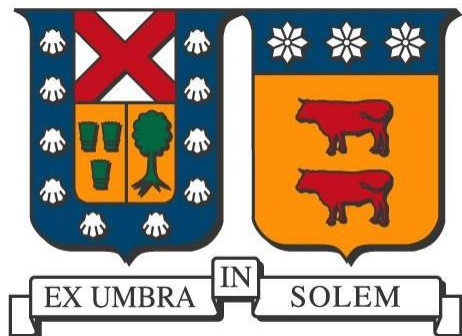


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES



**Cuantificación de la migración de finos en minería de caving mediante
simulaciones DEM**

Autor
Francisco Ignacio Contreras Saavedra

Memoria de Título para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía
Sergio Palma Moya

2024
Santiago, Chile



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Cuantificación de la migración de finos en minería de caving mediante simulaciones DEM

Nombre del candidato(a): Francisco Ignacio Contreras Saavedra Carrera /

Grado: Ingeniería Civil de Minas

Campus: San Jaquin Departamento: Ingeniería de Minas Metalurgia y Materiales 2.-

VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Sergio Palma Moya, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

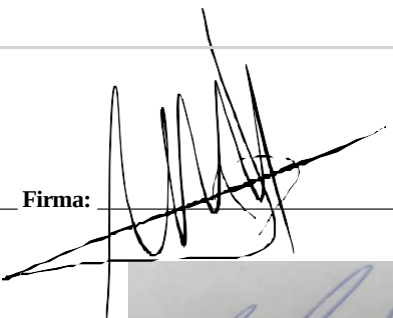
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

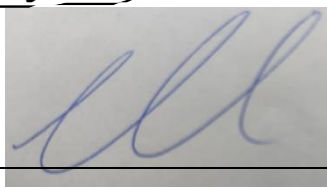
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 17/12/2025 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 17/12/2025 Firma: 

Dedicatoria

Dedicado a mis padres que me apoyaron este largo camino.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todos los que me apoyaron en este largo proceso de altos y bajos, tanto anímicos como emocionales. Al profesor Sergio Palma por su paciencia y guía en el desarrollo de este proyecto. A mis amigos Álvaro, Cesar, Gaspar y Javito por acompañarme todos estos años con risas, alegrías y apoyo en los malos momentos. A mi compa Deivid por su apoyo cercano en este proceso, las noches eternas de problemas, cálculos e informes y las cervezas y risas que seguías de estos. Al Profesor Zumaeta por creer en mi cuando ni yo lo hacía. A la Guardia Nocturna que me brindo un ideal al que aferrarme y me ayudo a no rendirme en todo este proceso y una mención especial a mis compañeros de pieza que se aguantaron mis bajadas del 3er piso en la madrugada. Finalmente quiero agradecer a la Kiki, mi polola hermosa que me acompañó en esta dura parte final de proceso y me permitió soñar con que era posible lograrlo

Resumen

El Block Caving es un método de explotación para minería subterránea, orientado a yacimientos masivos. Este aprovecha la acción de la gravedad para generar y propagar fracturas en el macizo rocoso, mediante el colapso de un nivel de hundimiento. Este método se presenta como una alternativa económica y de alta tasa de producción para minería subterránea. Uno de los problemas asociados a este método es la dilución del mineral extraído lo que conlleva pérdidas económicas considerables.

El problema se genera entre otras causas, por la infiltración de material fino proveniente de la roca de caja dentro del flujo gravitacional del mineral. Este material estéril adicional genera que la ley media del material que ingresa a la planta disminuya, consumiendo recursos adicionales para procesar la misma cantidad de recurso de interés.

Actualmente, la dilución en las explotaciones de tipo Block Caving se estima utilizando métodos basados en leyes empíricas, que no se ajustan del todo a las condiciones de cada yacimiento, ya que no se dispone de estudios suficientes sobre comportamiento del flujo gravitacional, que permitan generar modelos basados en la física del proceso.

Por lo anterior, con este trabajo se pretende estudiar el desplazamiento de material fino en un flujo gravitacional, según el ángulo de la interfaz entre el material fino con el material grueso en un flujo gravitacional de Block Caving. Para esto se utilizará el software EDEM, el cual usa el método de elementos discretos para simular el comportamiento de las partículas en un flujo gravitacional. Con los datos obtenidos de estas simulaciones se busca generar un modelo matemático que relacione la dilución del mineral con el ángulo de reposo del material y el cociente de los tamaños característicos de las partículas finas vs gruesas.

Índice

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	i
Resumen	ii
Índice de figuras	iv
1 Introducción	1
1.1 General	1
1.2 Descripción del problema.....	1
1.3 Objetivos	1
1.3.1 Objetivo General:	1
1.3.2 Objetivos Específicos:.....	2
1.3.3 Alcance y limitaciones	2
2 Antecedentes	3
2.1 Minería Block/Panel Caving	3
2.2 Flujo Gravitacional.....	5
2.3 Dilución	8
2.4 Migración de finos.....	11
2.4.1 Cuantificación de la migración de finos en block caving mediante experimentos 3D (Castro et. al. (2022)).....	13
2.4.2 Cuantificación de la migración de finos en minería de block caving mediante experimentos de laboratorio (Aravena et. al. (2024)).....	15
2.4.3 Selección de secuencia de extracción bajo migración lateral en minería Block/Panel Caving (Gómez et. al. (2025))	19
2.5 Método de elementos Discretos	22
3 Metodología	28
3.1 Montaje experimental.....	28
3.2 Partículas utilizadas	29
3.3 Disposición de partículas.....	32
3.4 Propiedades Geomecánicas	31
3.5 Disposición de material	¡Error! Marcador no definido.
3.6 Cuantificación de la Dilución.....	36
3.7 Medición de masa extraída.....	37
4 Análisis de Resultados	41
4.1 Contraste con Experimentos físicos	41

4.2	Resultados obtenidos	43
4.3	Comparación de resultados con otros autores	46
5	Conclusiones	50
	Referencias	51

Índice de figuras

Figura 2.1:	Niveles mina block caving (Gómez & Labbé, 2019).....	4
Figura 2.2:	Modelo experimental usado por Kvapil	5
Figura 2.3:	observación experimental de IEZ e IMZ	6
Figura 2.4:	Relación entre IEZ y IMZ (Kvapil, 1992)	6
Figura 2.5:	Distribución de capa de marcadores	7
Figura 2.6:	IEZ e IMZ obtenidos por Castro según masa extraída (R. Castro et al., 2007)	8
Figura 2.7:	Abaco de Laubsher para determinar la altura de la zona de interracción	9
Figura 2.8:	Abaco de factor de control de extracción	9
Figura 2.9:	Comparación de resultados obtenidos por Susaeta(2004).....	11
Figura 2.10:	Flujo de partículas finas generado por Pierce(2010)	12
Figura 2.11:	Modelo utilizado por en estudios de migración de finos en 3D (R. Castro et al., 2022)	13
Figura 2.12:	Distribución granulométrica de material utilizado por Castro et. al.(2022)	14
Figura 2.13:	resultados de experimentos para comparar la influencia del tamaño de partícula en la entrada de dilución	15
Figura 2.14:	Modelo Utilizado por Aravena (2023)	16
Figura 2.15:	Distribuciones granulométricas del material utilizado por Aravena et. al. (2024) ...	16
Figura 2.16:	Disposiciones de material utilizadas por Aravena (2023)	17
Figura 2.17:	Resultados obtenidos por Aravena et. al.(2024) para el caso 0° donde (a) extracciones aisladas (b) extracciones conjuntas	18
Figura 2.18:	Dilución máxima respecto del ángulo de interfaz de material fino y grueso	19
Figura 2.19:	Esquemas de modalidades de extracción realizadas por Gómez et al. (20225)	20
Figura 2.20:	Experimento 3 realizado por Gómez et. al. (2025)	21
Figura 2.21:	Experimento 4 realizado por Gómez et. al. (2025)	22
Figura 2.22:	Comparación de modelo físico con modelo DEM Rayo et al. (2016).....	27
Figura 3.1:	Vista de perfil de montaje experimental.	28
Figura 3.2:	Pilares del modelo utilizado.....	29
Figura 3.3:	(a) Dimensiones partículas material grueso; (b) Dimensiones partículas material fino	30
Figura 3.4:	Geometría auxiliar caso 45°	33
Figura 3.5:	(a) Panel general de geometría virtual para partículas gruesas del caso 45°; (b) Panel de fábrica de partículas gruesas caso 45°.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3.6:	Plano físico que separa partículas finas de las gruesas.....	34
Figura 3.7:	(a) Material dispuesto a 0°; (b) la interfase toca ambas paredes; (c) La interfase toca una pared; (d) la interfase toca el suelo del modelo; (e) material dispuesto a 90°.	36
Figura 3.8:	Sensor virtual de masa total	37
Figura 3.9:	Grafico de masas extraídas caso 45°	38
Figura 3.10:	Grafico de dilución caso 00°	39

Figura 4.1: Comparación Caso 0° con Aravena & Palma (2023)	42
Figura 4.2: Comparación Caso 45° con Aravena & Palma (2023)	42
Figura 4.3: Comparación Caso 90° con Aravena & Palma (2023)	43
Figura 4.4: Resultados experimentales, caso 1.1mm	45
Figura 4.5: Resultado experimentales caso 1.2mm	45
Figura 4.6: Resultado experimentales caso 1.5mm	45
Figura 4.7: Resultado experimentales caso 2.0mm	46
Figura 4.8: Comparacion de resultados	48

1 Introducción

1.1 General

En la actualidad se ha visto a diversos proyectos pasar desde explotaciones en superficie a minería subterránea, esto se debe en parte al agotamiento de yacimientos superficiales, lo que genera una baja en las leyes medias y la profundización de los recursos de intereses lo que implica un aumento en los costos de transporte y procesamiento. Dado lo anterior, el método Block/Panel Caving surge como alternativa prometedora como reemplazo de las explotaciones cielo abierto, debido a su relativo bajo costo, elevados ritmos de producción y versatilidad en cuanto al transporte del material (Laubscher, 2011).

El método de explotación subterráneo Block Caving se basa en aprovechar el flujo gravitacional para generar el fracturamiento del mineral y su subsecuente extracción. Sin embargo, la fragmentación continúa luego de alcanzar el final del bloque de mineral llegando a incluir la roca de caja y techo. Este material estéril fragmentado ingresa en el flujo gravitacional generando el fenómeno conocido como dilución, el cual consiste en la mezcla del material mineral con el material estéril agregado, bajando el valor de la ley de mineral que entra a la planta, lo que genera pérdidas económicas y un sobre trabajo de la planta de procesos.

1.2 Descripción del problema

La migración de finos a través del flujo gravitacional puede generar el fenómeno de dilución si las partículas son de estéril (Laubscher, 2003). La dilución es la mezcla del mineral de interés con mineral de peor ley o estéril, generado en etapas de diseño u operación de la mina (Rivas & Gonzáles, 2018). Este fenómeno es inevitable, sin embargo, se debe buscar cuantificar el grado de dilución esperado al momento de diseñar la explotación, con el fin de evitar pérdidas económicas.

Actualmente existen diversos modelos para estimar la dilución esperada en una explotación de tipo Block Caving, sin embargo, estas se basan principalmente en observaciones empíricas o regresiones logísticas, no en la física detrás del flujo gravitacional.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General:

- Cuantificar la dilución máxima generada por la migración de finos en una explotación de tipo Block Caving en distintos escenarios.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Generar simulaciones numéricas escaladas del flujo gravitacional de una explotación tipo Block Caving.
- Analizar la influencia del tamaño de partícula en la entrada de dilución.
- Analizar la influencia de la disposición de las partículas en la entrada de dilución.

1.3.3 Alcance y limitaciones

El presente estudio tiene como objetivo cuantificar la dilución asociada a una explotación del tipo Block Caving, empleando para ello modelación numérica basada en el Método de Elementos Discretos (DEM). Con este fin, se desarrolló un modelo pseudo-bidimensional a escala, en el cual se representaron cuatro tamaños diferentes de partículas. En dicho esquema, el material fino fue considerado como estéril, mientras que las partículas de mayor tamaño fueron asumidas como mineral útil, con el propósito de analizar de manera diferenciada su comportamiento y la forma en que ambos interactúan durante el proceso de hundimiento y extracción.

Cabe señalar que en esta investigación no se dispone de experimentos físicos de laboratorio que permitan validar de manera directa los resultados obtenidos mediante las simulaciones. Por esta razón, los fenómenos observados y los modelos generados deberán ser contrastados y comparados con los resultados reportados en trabajos previos de la literatura especializada, a fin de otorgarles mayor validez científica y aplicabilidad práctica en el contexto de la minería real.

No obstante, a pesar de esta limitación, las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo representan un aporte significativo como punto de referencia para investigaciones futuras. En particular, los resultados obtenidos pueden servir de base para el diseño de nuevos experimentos físicos, la calibración de modelos numéricos más complejos, y la evaluación de parámetros críticos que influyen en la dilución durante el hundimiento gravitacional en minería subterránea. De este modo, se espera que el presente estudio contribuya al avance en la comprensión de los procesos de fragmentación, mezcla y transporte de material bajo condiciones de Block Caving.

2 Antecedentes

2.1 Minería Block/Panel Caving

El *Block/Panel Caving* es un método de explotación subterránea de carácter masivo, que se basa en el aprovechamiento de la fuerza gravitacional y de los esfuerzos inducidos en el macizo rocoso para fracturar cuerpos mineralizados sin soporte artificial. La propagación del hundimiento se inicia a partir de una socavación planificada en el nivel de hundimiento, generando condiciones de inestabilidad controlada que inducen el colapso progresivo del macizo rocoso.

Una vez que el material se ha fracturado, este es extraído a través de bateas ubicadas en el nivel de extracción, las cuales canalizan el flujo gravitacional hacia los puntos de carga. Desde allí, el material fragmentado es removido mediante equipos Load-Haul-Dump (LHD) y transportado hacia un nivel inferior, ya sea mediante piques verticales, correas transportadoras u otros sistemas de manejo de material masivo.

Adicionalmente, el diseño de este tipo de minería contempla típicamente la implementación de al menos dos subniveles de ventilación. Estos permiten asegurar un flujo continuo de aire fresco hacia las zonas operativas y facilitan la evacuación de gases, polvo en suspensión y otros contaminantes generados durante las operaciones (ver Figura 2.1).

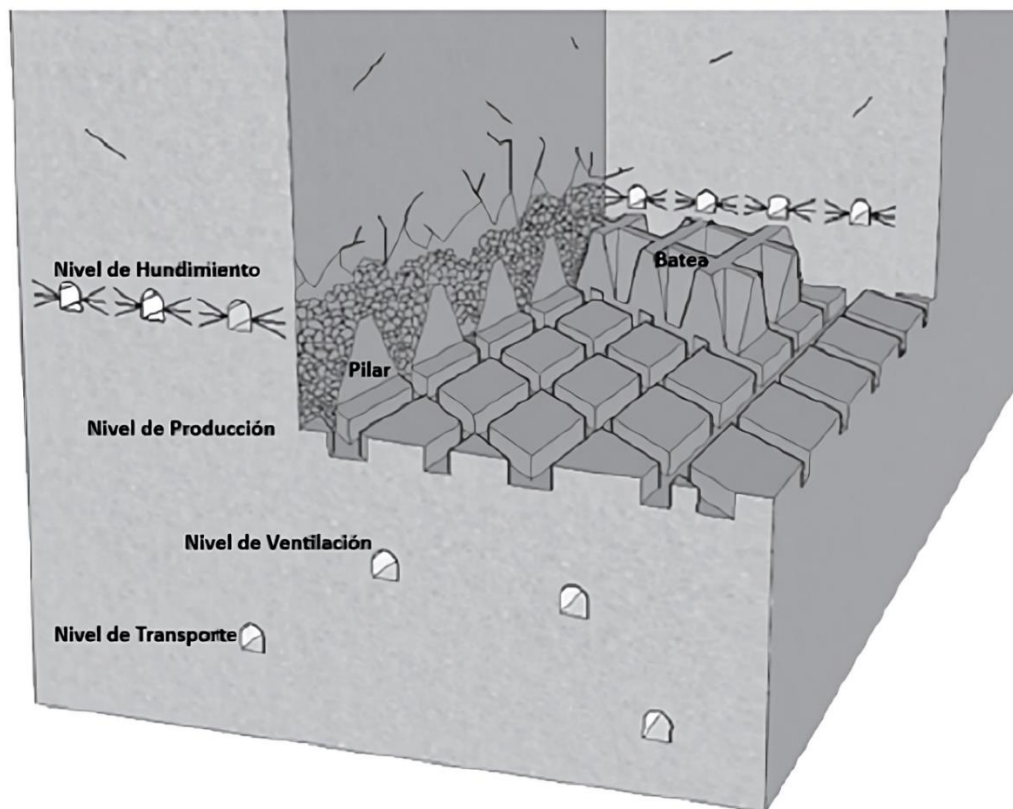


Figura 2.1: Niveles mina block caving (Gómez & Labbé, 2019)

El método de explotación Block Caving ha surgido como una alternativa altamente atractiva frente a la minería a cielo abierto, especialmente en yacimientos de gran tamaño y baja ley. Su principal ventaja radica en la alta productividad que puede alcanzar, con tasas de extracción que superan las 75.000ton/día (Brannon et al., 2011), lo que lo posiciona como uno de los métodos subterráneos más eficientes a nivel industrial. Además, presenta costos operacionales relativamente bajos, estimados entre 8USD/ton y 9USD/ton (Stebbins, 2011), debido a su naturaleza masiva y a la utilización del hundimiento gravitacional como mecanismo principal de transporte del mineral.

Sin embargo, este método también presenta limitaciones significativas, entre las que destaca el alto costo de inversión inicial, asociado principalmente a la construcción de las galerías de producción, los sistemas de ventilación y transporte, así como las cámaras de hundimiento. A ello se suma la escasa flexibilidad operacional que ofrece el método, ya que, una vez iniciada la etapa de hundimiento, las posibilidades de modificar el diseño o las condiciones de explotación son muy restringidas. Esta característica obliga a realizar un diseño geotécnico exhaustivo y preciso en las etapas tempranas del proyecto, donde las decisiones adoptadas determinarán en gran medida el rendimiento y la estabilidad futura del sistema de hundimiento.

2.2 Flujo Gravitacional

El flujo gravitacional se define como el movimiento descendente de material granular bajo la acción exclusiva de la fuerza de gravedad, constituyendo un fenómeno clave para comprender los procesos de hundimiento y extracción en minería subterránea. Este tipo de flujo se caracteriza por su dirección vertical predominante, la cual provoca el desplazamiento progresivo del material desde niveles superiores hacia los puntos de extracción ubicados en la base de un bloque o contenedor.

Los primeros estudios sistemáticos sobre este fenómeno fueron desarrollados por Rudolf Kvapil durante la década de 1960, a través de experimentos de laboratorio en modelos pseudo-bidimensionales, utilizando arena coloreada como material granular. Mediante estos ensayos pioneros, Kvapil logró visualizar y describir de manera experimental cómo el material se desplazaba internamente, lo que permitió sentar las bases conceptuales para el análisis del hundimiento gravitacional aplicado posteriormente al método de explotación Block Caving.

