



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA



Simulación numérica de propagación de Caving en FLAC3D tras Fracturamiento Hidráulico

POR

Cristóbal Andrés Quiroz Vargas

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

Profesor Guía:
Dr. René E. Gomez Puigpinos

Diciembre 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Cristóbal Andrés Quiroz Vargas.

Agradecimientos

Quiero comenzar este capítulo agradeciendo en primer lugar a mis padres, quienes han sido mi fuente de inspiración cuando el camino se ponía difícil y parecía imposible. Pedro y Susana, les doy las gracias por haber confiado en que era posible cumplir y llegar a la meta. Este desafío y sacrificio no fue solo mío, sino también de Uds. Lo difícil que fue alejarme del calor de su compañía cuando iniciamos esto en el año 2020, entiendo el sacrificio que hay detrás de todo, estaré siempre agradecido por la forma en que lideraron mis pasos, y hoy, después de 6 largos años, poder decirles que se logró.

Agradecer también a mis hermanas, Martina y Valeria, quienes a pesar de las discusiones y diferencias que podamos tener, me demuestran a su manera un cariño que siempre he notado y valorado.

Mi hermano, Diego, quién ha sido de cierta forma mi modelo para saber hacia dónde apuntar. Estaré agradecido siempre por su apoyo, no solo en esta etapa, sino en la vida misma. Esas noches eternas jugando, cuando estaba lleno de cosas por hacer, pero una sola partida lograba calmar todas las preocupaciones, por más que hayamos terminado peleando más de una vez, todo se solucionaba al día siguiente con un “Go?”.

Mi novia, Cristel, quien ha sido mi apoyo académico, y sobre todo, mi apoyo emocional. La persona que ha tenido que lidiar con mis defectos y con cada situación personal en este proceso -situaciones que solo ella conoce, desde días muy buenos, a días en que quería quedarme solo y no salir-. A pesar de todo, continúa demostrándome su apoyo incondicional, por el cual estaré siempre agradecido, ya que, sin eso, probablemente no estaría redactando esto.

Mis compañeros, en especial Diego, Nicolás, Benjamín, Martín y Thomas, por todos los buenos momentos, cada uno fue una parte importante dentro de este camino. Imposible olvidar esos días de estudio en la noche y después en la central, los carretes, los partidos de tenis, las partidas de Valorant. Gracias por todo.

A mi profesor guía, René Gómez, quien siempre mostró un compromiso por el presente documento. Quien confió en mí como ayudante de su asignatura, geomecánica, lo que fue muy significativo teniendo en cuenta la gran responsabilidad que eso llevaba consigo.

Finalmente, a cada persona que, de una u otra manera, formó parte de este largo camino, sin duda alguna, esto no habría sido posible sin Uds.

Esta memoria fue financiada por Fondecyt Iniciación 11240668, de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo.

Resumen

Debido al agotamiento de los recursos superficiales, la minería subterránea se vuelve cada vez más común. Esto trae consigo nuevos desafíos geomecánicos, tales como los cambios en los esfuerzos a los que está sometida la roca, cambios en la operatividad de la mina, o bien, cambios en la mineralogía presente. Dichos cambios en la roca se hacen muy notables cuando se llega a una cota muy baja con respecto a la topografía, pudiendo encontrar una roca de una dureza muy superior en comparación con la roca más superficial. Este fenómeno dificulta la extracción mediante el método de Block/Panel Caving, debido a la forma en la que funciona el mismo, dependiendo de la gravedad y del desconfinamiento de la roca para permitir que esta fluya a través de los puntos de extracción; lo que se ve dificultado cuando se trata de una roca de muy buena calidad geotécnica. Es esta la razón por la que se vuelve común el uso del preacondicionamiento de la roca.

El fracturamiento hidráulico (FH) es un método de preacondicionamiento del macizo rocoso, el cual consiste en inyectar agua a través de perforaciones, a una presión tal que logre fracturar la roca. De este modo, se obtendrá una roca de menor calidad, la cual facilitará el hundimiento de esta durante la operación.

