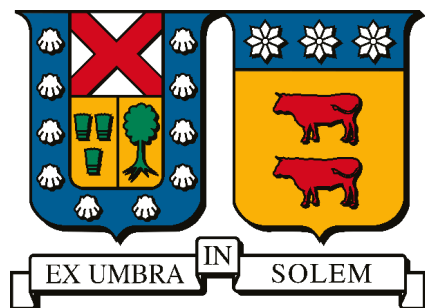


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO – CHILE



INFILTRACIÓN DE PASTA DE RELAVE EN MINERÍA SUBTERRÁNEA BLOCK CAVING

KARLA FRANCISCA MELLA PEÑA

Memoria para optar al título profesional de

INGENIERA CIVIL DE MINAS

MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA METALÚRGICA

Profesor Guía:

Dr. Sergio Palma M.

Profesor Correferente:

Ing. Víctor Encina

DICIEMBRE 2023

*Dedicado a mi familia,
por ser la base de mi desarrollo personal
y entregarme su apoyo incondicional.*

Resumen

Los depósitos de relaves son uno de los acopios de residuos mineros que más problemas han generado a la industria minera, cubriendo extensas áreas y acumulando millones de toneladas en el territorio nacional. Dado este fenómeno se estudió, a través de experimentos, el comportamiento de pastas de relave en minería subterránea utilizando el método block caving a escala de laboratorio.

En este estudio se propuso caracterizar el comportamiento de la pasta de relave mediante la influencia de las variables de concentración de albúmina ϕ_A y tiempo de reposo t_R .

Mediante los resultados se lograron establecer los fundamentos y el comportamiento de relave en pasta sobre material granular a través del flujo gravitacional en block caving.

Los resultados obtenidos de los datos experimentales mostraron que aumentando la variable de concentración de albúmina y disminuyendo el tiempo de reposo, la pasta de relave se comporta como una pasta sólida logrando una alta viscosidad.

Se demostró que es posible rellenar las cavidades de una mina subterránea con material de pasta de relave, a escala experimental. Si esta solución se logrará aplicar a nivel industrial, se disminuiría entre un 90% a 96% del material sólido desechado de una mina subterránea, depositándolo en el cráter de hundimiento de esta.

Tabla de contenidos

1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVOS.....	9
2.1 OBJETIVO GENERAL	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3. METODOLOGÍA	10
3.1 MODELO CONCEPTUAL	10
3.2 GRANULOMETRÍA	11
4. CASOS DE ESTUDIO.....	11
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
6. CONCLUSIONES.....	15
7. REFERENCIAS.....	16

Índice de figuras

Ilustración 1: Representación del modelo WLM. (a) Preparación para explotación subterránea y WLM. (b) P.E.M. explotación subterránea a concentrador y WLM. (c) Depositación en WLM. (d) Término formación Block Caving y explotación. (e) Remate del WLM. (f) Término de la explotación y abandono.	8
Ilustración 2: (a) Diagrama conceptual de mina con extracción BC a escala de laboratorio (b) Curva granulométrica	10
Ilustración 3: Caso sin albúmina ($\phi_A = 0.0\%$) para tres tiempos de reposo. (b) Caso con albúmina ($\phi_A > 0.0\%$) para un tiempo de reposo de 5 min. (c) Viscosidad efectiva versus concentración de albúmina. (d) Tensión de fluencia versus concentración de albúmina.....	12
Ilustración 4: (a) Profundidades de infiltración de agua para $\phi_A = 10$ min. (b) Profundidad de infiltración en función de la concentración de albúmina.	13
Ilustración 5: Taponamiento de puntos de extracción.....	14

Índice de tablas

Tabla 1: Distribución regional del estado de depósitos de relaves del país, año 2022.	7
---	----------

1. Introducción

En la actualidad se presentan numerosos desafíos en la industria minera, donde cada vez aumentan los costos de producción y disminuyen las leyes presentes en los yacimientos. Sumado a esto, se han implementado exigencias ambientales dado el fuerte impacto de la minería en el entorno. Para mitigar el efecto producido se han adoptado distintas tecnologías como la explotación subterránea en lugar de la explotación a cielo abierto. Un ejemplo se observa en División Chuquicamata, la cual inicio sus operaciones subterráneas el 2019 [1], siendo una de las minas a cielo abierto más grande del mundo.