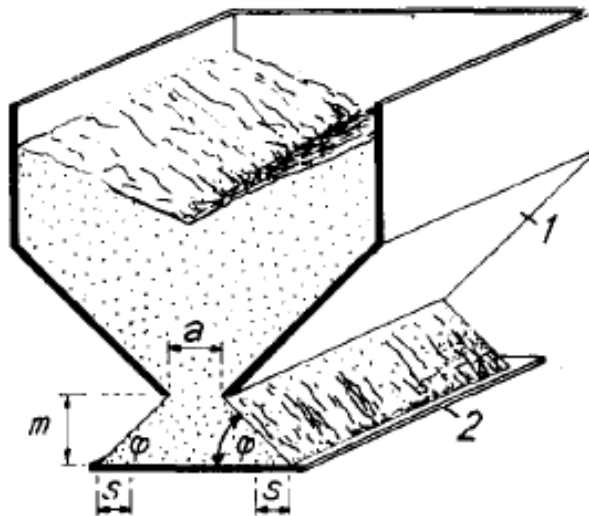


Figura 2.2: Modelo experimental usado por Kvapil

A partir de sus investigaciones, Kvapil (1992) introdujo los conceptos de zona aislada de extracción (Isolated Extraction Zone, IEZ) y zona aislada de movimiento (Isolated Movement Zone, IMZ). La IEZ corresponde al volumen de material efectivamente extraído desde un punto de producción, mientras que la IMZ representa el volumen de material que, sin ser extraído, es desplazado y reacomodado como consecuencia del flujo gravitacional generado en torno al punto de extracción (figura 2.3).

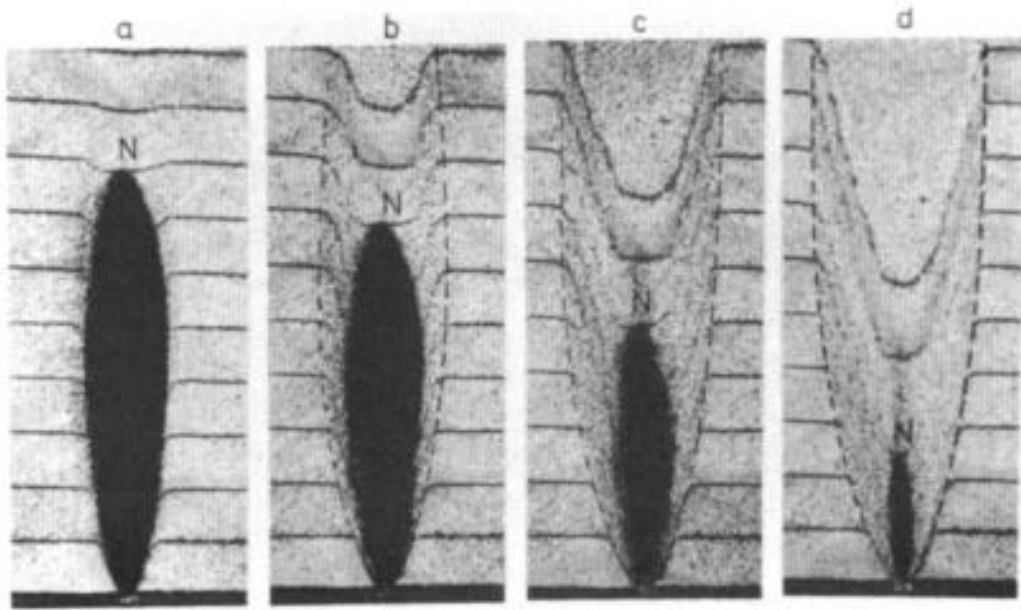


Figura 2.3: observación experimental de IEZ e IMZ

Ambas zonas presentan una morfología elipsoidal, lo que refleja la naturaleza continua y progresiva del hundimiento generado por la extracción localizada. La interacción entre la IEZ y la IMZ constituye un elemento central para entender la propagación del hundimiento, la eficiencia de la extracción y los procesos de mezcla y dilución dentro del bloque (Figura 2.4).

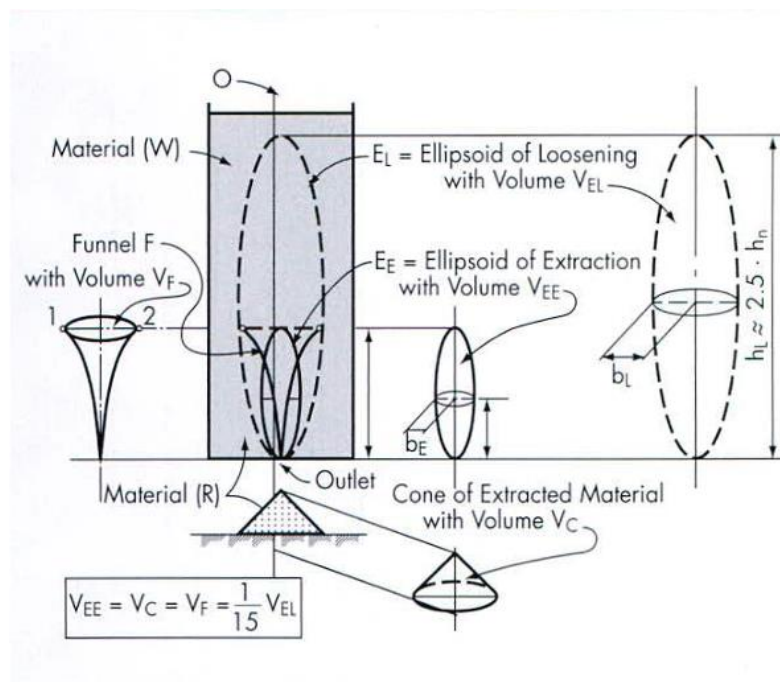


Figura 2.4: Relación entre IEZ y IMZ (Kvapil, 1992)

Por otro lado, investigaciones más recientes han profundizado en el estudio del comportamiento del flujo gravitacional utilizando modelos tridimensionales en combinación con la técnica de marcadores de coordenadas (R. Castro et al., 2007; Jin et al., 2017). Esta metodología consiste en incorporar partículas distintivas y numeradas en diferentes niveles de altura dentro del macizo fragmentado, de manera que, al momento de producirse la extracción y caída del material, dichas partículas puedan ser recuperadas y cotejadas con la masa extraída. Este procedimiento permite reconstruir con detalle el trayecto y el desplazamiento real de las partículas dentro del bloque, entregando información clave sobre la dinámica interna del hundimiento (Figura 2.5).

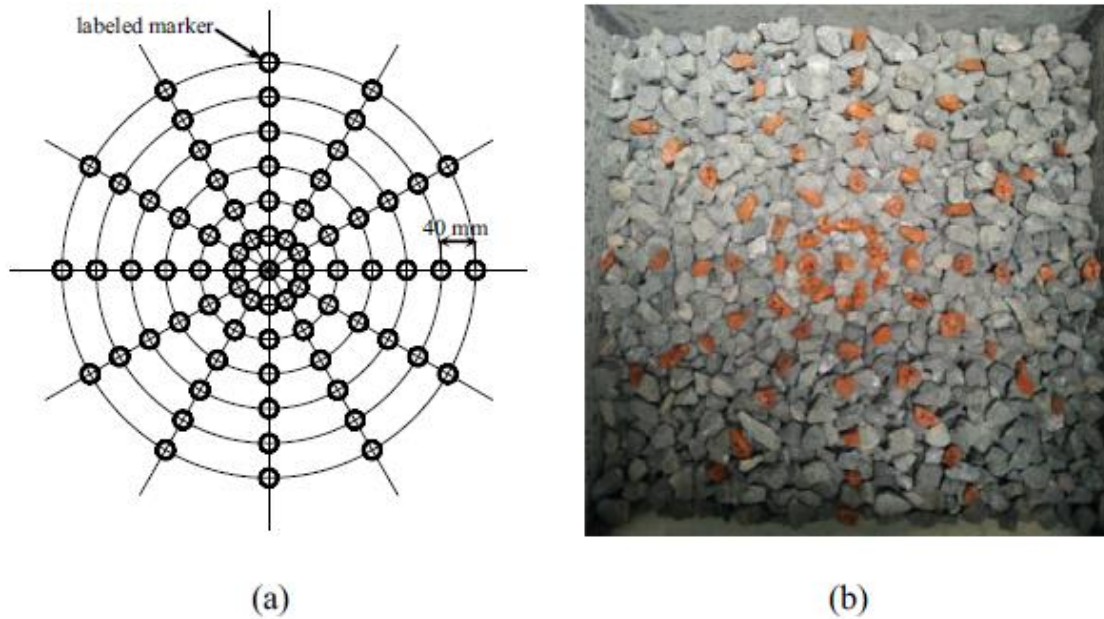


Figura 2.5: Distribución de capa de marcadores

Los resultados obtenidos a partir de estos experimentos han demostrado que, si bien la Zona Aislada de Extracción (IEZ) y la Zona Aislada de Movimiento (IMZ) pueden ser representadas de manera aproximada mediante una forma elipsoidal, esta descripción resulta insuficiente para capturar con precisión su geometría real. En efecto, los estudios recientes evidencian que ambas zonas presentan una morfología semejante a una “gota invertida”, caracterizada por un estrechamiento hacia la base, donde se ubican los puntos de extracción, y una expansión hacia los niveles superiores del bloque (Figura 2.6).

Esta caracterización más realista del fenómeno no solo refina los modelos conceptuales previamente propuestos, sino que también tiene importantes implicancias prácticas en el diseño y la operación del

método Block Caving, ya que permite una mejor comprensión de la propagación del hundimiento, del desplazamiento diferencial de partículas y de los mecanismos que gobiernan la dilución en este tipo de explotación subterránea.

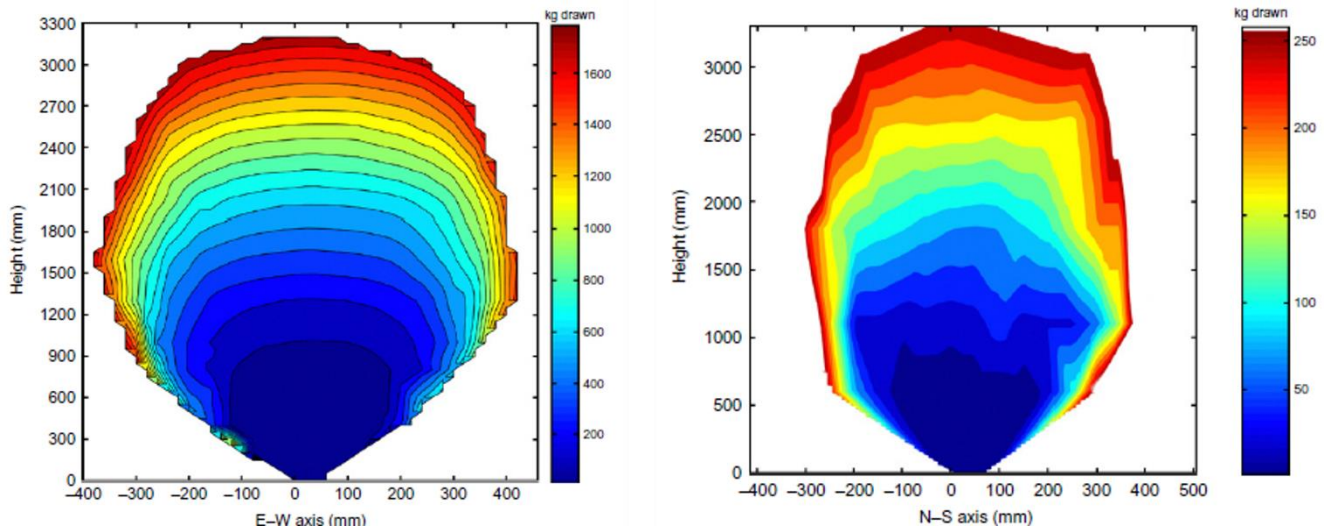


Figura 2.6: IEZ e IMZ obtenidos por Castro según masa extraída (R. Castro et al., 2007)

2.3 Dilución

Por definición general la dilución es la disminución de la concentración de una sustancia por la inclusión de otra, en el caso de la minería el concepto hace referencia a una disminución en la ley del material extraído debido a la inclusión de material estéril. La dilución es una parte integral de la minería por caving se presenta por diversas causas, algunas de las causas más importantes es la migración de material estéril de granulometría fina, la distribución del mineral y el control de extracción. (R. L. Castro & Paredes, 2014).

Al momento de estimar la dilución que ingresa en una explotación de tipo Block/Panel Caving, se han realizado múltiples estudios, uno de los más conocidos es el modelo de dilución de propuesto por Dennise Laubscher (1994), donde propuso que la entrada de dilución se puede estimar usando los factores de altura de la IEZ multiplicada por un factor de fragmentación (A), la altura de interacción entre columnas (B) y del control de extracción (C) (Laubscher, 1994).

$$Dilución\% = \frac{(A - B)}{A} \times C \times 100 \quad (1)$$

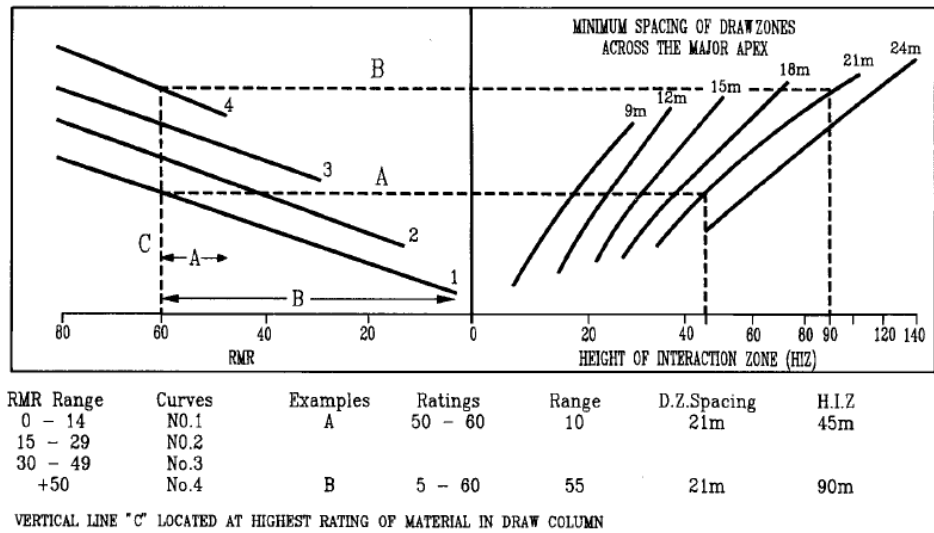
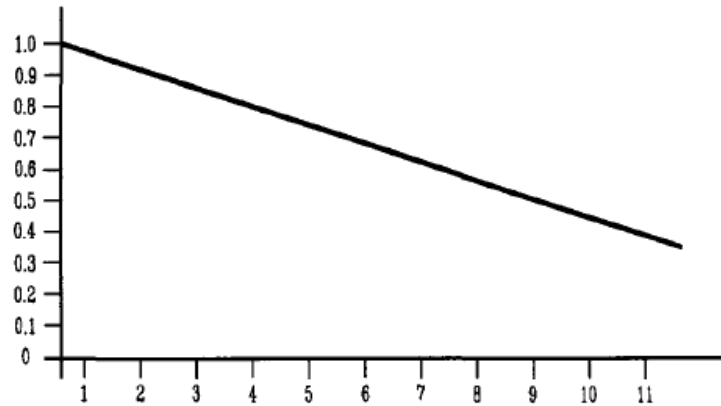


Figura 2.7: Abaco de Laubscher para determinar la altura de la zona de interacción



Standard Deviation x 100 of Tonnage of Working Drawpoints

D/Ps	W/1	E/1	W/2	E/2	W/3	E/3	W/4	E/4
Monthly	2000	800	1000	2500	600	1500	800	1800
Tonnage	Mean = 1375 Standard Deviation = 682/100 = 7							

Draw Control Factor = 0.6

Figura 2.8: Abaco de factor de control de extracción

Por otro lado, en investigaciones posteriores, Laubscher (2000) identificó que una de las principales causas de la dilución en el método Block Caving está directamente relacionada con el grado de fragmentación del material estéril proveniente de la roca de caja y del techo que rodea al cuerpo mineralizado. De acuerdo con sus observaciones, mientras más fina es la fragmentación de dicho material

estéril, mayor es la probabilidad de que este se infiltre con rapidez hacia los puntos de extracción, incrementando significativamente los niveles de dilución. Este fenómeno ocurre debido a que las partículas más finas poseen una mayor movilidad y facilidad de desplazamiento dentro de la masa fragmentada, favoreciendo así su ingreso prematuro al flujo de mineral.

Asimismo, Laubscher destacó que otro factor de considerable influencia en la entrada de material estéril corresponde al modo de extracción aplicado. En este sentido, los puntos de extracción operados de manera aislada presentan una tendencia más marcada a experimentar altos niveles de dilución, en contraste con aquellos escenarios donde la extracción se lleva a cabo de forma conjunta desde múltiples puntos. Esta diferencia se explica porque la extracción simultánea favorece la formación de un hundimiento más uniforme, reduciendo la entrada localizada de estéril hacia puntos específicos.

Las hipótesis planteadas por Laubscher (2000) fueron posteriormente contrastadas y confirmadas por Susaeta (2004), quien llevó a cabo una serie de experimentos a escala reducida utilizando arena como material granular, con el objetivo de analizar el efecto del modo de extracción sobre la entrada de dilución en el método Block Caving. A través de estos ensayos, el autor logró evidenciar de manera empírica que la extracción conjunta desde varios puntos produce una disminución significativa en la magnitud de la dilución, en comparación con los casos donde la extracción se realiza de forma aislada o independiente.

Estos resultados respaldaron las observaciones teóricas y experimentales de Laubscher, reforzando la idea de que el modo de extracción desempeña un papel determinante en la dinámica del flujo del material y, por ende, en el grado de mezcla entre el mineral y el estéril. En particular, se observó que la extracción simultánea favorece una zona de hundimiento más uniforme y estable, lo que contribuye a un flujo descendente controlado del material grueso y limita la entrada prematura de material fino hacia los puntos de extracción.

Por otra parte, los hallazgos de Susaeta destacaron que el grado de fragmentación del material también constituye una variable crítica dentro del proceso, ya que influye directamente en la movilidad relativa de las partículas finas y en la permeabilidad del medio granular. De esta forma, tanto la fragmentación como la estrategia de extracción se consolidan como parámetros esenciales para la gestión y control de la dilución en el método Block Caving, proporcionando lineamientos experimentales que contribuyen al diseño de secuencias de extracción más eficientes y con menores pérdidas de ley.