La presente investigación busca simular el comportamiento del *cave-back* tras la aplicación de fracturamiento hidráulico con un ángulo o manteo con respecto a la horizontal, con el fin de predecir el comportamiento de este en presencia de fracturas. Para esto se definieron cinco casos de estudio, los cuales variaron el ángulo de la zona fracturada. El primero corresponde a una zona fracturada con un manteo de 80°, el cual no mostró una mejora en las velocidades de propagación de caving. El caso dos, similar al primero, corresponde a dos zonas de preacondicionamiento con un manteo de 80°; dicho caso fue el que mostró la mayor velocidad de propagación, conectando con la topografía al tercer mes de producción. El tercer caso corresponde a una zona de fracturamiento con un manteo de 30°, siendo este el peor de los 5 casos, donde no solo se dificultó la propagación del hundimiento, sino que también se colgó el *cave-back*. Finalmente, los casos 4 y 5, corresponden a 1 y 2 zonas de FH respectivamente con un manteo de 0° con respecto a la horizontal; estos casos mostraron un comportamiento similar en cuanto a la propagación del caving, en el cual se notó un aumento repentino de la velocidad al llegar a la zona fracturada.

Estos comportamientos se atribuyen a dos factores principalmente: la degradación de la roca producto del preacondicionamiento, donde los casos con una mayor velocidad o facilidad para propagar el caving contaban con 2 zonas de fracturas; o bien, el manteo de la zona a la cual se le aplicó el fracturamiento hidráulico, este último factor se puede explicar al analizar el comportamiento en los casos 1 y 3. Ambos casos contaron con una única zona de preacondicionamiento, sin embargo, la diferencia en la altura del caveback luego de 12 meses de producción fue muy favorable para el primer caso -una zona con un manteo de 80°-.

Abstract

Due to the actual situation in the mining industry, where resources on surface start to deplete, it's becoming increasingly common to transit into an underground operation. This brings new geomechanical challenges to the mine, whether it is due to the change in the stresses to which the rock is subjected, or changes in the mineral composition of the rock, due to the deepening of the mine in search of better ore grades to increase the life of the operation.

These changes in rock conditions can become pronounced at significantly greater depths relative to the original elevation, where the rock often exhibits much higher intact strength compared to near-surface material. This poses a challenge for extraction by the Block/Panel Caving method, which relies on gravity flow and rock-mass deconfinement to allow material to move through the drawpoints – conditions that are harder to achieve in a very competent rock mass.

Hydraulic fracturing (HF) is a rock-mass preconditioning technique that consists of injecting water through predrilled holes at pressures high enough to induce fractures. In this way, undercutting and cave initiation are facilitated in the scenarios described above.

This study seeks to simulate cave-back behavior after applying hydraulic fracturing with a dip angle relative to the horizontal; that is, when HF is oriented non-vertically with respect to the undercut level. The analysis was carried out over a one-year production simulation.

Five study cases were defined, varying either the dip of the fractured zone or the number of such zones. Case 1 used a single fractured zone with an 80° dip and showed no improvement in cave propagation rates. Case 2, similar in dip but with two preconditioning zones at 80°, exhibited the highest propagation rates, connecting to surface topography by the third month of production. Case 3 applied a single fractured zone with a 30° dip and performed the worst of the five: not only did cave-back propagation slow, but the cave hung up at a certain elevation. Finally, cases 4 and 5 applied HF in one and two zones, respectively, each with a 0° dip (horizontal). These showed similar caving behavior, characterized by a step-increase in propagation rate upon encountering the fracturing zone.

These responses are attributed primarily to two factors: rock-mass degradation produced by preconditioning – cases with two fractured zone propagated the cave better – and the dip of the hydraulic fractured zone. The latter is evident when comparing Cases 1 and 3: both used a single preconditioning zone, yet after 12 months of production, the cave-back elevation was markedly more favorable in Case 1, with 80° dip.