Dentro de la minería subterránea, existen diversos métodos de explotación, entre ellos los de hundimiento (caving), de los cuales destaca el block caving. Este método es aplicado en yacimientos cupríferos de grandes dimensiones, dado que permite el movimiento de grandes cantidades de mineral. El principio físico se basa en la fractura del macizo rocoso provocado por la fuerza de gravedad en conjunto con los esfuerzos internos de la roca, generando fragmentos de menor tamaño para su posterior extracción [2]. Ejemplos de mineras que extraen material mediante block caving en Chile son: División Chuquicamata Subterránea y División El Salvador de Codelco.

A pesar de las medias adoptadas, uno de los problemas más grandes presentes en minería subterránea, es la alta producción de residuos sólidos generados en todas las etapas de su proceso productivo. Estos residuos deben ser almacenados como depósitos, los cuales utilizan grandes extensiones de terreno y presentan altos riesgos de contaminación y estabilidad. Actualmente existen varios tipos de depósitos de relaves, los que varía según la cantidad de agua (es decir, la densidad del relave) y según la forma de contener la depositación [3].

Los depósitos de relaves son uno de los acopios de residuos mineros que más problemas han generado a la industria minera, si se considera los numerosos eventos que han afectado a esta industria a nivel mundial, entre ellos, los colapsos de depósitos de este tipo en Brasil y Canadá. Se ha estimado que, en Chile, las faenas mineras actuales generan relaves a una tasa de 530 millones de toneladas al año que cubren extensas áreas y que han acumulado, hasta el presente, aproximadamente 24 mil millones de toneladas en el territorio nacional. Se ha muestreado la existencia de 764 depósitos de relaves catastrados en el país, entre los que se encuentran en mayoría inactivos, abandonados y activos como se observa en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Distribución regional del estado de depósitos de relaves del país, año 2022.

Región	Activos	Inactivos	Abandonados	En construcción	Total
Tarapacá	2	0	6	0	8
Antofagasta	12	24	16	0	52
Coquimbo	30	113	23	6	172
Valparaíso	14	55	11	0	80
Metropolitana	6	14	6	0	26
O'Higgins	3	15	1	0	19
Maule	4	2	0	0	6
Aysén	0	5	4	0	9
Total	110	474	172	8	764

A pesar de que la mayor cantidad de depósitos de relave se encuentra en la región de Coquimbo, la mayor cantidad en toneladas se presenta en las regiones de Antofagasta con 4,400Mton, correspondientes a un 38.4%; Atacama con 1,277Mton, correspondientes a un 11.1% y Coquimbo con un total de 1,321Mton correspondientes a un 11.5% del total de toneladas actuales de relave.

Uno de los tipos de depósitos está compuesto por pasta de relave, la cual corresponde a una mezcla de agua con sólido, que contiene abundante partículas finas y bajo contenido de agua, de modo que la mezcla tenga una consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad [3]. Dentro de esta mezcla se define un relave, el cual es un sólido finamente molido que se descarta [3].

Dado el uso de estos materiales, y el peligro que implica a la población, se requiere aplicar un nuevo estándar para desarrollar y expandir la minería sin afectar al entorno. De esta forma, mediante principios físicos y conceptos de ingeniería, se utilizarán los altos volúmenes de relaves en pasta como material desechado para rellenar las cavidades de la mina y así para disminuir el uso de depósitos de estériles mineros.

Se han realizado estudios previos con resultados muy promisorios, como es el caso del proyecto minero Wasteless Mining (WLM®). Este método propone que los minerales, extraídos a través de la excavación de bloques o paneles, se procesan junto a la mina, donde los relaves se espesan y transporten al borde de la excavación [4] como se muestra en la **Ilustración 1**.