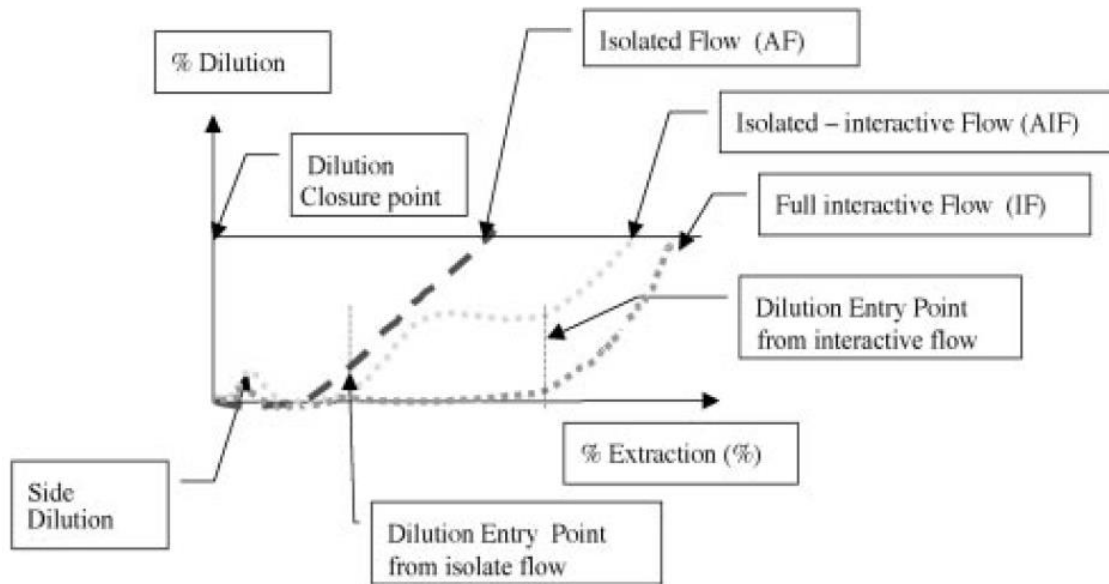


Figura 2.9: Comparación de resultados obtenidos por Susaeta (2004)

2.4 Migración de finos

Se entiende por material fino a la fracción de partículas granulares de menor tamaño que se encuentra confinada dentro de un medio poroso compuesto por partículas de mayor dimensión. Este tipo de material, debido a su reducida granulometría, presenta un comportamiento particular dentro del sistema, ya que posee una mayor movilidad y susceptibilidad a ser transportado a través de los poros del medio que lo contiene. De acuerdo con lo señalado por Khilar & Fogler (1998), el desplazamiento de estas partículas finas ocurre principalmente bajo la acción de fuerzas coloidales e hidrodinámicas, las cuales favorecen su migración y redistribución dentro de la matriz granular.

Este fenómeno resulta especialmente relevante en el estudio de medios porosos y en procesos asociados al flujo de partículas en minería y geomecánica, ya que la presencia y el movimiento de finos pueden alterar de manera significativa las propiedades del sistema. Entre los efectos más relevantes se encuentran la modificación de la permeabilidad, el aumento de la susceptibilidad a la dilución y la variación en la estabilidad estructural del medio poroso. Por lo tanto, comprender la dinámica de los materiales finos y su interacción con las partículas de mayor tamaño constituye un aspecto clave para el análisis de la fragmentación, el transporte de material y la eficiencia de los procesos de extracción.

Pierce (2010) llevó a cabo una serie de simulaciones tridimensionales con el propósito de estudiar el fenómeno de migración de material fino durante procesos de hundimiento, específicamente bajo condiciones de extracciones aisladas. El modelo numérico utilizado estuvo constituido por un conjunto de partículas esféricas clasificadas en dos categorías granulométricas según su tamaño: partículas finas y partículas gruesas, representando respectivamente el material estéril y el mineral. El punto de extracción se ubicó en el centro del dominio del modelo, lo que permitió observar de forma simétrica el comportamiento del flujo de partículas en torno al eje vertical (véase Figura 2.5).

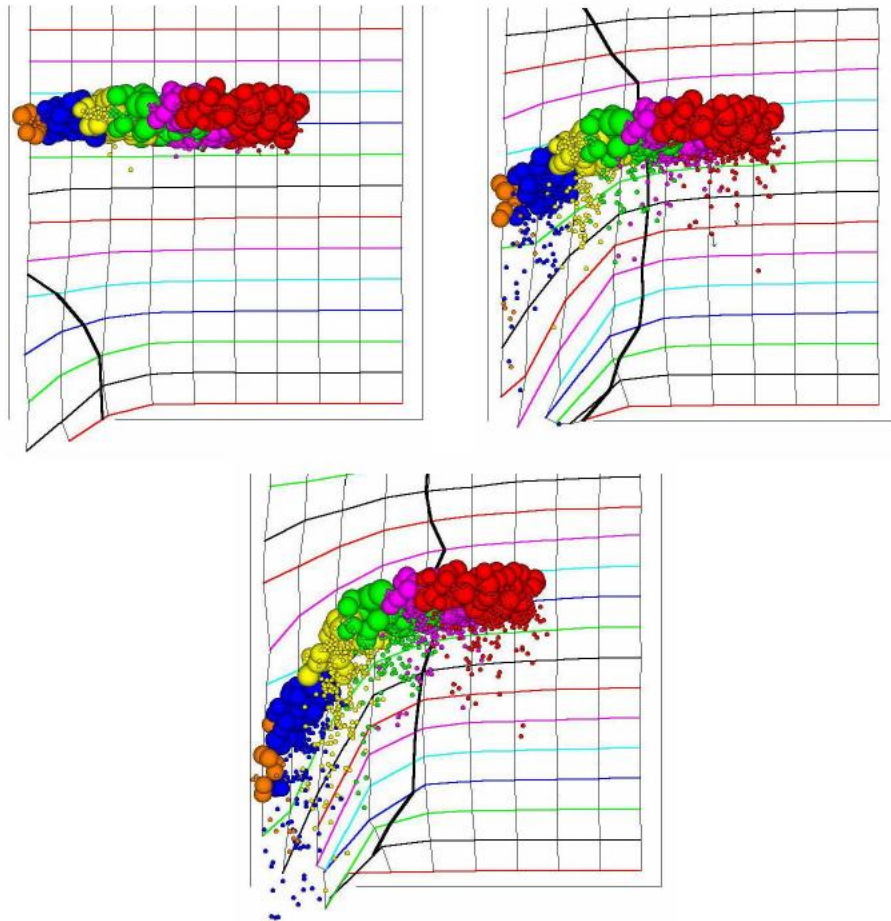


Figura 2.10:Flujo de partículas finas generado por Pierce(2010)

Durante las simulaciones, Pierce identificó distintas fases de comportamiento del material. En la etapa inicial, se observó que una fracción del material fino experimentó desplazamientos incipientes en respuesta a pequeñas perturbaciones locales generadas por la extracción. A medida que el proceso avanzó, las partículas finas demostraron una mayor movilidad vertical en comparación con las partículas gruesas, evidenciando una tendencia progresiva a desplazarse hacia la zona inferior del modelo.

El análisis detallado de las trayectorias de las partículas mostró que aquellas localizadas en la región central, directamente sobre el punto de extracción, presentaron los desplazamientos verticales más pronunciados, lo que confirma la existencia de un flujo preferencial central característico del mecanismo de hundimiento gravitacional. Este comportamiento refleja el efecto de canalización del flujo inducido por la geometría del modelo y la ubicación del punto de extracción, lo que favorece el descenso temprano de las partículas finas y su incorporación al flujo de mineral.

En conjunto, las simulaciones desarrolladas por Pierce permitieron describir con precisión los mecanismos iniciales de migración de finos, aportando evidencia de que incluso bajo condiciones de extracción aislada, la segregación entre fracciones no es completamente estable. Este estudio constituye una referencia fundamental para el análisis de procesos de dilución y flujo granular en sistemas de Block Caving, al evidenciar cómo la interacción entre el tamaño de partícula y la posición relativa dentro del bloque influye directamente en la evolución del flujo de materiales durante la extracción.

2.4.1 Cuantificación de la migración de finos en block caving mediante experimentos 3D (Castro et. al. (2022))

Uno de los estudios más recientes en esta materia fue desarrollado por R. Castro et al. (2022), quienes llevaron a cabo 8 experimentos físicos tridimensionales empleando la técnica de marcadores (previamente utilizada por R. Castro et al., 2007; Jin et al., 2017). En estos modelos experimentales se dispuso una capa de material fino sobre una base de material grueso, con el objetivo de analizar el comportamiento de la migración de partículas bajo distintas condiciones de extracción.

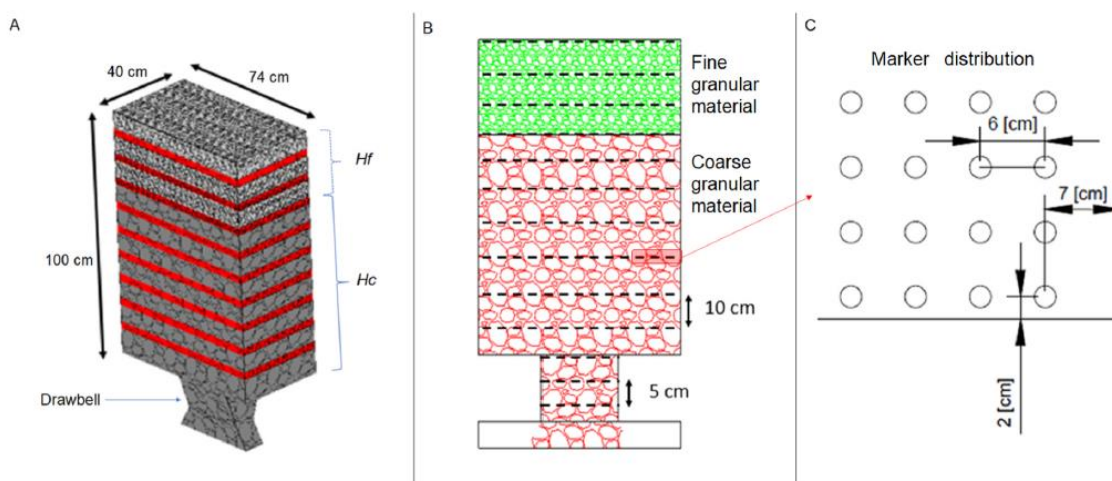


Figura 2.11: Modelo utilizado por en estudios de migración de finos en 3D (R. Castro et al., 2022)

El diseño experimental consideró tanto extracciones aisladas como extracciones conjuntas, lo que permitió comparar de manera sistemática los efectos que cada modalidad ejercía sobre el flujo de finos. Adicionalmente, se introdujo la variación en la granulometría del material Grueso, con el fin de evaluar la influencia del tamaño de partícula en la dinámica de infiltración.

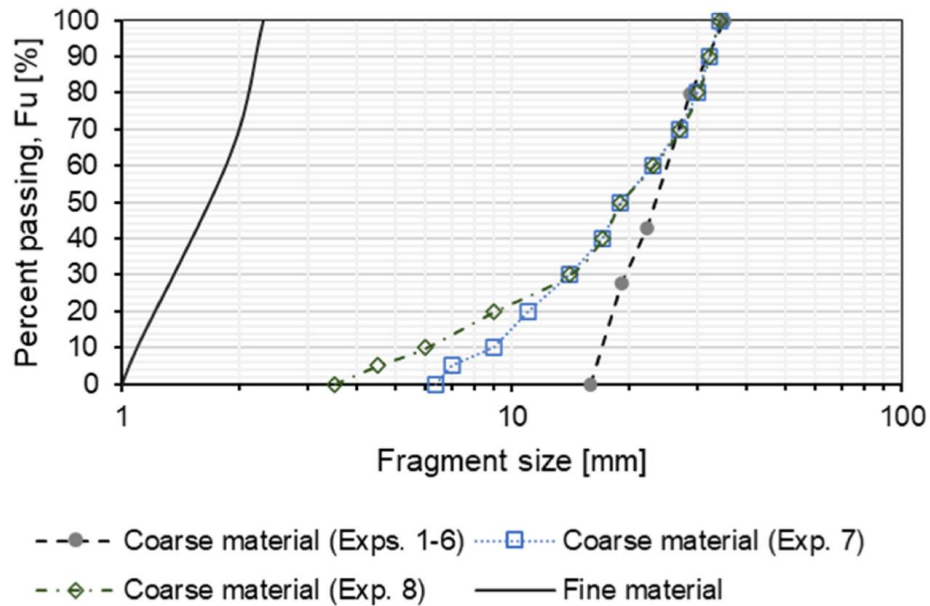


Figura 2.12: Distribución granulométrica de material utilizado por Castro et. al. (2022)

Los resultados obtenidos mostraron una relación directa entre la disminución de la granulometría y el incremento en la migración de finos, lo que evidencia que las partículas de menor tamaño presentan una mayor propensión a infiltrarse en el material grueso subyacente. Asimismo, se observó que la aparición de finos en los puntos de extracción se producía de manera más temprana y en mayor proporción cuando

las operaciones se realizaban bajo un esquema de extracción aislada, en contraste con las extracciones conjuntas, en las que la presencia de finos fue más tardía y menos abundante.

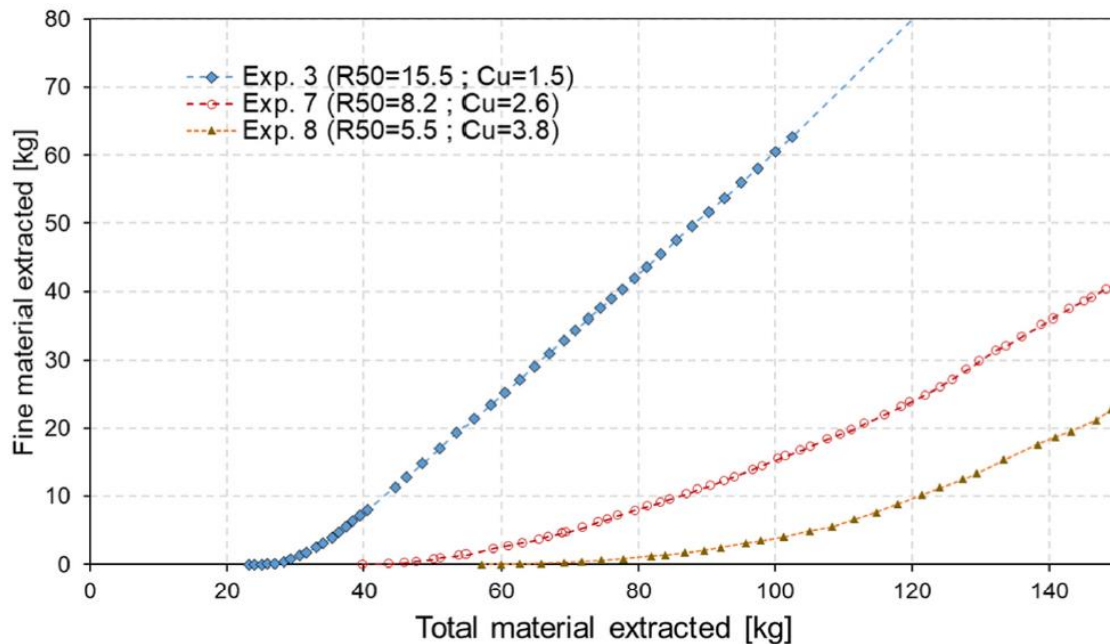


Figura 2.13: resultados de experimentos para comparar la influencia del tamaño de partícula en la entrada de dilución

Estos hallazgos confirman la relevancia del modo de extracción y de la granulometría de los materiales como variables determinantes en el proceso de dilución, aportando evidencia experimental que contribuye a comprender y optimizar las prácticas de explotación en métodos de hundimiento como el Block Caving.

2.4.2 Cuantificación de la migración de finos en minería de block caving mediante experimentos de laboratorio (Aravena et. al. (2024))

En el año 2024, Aravena et. al. desarrolló un estudio orientado a cuantificar la migración de finos en minería subterránea bajo el método Block Caving, mediante el uso de un modelo pseudo-bidimensional que reproduce el comportamiento de un bloque típico de este tipo de explotación. El modelo experimental contempló la disposición de bateas con una inclinación de 45° en su parte inferior (Figura 2.9), configurando una estructura representativa de los puntos de extracción. En la parte superior del modelo se establecieron dos zonas diferenciadas: una conformada por material de granulometría gruesa, considerada como mineral, y otra compuesta por material fino, representando el estéril. Esta disposición permitió simular de manera controlada la interacción y el movimiento relativo entre ambas fracciones durante el proceso de extracción.

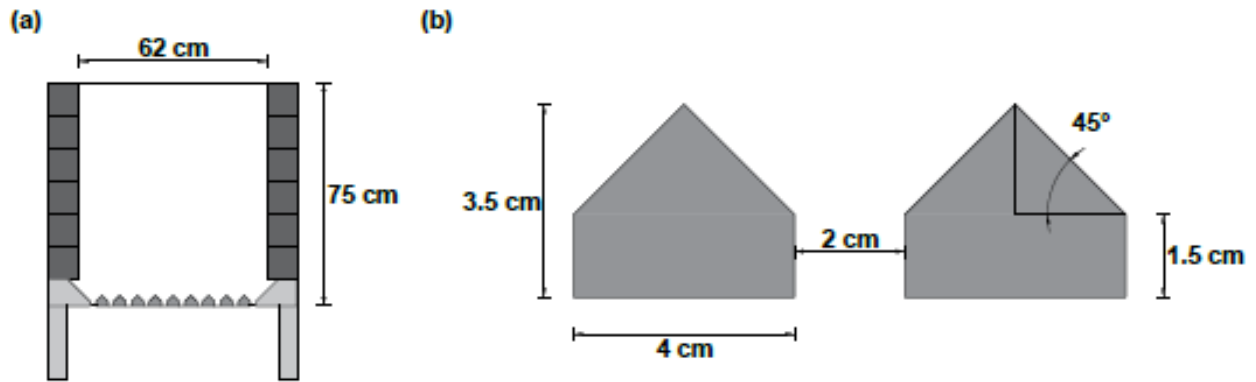


Figura 2.14: Modelo Utilizado por Aravena (2023)

Respecto a la caracterización de los materiales utilizados, el estudio centró su análisis en la medición del diámetro medio de las partículas. Se empleó un tipo de material grueso y dos tipos de material fino, todos ellos compuestos por cuarzo. Las muestras fueron tamizadas y ajustadas mediante el modelo de Rosin-Rammler, con el fin de obtener distribuciones granulométricas representativas y comparables (Figura 2.10).