Índice de Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	CONTEXTO	1
1.2	MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO	2
1.3	OBJETIVOS	3
1.3.1	<i>Objetivo General</i>	3
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3.3	<i>Alcances y Limitaciones</i>	3
2	MARCO TEÓRICO	4
2.1	BLOCK CAVING	4
2.2	PREACONDICIONAMIENTO	6
2.2.1	<i>Fracturamiento Hidráulico (FH)</i>	6
2.2.2	<i>Debilitamiento dinámico con explosivos (DDE)</i>	8
2.3	SIMULACIONES NUMÉRICAS	8
2.3.1	<i>Método de los volúmenes finitos (FVM)</i>	9
2.3.2	<i>FLAC3D</i>	9
2.3.3	<i>Mallado</i>	10
2.3.4	<i>Rhinoceros</i>	11
2.3.5	<i>Griddle</i>	12
2.4	MODELAMIENTO DE CAVING	12
3	METODOLOGÍA	16
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	23
4.1	CASO 1	24
4.2	CASO 2	26
4.3	CASO 3	29
4.4	CASO 4	32
4.5	CASO 5	34
4.6	ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS	38
5	CONCLUSIONES	40
6	DISCUSIONES	41
6.1	RECOMENDACIONES	42

Índice de Figuras

Figura 2.1: Modelo conceptual de la respuesta del macizo rocoso al caving. [27]	5
Figura 2.2. Visualización del proceso de preacondicionamiento. [32]	6
Figura 2.3: Esquema general del Fracturamiento hidráulico. [37]	7
Figura 2.4: Esquema general del Debilitamiento Dinámico con Explosivos (DDE). [37]	8
Figura 2.5: Tipos de mallado. (a) corresponde a un mallado estructurado [53]. (b) corresponde a un mallado no estructurado [53]. (c) corresponde a un mallado híbrido [54].....	11
Figura 2.6: Modelo numérico genérico de Blok Caving realizado en FLAC3D con un corte transversal en el centro del nivel de hundimiento. Se puede ver en escala de colores, el esfuerzo principal menor.	13
Figura 2.7. Esquema del modelo Ubiquitous-Joint. [62].....	14
Figura 2.8. Mapa conceptual de celdas entre FLAC3D y CAVESIM. [63]	14
Figura 2.9. Volumen de roca excavada por la mina Malmberget en el año 2030. [63]	15
Figura 3.1: Metodología empleada para llevar a cabo la investigación.	16
Figura 3.2: Casos de estudio seleccionados para cada una de las simulaciones. (a) Caso 1, una zona de FH con un ángulo de 80°. (b) Caso 2, dos zonas de FH con un ángulo de 80°. (c) Caso 3, una zona de FH con un ángulo de 30°. (d) Caso 4, una zona de FH con un ángulo de 0°. (e) Caso 5, dos zonas de FH con un ángulo de 0°.....	17
Figura 3.3: Modelo empleado en el caso de estudio N°1. En naranja, la zona que contendrá las discontinuidades producto del Fracturamiento Hidráulico. En azul, el nivel de hundimiento. No se incluye la caja del modelo en la figura.	18
Figura 3.4: Mallado creado en Rhinoceros con complemento Griddle. Se muestra el primer caso de estudio.	19
Figura 3.5: Gráfico esfuerzo-deformación. Se especifica el modelo constitutivo usado para cada estado de la roca.....	21
Figura 3.6: Diagrama de flujo del script FISH usado en las simulaciones de cada uno de los casos de estudio.	22
Figura 4.1. Estado de equilibrio de los 5 casos. A) Caso 1. B) Caso 2. C) Caso 3. D) Caso 4. E) Caso 5.	24
Figura 4.2. Cave-back en el caso 1, luego de: a) una semana. b) dos semanas. c) tres semanas. d) cuatro semanas.	25
Figura 4.3: Caso 1. Estado del cave-back luego de: a) 2 meses de producción. b) 3 meses de producción. c) 8 meses de producción. d) 12 meses de producción.	26
Figura 4.4. Caso 2. Primeras cuatro semanas de producción.	27