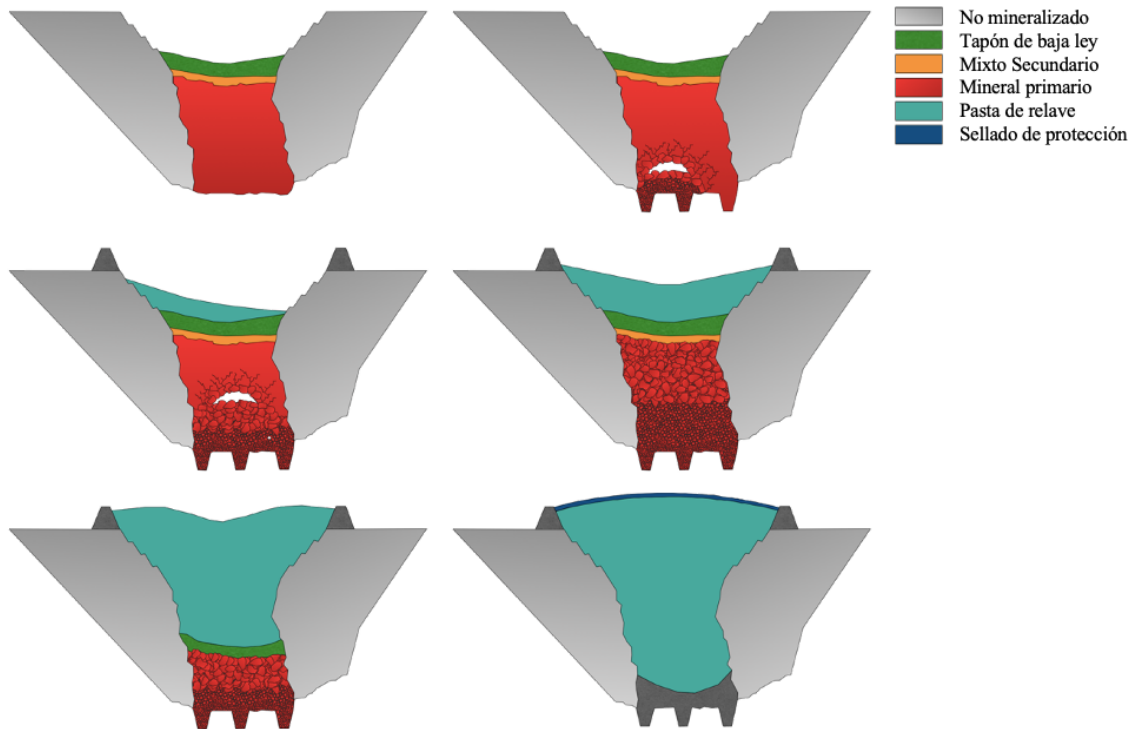


Ilustración 1: Representación del modelo WLM. (a) Preparación para explotación subterránea y WLM. (b) P.E.M. explotación subterránea a concentrador y WLM. (c) Depositación en WLM. (d) Término formación Block Caving y explotación. (e) Remate del WLM. (f) Término de la explotación y abandono.

Dado esto se plantea estudiar el comportamiento de una pasta de relave y cómo adquiere una mayor viscosidad. Esto se logra mediante la adición de albúmina, donde los parámetros que caracterizaran este fenómeno son: la concentración de albúmina (ϕ_A) y el tiempo de reposo (t_R).

