10] * pond[0])
* emp[mii])

    if pox[1] > -1:

        massmodel[pox[1],10] = massmodel[pox[1],10] + ((massmodel[mii,10] * pond[1])
* emp[mii])

    if pox[2] > -1:

        massmodel[pox[2],10] = massmodel[pox[2],10] + ((massmodel[mii,10] * pond[2])
* emp[mii])

    if pox[3] > -1:

        massmodel[pox[3],10] = massmodel[pox[3],10] + ((massmodel[mii,10] * pond[3])
* emp[mii])

    if pox[4] > -1:

        massmodel[pox[4],10] = massmodel[pox[4],10] + ((massmodel[mii,10] * pond[4])
* emp[mii])

    if pox[5] > -1:

        massmodel[pox[5],10] = massmodel[pox[5],10] + ((massmodel[mii,10] * pond[5])
* emp[mii])

    if pox[6] > -1:

        massmodel[pox[6],10] = massmodel[pox[6],10] + ((massmodel[mii,10] * pond[6])
* emp[mii])

    if pox[7] > -1:

        massmodel[pox[7],10] = massmodel[pox[7],10] + ((massmodel[mii,10] * pond[7])
* emp[mii])

```

```

    if pox[8] > -1:

        massmodel[pox[8],10] = massmodel[pox[8],10] + ((massmodel[mii,10] * pond[8])
* emp[mii])

    else:

        massmodel[mii,10] = 0

        mii = mii -1

#    print (massmodel[mii,10])

#visualizar un plano 2D, ejemplo con x = 10

esfuerzoz = np.zeros((yl + 1) * (xl + 1), dtype=float)

esfuerzoz = list(esfuerzoz)

ejex = np.zeros((yl + 1) * (xl + 1), dtype=float)

ejey = np.zeros((yl + 1) * (xl + 1), dtype=float)

ejex = list(ejex)

ejey = list(ejey)

varx = 0

auxx = 0

while varx < len(model):

    if massmodel[varx,2] == cortez:

        esfuerzoz[auxx] = massmodel[varx,10]

        ejex[auxx] = massmodel[varx,0]

        ejey[auxx] = massmodel[varx,1]

        auxx = auxx + 1

    varx = varx + 1

```

```

esfuerzoy = np.zeros(c2, dtype=float)

esfuerzoy = list(esfuerzoy)

ejexx = np.zeros((zl + 1) * (xl + 1), dtype=float)

ejeyy = np.zeros((zl + 1) * (xl + 1), dtype=float)

ejexx = list(ejexx)

ejeyy = list(ejeyy)

#esfuerzo medio en pilar centrar en cota y (z= 36 y 38 cm para canales)

esfpilary = np.zeros((zl + 1) * 3, dtype=float)

esfpilary = list(esfpilary)

varxx = int((corley / d) * c2)

limitvarxx = varxx


#variables auxiliares para contar vacios para (0) para no promediarlos

esfpilary0 = 0

esfy0 = 0


#medir esfuerzos verticales en una cota y en un pilar

auxx1 = 0

auxx2 = 0

while varxx < (limitvarxx + c2):

    esfuerzoy[auxx1] = massmodel[varxx,10]

    if esfuerzoy[auxx1] == 0:

```

```

    esfy0 = esfy0 + 1

    ejexx[auxx1] = massmodel[varxx,0]

    ejeyy[auxx1] = massmodel[varxx,2]

    if ejexx[auxx1] == 38 or ejexx[auxx1] == 36 or ejexx[auxx1] == 34:

        esfpilary[auxx2] = esfuerzoy[auxx1]

        if esfpilary[auxx2] == 0:

            esfpilary0 = esfpilary0 + 1

            auxx2 = auxx2 + 1

        auxx1 = auxx1 + 1

    varxx = varxx + 1

```

#esfuerzos en celdas 1 2 y 3 canales 2016 Test 0

```

                                #EsfuerzoC1                                =
(massmodel[2492,10]+massmodel[2493,10]+massmodel[2494,10]+massmodel[2495,10]+
massmodel[2528,10]+massmodel[2529,10]+massmodel[2530,10]+massmodel[2531,10]+m
assmodel[2564,10]+massmodel[2565,10]+massmodel[2566,10]+massmodel[2567,10]) / 12

```