Figura 4.5: Caso 2. Estado del cave-back luego de: a) 2 meses de producción. b) 3 meses de producción. c) 5 meses de producción. d) 7 meses de producción. e) 9 meses de producción. f) 12 meses de producción. .	28
Figura 4.6. Caso 3. Cave-back semanal.....	30
Figura 4.7: Caso 3. Estado del cave-back luego de: a) 2 meses de producción. b) 3 meses de producción. c) 4 meses de producción. d) 5 meses de producción. e) 6 meses de producción. f) 8 meses de producción. g) 10 meses de producción. h) 12 meses de producción.....	31
Figura 4.8. Caso 4. Estado del cave-back durante el primer mes de producción.....	33
Figura 4.9: Caso 4. Estado del cave-back luego de: a) 2 meses de producción. b) 3 meses de producción. c) 4 meses de producción. d) 5 meses de producción. e) 6 meses de producción. f) 7 meses de producción. g) 9 meses de producción. h) 12 meses de producción.....	34
Figura 4.10. Caso 5. Estado del cave-back durante el primer mes de producción.....	35
Figura 4.11: Caso 5. Estado del cave-back luego de: a) 2 meses de producción. b) 3 meses de producción. c) 4 meses de producción. d) 5 meses de producción. e) 6 meses de producción. f) 7 meses de producción. g) 8 meses de producción. h) 9 meses de producción. i) 10 meses de producción. j) 12 meses de producción..	37
Figura 4.12: Gráfico Periodo vs. Altura del Caveback.	38

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Velocidades de extracción por mes en cada zona del techo del UCL.	20
Tabla 3.2: Parámetros usados en los distintos modelos constitutivos. Hoek & Brown, Mohr-Coulomb, Ubiquitous-Joint Model.....	20

1 Introducción

1.1 Contexto

En la actualidad, la minería corresponde a un sector de vital importancia tanto para el desarrollo de los países como para el progreso global. Esta actividad proporciona las materias primas fundamentales para una amplia gama de industrias, incluyendo la construcción, el sector energético, la tecnología, entre otros. [1, 2, 3, 4]

Existen diversas formas y métodos de explotación los minerales de la tierra, los cuales pueden dividirse en minería a cielo abierto y minería subterránea. La elección de estos puede depender de muchos factores, ya sea del yacimiento, como la profundidad a la cual está o la forma de este; existen factores económicos, como los costos de extraer el mineral o los costos y precios de venta de este; además existen los factores geológicos, como la calidad de la roca o la presencia de discontinuidades. [5, 6]

En cuanto a minería subterránea, diversas investigaciones se enfocan en la modernización de sus métodos para obtener una mejor eficiencia a la hora de extraer el material de valor, al mismo tiempo que se garantiza la seguridad operativa. Este enfoque busca asegurar tanto el buen funcionamiento de la maquinaria como la protección de los trabajadores. Entre los métodos más utilizados en yacimientos a gran escala destaca el Block Caving, una técnica especialmente eficaz para la extracción de mineral desde un depósito masivo y de baja ley. [7, 8, 9]

Si se tiene en cuenta la diferencia de costos entre la minería a cielo abierto y la subterránea (siendo más altos en esta última) el Block Caving cuenta con los costos más bajos, logrando una mayor eficiencia costo/producción. Sin embargo, debido a la forma de operar de este método, son muchos los riesgos asociados que se deben tener en cuenta para mantener un correcto funcionamiento y operativización dentro de la faena. [10, 11]

En este contexto cobran mucha relevancia los métodos de análisis, tanto físicos como numéricos (computacionales), los cuales permiten anticipar eventos potenciales al interior de la operación. Estas herramientas son clave para implementar medidas preventivas que reduzcan el riesgo de accidentes, como estallidos de roca, colapsos estructurales y otras situaciones críticas. [12, 13]

La presente investigación se centra en el estudio de la propagación del *caving* en una operación genérica de Block/Panel Caving en la cual se ha realizado un preacondicionamiento en el macizo rocoso, creando fracturas a lo largo de una sección definida del mismo; este estudio se lleva a cabo mediante simulaciones

numéricas empleando el software FLAC3D con el método de volúmenes finitos (FVM, por sus siglas en inglés, *Finite Volume Method*), realizándose diversas simulaciones para los distintos casos propuestos. [13, 14, 15]

La implementación de la metodología descrita anteriormente busca lograr una representación de la roca que va colapsando a lo largo de un tiempo definido, y así realizar un estudio detallado del comportamiento de la socavación en cada una de las situaciones. [14, 15]

1.2 Motivación del estudio

Con el agotamiento de mineral de los yacimientos en su parte más superficial, cada vez se hace más recurrente la profundización de este, o incluso, su paso de minería a cielo abierto a subterránea. Este cambio en la profundidad a la cual se opera la mina trae consigo distintos riesgos y/o problemas, siendo uno de estos, el aumento de la calidad de la roca producto del confinamiento al que está sometida, la mineralogía, y el aumento en la densidad de esta. Es esta la razón por la que cada vez es más necesario un método de preacondicionamiento que reduzca la calidad geotécnica de la roca, para que, de este modo sea más fácil el flujo de mineral a través de los puntos y así evitar problemas de colgaduras, eliminando sus riesgos asociados. [16, 17]