Los objetivos de esta investigación son caracterizar y modelar experimentalmente el comportamiento de pastas de relave en block caving para estudiar la viscosidad del material. Para lograr esto se han planteado objetivos específicos los cuales consisten en analizar cómo varía la viscosidad de la pasta de relave respecto a las variables de concentración de albúmina y el tiempo de reposo. Determinar la distancia máxima de infiltración de agua proveniente de la pasta en el material granular y establecer los fundamentos y comportamiento de la muestra de relave sobre material granular.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

- Caracterizar y modelar experimentalmente el comportamiento de pastas de relave en block caving para estudiar la viscosidad del material.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar cómo varía la viscosidad efectiva de la pasta de relave con respecto a dos variables: concentración de albúmina (ϕ_A) y el tiempo de reposo (t_R).
- Determinar la distancia máxima de infiltración de agua proveniente de la pasta.
- Establecer los fundamentos y comportamiento de la muestra de relave sobre material granular

3. Metodología

3.1 Modelo Conceptual

Para llevar a cabo la investigación se utilizó un modelo a escala de una mina de block caving, que consiste en un área unitaria que incorpora una batea con dos puntos de extracción en su base, como se muestra en la **Ilustración 2**.

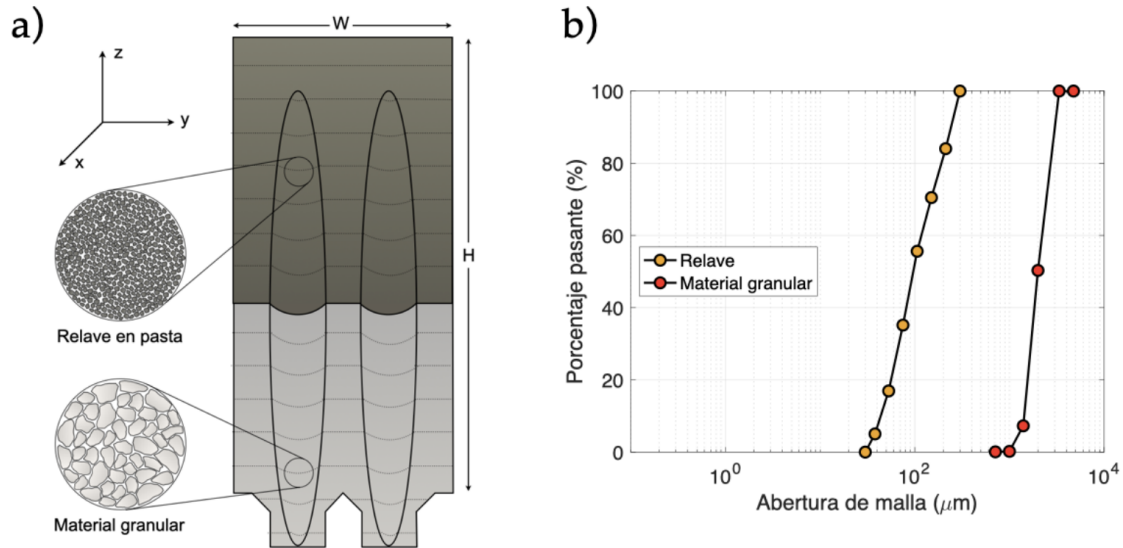


Ilustración 2: (a) Diagrama conceptual de mina con extracción BC a escala de laboratorio (b) Curva granulométrica

La instalación experimental revestida de acero en sus costados presenta láminas de vidrio de 5.0 mm de espesor, las cuales permiten visualizar el desplazamiento y las filtraciones en su interior. Por otro lado, la maqueta presenta una altura de 750 mm (H), un ancho de 360 mm (W) y 50 mm de espesor.

El flujo de material fue descargado por cada uno de sus puntos de extracción de manera simultánea, los cuales tienen una dimensión de 50x50 mm. El sistema de extracción del material está compuesto por dos compuertas acopladas a motores, los que permiten la descarga de flujo a velocidad constante.

El montaje experimental se ubicó dentro de una cámara oscura, la cual se ilumina frontalmente por luces y presenta una cámara que facilita el registro fotográfico. Las imágenes se analizaron mediante ImageJ y Matlab-2023®.

La maqueta fue llenada de material granular por la parte superior, manteniendo una concentración de sólidos de un 75% para una masa total de 1,500 g de relave. Se utilizó cuarzo blanco con un tamaño de partícula comprendido entre 2,000 a 1,400 μm y relave con un tamaño de partícula entre 150 y 40 μm . La maqueta se llenó proporcionalmente entre ambos materiales, hasta la altura de 300 mm con una cantidad de 2,000 g de cuarzo y hasta 500 mm con una cantidad de 2,000 g de pasta de relave.