```

                                #EsfuerzoC2                                =
(massmodel[2501,10]+massmodel[2502,10]+massmodel[2503,10]+massmodel[2537,10]+
massmodel[2538,10]+massmodel[2539,10]+massmodel[2573,10]+massmodel[2574,10]+m
assmodel[2575,10]) / 9

```

```

                                #EsfuerzoC3                                =
(massmodel[2504,10]+massmodel[2505,10]+massmodel[2506,10]+massmodel[2507,10]+
massmodel[2540,10]+massmodel[2541,10]+massmodel[2542,10]+massmodel[2543,10]+m
assmodel[2576,10]+massmodel[2577,10]+massmodel[2578,10]+massmodel[2579,10]) / 12

```

```
#print('Esfuerzo Celda 1, kPa =', EsfuerzoC1, 'Esfuerzo Celda 2, kPa =',
EsfuerzoC2,'Esfuerzo Celda 3, kPa =', EsfuerzoC3)
```

```
#Diaz 1y2
```

```
#1ra celda: 20,10,10 2da celda 42,10,10 3ra celda 56,10,10
```

```
#EsfuerzoC1 =
(massmodel[2351,10]+massmodel[2352,10]+massmodel[2353,10]+massmodel[2388,10]+
massmodel[2316,10]+massmodel[2387,10]+massmodel[2315,10]) / 7
```

```
#EsfuerzoC2 =
(massmodel[2362,10]+massmodel[2363,10]+massmodel[2364,10]+massmodel[2327,10]+
massmodel[2399,10]+massmodel[2387,10]+massmodel[2400,10]) / 7
```

```
#EsfuerzoC3 =
(massmodel[2369,10]+massmodel[2370,10]+massmodel[2371,10]+massmodel[2364,10]+
massmodel[2406,10]+massmodel[2335,10]+massmodel[2407,10]) / 7
```

```
#print('Esfuerzo Celda 1, kPa =', EsfuerzoC1, 'Esfuerzo Celda 2, kPa =',
EsfuerzoC2,'Esfuerzo Celda 3, kPa =', EsfuerzoC3)
```

```
#Diaz3y4
```

```
#1ra celda: 20,10,10 2da celda 42,10,10 3ra celda 56,10,10 CAMBIAN LOS IDS
```

```
#EsfuerzoC1 =
(massmodel[2351,10]+massmodel[2315,10]+massmodel[2350,10]+massmodel[2352,10]+
massmodel[2387,10]+massmodel[2314,10]+massmodel[2316,10]+massmodel[2386,10]+m
assmodel[2388,10]) / 9
```

```
#EsfuerzoC2 =
(massmodel[2362,10]+massmodel[2326,10]+massmodel[2361,10]+massmodel[2363,10]+
massmodel[2398,10]+massmodel[2325,10]+massmodel[2327,10]+massmodel[2397,10]+m
assmodel[2399,10]) / 9
```

```

#EsfuerzoC3 =
(massmodel[2369,10]+massmodel[2333,10]+massmodel[2368,10]+massmodel[2370,10]+
massmodel[2405,10]+massmodel[2332,10]+massmodel[2334,10]+massmodel[2404,10]+m
assmodel[2406,10]) / 9

```

```

#print('Esfuerzo Celda 1, kPa =', EsfuerzoC1, 'Esfuerzo Celda 2, kPa =',
EsfuerzoC2,'Esfuerzo Celda 3, kPa =', EsfuerzoC3)

```

#esfuerzos en celdas 1 2 y 3 canales 2016 Test 1 y 2