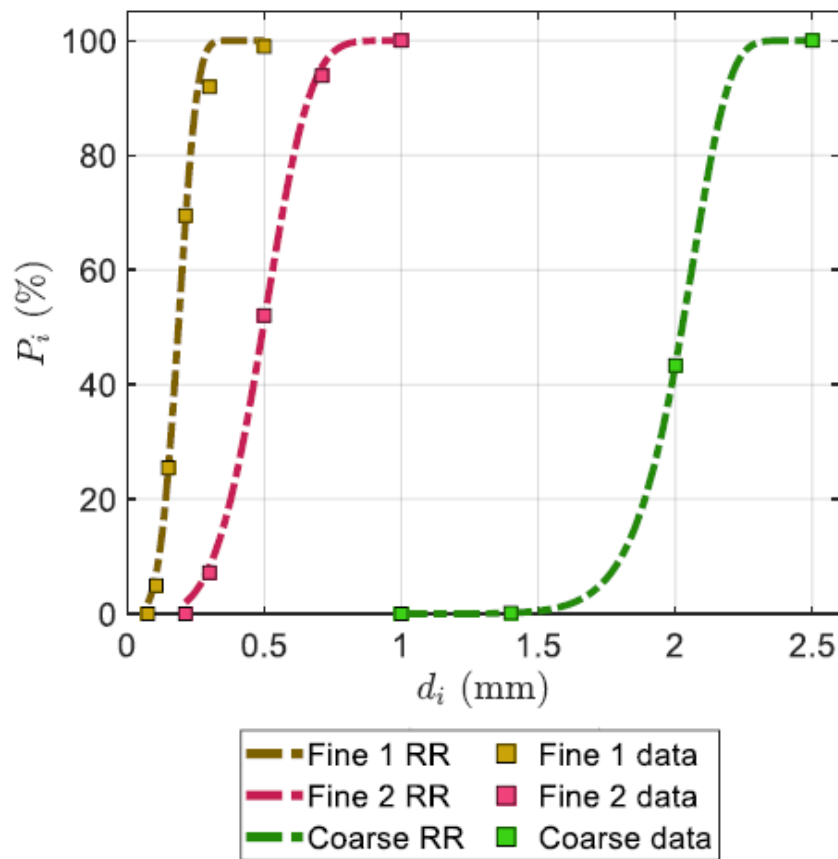


Figura 2.15: Distribuciones granulométricas del material utilizado por Aravena et. al. (2024)

Asimismo, el material fue dispuesto considerando tres orientaciones distintas: 0°, 45° y 90°, con el propósito de emular las variaciones geométricas naturales que pueden presentarse en un yacimiento real (Figura 2.11). En cada orientación se analizaron dos proporciones de contenido de material fino, equivalentes al 20 % y 40 % del volumen total del modelo. Estas configuraciones permitieron evaluar el efecto combinado de la inclinación de la interfaz y del contenido de finos sobre la magnitud y evolución de la dilución durante la extracción.

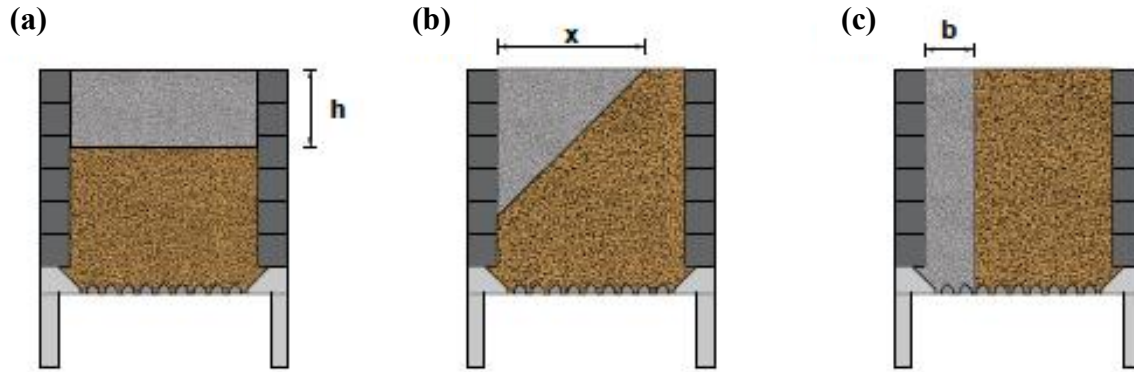


Figura 2.16: Disposiciones de material utilizadas por Aravena (2023)

Para la cuantificación de la migración de finos, el estudio utilizó el parámetro de dilución, definido como la fracción de material estéril que ingresa al mineral durante el proceso de extracción. Matemáticamente, la dilución se expresa mediante la siguiente relación:

$$Dilución = \frac{Esteril}{Mineral + Esteril} \quad (2)$$

Durante el desarrollo experimental, tras cada extracción, el material recuperado fue tamizado con el objetivo de separar la masa del material fino (MF) de la masa del material grueso (MG). A partir de estas mediciones se construyeron las curvas de dilución acumulada (D) y masa total acumulada hasta la n-ésima extracción, las cuales se expresan según la ecuación:

$$D_i = \frac{\sum_{i=1}^n M_{Fi}}{\sum_{i=1}^n (M_{Gi} + M_{Fi})} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{Fi}}{\sum_{i=1}^n M_{Ti}} \quad (3)$$

Los resultados obtenidos por Aravena (2024) mostraron que la variación de la granulometría del material no constituye un factor con incidencia significativa en la entrada de dilución, dado que las diferencias

observadas entre los casos analizados no superaron el 10 % respecto a sus contrapartes más finas. Este hallazgo contrasta con lo reportado por Castro et al. (2022), quienes observaron una influencia más marcada de la granulometría en la dilución. No obstante, Aravena plantea que esta discrepancia podría deberse a otros factores experimentales, tales como el coeficiente de uniformidad del material, el rango de tamaños relativos entre los materiales fino y grueso, o incluso las condiciones geométricas de la interfaz.

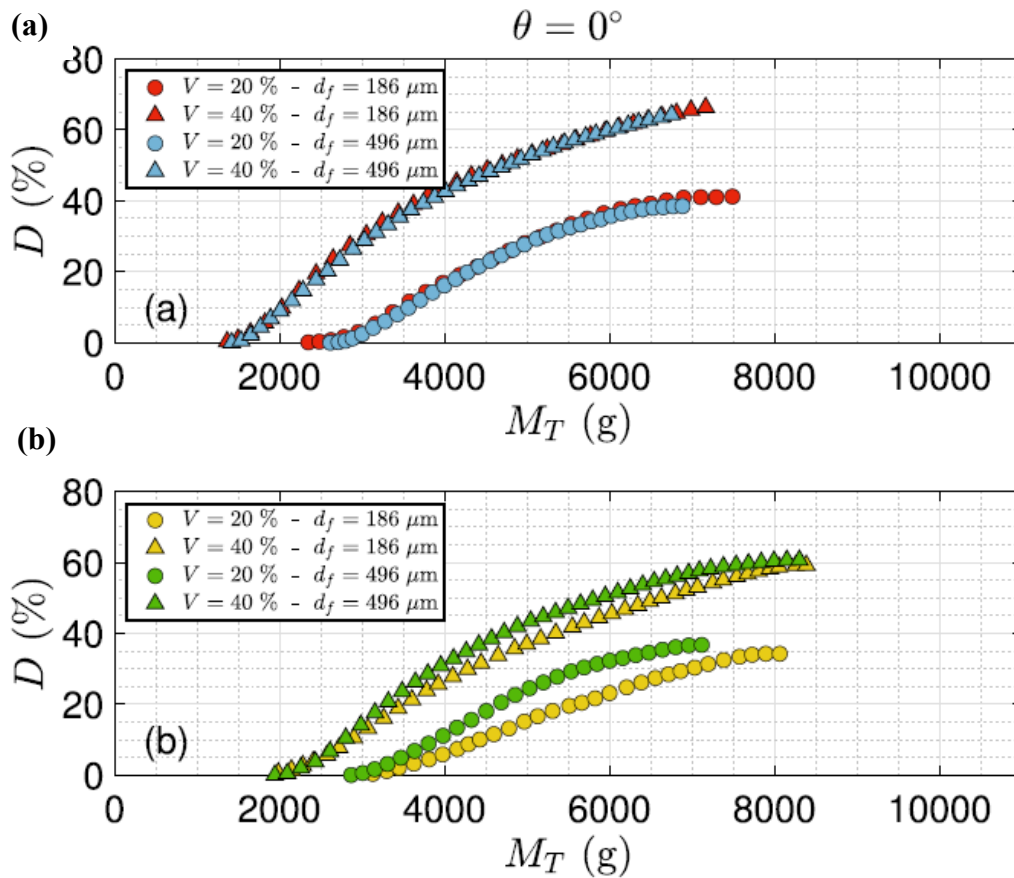


Figura 2.17: Resultados obtenidos por Aravena et. al.(2024) para el caso 0° donde (a) extracciones aisladas (b) extracciones conjuntas

Por otra parte, el contenido de material fino mostró una influencia considerable en el comportamiento de la dilución. En promedio, los casos con un mayor porcentaje de finos (40%) requirieron un 36 % menos de material extraído para alcanzar el mismo nivel de dilución que aquellos con menor contenido (20%). Este resultado sugiere que el volumen inicial de material fino es un parámetro determinante en la rapidez con que se produce la contaminación del mineral extraído.

Finalmente, el ángulo de la interfaz entre los materiales demostró ser uno de los factores más influyentes en la magnitud de la dilución. Tal como se observa en la Figura 2.12, el aumento del ángulo de la interfaz produce una reducción significativa en la entrada de dilución, indicando que configuraciones más inclinadas tienden a retrasar la infiltración del material estéril hacia los puntos de extracción. Este resultado reafirma la importancia de la geometría de contacto entre las zonas de mineral y estéril, la cual puede modificar de manera sustancial el desempeño global del proceso de hundimiento.

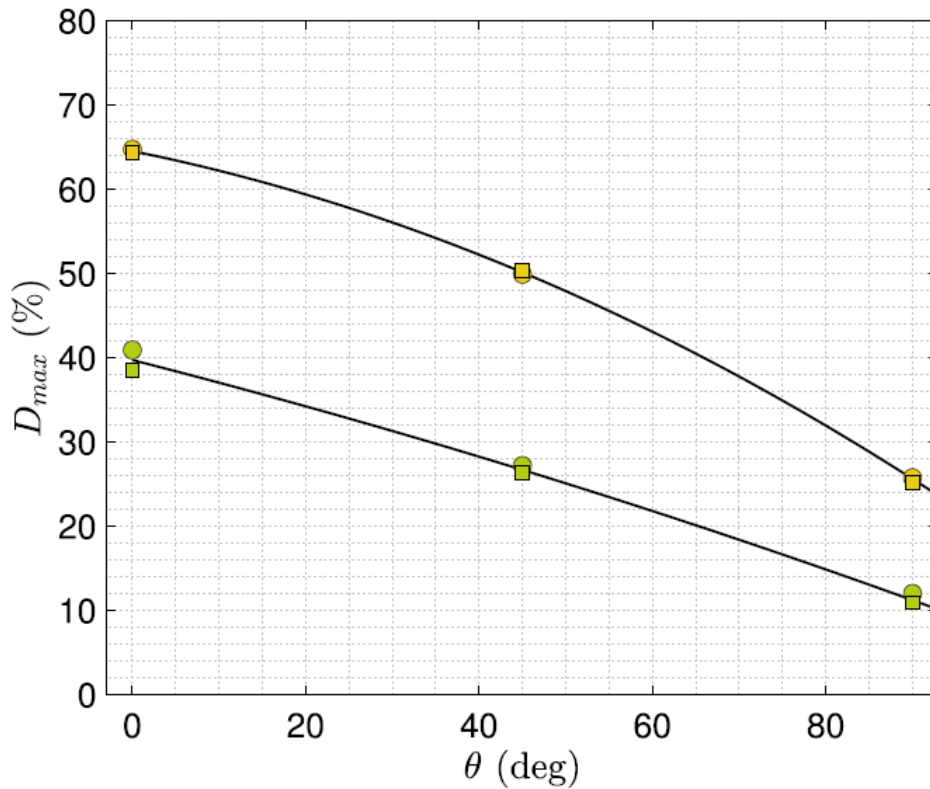


Figura 2.18: Dilución máxima respecto del ángulo de interfaz de material fino y grueso

2.4.3 Selección de secuencia de extracción bajo migración lateral en minería Block/Panel Caving (Gómez et. al. (2025))

Finalmente, Gómez et al. (2025) llevaron a cabo una serie de experimentos físicos orientados a cuantificar la entrada de dilución lateral en explotaciones subterráneas del tipo Block Caving. Para ello, implementaron un modelo pseudo bidimensional conformado por dos zonas claramente diferenciadas: una compuesta por material fino, que representaba el estéril o ganga, y otra por material grueso,

correspondiente al mineral útil. El objetivo principal del estudio fue analizar cómo la disposición espacial del material fino y el modo de extracción influían en la magnitud y dinámica de la dilución lateral.

En los ensayos experimentales se consideraron dos configuraciones de disposición del material fino, con ángulos de 0° y 90° respecto a la horizontal. En el caso de la disposición a 0° , se realizaron tanto extracciones aisladas —efectuadas desde el centro de la batea— como extracciones combinadas, distribuidas a lo largo de toda la base del modelo, con el fin de comparar los efectos del patrón de extracción sobre la propagación del material fino. Por otro lado, para la disposición de 90° , se llevaron a cabo extracciones conjuntas no uniformes, destinadas a simular condiciones irregulares de flujo de material, propias de un frente de producción con heterogeneidad estructural o variaciones locales en la fragmentación.

Los distintos esquemas de extracción ensayados se ilustran en la Figura 2.17, donde se presentan las configuraciones geométricas y los puntos de extracción utilizados por Gómez et al. (2025), los cuales permitieron evaluar comparativamente la evolución del frente de dilución bajo diferentes condiciones experimentales.

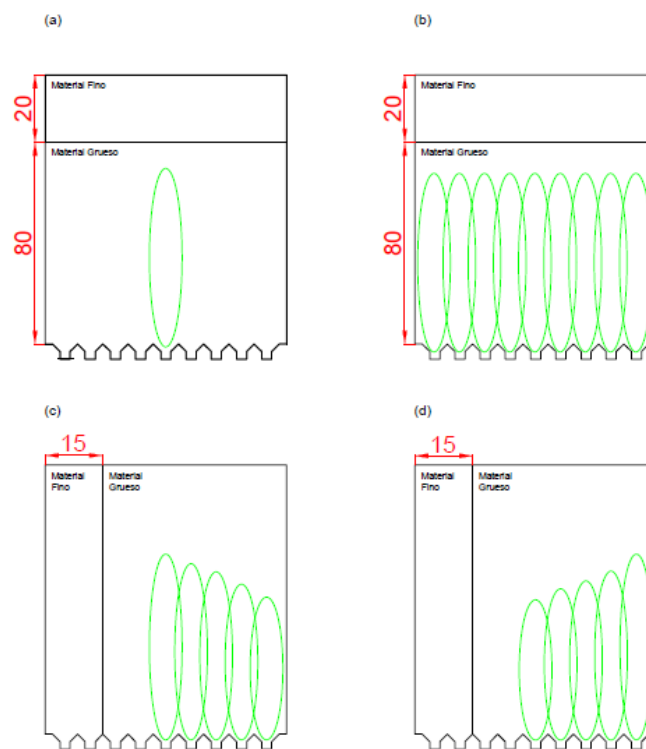


Figura 2.19: Esquemas de modalidades de extracción realizadas por Gómez et al. (20225): (a) Material horizontal con una extracción aislada, (b) material horizontal con extracciones conjuntas, (c) Material Vertical con extracciones no uniformes alejándose del muro de material fino, (d) Material Vertical con extracciones no uniformes acercándose al muro de material fino

A partir de los resultados obtenidos, Gómez et al. (2025) complementaron su estudio mediante la calibración de un modelo numérico basado en los datos experimentales, con el propósito de evaluar distintas secuencias de extracción bajo condiciones de migración lateral de material fino. Los ensayos demostraron que variables como la altura del material grueso, el coeficiente de uniformidad y el tipo de flujo influyen directamente en la velocidad y dirección de la migración de finos.

Se observó que, en los casos de extracción aislada, el material fino tendió a ingresar de forma más temprana en comparación con configuraciones de extracción múltiple o uniforme. En tanto, para las disposiciones laterales del material fino (experimentos 3 y 4), los mecanismos predominantes fueron la perforación y migración vertical descendente. Además, la presencia de un pilar estancado mostró ser un factor relevante en el control de la dilución lateral, actuando como barrera que retrasa la infiltración del material estéril hacia los puntos de extracción.

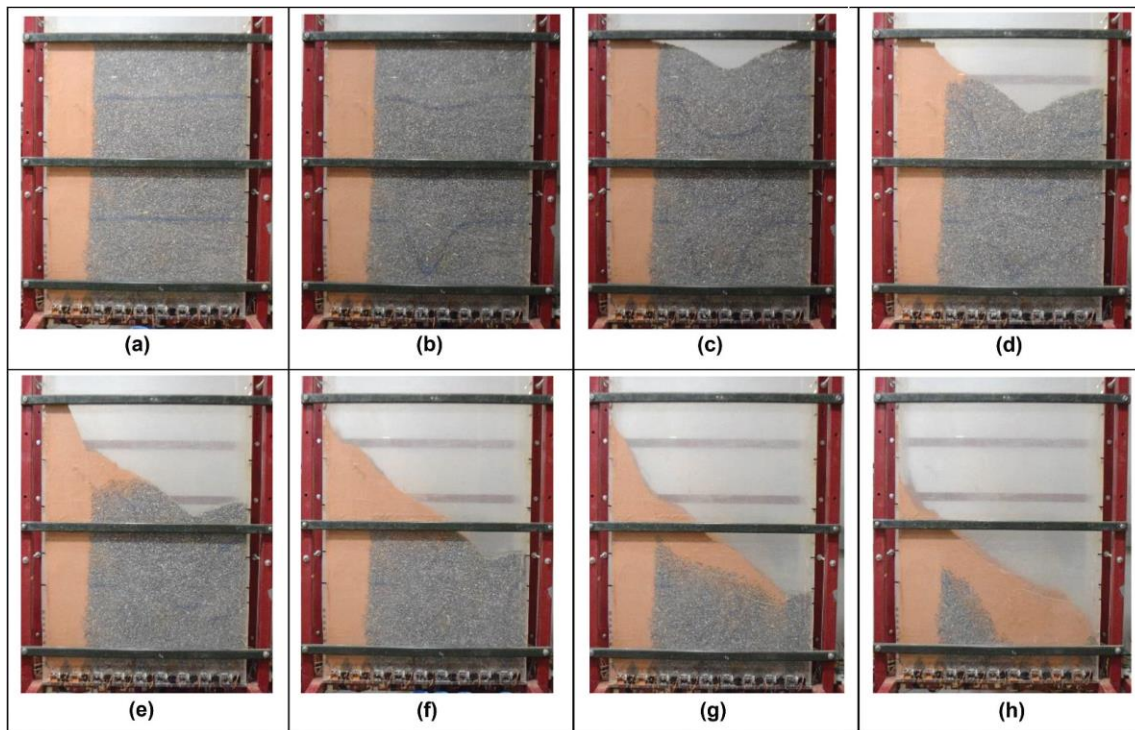


Figura 2.20:Experimento 3 realizado por Gómez et. al. (2025)

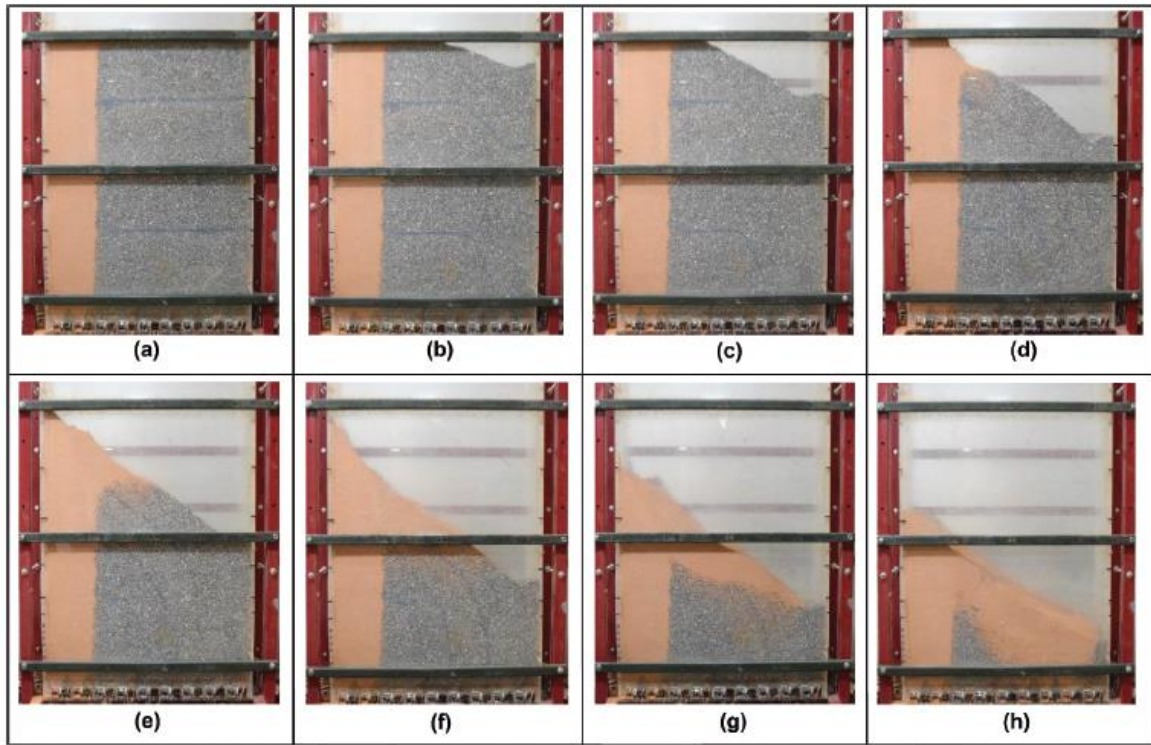


Figura 2.21: Experimento 4 realizado por Gómez et. al. (2025)

Finalmente, los autores concluyeron que la secuencia de extracción constituye un parámetro clave para optimizar la recuperación y minimizar la dilución. En particular, cuando el pilar estancado es pequeño o inexistente, se recomienda una extracción que se aleje del frente de material fino, mientras que en casos con pilares de mayor tamaño (superiores a 30 m), resulta más conveniente una estrategia de extracción opuesta, orientada a evitar la entrada temprana de finos en la zona productiva.