3.2 Granulometría

Se determinó la distribución granulométrica de ambos materiales como se observa en la **Ilustración 2** (b). El cuarzo blanco presenta un tamaño de partícula comprendido entre 2,000 a 1,400 μm y relave con un tamaño de partícula entre 150 y 40 μm .

4. Casos de estudio

Para estudiar el comportamiento de filtración se definen condiciones fijas a lo largo del estudio. Se utiliza una masa de relave de 1,500 g con una concentración de sólidos del 75%, por lo que la masa de agua es igual a 500 g y una masa de cuarzo de 2,000 g.

Por otro lado, los parámetros variables corresponden a la concentración de albúmina, ϕ_A desde un 0 a 10% y el tiempo de reposo, t_R de la pasta de relave en tres periodos de tiempo de 0, 5 y 10 minutos. Cabe mencionar, que el tiempo de reposo se comienza a contabilizar una vez llena la instalación experimental con pasta de relave.

5. Resultados y discusión

Para analizar el fenómeno de la viscosidad en la pasta de relave se estudió el caso sin la adición de albúmina ($\phi_A = 0.0\%$). Se observó en la **Ilustración 3** (a) que gran parte del agua perteneciente a la pasta de relave se filtra a través del material granular. Dado que el relave es un material permeable, al adicionar un porcentaje de agua, ésta exuda a través de los intersticios del material.