```

EsfuerzoC1 = (massmodel[2553,10] + massmodel[2554,10] + massmodel[2555,10] +
massmodel[2589,10] + massmodel[2590,10] + massmodel[2591,10]) / 6

```

```

EsfuerzoC2 = (massmodel[2547,10] + massmodel[2548,10] + massmodel[2549,10] +
massmodel[2583,10] + massmodel[2584,10] + massmodel[2585,10]) / 6

```

```

EsfuerzoC3 = (massmodel[2541,10] + massmodel[2542,10] + massmodel[2543,10] +
massmodel[2577,10] + massmodel[2578,10] + massmodel[2579,10]) / 6

```

```

EsfuerzoC4 = (massmodel[2535,10] + massmodel[2536,10] + massmodel[2537,10] +
massmodel[2571,10] + massmodel[2572,10] + massmodel[2573,10]) / 6

```

```

EsfuerzoC5 = (massmodel[2530,10] + massmodel[2531,10] + massmodel[2566,10] +
massmodel[2567,10]) / 4

```

```

EsfuerzoC6 = (massmodel[2524,10] + massmodel[2525,10] + massmodel[2526,10] +
massmodel[2560,10] + massmodel[2561,10] + massmodel[2562,10]) / 6

```

```

print('Esfuerzo Celda 1, kPa =', EsfuerzoC1, 'Esfuerzo Celda 2, kPa =',
EsfuerzoC2,'Esfuerzo Celda 3, kPa =', EsfuerzoC3)

```

```

print('Esfuerzo Celda 4, kPa =', EsfuerzoC4, 'Esfuerzo Celda 5, kPa =',
EsfuerzoC5,'Esfuerzo Celda 6, kPa =', EsfuerzoC6)

```

#esfuerzos en celdas 1 2 3 4 y 5 canales 2016 Test 3


```
#EsfuerzoC1 = (massmodel[2550,10] + massmodel[2551,10] + massmodel[2552,10] +  
massmodel[2586,10] + massmodel[2587,10] + massmodel[2588,10]) / 6
```

```
#EsfuerzoC2 = (massmodel[2543,10] + massmodel[2544,10] + massmodel[2545,10] +  
massmodel[2579,10] + massmodel[2580,10] + massmodel[2581,10]) / 6
```

```
#EsfuerzoC3 = (massmodel[2539,10] + massmodel[2540,10] + massmodel[2575,10] +  
massmodel[2576,10]) / 4
```

```
#EsfuerzoC4 = (massmodel[2532,10] + massmodel[2533,10] + massmodel[2534,10] +  
massmodel[2568,10] + massmodel[2569,10] + massmodel[2570,10]) / 6
```

```
#EsfuerzoC5 = (massmodel[2523,10] + massmodel[2524,10] + massmodel[2525,10] +  
massmodel[2526,10] + massmodel[2559,10] + massmodel[2560,10] + massmodel[2561,10]  
+ massmodel[2562,10]) / 8
```

```
#print('Esfuerzo Celda 1, kPa =', EsfuerzoC1)
```

```
#print('Esfuerzo Celda 2, kPa =', EsfuerzoC2)
```

```
#print('Esfuerzo Celda 3, kPa =', EsfuerzoC3)
```

```
#print('Esfuerzo Celda 4, kPa =', EsfuerzoC4)
```

```
#print('Esfuerzo Celda 5, kPa =', EsfuerzoC5)
```

```
#esfuerzos en celdas 1 2 y 3 Segovia Test 1 y 2
```

```
#EsfuerzoC1 =  
(massmodel[7481,10]+massmodel[7482,10]+massmodel[7483,10]+massmodel[7557,10]+  
massmodel[7558,10]+massmodel[7559,10]) / 6
```

```
#EsfuerzoC2 =  
(massmodel[7562,10]+massmodel[7563,10]+massmodel[7564,10]+massmodel[7486,10]+  
massmodel[7487,10]+massmodel[7488,10]) / 6
```