Es aquí donde entra la presente investigación, la cual busca entregar un análisis del comportamiento del *caving* tras la aplicación de fracturamiento hidráulico con distintas inclinaciones, aportando a la planificación de la faena.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Simular la propagación del hundimiento en presencia de discontinuidades creadas producto del fracturamiento hidráulico a través de simulaciones numéricas, mediante el software FLAC3D.

1.3.2 Objetivos Específicos

Los siguientes objetivos específicos se definen con el propósito de guiar de manera estructurada el desarrollo del estudio. Cada uno de ellos abordando una etapa clave dentro del proceso, permitiendo alcanzar de forma sistemática el objetivo general planteado. De esto se tienen:

- Desarrollar un modelo de Block Caving en FLAC3D que represente las condiciones iniciales del macizo rocoso y del entorno subterráneo bajo estudio, utilizando el método de volúmenes finitos (FVM).
- Diseñar un modelo en 3D, el cual representará la zona de la roca que contendrá las fallas.
- Simular en el software cada uno de los casos a estudiar, contando con el modelo junto a sus discontinuidades para obtener los resultados.
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos.

1.3.3 Alcances y Limitaciones

Una de las variables más importantes a la hora de predecir el comportamiento de una operación de Block Caving son las propiedades mecánicas de la roca en cuestión, las cuales serán el principal factor a evaluar antes de tomar cualquier decisión dentro de la mina. De esta misma forma, debido al gran abanico de posibilidades se tendrá en cuenta una razón de esfuerzos k de 1,5 igual en todas las direcciones, es decir, la razón entre el esfuerzo horizontal y el vertical será de 1,5, obteniendo así un esfuerzo principal mayor ubicado de forma horizontal, dirección la cual será adoptada por las fracturas provenientes del fracturamiento hidráulico.

El presente estudio busca predecir el comportamiento del *caving* tras la aplicación de Fracturamiento Hidráulico en distintas configuraciones, variando el ángulo y la cantidad de zonas preacondicionadas. Para esto se llevaron a cabo 5 estudios, mas un escenario de control, todos estos bajo las mismas propiedades mecánicas, velocidades de extracción y condiciones de esfuerzo in-situ.

2 Marco Teórico

2.1 Block Caving

El Block Caving es un método de minería subterránea altamente mecanizado, utilizado principalmente en yacimientos profundos, masivos y de baja ley, donde la extracción selectiva no es viable económicamente. Su eficiencia radica en la posibilidad de movilizar grandes volúmenes de mineral a bajo costo unitario. El principio físico que lo sustenta se basa en el colapso inducido y progresivo del macizo rocoso, el cual, tras una fragmentación inicial, continúa propagándose de manera natural por efecto de la gravedad y el desconfinamiento progresivo de los bloques adyacentes. Este método se puede dividir en 3 etapas principales: preparación, iniciación del colapso y el flujo del material. [18, 19]

La preparación comprende el diseño y la construcción de galerías necesarias para la operación. Se construyen rampas de acceso y galerías para alcanzar el nivel objetivo, donde se establecen dos niveles operativos: el nivel de hundimiento, desde el cual se iniciará el colapso del material en la siguiente etapa, y el nivel de producción, ubicado debajo del nivel de hundimiento, cuyo objetivo es permitir la extracción del mineral fragmentado y posterior transporte a piques de traspaso, los cuales pueden conectar con niveles de transporte o salas de chancado para facilitar el transporte de este a la superficie. En esta etapa se instalan también sistemas de ventilación, drenaje y comunicaciones, esenciales para mantener la seguridad y eficiencia en el proceso. [18, 19, 20, 21]

La iniciación del colapso corresponde a la etapa en la cual se realiza una primera fragmentación del mineral desde el nivel de hundimiento mediante tronaduras controladas, lo cual permitirá una extracción en la siguiente etapa. Existen casos en los que, para lograr un óptimo flujo de material, se debe realizar un preacondicionamiento del macizo rocoso. Algunos de los métodos más usados para esta tarea son el fracturamiento hidráulico y el debilitamiento dinámico con explosivos, ambos usados para generar nuevas fracturas en la roca y reducir la resistencia de esta. [22, 23]