2.5 Método de elementos Discretos

El Método de Elementos Discretos (DEM, por sus siglas en inglés) es una técnica numérica de simulación de enfoque Lagrangiano, ampliamente utilizada para modelar el comportamiento de materiales granulares. A diferencia de los métodos de tipo continuo, el DEM trata a cada partícula como una entidad individual con seis grados de libertad (tres traslacionales y tres rotacionales), permitiendo describir de manera precisa su movimiento en el espacio.

El método se fundamenta en la detección de contactos entre partículas (figura 2.22) y en la aplicación de modelos de interacción, que permiten calcular las fuerzas de contacto (normales y tangenciales) que actúan durante las colisiones. Posteriormente, mediante las leyes de Newton y técnicas de integración

numérica, se actualizan las posiciones y velocidades de cada partícula a lo largo del tiempo. Este enfoque permite capturar efectos como colisiones, fricción, rotación y traslación de forma explícita.

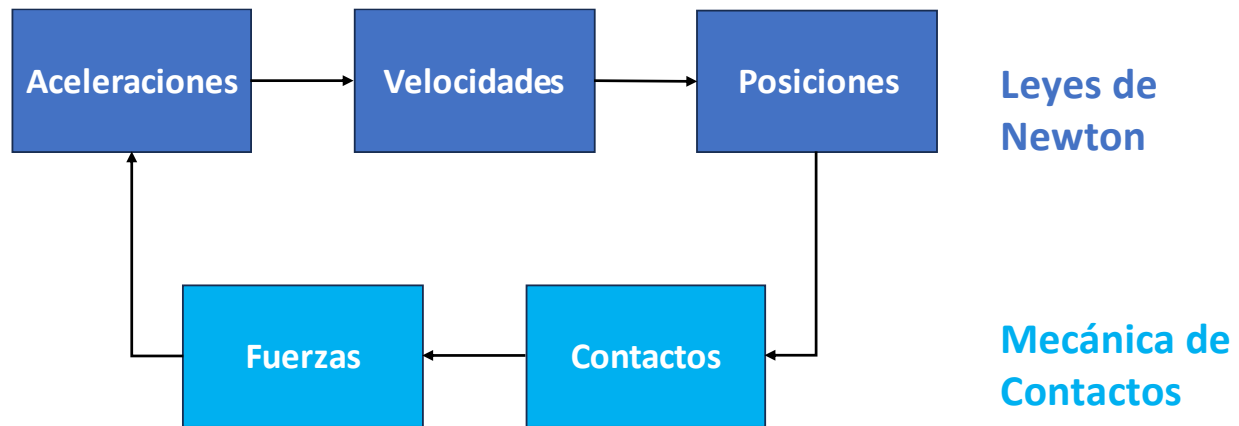


Figura 2.22: Algoritmo de detección de Contactos de EDEM

Las formulaciones más comunes dentro del DEM adoptan el tipo soft-sphere, donde se permiten pequeñas superposiciones entre partículas para representar deformaciones locales durante el contacto, a partir de las cuales se calculan las magnitudes de las fuerzas. Esta metodología resulta especialmente útil para simular sistemas con grandes desplazamientos y flujos de materiales discontinuos, superando las limitaciones de los modelos continuos en el tratamiento de la microestructura del material. (Theoretical Background behind the Discrete Element Method (DEM), n.d.)

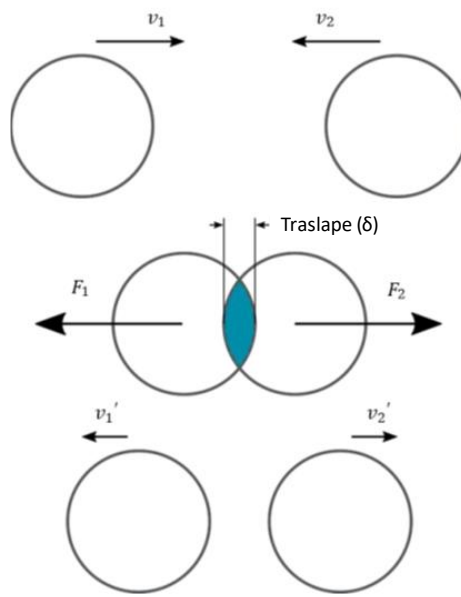


Figura 2.23: Diagrama de colisión de tipo Soft-Sphere

Tras la definición de las colisiones, se determinan los movimientos de las partículas, considerando tanto sus componentes rotacionales (4) como traslacionales (5), mediante la aplicación de las ecuaciones respectivas.

$$I \frac{d\omega}{dt} = M \quad (4)$$

Donde:

- I: Momento de Inercia
- ω : Velocidad Angular
- M: Torque de contacto resultante Actuando sobre la partícula.
- t: tiempo

$$m \frac{dv}{dt} = F_g + F_c + F_{nc} \quad (5)$$

Donde:

- m : Masa de la partícula
- v : Velocidad de traslación
- F_g : Fuerza gravitacional resultante actuando sobre la partícula
- F_c : Fuerza de contacto entre partículas o paredes adyacentes
- F_{nc} : Fuerza por no contacto entre partículas y paredes adyacentes

A partir de las aceleraciones calculadas, se lleva a cabo la integración numérica para determinar la evolución a través del tiempo de la velocidad (6) y la posición (7) de las partículas, tal como se presenta a continuación.

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a(t)\Delta t \quad (6)$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t \quad (7)$$

Donde

- $v(t)$: Velocidad en el tiempo t
- $a(t)$: Aceleración en el tiempo t
- Δt : paso de tiempo
- $x(t)$: posición en el tiempo t

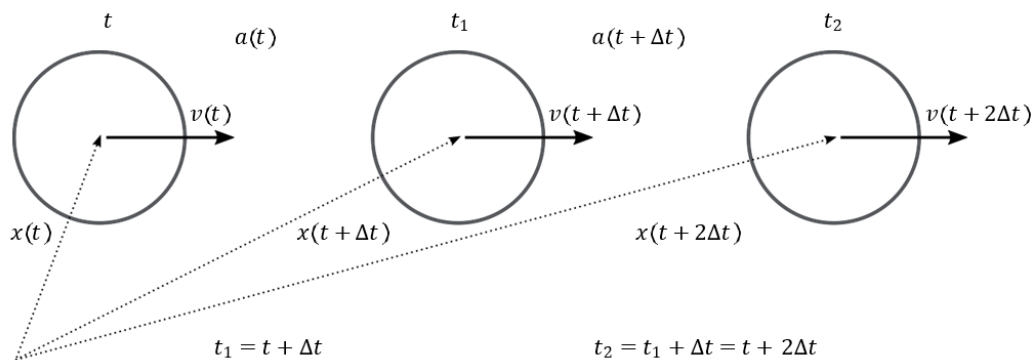


Figura 2.24: Movimiento de una partícula calculado en función de su aceleración, velocidad y posición.

En las simulaciones realizadas mediante el Método de Elementos Discretos (DEM), la selección de un paso de tiempo (Δt) adecuado es un factor crítico para asegurar la estabilidad numérica y la validez física del modelo. Habitualmente, Δt se encuentra en el rango de 10^{-4} s a 10^{-6} s, es decir, entre 10 y 100 veces más pequeño que el utilizado en simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

Esta diferencia se justifica por dos razones principales. En primer lugar, un paso de tiempo reducido evita el solape excesivo entre partículas, lo cual impediría la generación de fuerzas de contacto realistas y produciría valores numéricamente inestables. En segundo lugar, un Δt pequeño permite controlar los efectos de las ondas de perturbación —conocidas como ondas de Rayleigh— que se propagan a través del medio granular y pueden afectar el cálculo de fuerzas si no son resueltas temporalmente con suficiente detalle. Las ondas de Rayleigh corresponden a perturbaciones elásticas superficiales que se propagan a través del medio granular, incluso desde partículas que no se encuentran en contacto directo. Debido a su naturaleza, estas ondas pueden influir en el estado dinámico de una partícula aun cuando el origen de la perturbación se encuentra a cierta distancia.

Por esta razón, la selección de un paso de tiempo suficientemente pequeño es fundamental. Un Δt reducido evita que las ondas de Rayleigh distorsionen los cálculos numéricos y asegura que la transmisión de fuerzas entre partículas sea físicamente realista y estable dentro del modelo. Este paso de tiempo está definido por la siguiente ecuación.

$$T_R = \frac{\pi R \sqrt{\frac{\rho}{G}}}{0.1631\nu + 0.8766} \quad (8)$$

Donde :

- T_R : Paso de tiempo de Rayleigh
- R : Radio de la partícula
- ρ : Densidad de la partícula
- G : Modulo de Corte
- ν : Modulo de Poisson de la partícula

En resumen, el DEM ofrece una herramienta poderosa para el análisis detallado del comportamiento colectivo de sistemas particulados, siendo aplicable a una amplia gama de materiales como minerales, granos agrícolas, comprimidos farmacéuticos, entre otros.

Este método ha sido ampliamente utilizado en diversos estudios para la simulación de medios granulares en contextos mineros. Un ejemplo relevante es el trabajo desarrollado por Rayo et al. (2016), en el cual se demostró la efectividad del DEM para modelar el comportamiento del método de explotación *Block*

Caving. En dicho estudio, se compararon los resultados obtenidos mediante un modelo numérico basado en DEM con aquellos provenientes de un modelo físico a escala, evidenciando una buena correlación entre ambos enfoques y validando la capacidad del método para representar fenómenos complejos asociados a la fragmentación y el flujo de material.

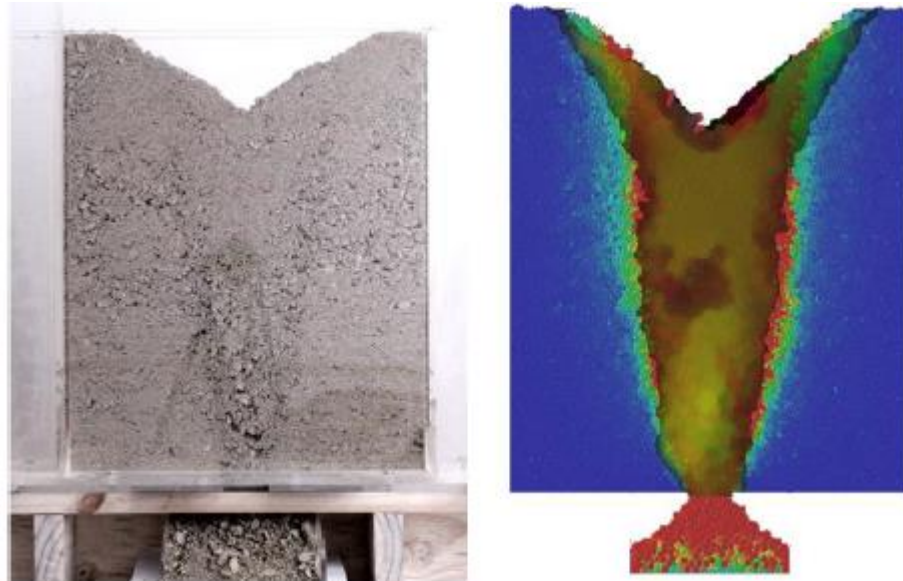


Figura 2.25: Comparación de modelo físico con modelo DEM Rayo et al. (2016).

3 Metodología

3.1 Montaje experimental

Para el desarrollo de este estudio se preparó un montaje experimental a escala, diseñado con el objetivo de simular el comportamiento de un bloque bajo el método de explotación Block Caving. Dicho montaje representa un bloque de 133 m de altura, reducido a una escala de 1:257, lo que permite reproducir las condiciones geométricas fundamentales del fenómeno a investigar, manteniendo al mismo tiempo un tamaño manejable en términos de modelamiento y simulación.

El prototipo se materializó en un contenedor de dimensiones 321,46 mm de ancho, 388,86 mm de largo y 15 mm de espesor (Figura 3.1)., configurado para alojar el material granular a ensayar. En su base, el modelo dispone de ocho puntos de extracción estratégicamente distribuidos, cada uno reforzado mediante pilares inclinados a 45° , con una altura de 35 mm. La distancia entre los puntos de extracción se definió en 60 mm entre centros, lo que busca representar una disposición regular y comparable con configuraciones utilizadas en investigaciones previas

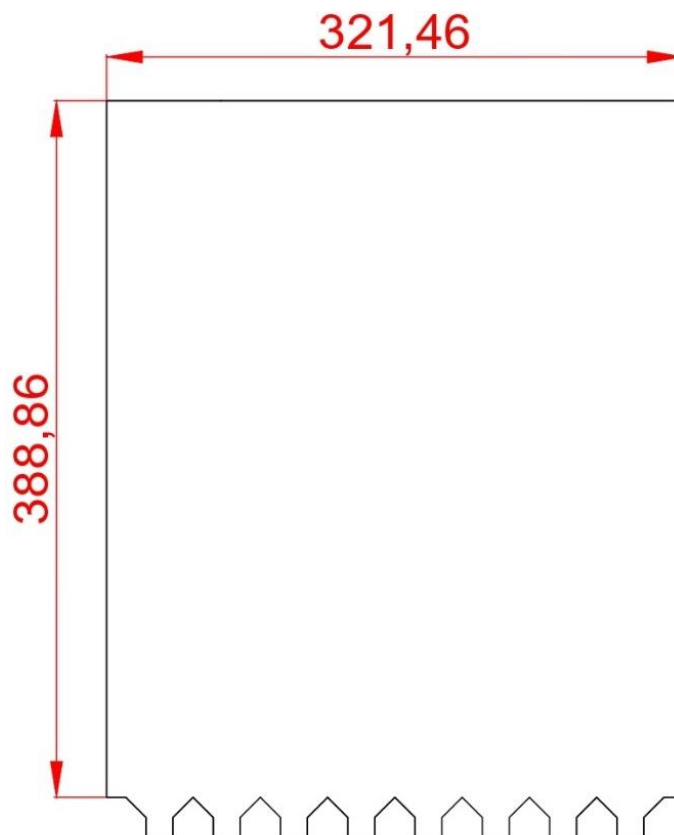


Figura 3.1: Vista de perfil de montaje experimental.

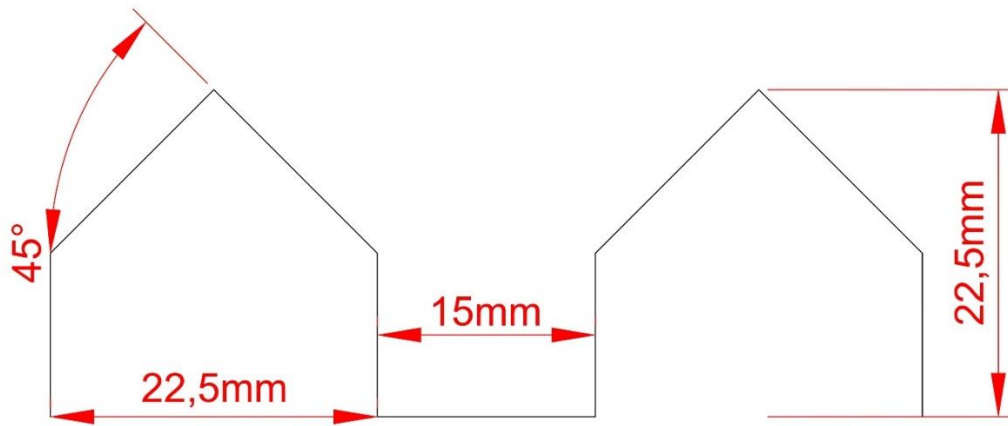


Figura 3.2: Pilares del modelo utilizado

El diseño geométrico del montaje fue desarrollado en AutoCAD 3D, software que permitió definir con precisión la escala, las dimensiones y la ubicación de los puntos de extracción. Posteriormente, el modelo fue exportado e implementado en el software de simulación EDEM, especializado en el método de elementos discretos (DEM, por sus siglas en inglés). Este procedimiento permitió generar un ambiente de simulación en el que las partículas interactúan de manera realista, reproduciendo procesos de flujo, hundimiento y propagación de esfuerzos, característicos del método Block Caving.

Cabe destacar que el tamaño seleccionado para este modelo experimental responde a un criterio de balance entre representatividad y viabilidad computacional. En efecto, se buscó imitar el esquema propuesto por Aravena et. al. (2024), quienes desarrollaron un modelo de referencia para el análisis de hundimiento y extracción en minería subterránea. Sin embargo, las altas demandas computacionales propias del método DEM, debido al elevado número de partículas requerido para simular un bloque de mayor escala, hicieron necesario ajustar las dimensiones del montaje. De esta manera, se logró un modelo que conserva las características esenciales del fenómeno físico a estudiar, al mismo tiempo que se mantiene dentro de las posibilidades prácticas de cómputo disponibles para esta investigación.

3.2 Partículas utilizadas

En el presente estudio se emplearon cinco tipos de partículas con el objetivo de representar adecuadamente las distintas fracciones granulométricas presentes en el proceso de hundimiento. El

primer tipo de partícula, denominado material grueso, corresponde a esferas de 3,0 mm de diámetro, las cuales fueron utilizadas para modelar el comportamiento del mineral dentro del sistema. Este tamaño fue seleccionado considerando que las partículas de mayor diámetro presentan menor movilidad y una tendencia a mantener la estructura del flujo, reproduciendo así el papel del mineral fragmentado en un bloque de hundimiento real.