```
#EsfuerzoC3 =  
(massmodel[7496,10]+massmodel[7497,10]+massmodel[7498,10]+massmodel[7572,10]+  
massmodel[7573,10]+massmodel[7574,10]) / 6
```

```
#print('Esfuerzo Celda 1, kPa =', EsfuerzoC1, 'Esfuerzo Celda 2, kPa =',  
EsfuerzoC2,'Esfuerzo Celda 3, kPa =', EsfuerzoC3)
```

#esfuerzos en celdas Segovia Test 3

```
#EsfuerzoC1 = (massmodel[7082, 10] + massmodel[7006, 10] + massmodel[7081, 10] +  
massmodel[7083, 10] + massmodel[7158, 10] + massmodel[7005, 10] + massmodel[7007,  
10] + massmodel[7157, 10] + massmodel[7159, 10]) / 9
```

```
#EsfuerzoC2 = (massmodel[7092, 10] + massmodel[7016, 10] + massmodel[7091, 10] +  
massmodel[7093, 10] + massmodel[7168, 10] + massmodel[7015, 10] + massmodel[7017,  
10] + massmodel[7167, 10] + massmodel[7169, 10]) / 9
```

```
#EsfuerzoC3 = (massmodel[7102, 10] + massmodel[7026, 10] + massmodel[7101, 10] +  
massmodel[7103, 10] + massmodel[7178, 10] + massmodel[7025, 10] + massmodel[7027,  
10] + massmodel[7177, 10] + massmodel[7179, 10]) / 9
```

```
#EsfuerzoC4 = (massmodel[7112, 10] + massmodel[7036, 10] + massmodel[7111, 10] +  
massmodel[7113, 10] + massmodel[7188, 10] + massmodel[7035, 10] + massmodel[7037,  
10] + massmodel[7187, 10] + massmodel[7189, 10]) / 9
```

```
#EsfuerzoC5 = (massmodel[7122, 10] + massmodel[7046, 10] + massmodel[7121, 10] +  
massmodel[7123, 10] + massmodel[7198, 10] + massmodel[7045, 10] + massmodel[7047,  
10] + massmodel[7197, 10] + massmodel[7199, 10]) / 9
```

```
#EsfuerzoC6 = (massmodel[7132, 10] + massmodel[7056, 10] + massmodel[7131, 10] +  
massmodel[7133, 10] + massmodel[7208, 10] + massmodel[7055, 10] + massmodel[7057,  
10] + massmodel[7207, 10] + massmodel[7209, 10]) / 9
```

```
#print('Esfuerzo Celda 1, kPa =', EsfuerzoC1, 'Esfuerzo Celda 2, kPa =',  
EsfuerzoC2,'Esfuerzo Celda 3, kPa =', EsfuerzoC3)
```

```
#print('Esfuerzo Celda 4, kPa =', EsfuerzoC4, 'Esfuerzo Celda 5, kPa =',  
EsfuerzoC5,'Esfuerzo Celda 6, kPa =', EsfuerzoC6)
```

```
promedio = sum(esfuerzoy) / (len(esfuerzoy) - esfy0)
```

```
devest = st.stdev(esfuerzoy)
```

```
#promediopilar = st.mean(esfpilary)
```

```
#promediopilar = sum(esfpilary) / (len(esfpilary) - esfpilary0)
```

```
t2 = time()-t1
```

```
print('Esfuerzo medio (Y =',cortey,'cm) = ', promedio, ' kPa')
```

```
print('Desviacion (Y =',cortey,'cm) = ', devest, ' kPa')
```

```
#print('Esfuerzo pilar (Y =',cortey,'cm) = ', promediopilar, ' kPa')
```

```
print('Tiempo de simulacion esfuezos ', t2,' s')
```

```
return (massmodel,esfuerzoz,ejex,ejey,esfuerzoy,ejexx,ejeyy)
```

MovementZone.Py