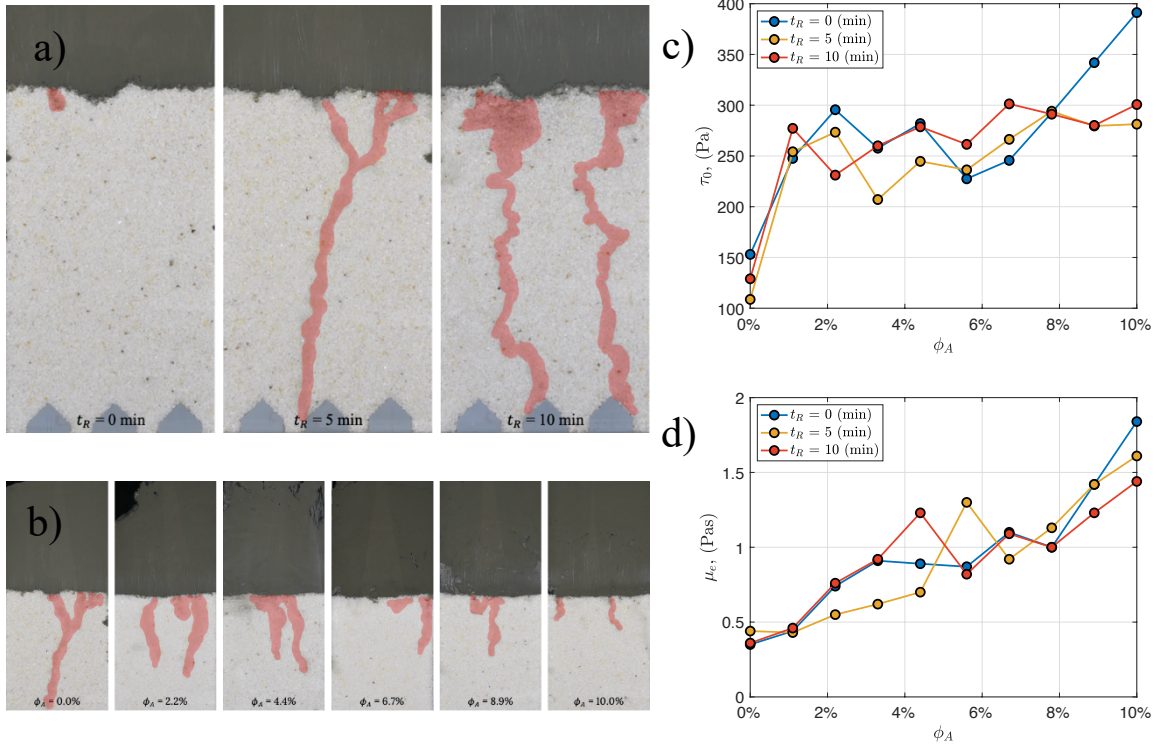


Ilustración 3: *Caso sin albúmina ($\phi_A = 0.0\%$) para tres tiempos de reposo. (b) Caso con albúmina ($\phi_A > 0.0\%$) para un tiempo de reposo de 5 min. (c) Viscosidad efectiva versus concentración de albúmina. (d) Tensión de fluencia versus concentración de albúmina.*

Una vez presentado el caso base, se incorpora la albúmina en distintos porcentajes. La cantidad del aditivo es proporcional a la cantidad de agua de la pasta. En la **Ilustración 3** (b) se aprecian distintas concentraciones de albúmina para un tiempo establecido de 5 minutos.

Se observa la filtración de agua y cómo varía con respecto a la cantidad de albúmina, en donde a medida que la concentración del aditivo es mayor, la filtración de agua proveniente de la pasta es menor. Este fenómeno se debe a que la viscosidad de la pasta de relave es directamente proporcional a la adición de albúmina.

En la **Ilustración 3** (c) se observa la viscosidad efectiva en función de la concentración de albúmina en los tres tiempos de reposo. La tendencia de las curvas muestra que, a medida que aumenta la concentración de albúmina presente en la pasta de relave, aumenta la viscosidad efectiva. También se observa que, a mayor tiempo de reposo, la viscosidad efectiva de la pasta de relave aumenta.

Por otro lado, en la **Ilustración 3 (d)** se observa la tensión de fluencia en función de la concentración de albúmina en los tres tiempos de reposo. La tensión de fluencia es uno de los indicadores más relevantes al estudiar una pasta, la cual permite identificar cuando un material pasa de un estado líquido a sólido. Se observa que, a medida que aumenta la concentración de albúmina hasta un 1.0%, aumenta la tensión de fluencia. Por otro lado, desde una concentración de albúmina de un 2.0% se observa una tendencia constante hasta alcanzar el máximo de concentración, donde la tensión de fluencia se mantiene entre un 200 a 250 Pa. Considerando la variable de tiempo de reposo, se observa que a medida que aumenta el tiempo de reposo, aumenta la tensión de fluencia.

Otra de las variables a considerar, es la profundidad de infiltración del agua, d_i . Esta se representa en la **Ilustración 4 (a)** para un tiempo de espera de 10 minutos, donde se observa que la profundidad de infiltración disminuye a medida que aumenta la concentración de albúmina. La profundidad de infiltración del agua, d_i se relaciona directamente a la viscosidad adquirida de la muestra. En la **Ilustración 4 (b)** se presenta gráficamente la relación entre ambas variables, sumado el tiempo de reposo. Se observa un aumento de d_i a medida que aumenta el t_R . Desde el caso $\phi_A = 0$, los datos van disminuyendo y fluctuando a medida que aumenta la concentración. La variación de datos observada está relacionada a la limitación del estudio y la recopilación de datos. Para $\phi_A = 5.6\%$ se tienen los valores más bajos de la distancia de infiltración en los tres tiempos de reposo.