Por otra parte, se definieron cuatro tipos de partículas finas, con diámetros de 1,1 mm, 1,2 mm, 1,5 mm y 2,0 mm, designadas en su conjunto como material estéril. Estas partículas representan los componentes de menor tamaño y mayor movilidad, que corresponden a los finos presentes en la roca de caja o el material de relleno que tiende a mezclarse con el mineral durante la extracción. La inclusión de diferentes tamaños dentro de esta categoría permitió analizar el efecto de la variación granulométrica sobre la migración y entrada de dilución, proporcionando una base comparativa entre configuraciones con distintas relaciones de tamaño.

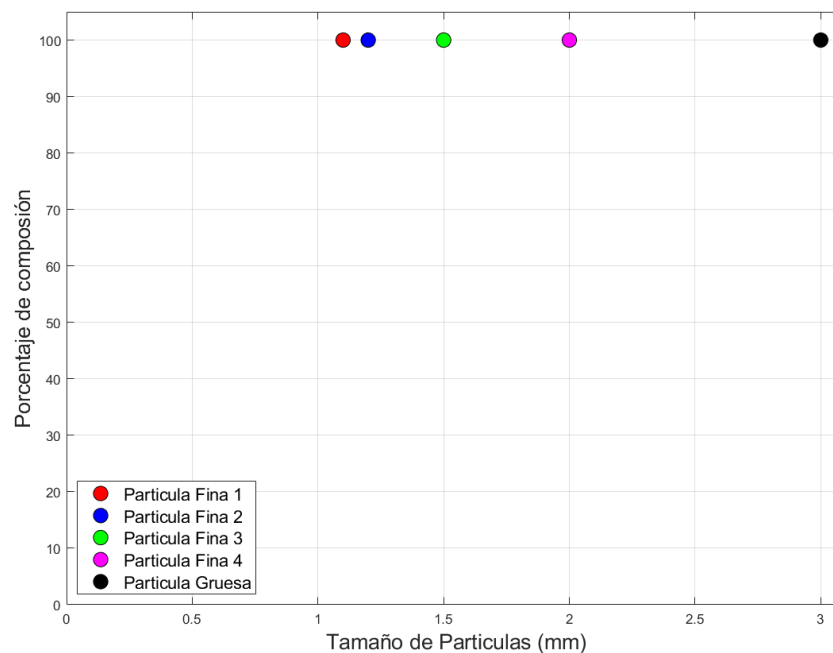


Figura 3.3: (a) Dimensiones partículas material grueso; (b) Dimensiones partículas material fino

En términos conceptuales, el material grueso fue asumido como el mineral útil, mientras que las partículas finas fueron consideradas como estéril, siguiendo la convención adoptada en estudios previos de Aravena et. al. (2024) y Castro et al. (2022). Esta diferenciación permitió evaluar la interacción entre

ambos tipos de material bajo condiciones controladas, identificando los mecanismos de segregación y mezcla que dan origen a la dilución durante el proceso de hundimiento.

A partir de las dimensiones asignadas a cada tipo de partícula, se calcularon los respectivos valores de la relación d_f/d_g , la cual permite cuantificar la diferencia de escala entre el material fino y el material grueso incluido en el modelo.

Tabla 3-1: Ratio d_f/d_g para cada partícula fina

Partícula	Ratio d_f/d_g
Fino 1	0.38
Fino 2	0.40
Fino 3	0.50
Fino 4	0.67

3.3 Propiedades Geomecánicas

Para el presente estudio se definieron las propiedades geomecánicas del material que se detallan a continuación, con el propósito de asegurar un comportamiento realista y representativo en las simulaciones desarrolladas mediante el Método de Elementos Discretos (DEM). La correcta selección y parametrización de estas propiedades es un aspecto fundamental dentro del modelado numérico, ya que determina la forma en que las partículas interactúan entre sí y con las fronteras del dominio, afectando directamente la precisión de los resultados obtenidos.

Entre las variables consideradas se incluyen los parámetros de densidad de las partículas, coeficientes de fricción estática y dinámica, coeficiente de restitución, así como los módulos elásticos y de rigidez de contacto. Cada uno de estos parámetros fue ajustado en función de los valores reportados en la literatura para materiales granulares de cuarzo, garantizando que el modelo reproduzca con fidelidad el comportamiento mecánico observado en sistemas reales de flujo gravitacional.

La definición de estas propiedades permitió establecer condiciones iniciales coherentes con las características físicas del material ensayado y con los objetivos de la simulación. De este modo, se logró representar de forma precisa los fenómenos de interacción, segregación y migración de partículas que se desarrollan durante el proceso de hundimiento. Además, una adecuada calibración de las propiedades geomecánicas contribuye a optimizar la estabilidad numérica del modelo, evitando comportamientos no físicos, como penetraciones excesivas entre partículas o velocidades de contacto irreales.

En conjunto, la correcta definición de las propiedades del material constituye un paso esencial en el proceso de modelación DEM, ya que garantiza la consistencia entre los resultados simulados y los comportamientos observados experimentalmente, fortaleciendo así la validez de las conclusiones obtenidas a partir del presente estudio.

Tabla 3-2: Propiedades geomecánicas

Parámetro	Valor	Unidad
Módulo de Poisson	0.46	-
Coeficiente de restitución	0.3	-
Densidad	2700	kg/m^3
Módulo de Young	3.01	MPa
Módulo de Corte	1.03	MPa

3.4 Disposición de partículas

Para lograr una disposición precisa y controlada de las partículas dentro del modelo, se desarrollaron geometrías auxiliares mediante el software AutoCAD, las cuales reproducen fielmente la forma y los límites de las secciones correspondientes a las zonas de material fino y material grueso (Figura 3.3). Estas geometrías fueron posteriormente importadas al software EDEM y configuradas con el atributo de “Geometría Virtual”, lo que implica que dichos elementos no poseen masa ni propiedades físicas, actuando únicamente como referencias espaciales.

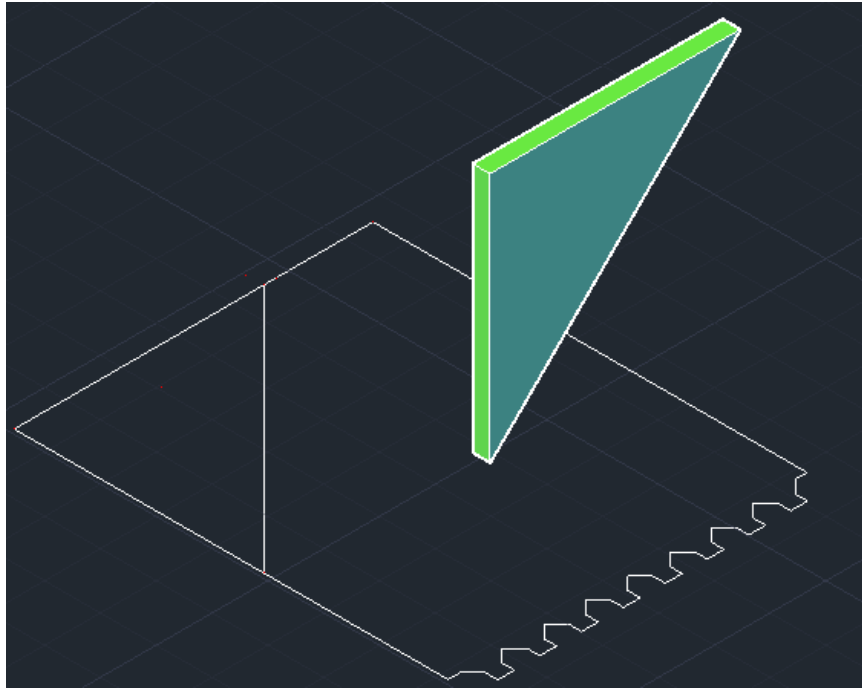


Figura 3.4: Geometría auxiliar caso 45°

Cada una de estas geometrías fue configurada como una fábrica de partículas (particle factory), encargada de generar una cantidad controlada del tipo de partícula correspondiente —ya sea fina o gruesa— en la ubicación definida. Con el fin de mantener un equilibrio adecuado entre la precisión del modelo numérico y la eficiencia computacional, se estableció una tasa de creación equivalente a tres cuartas partes del número total de partículas generadas por segundo, optimizando así el tiempo de procesamiento sin comprometer la representatividad física del modelo.

Por otro lado, para evitar la mezcla prematura de partículas durante la etapa inicial de generación, se implementó un plano físico separador entre las dos geometrías de material (Figura 3.5). Este plano actuó como una barrera temporal, garantizando la segregación de los materiales durante el llenado del contenedor. Una vez alcanzada la cobertura completa de la interfaz entre ambos tipos de partículas, el plano fue cuidadosamente retirado, permitiendo así la formación natural de la superficie de contacto entre las fracciones fina y gruesa bajo condiciones controladas.

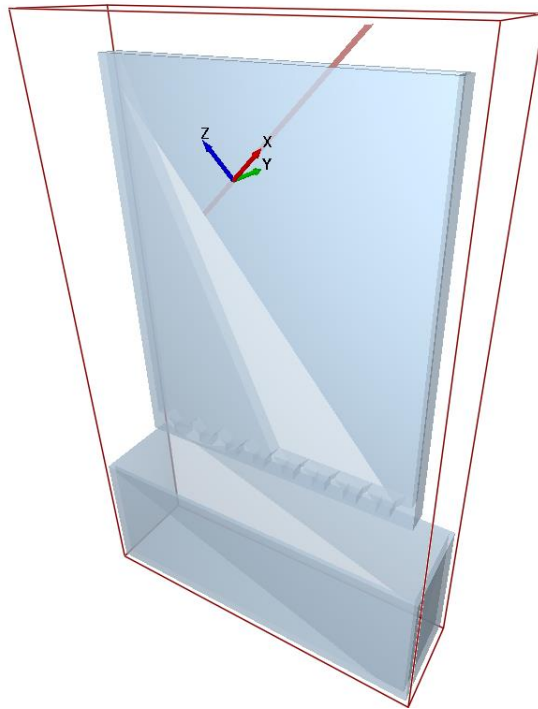


Figura 3.5: Plano físico que separa partículas finas de las gruesas

En los casos extremos, cuando la interfaz se dispuso a 90° o a 0° , el material estéril configuró una geometría rectangular, como se observa en las Figuras 3.6(a) y 3.6(e).

Por otra parte, cuando la interfaz del material fino interceptó con ambas paredes del modelo o con el piso del contenedor, se obtuvieron configuraciones geométricas más complejas, representadas en las Figuras 3.3(b) y 3.3(d), respectivamente. En estas disposiciones, el área ocupada por el material estéril puede descomponerse en dos regiones geométricas:

1. Un triángulo rectángulo, con un ángulo θ° (caso b) o de $90^\circ - \theta^\circ$ (caso d). En el caso b, este triángulo posee un cateto adyacente de 321,46 mm, mientras que en el caso del cateto adyacente corresponde a 388,88 mm.
2. Un rectángulo adyacente, que comparte un lado con el cateto anterior, y cuyo otro lado tiene dimensiones definidas por los parámetros h o a , según corresponda al caso analizado.

El procedimiento de cálculo de estas medidas es análogo para ambos escenarios, variando únicamente los valores del ángulo y del cateto adyacente de referencia. A continuación, se presenta el desarrollo correspondiente al caso b:

$$CO = 321.46\text{mm} \cdot \tan(\theta) \quad (9)$$

$$\text{Area triangulo} = \frac{CO \cdot 321.46\text{mm}}{2} \quad (10)$$

$$h = \frac{(25000\text{mm}^2 - \text{Area triangulo})}{321.46\text{mm}} \quad (11)$$

Finalmente, en el escenario en el que la interfaz toca únicamente una de las paredes del contenedor, representado en la Figura 3.6(c), la geometría formada corresponde a un triángulo rectángulo cuyos catetos tienen longitudes a y b. Para obtener estos valores se aplicó el siguiente procedimiento:

$$b = \sqrt{\tan(\theta) \cdot 2 \cdot 25000\text{mm}^2} \quad (12)$$

$$a = \frac{2 \cdot 25000\text{mm}^2}{b} \quad (13)$$

En la Figura 3.6 se presentan gráficamente los diferentes casos analizados:

- (a) Material dispuesto con interfaz de 0° ,
- (b) Interfaz en contacto con ambas paredes,
- (c) Interfaz en contacto con una pared,
- (d) Interfaz en contacto con el suelo del modelo,
- (e) Material dispuesto con interfaz de 90°

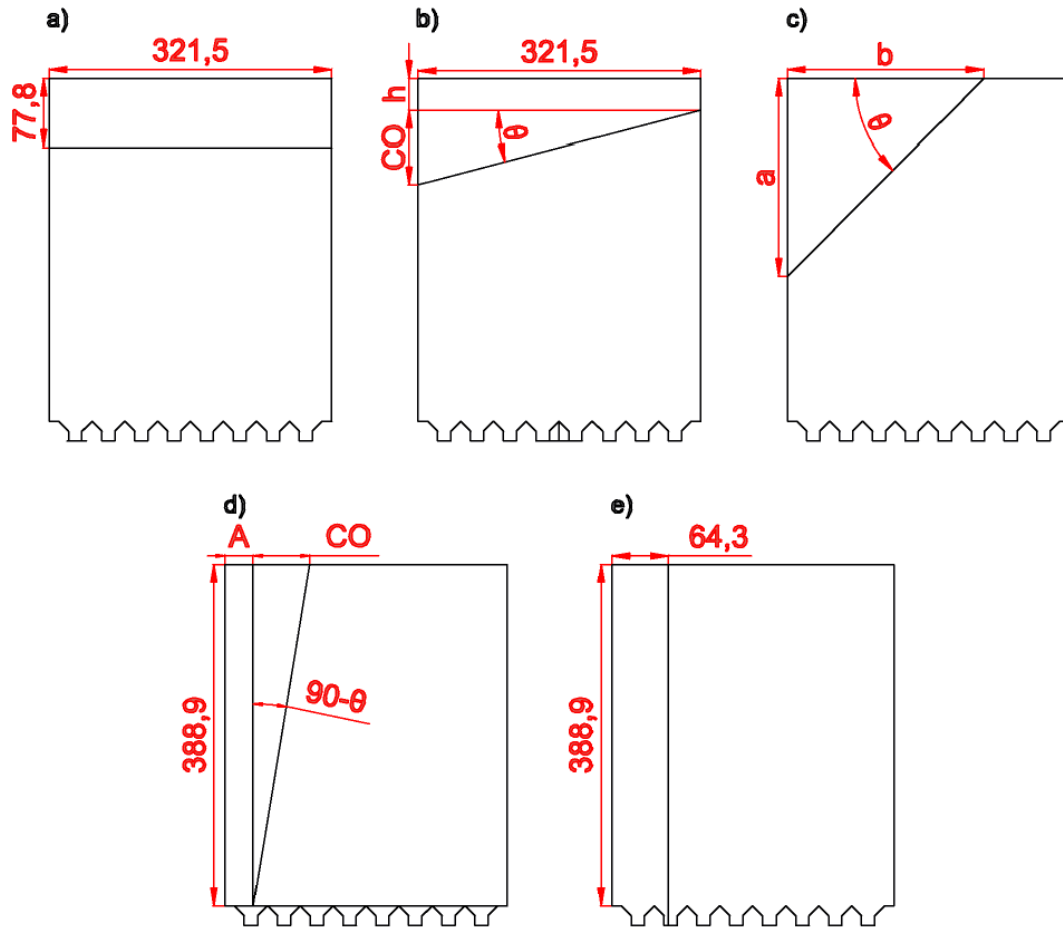


Figura 3.6: (a) Material dispuesto a 0°; (b) la interfase toca ambas paredes; (c) La interfase toca una pared; (d) la interfase toca el suelo del modelo; (e) material dispuesto a 90°.

3.5 Cuantificación de la Dilución

Para la cuantificar la migración de finos. en este estudio se empleará el procedimiento utilizado por (Aravena & Palma, 2023) donde se utilizó la ecuación:

$$Dilución\% = \frac{M_{Esteril}}{M_{mineral} + M_{esteril}} \cdot 100\% \quad (14)$$

Además, para poder realizar un análisis más completo se comparará la dilución con el porcentaje total de material extraído:

$$\%extraido = \frac{M_{Extraido}}{M_{total}} \cdot 100\% \quad (15)$$

3.6 Medición de masa extraída

Para medir con precisión la masa del material extraído, se incorporó en la parte inferior del modelo un recipiente colector equipado con dos sensores virtuales de masa independientes. Estos sensores operan detectando cada partícula que ingresa en su área de influencia y registrando su masa de forma acumulativa durante todo el proceso de extracción. Con el objetivo de obtener una caracterización más detallada del comportamiento del flujo, se configuraron dos tipos de medición: un sensor global, encargado de registrar la masa total del material extraído, y un sensor selectivo, destinado exclusivamente a cuantificar la masa correspondiente a las partículas finas. Esta configuración permitió distinguir con mayor precisión la contribución de cada fracción granulométrica al proceso de dilución y analizar su evolución a lo largo de las distintas etapas del experimento.

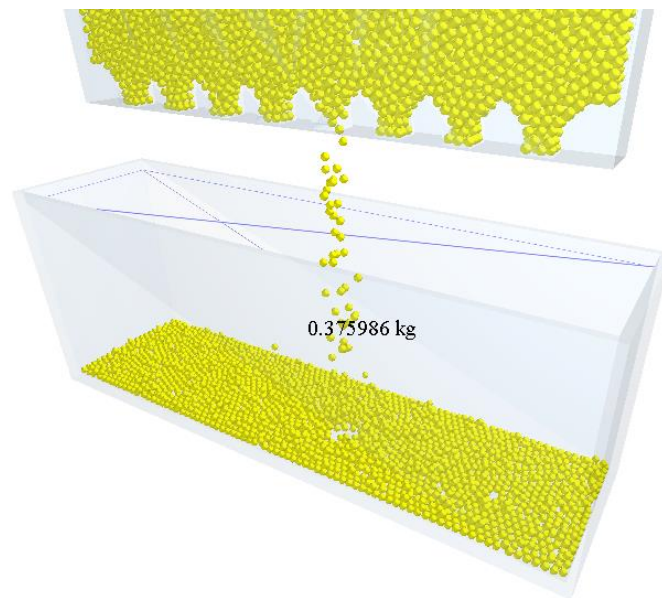


Figura 3.7: Sensor virtual de masa total

Los datos recopilados por los sensores son exportados y posteriormente graficados, tal como se muestra en la Figura 3.9, con el objetivo de evaluar la consistencia y calidad de las mediciones obtenidas durante el experimento. Este procedimiento permite identificar de manera temprana la presencia de posibles anomalías o comportamientos atípicos en los registros de masa, los cuales podrían deberse a errores en la velocidad de depositario de las, falta o exceso de llenado del modelo o problemas en la configuración del modelo.