```
# Geometria de zona de movimiento
```

```
import numpy as np
```

```
def geometry(model,kk,d,px,pz):
```

```
#Hmz
```

```
q = 0
```

x = px

z = pz

x1 = px

x2 = x + d[0]

z1 = z

z2 = z + d[2]

h = d[1]

height = h

#kk=[ii for ii in range(0,len(model)) if model[ii,3]==2 or model[ii,3]==1]

hmz=max(model[kk,1])-min(model[kk,1])+d[1]

#hmz2=hmz+min(model[kk,1])

#Wimz NO considerando una geometria 100 porciento eliptica

widthx = max(model[kk,0])-min(model[kk,0])+d[0]

widthz = max(model[kk,2])-min(model[kk,2])+d[2]

#Wimz considerando una geometria 100 porciento eliptica

#se mueve cerca de la mitad de hmz (para una elipse matematicamente el wmz,max deberia estar en la mitad de la altura)

#ii = [iii for iii in kk if model[iii,1] <= hmz * 0.5 + d[1] and model[iii, 1] >= hmz * 0.5 - d[1]]

#widthx = max(model[ii, 0]) - min(model[ii, 0]) + d[0]

#widthz = max(model[ii, 2]) - min(model[ii, 2]) + d[2]

return [hmz, widthx, widthz]

Color.py

Pinta de color los estados de cada bloque del modelo final

import numpy as np

import math as mt

#0: fijo

#1: vacio

#2: en movimiento

#3: pueden moverse

#0 rojo, 1 azul, 2 amarillo, 3, verde

def col(c):

if c == 0.0:

r = 'red'

if c == 1.0:

r = 'blue'

if c == 2.0:

r = 'yellow'

if c == 3.0:

r = 'green'

if c != 0 and c != 1 and c != 2 and c != 3:

r = 'valor fuera de rango'

print(r)

return r

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

Título: MODELAMIENTO DE ESFUERZOS EN MINERAL QUEBRADO		
Nombre Memorista: Joakin José Ignacio Rodríguez Serrano		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	EXCELENTE	 Prof. René Gómez P.
Calificación	6.8	
Fecha	24.01.2025	
  Prof. Ramón Díaz N.		Ingeniero Supervisor:
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
Prof. Raúl Castro R. (U. de Chile)		 Ing. Carlos Novoa P.
Resumen		
La minería subterránea de caving presenta retos significativos en la modelación de esfuerzos en medios granulares, debido a la dinámica del hundimiento y la interacción entre las zonas en movimiento y estancadas. Este trabajo tiene como objetivo modelar y validar los esfuerzos inducidos durante el proceso de extracción en caving, utilizando un enfoque numérico basado en autómatas celulares. El estudio se basa en el modelo propuesto por Gómez en 2022, que ha sido recalibrado y evaluado con nuevos datos experimentales. Se han llevado a cabo comparaciones entre los resultados simulados y experimentales en configuraciones como extracción aislada, tiraje múltiple uniforme y extracción múltiple no uniforme, reproduciendo de manera satisfactoria los patrones de concentración de esfuerzos y zonas de estancamiento observados en laboratorio. Adicionalmente se introduce un nuevo ajuste para un parámetro que cambia en función de las áreas tributarias, permitiendo replicar de forma más precisa los esfuerzos medidos en situaciones mixtas, donde la concentración de esfuerzos en zonas estancadas tiene mayor relevancia, mejorando la capacidad del modelo para reflejar esta realidad. Finalmente, si bien se han detectado errores en torno al 10% en las comparaciones entre las simulaciones y los datos de mina real, bajo ciertos supuestos, el modelo constituye un buen primer paso para abordar el tema de los esfuerzos a escala mina. Aunque no es completamente preciso en su estado actual, ofrece una base sólida para futuras		

investigaciones. Aún son necesarios más experimentos y la recopilación de datos mina adicionales para lograr una modelación más completa y mejorar la capacidad predictiva del modelo en condiciones reales de minería.