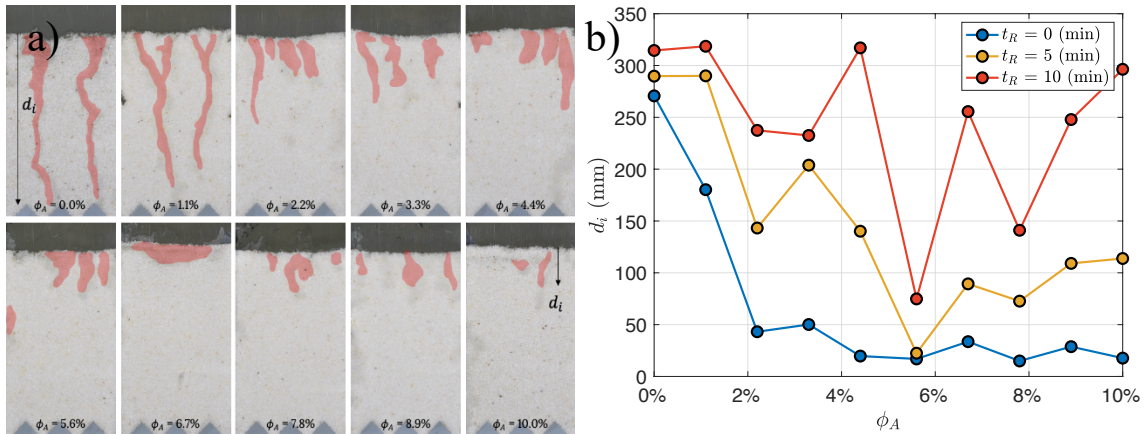


Ilustración 4: (a) Profundidades de infiltración de agua para $\phi_A = 10$ min. (b) Profundidad de infiltración en función de la concentración de albúmina.



Ilustración 5: Taponamiento de puntos de extracción.

Durante los experimentos se produce el taponamiento de uno o ambos puntos de extracción, como se observa en la **Ilustración 5**. Esto se debe a que, al aumentar el tiempo de reposo de la pasta de relave, el agua presente en la mezcla comienza a fluir por gravedad hasta los puntos de extracción. Dado esto, el agua proveniente de la pasta de relave se aglutina junto al material granular de cuarzo ahí presente. Finalmente, al momento de realizar la extracción del material, los puntos de extracción se encuentran obstruidos, por lo que la mezcla fluye por el punto de extracción menos húmedo o aglutinado.

6. Conclusiones

Mediante esta investigación se busca aplicar un nuevo proceso productivo, que permita utilizar los desperdicios mineros sin afectar en el entorno. Para esto se propuso analizar cómo varía la viscosidad de la pasta con respecto a la concentración de albúmina ϕ_A y el tiempo de reposo t_R .

Los resultados indican la relación entre la viscosidad efectiva y los parámetros de estudio, donde a medida que aumenta la concentración de albúmina y disminuye el tiempo de reposo, aumenta la viscosidad efectiva de la pasta de relave. Esto se traduce de igual forma para visualizar la profundidad de infiltración de agua en el material granular, en donde al ser más viscosa la pasta de relave, la distancia de infiltración será menor.

Estos resultados se traducen en que la adición de albúmina en una pasta de relave efectivamente logra atrapar el agua. De esta forma, considerando las simplificaciones del estudio, es posible rellenar las cavidades de una mina con pasta de relave, considerando las condiciones presentadas.

A pesar de los resultados presentados, el estudio presenta limitaciones. Dado esto, se recomienda seguir investigando para comprender plenamente las implicaciones de su implementación a escala industrial. Considerando esto, se recomienda utilizar un área unitaria en 3D, para desprejar efectos producto de un espesor limitado en los experimentos, igual a 50 mm; realizar experimentos con una distribución granulométrica similar a la granulometría de una mina a escala, para observar de mejor manera la filtración producida; estudiar el efecto físico de un aditivo cualquiera sobre la pasta de relave, considerando su viscosidad efectiva y tensión de fluencia y estudiar la dependencia o independencia de la viscosidad efectiva y la tensión de fluencia sobre una pasta de relave.

7. Referencias

- [1] G. Flores and A. Catalan, “A transition from a large open pit into a novel ‘macroblock variant’ block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 549–561, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jrmge.2018.08.010.
- [2] D.H. Laubscher, “Cave mining - the state of the art,” *J South Afr Inst Min Metall*, 1994.
- [3] Servicio Nacional de Geología y Minería, “Anuario de la Minería de Chile 2022,” 2022.
- [4] J. Rayo and V. Encina, “WASTELESS MINING.”