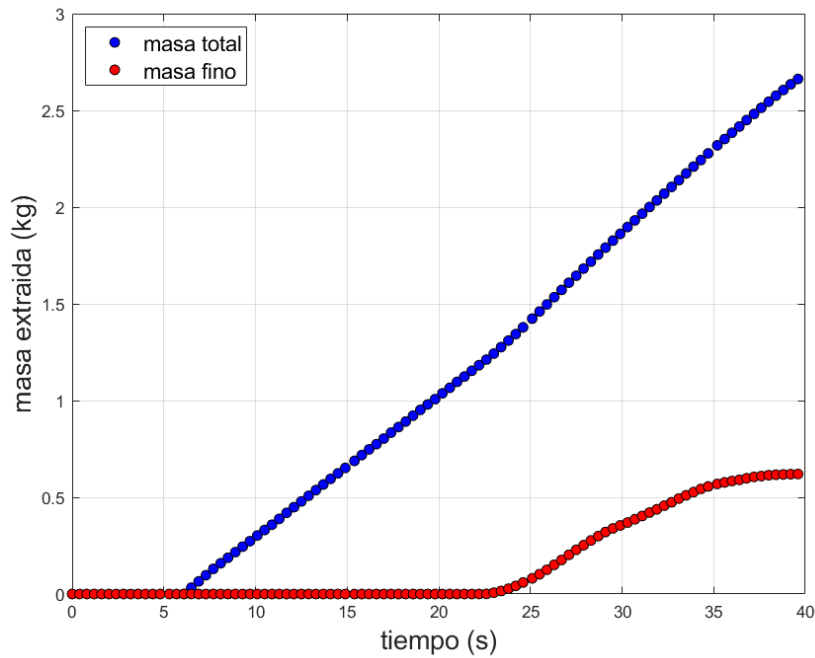


Figura 3.8: Grafico de masas extraídas caso 45°

La representación gráfica de los resultados constituye una herramienta fundamental para el control de calidad experimental, ya que facilita la comparación entre las tendencias esperadas y los valores efectivamente observados. En caso de detectarse desviaciones significativas respecto al comportamiento teórico o inconsistencias entre los sensores, se procede a revisar las condiciones de simulación o, de ser necesario, repetir el experimento para garantizar la validez y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

Una vez verificada la correcta ejecución de la simulación y descartada la presencia de errores o comportamientos anómalos en los datos obtenidos, se procede al cálculo del porcentaje de dilución mediante la aplicación de la ecuación (9). Este parámetro constituye una de las principales métricas de evaluación del desempeño del modelo, ya que permite cuantificar de manera directa la proporción de material estéril que se mezcla con el mineral durante el proceso de extracción.

El cálculo se realiza considerando la relación entre la masa de partículas finas extraídas y la masa total acumulada, integrando los valores registrados por los sensores de medición en cada intervalo de tiempo. Posteriormente, los resultados son representados gráficamente, tal como se muestra en la Figura 3.10, donde se presenta la evolución del porcentaje de dilución en función de la masa total extraída. Esta representación permite observar la tendencia de incremento o estabilización de la dilución a lo largo del proceso, facilitando la identificación de posibles comportamientos críticos asociados a la geometría del modelo, las condiciones de interfaz o la secuencia de extracción aplicada.

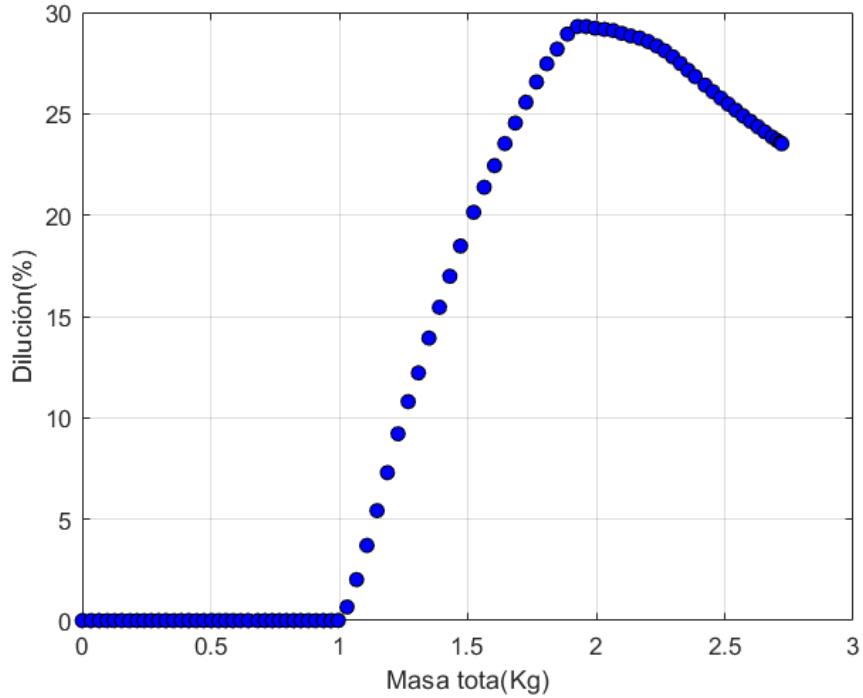


Figura 3.9: Grafico de dilución caso 00°

De esta forma, el análisis gráfico no solo valida el correcto desarrollo de la simulación, sino que también proporciona una herramienta clave para interpretar la eficiencia del proceso de hundimiento y evaluar el impacto de las variables de diseño sobre la generación de dilución.

Finalmente, los valores máximos de dilución obtenidos en cada experimento fueron organizados y representados en función del ángulo de interfase entre el material fino y el material grueso, tal como se presentará en la sección de Resultados. Esta representación gráfica permite visualizar de manera clara la relación entre la geometría de contacto y la magnitud de la dilución alcanzada, proporcionando una visión comparativa de cómo las variaciones angulares influyen en el comportamiento del flujo y en la mezcla de materiales durante la extracción.

El análisis de estos valores máximos resulta fundamental, ya que resume el punto de mayor interacción entre el material estéril y el mineral, reflejando las condiciones en que la dilución alcanza su nivel crítico. A través de esta comparación, es posible identificar tendencias consistentes entre los distintos casos experimentales y determinar la existencia de un ángulo de interfase óptimo, en el cual la dilución se minimiza. Este enfoque permite además contrastar los resultados obtenidos en el presente estudio con los reportados en la literatura previa, fortaleciendo la comprensión del fenómeno de migración de finos y su relación directa con la geometría del frente de hundimiento.

En conjunto, esta etapa del análisis no solo valida el comportamiento observado en las simulaciones, sino que también establece una base cuantitativa sólida para interpretar los mecanismos de dilución y su dependencia con el diseño geométrico del sistema de extracción, constituyéndose en un elemento clave dentro de la evaluación integral del proceso de hundimiento tipo Block Caving.

4 Análisis de Resultados

4.1 Contraste con Experimentos físicos

En relación con los resultados obtenidos en el presente estudio, al compararlos con los datos experimentales reportados por Aravena et. al. (2024), se evidencia un comportamiento general similar en cuanto a las tendencias de extracción observadas en ambos casos. Esta similitud sugiere una validación preliminar del modelo utilizado, aunque deben considerarse ciertas diferencias que surgen de las variaciones en el tamaño y forma de partícula, y en la escala geométrica del modelo empleado en esta investigación. Estas diferencias son esperables, dado que ambos factores influyen directamente en los patrones de flujo y en la dinámica de extracción de material, tal como ha sido ampliamente documentado en la literatura.

Particularmente, en los casos correspondientes a los ángulos de 0° y 45° , se observa una notable correspondencia entre los resultados numéricos obtenidos y los datos experimentales de Aravena, lo cual se refleja tanto en la forma del contorno de extracción como en la distribución espacial del material removido. Esto puede observarse claramente en las figuras 4.1 y 4.2, donde las trayectorias y zonas de vaciado muestran una alineación coherente con los patrones reportados por los autores mencionados. La coincidencia en estos casos refuerza la validez del enfoque metodológico adoptado, así como la representatividad del modelo utilizado.

Sin embargo, en el caso correspondiente al ángulo de 90° , representado en la figura 4.3, se identifica una diferencia más marcada con respecto a los resultados experimentales previos. En este escenario, se aprecia una mayor dispersión lateral del material extraído, lo que indica una dilución del patrón principal de extracción. Esta divergencia podría explicarse por varios factores. En primer lugar, las dimensiones de la batea utilizadas en este caso difieren respecto al estudio de referencia, lo que modifica las condiciones de confinamiento lateral y, por tanto, la dirección preferente del flujo de partículas. En segundo lugar, la forma y tamaño de las partículas juegan un rol determinante, ya que afectan la movilidad y el empaquetamiento del material, generando variaciones en la forma del cono de extracción. Estas diferencias resaltan la sensibilidad del sistema a los parámetros físicos involucrados y la necesidad de considerar estas variables al momento de comparar resultados entre distintos estudios.

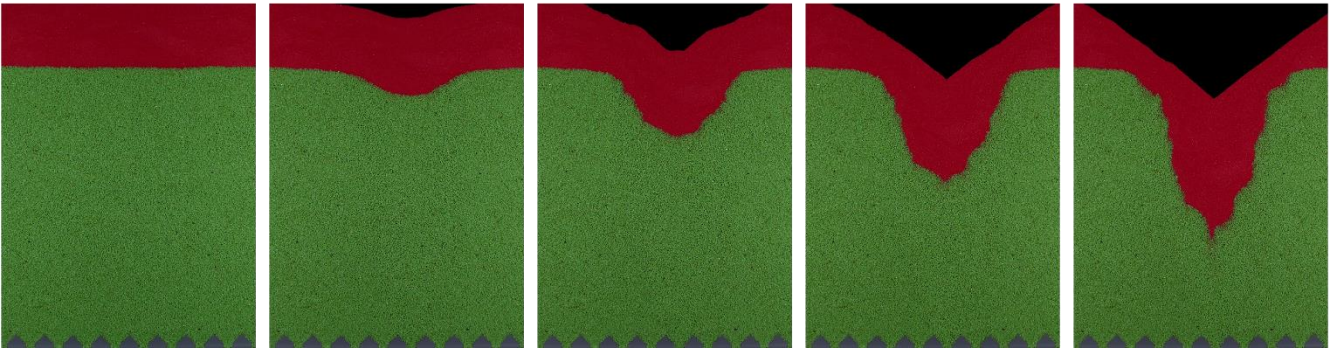
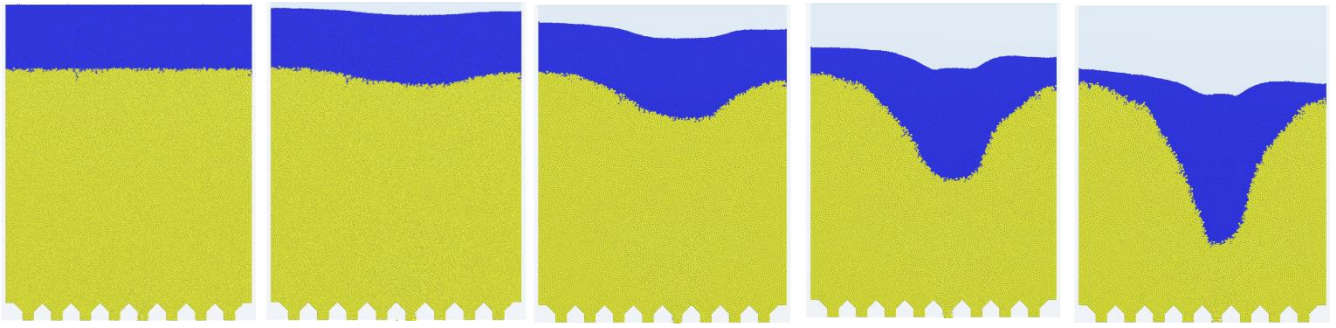


Figura 4.1: Comparación Caso 0° con *Aravena & Palma (2023)*

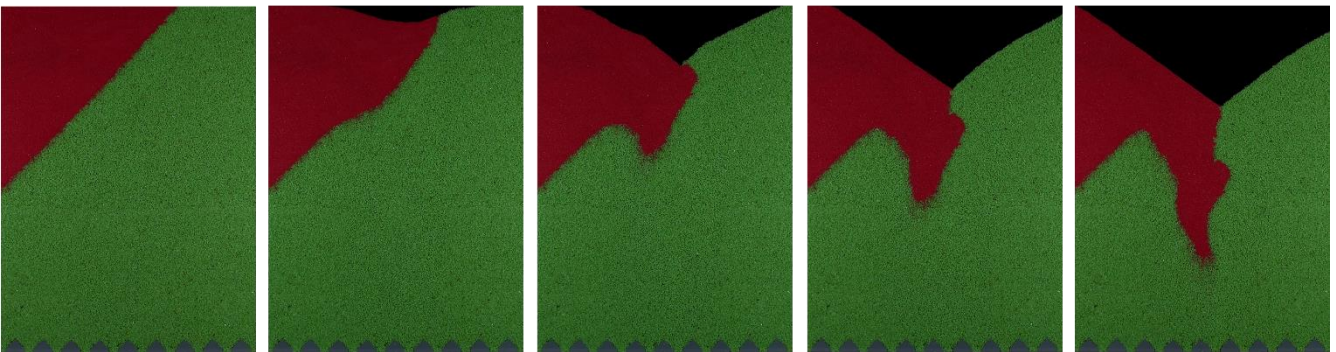
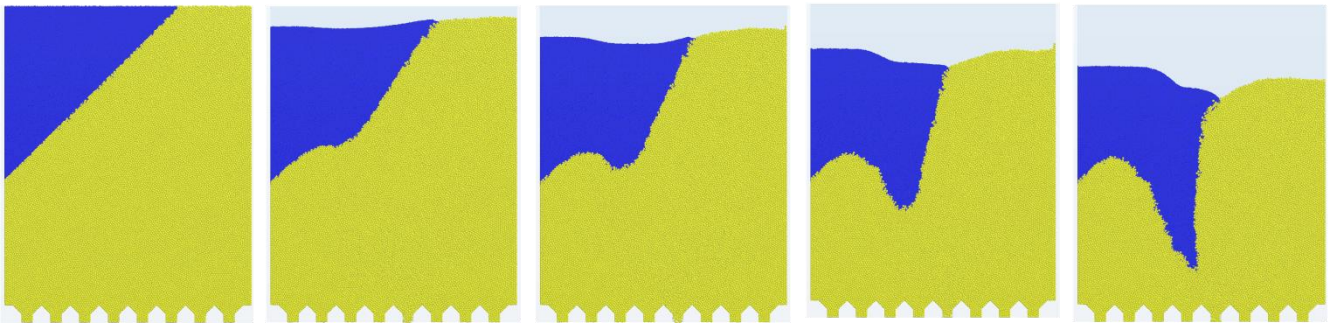


Figura 4.2: Comparación Caso 45° con *Aravena & Palma (2023)*

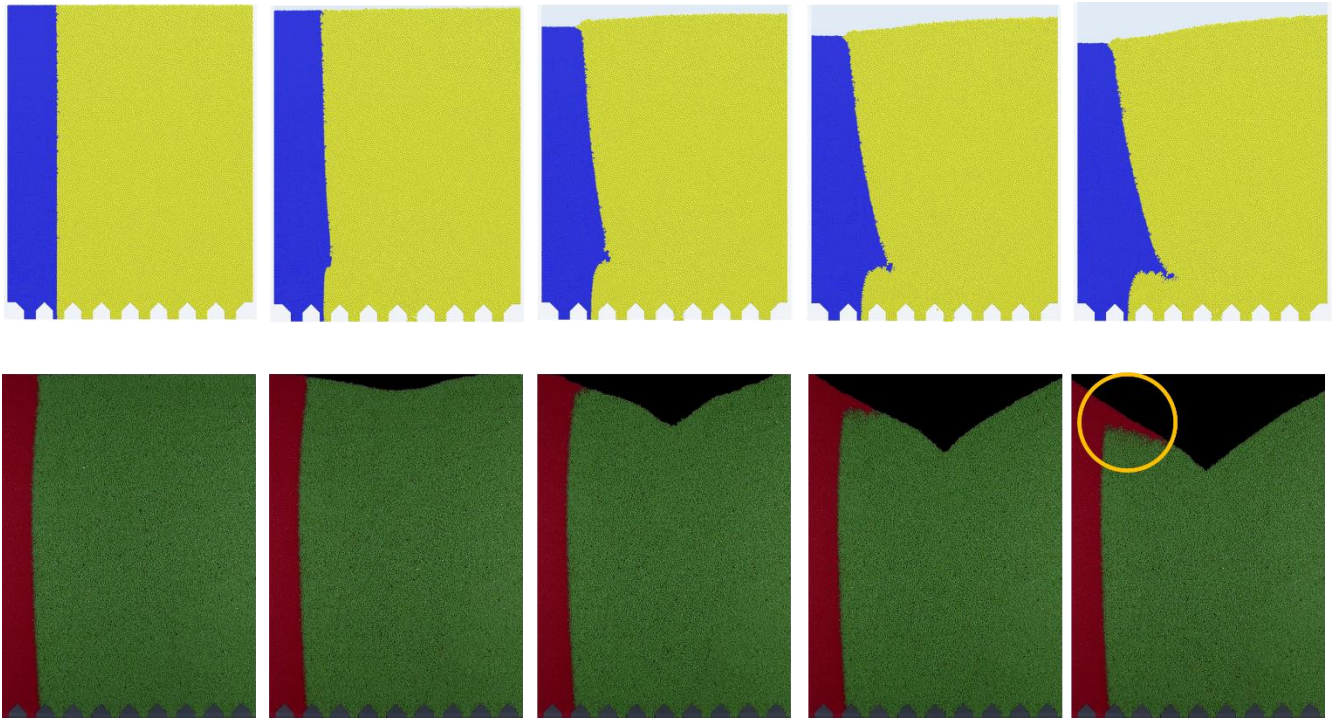


Figura 4.3: Comparación Caso 90° con Aravena & Palma (2023)

4.2 Resultados obtenidos

A partir de los experimentos realizados, cuyos resultados se presentan en las Figura 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 , se observa una tendencia general consistente con las observaciones reportadas por Aravena et al (2024) quien también identificó una relación inversa entre el ángulo de contacto y la magnitud de la dilución. En el presente estudio, dicha tendencia se mantiene con una clara disminución de la dilución total conforme aumenta el ángulo de contacto entre el material fino y el mineral, lo cual sugiere una mejora progresiva en la eficiencia del proceso de segregación. Este comportamiento indica que una geometría más inclinada favorece la estratificación del material, permitiendo que el mineral grueso fluya preferentemente hacia los puntos de extracción, mientras que el material fino tiende a permanecer confinado en las zonas superiores o laterales del modelo.

Desde un punto de vista físico, esta respuesta puede interpretarse como el resultado del equilibrio entre dos mecanismos opuestos. Por un lado, el aumento del ángulo de contacto mejora la estabilidad de la interfaz entre los materiales, reduciendo la probabilidad de mezcla durante el desplazamiento del flujo gravitacional y retrasando la entrada del material estéril hacia la zona productiva. Esta condición contribuye a una extracción más selectiva y controlada, lo que se traduce en menores niveles de dilución acumulada. Por otro lado, cuando el ángulo supera un umbral crítico, se observa una pérdida de

estabilidad en el frente de contacto, atribuible a la generación de zonas de vacío y esfuerzos diferenciales que inducen deslizamientos locales o colapsos parciales del material fino sobre el mineral. Este fenómeno promueve la infiltración temprana de partículas estériles en los puntos de extracción, incrementando nuevamente la dilución.