Finalmente se lleva a cabo el flujo de material, donde, en primera instancia, se realizan tronaduras en el techo del nivel de producción, uniéndolo al nivel de hundimiento y generando estructuras denominadas bateas, luego se extrae el mineral fragmentado a través de los puntos de extracción ubicados en el nivel de producción. Mientras se va retirando el material, el macizo rocoso intacto ubicado en el techo de la cavidad se comienza a fracturar producto del desconfinamiento y de los cambios en los estados de esfuerzo (producto de extraer el mineral y generar un vacío en la cavidad llamado *air gap*). El mineral que ingresa al nivel de producción es cargado y transportado por equipos LHD (*Load-Haul-Dump*) y transportado por un sistema de

galerías hasta los piques de traspaso. Se debe mantener un correcto ritmo o velocidad de extracción para evitar fenómenos indeseados, como la dilución o el colapso de estructuras en zonas críticas. [24]

Este método requiere tanto de una planificación exhaustiva como de un monitoreo constante, esto debido a que, una vez se inicia el hundimiento, no es posible detenerlo sin comprometer la estabilidad del yacimiento y de las labores subterráneas. Sin embargo, a pesar de sus desafíos, el Block Caving es una de las técnicas más eficientes y, por ende, más usadas para la explotación de grandes depósitos. [18, 19]

Al analizar en profundidad el funcionamiento de este método, se notará que, en primer lugar, se debe realizar una tronadura inicial en el mineral para inducir una primera fragmentación, operación que se lleva a cabo desde el nivel de hundimiento. Posteriormente, desde un nivel más profundo, llamado nivel de producción, se realizarán disparos ascendentes en el techo para generar la conexión estructural entre ambos niveles. Esta etapa resulta crítica, ya que la continuidad del hundimiento depende tanto de la configuración de las bateas como de la geometría de las galerías. Una vez establecido el contacto entre ambos niveles, el proceso se vuelve progresivo, con la roca fragmentada fluyendo a través de los puntos de extracción. [19, 25]

La columna de material puede ser dividida en cinco zonas:

- *Mobilized zone*, la cual corresponde al lugar en donde ocurre el *caving*.
- *Air-gap*, que corresponde al espacio de aire entre la *mobilized zone* y la *yielded zone*;
- *Yielded zone*, que corresponde a la roca que ha sido debilitada pero no se ha desplazado, por lo que yace en la parte superior del *air-gap*
- *Seismogenic zone*, donde ocurren fracturas significativas del macizo rocoso
- *Elastic zone*, donde los esfuerzos in-situ pueden ser muy altos, pero no lo suficiente para causar una actividad sísmica que pueda causar daños en la roca. [26]

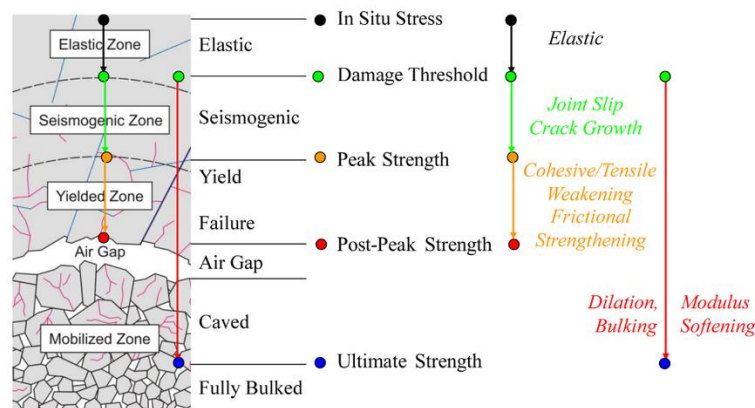


Figura 2.1: Modelo conceptual de la respuesta del macizo rocoso al caving. [27]