Como consecuencia de la interacción entre ambos mecanismos, la evolución de la dilución en función del ángulo de contacto adquiere una forma parabólica, con un punto mínimo que representa el equilibrio óptimo entre estabilidad geométrica y continuidad del flujo. Este comportamiento sugiere que existe un ángulo de contacto óptimo, dependiente de la relación de tamaños y del coeficiente de uniformidad de los materiales, en el cual se minimiza la contaminación del mineral extraído. Dicho ángulo define una condición geométrica de operación ideal que podría utilizarse como parámetro de diseño en la planificación de sectores de hundimiento, especialmente en aquellos donde la presencia de materiales finos constituye una fuente significativa de dilución.

Finalmente, al comparar los resultados obtenidos en este estudio con los trabajos previos de Aravena et al. (2024), se observa que, si bien la tendencia parabólica se mantiene, la magnitud de la dilución reportada es menor en las simulaciones actuales. Esta diferencia puede explicarse principalmente por la mayor razón de tamaños entre partículas finas y gruesas, lo que reduce la capacidad de infiltración de los finos, así como por una menor proporción volumétrica de material fino en las pruebas realizadas. En conjunto, estos resultados confirman que el ángulo de contacto constituye un parámetro de control determinante en el proceso de hundimiento, capaz de modificar de forma significativa la cinemática del flujo y la eficiencia global de extracción, y que su correcta estimación puede contribuir a optimizar la selectividad y reducir la dilución en operaciones subterráneas tipo Block Caving..

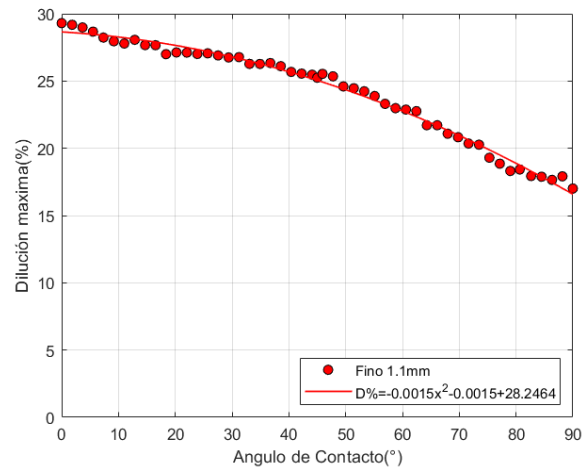


Figura 4.4: Resultados experimentales, caso 1.1mm

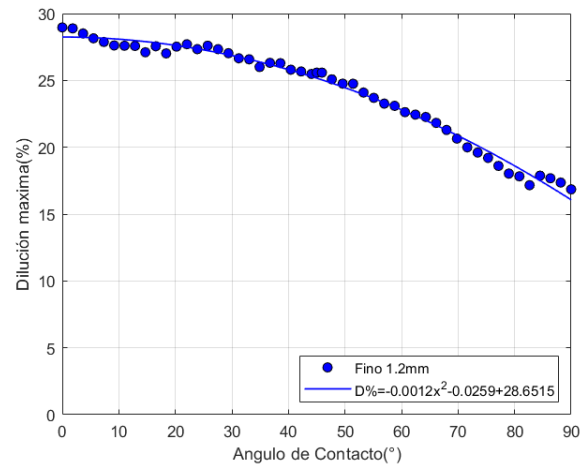


Figura 4.5: Resultado experimentales caso 1.2mm

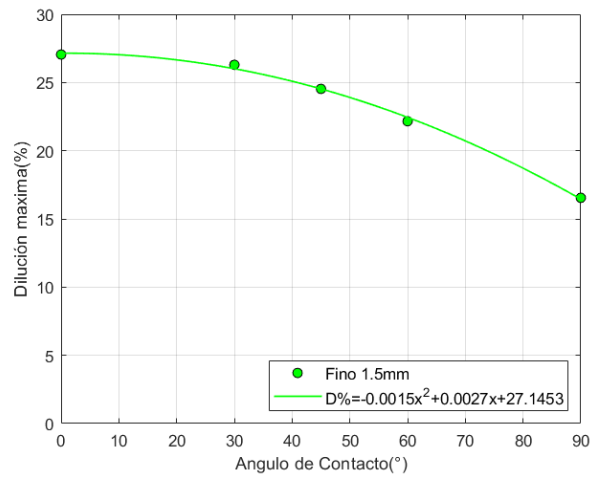


Figura 4.6: Resultado experimentales caso 1.5mm

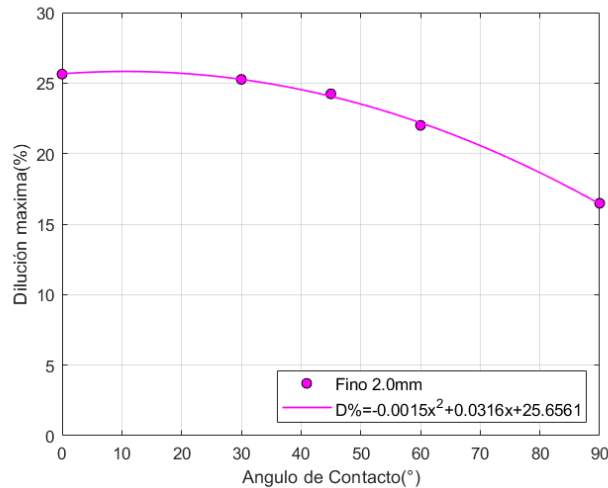


Figura 4.7: Resultado experimentales caso 2.0mm

4.3 Comparación de resultados con otros autores

Diversos estudios han abordado el fenómeno de migración de finos en sistemas de hundimiento gravitacional, aunque la mayoría de ellos ha sido desarrollada bajo condiciones controladas en las que el ángulo de contacto entre el material y el frente de extracción se mantiene igual a 0° . Bajo este enfoque, el interés se ha centrado principalmente en la evaluación de otras variables, tales como la relación entre material fino y material grueso, el porcentaje volumétrico de finos incorporado al modelo, el coeficiente de uniformidad granulométrica o la altura inicial de la columna de material. La ausencia de estudios que integren variaciones sistemáticas en el ángulo de contacto constituye una limitación para la comprensión global del proceso, ya que introduce una heterogeneidad experimental que dificulta la comparación directa y la extrapolación de conclusiones entre distintos autores.

Entre los trabajos más representativos se encuentran los desarrollados por Castro et al. (2022), Aravena et al. (2024) e Irribarra (2014), cuyos resultados son contrastados en las Figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7, mientras que sus principales parámetros experimentales se resumen en la Tabla 4.1. La comparación de estos antecedentes con los resultados obtenidos en el presente estudio permite evaluar de manera explícita la influencia del ángulo de contacto como variable de control en la entrada de dilución, demostrando que incluso variaciones reducidas en este parámetro pueden modificar de forma significativa la trayectoria

del flujo granular, la configuración del cono de hundimiento y la secuencia de mezcla entre fracciones finas y gruesas.

La correlación observada entre los resultados experimentales previamente reportados y aquellos derivados de este estudio aporta una base interpretativa más robusta para el entendimiento del fenómeno de migración de finos. En particular, se refuerza la hipótesis de que el ángulo de contacto no solo afecta el flujo vertical dominante, sino que también condiciona la magnitud y dirección de la propagación lateral de partículas finas, lo que incide directamente en la tasa de dilución y en la eficiencia del proceso de extracción. De esta manera, el ángulo de contacto se consolida como un parámetro clave en el control operacional del hundimiento y un factor potencialmente relevante para el diseño de estrategias de extracción secuencial en operaciones tipo Block Caving.

En conjunto, los resultados evidencian que la incorporación explícita del ángulo de contacto en estudios de migración de finos constituye un aporte metodológico necesario para avanzar hacia modelos más representativos de condiciones reales de minería subterránea, proporcionando una base cuantitativa útil para la optimización de diseño de caserones, disposición de puntos de extracción y planificación de secuencias de producción.

Tabla 4-1: Parámetros utilizados por otros autores

Autor	Ratio	Cu	Porcentaje de fino
Castro	0.06	1.5	35%
Castro	0.12	2.6	35%
Castro	0.18	3.8	35%
Aravena	0.24	1.1	20%
Aravena	0.09	1.1	20%
Aravena	0.24	1.1	40%
Aravena	0.09	1.1	40%
Iribara	0.02	2	35%

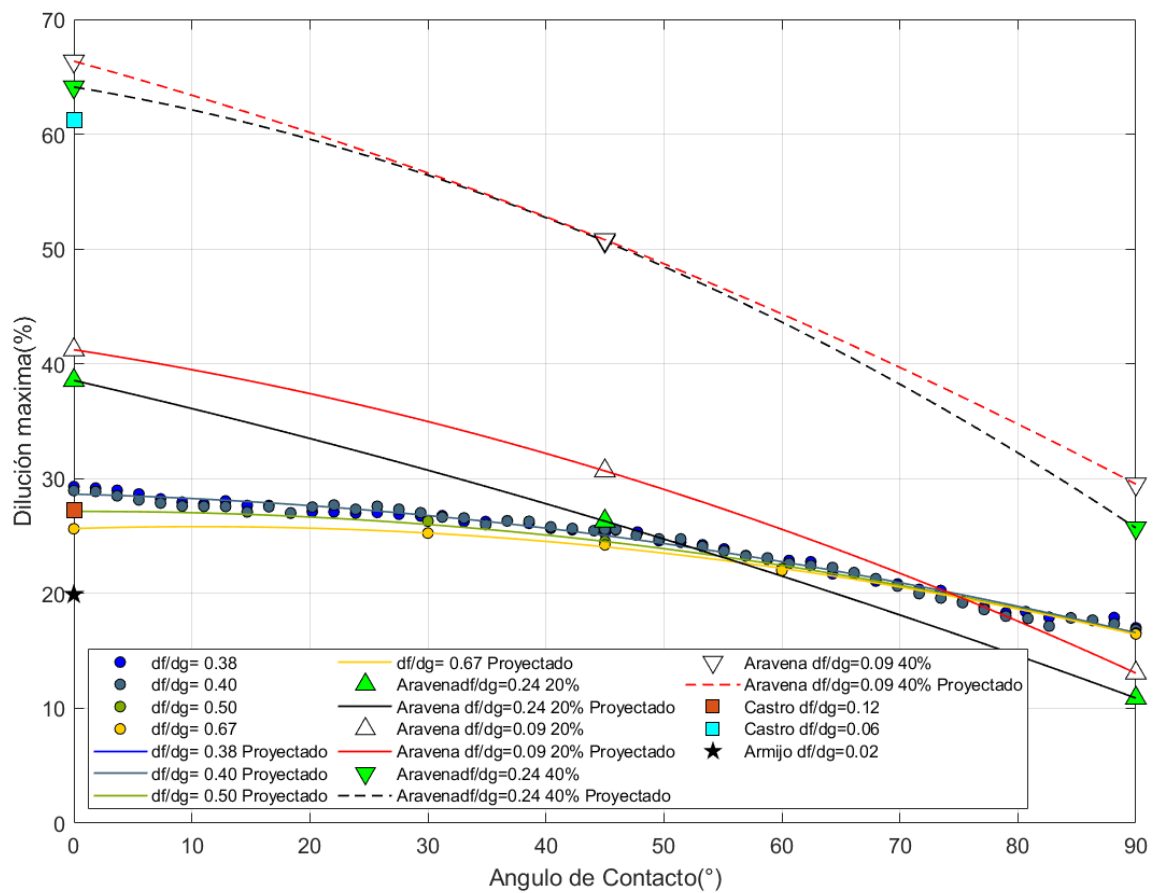


Figura 4.8: Comparación de resultados

En los experimentos desarrollados por Aravena et al. (2024) se identificó un comportamiento de tipo parabólico en la evolución de la dilución en función del ángulo de contacto entre los materiales fino y grueso. Dicha tendencia también se reproduce en las simulaciones numéricas realizadas en el presente estudio, aunque con una magnitud inferior. Este resultado sugiere que la relación geométrica entre las zonas de mineral y estéril no ejerce un efecto lineal sobre la progresión de la dilución, sino que existe un rango angular crítico en el cual la infiltración de finos se ve favorecida. En otras palabras, ciertos ángulos intermedios generan configuraciones más propensas a la mezcla entre fracciones granulares, lo que permite postular la existencia de un ángulo óptimo de máxima dilución.

La menor magnitud de dilución observada en este estudio, al ser comparada con la reportada por Aravena et al., puede atribuirse a diferencias en la razón de tamaños entre partículas finas y gruesas. En particular, en los experimentos numéricos que consideran un 20 % de material fino, el contraste entre diámetros es mayor que en el estudio experimental de referencia, lo que reduce la capacidad de infiltración del material fino hacia los espacios intersticiales del material grueso. Desde una perspectiva micromecánica, una mayor disparidad entre tamaños incrementa la estabilidad del empaquetamiento granular, disminuye la movilidad relativa de los finos y, en consecuencia, atenúa su incorporación temprana al flujo de extracción, retrasando el inicio de la dilución efectiva.

Por otro lado, los resultados obtenidos por Castro et al. (2022) e Irribarra y Castro (2014) presentan una correlación menos estrecha con los de Aravena et al. (2024), lo cual puede explicarse, en parte, por las diferencias en el coeficiente de uniformidad granulométrica (C_u) de los materiales empleados en cada estudio. Los casos con valores de C_u más próximos muestran tendencias más similares, lo que refuerza la idea de que la distribución granulométrica es un factor de control relevante en la dinámica de mezcla. A ello se suma la variación en la proporción de material fino utilizada, parámetro que —tal como señalan Aravena y Palma (2023)— ejerce una influencia directa sobre la magnitud y el momento de aparición de la dilución, siendo uno de los factores más determinantes del comportamiento global del sistema de hundimiento.

En conjunto, la comparación entre los distintos estudios confirma que la dilución no depende únicamente del ángulo de contacto, sino de la interacción simultánea entre: (i) la relación de tamaños entre fracciones gruesas y finas, (ii) la uniformidad de la distribución granulométrica y (iii) el porcentaje volumétrico de finos incorporado al sistema. Lo anterior refuerza la necesidad de abordar el fenómeno desde una perspectiva multivariable, especialmente cuando se pretende extrapolar resultados de modelos físicos o numéricos hacia condiciones operacionales reales en minería subterránea tipo Block Caving.

5 Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que las simulaciones numéricas presentan un comportamiento muy similar al de los experimentos realizados por Aravena (2023). Las pequeñas diferencias observadas con respecto a los ensayos físicos se deben principalmente a variaciones en el tamaño y la forma de las partículas. Esto permite concluir que el modelo utilizado logra reproducir de manera adecuada las condiciones físicas de los experimentos de laboratorio asociados al método *block caving*.

En el análisis de 51 casos, considerando distintos ángulos de reposo y cuatro tamaños de partículas, se pudo identificar que el ángulo de reposo tiene una influencia directa y significativa en la migración de finos. En particular, se observó que la dilución disminuye de manera progresiva a medida que aumenta el ángulo de reposo. Este resultado coincide con lo observado en los experimentos de laboratorio, lo que refuerza la validez del modelo.

Un hallazgo importante es que, cuando el ángulo alcanza los 90° , todos los tamaños de partículas tienden a converger hacia un mismo valor de dilución máxima. Esto indica que, en estas condiciones, la dilución máxima está controlada principalmente por la forma en que se disponen las partículas y no tanto por el tamaño que tengan individualmente.

Al introducir una modificación en el modelo, reduciendo el tamaño de las partículas y analizando nuevos casos, se detectó un aumento en la dilución. Sin embargo, debido a las limitaciones en la capacidad de cómputo disponible, no fue posible profundizar en este fenómeno ni cuantificarlo con mayor precisión dentro del alcance del presente estudio. Por este motivo, se recomienda llevar a cabo investigaciones adicionales utilizando mayores recursos computacionales, con el fin de verificar y analizar en detalle esta hipótesis.

Finalmente, se considera necesario comprobar estas observaciones a través de estudios aplicados en condiciones a escala industrial, lo que permitiría validar de manera definitiva los resultados obtenidos en laboratorio y en simulaciones.

Referencias

- Aravena, M., Palma, S., Vivanco-Avaria, F. J., & Nelis, G. (2024). Quantification of fines migration in block caving mining through laboratory experiments. *Results In Engineering*, 25, 103576. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103576> cl
- Brannon, C., Carlson, G., & Casten, T. (2011). Block Caving. In P. Darling (Ed.), *Mining Engineering Handbook* (3rd ed., Vol. 2, pp. 1437–1471). Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Castro, R., Arancibia, L., & Gómez, R. (2022). Quantifying fines migration in block caving through 3D experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105033>
- Castro, R. L., & Paredes, P. S. (2014). Empirical observations of dilution in panel caving. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114, 455–462.
- Castro, R., Trueman, R., & Halim, A. (2007). A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(6), 860–870. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.01.001>
- Gómez, R., Castro, R., Díaz, T., & Nelis, G. (2025). Draw sequence selection under lateral migration in block/panel caving mining. *International Journal of Mining Reclamation And Environment*, 1-25. <https://doi.org/10.1080/17480930.2025.2554210>
- Gómez, R., & Labbé, E. (2019). An option for the change to massive underground mining: The current Chilean methodology of block caving. *Boletín Geológico y Minero*, 130(1), 181–198. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.130.1.011>
- Iribarra Cadenas, S. (2014). Estudio experimental de migración de finos en minería de caving. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/129896>
- Jin, A., Sun, H., Wu, S., & Gao, Y. (2017). Confirmation of the upside-down drop shape theory in gravity flow and development of a new empirical equation to calculate the shape. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 92, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.12.005>

- Khilar, K. C., & Fogler, H. S. (1998). *Migrations of Fines in Porous Media* (Vol. 12). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9074-7>
- Kvapil, R. (1965). Gravity flow of granular materials in hoppers and bins. *International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 2(1), 25-41. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(65\)90020-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(65)90020-3)
- Kvapil, R. (1992). Sublevel Caving. In H. Harmard (Ed.), *Mining Engineering Handbook* (2nd ed., Vol. 2, pp. 1789–1814). Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Laubscher, D. (1994). Cave mining - the state of the art. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 279–293.
- Laubscher, D. (2000). *A Practical Manual On Block Caving*.
- Laubscher, D. (2003). *Cave mining handbook*. De Beers.
- Laubscher, D. (2011). Cave Mining. In P. Darling (Ed.), *Mining Engineering Handbook* (3rd ed., Vol. 2, pp. 1385–1398). Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Pierce, M.E. (2010). A model for gravity flow of fragmented rock in block caving mines. University of Queensland Brisbane, Australia.
- Rayo, J. D., Mercado, J. M., & Encina, V. (2016). *Simulation of block caving operation using a discrete element method (DEM)*. <https://www.researchgate.net/publication/306444149>
- Rivas, J. M., & Gonzáles, A. (2018). *Control Geológico en la Dilución Mineral*. [Universidad de Concepción]. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/3105>
- Stebbins, S. A. (2011). Cost Estimating for Underground mining. In P. Darling (Ed.), *Mining Engineering Handbook* (3rd ed., Vol. 1, pp. 263–279). Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Susaeta, A. (2004). Theory of gravity flow (part 1). *MassMin*, 167–172.

Theoretical background behind the Discrete Element Method (DEM). (n.d.). Retrieved July 1, 2025,
from <https://altair.com.es/resource/what-is-the-discrete-element-method-dem>