La caída del material fragmentado (*caving*) desde el techo de la cavidad (*yielded zone*) permite el desconfinamiento del material ubicado sobre este, permitiendo un cambio en el estado de esfuerzos en esa zona y el flujo del material fragmentado hacia el interior de la galería. Las variaciones en la carga, producto de la extracción del material, puede generar cambios en el estado de esfuerzos del macizo rocoso, o bien, generar variaciones en el esfuerzo inducido por la socavación, denominado *abutment stress*. [28]

2.2 Preacondicionamiento

Cada operación minera, ya sea subterránea o superficial, contiene una mineralogía única al compararla con la de otras faenas, la cual puede variar de acuerdo con la profundidad a la que se ubique el yacimiento o el nivel actual de la excavación. Esta variación en la mineralogía puede significar que, a menudo se encuentren rocas de muy alta calidad, resistencia, dureza, etc. Lo cual dificultaría eventualmente la propagación del *caving* de la operación. Es ahí cuando entra en juego el preacondicionamiento, el cual corresponde al proceso mediante el cual se busca modificar la estructura de la roca antes de su explotación para disminuir su calidad geotécnica, con el fin de facilitar el flujo de mineral a través de los puntos de extracción en una operación de Block/Panel Caving, como también de disminuir los riesgos asociados a la operación, principalmente en minas profundas con una condición de esfuerzos alta. De esta forma, existen diversos métodos para debilitar la roca y así disminuir su resistencia, entre estos, los más usados en operaciones actuales corresponden al Fracturamiento Hidráulico y a la Tronadura Confinada. [29, 30, 31]

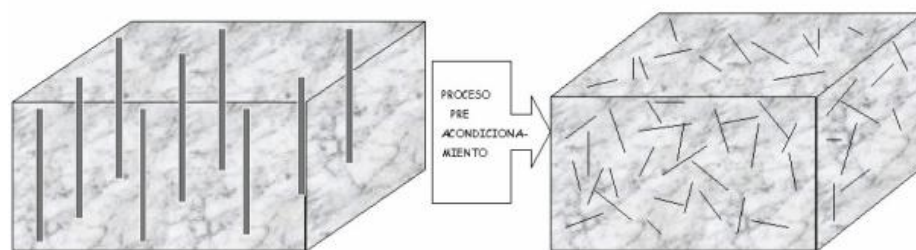


Figura 2.2. Visualización del proceso de preacondicionamiento. [32]

2.2.1 Fracturamiento Hidráulico (FH)

El proceso de FH corresponde a la presurización de una perforación ya creada, mediante la inyección de un fluido, el cual en la mayoría de los casos suele ser agua. Este fluido es inyectado a una presión mayor a la

resistencia de la roca, generando rocas en ella, las cuales se propagan en la dirección del esfuerzo principal menor (σ_3), extendiéndose hasta el interior del macizo rocoso. Esto produce una disminución en la resistencia del macizo, facilitando el colapso o la fragmentación durante la operación. Esta disminución en la resistencia es atribuida tanto a la creación de nuevas estructuras como al cambio en el estado de esfuerzos alrededor de las fracturas. [30, 33]

Existen distintos factores que se deben tener en cuenta al momento de realizar el FH en una operación minera, algunos de estos son:

1. **Estado de esfuerzos in-situ:** La magnitud de estos definirán la presión necesaria para lograr una correcta fragmentación en la roca. Esfuerzos mayores requerirán una mayor presión para superar la cohesión y resistencia de la roca. Por otra parte, tanto el manto como su dirección en las fracturas dependerá de la dirección del esfuerzo principal menor.
2. **Permeabilidad y porosidad de la roca:** Una roca con una alta permeabilidad permitirá el paso del fluido a través de ella, reduciendo la presión disponible para su fractura. Esto está relacionado directamente con el estado de esfuerzos, el cual, al aumentar, aumentará también la permeabilidad del macizo rocoso. [34]
3. **Interacción con fracturas preexistentes:** La presencia de fallas puede alterar la propagación de las fracturas inducidas con el Fracturamiento Hidráulico. Estas dependerán del ángulo de incidencia entre las fracturas ya existentes y las inducidas por el preacondicionamiento. [35]
4. **Condiciones de anisotropía:** Un macizo con una alta anisotropía provocará una propagación no uniforme de las fracturas. Además, Moghaddam [36] confirmó que la inyección cíclica en medios heterogéneos provocó un aumento en la complejidad de la red de fracturas inducidas.

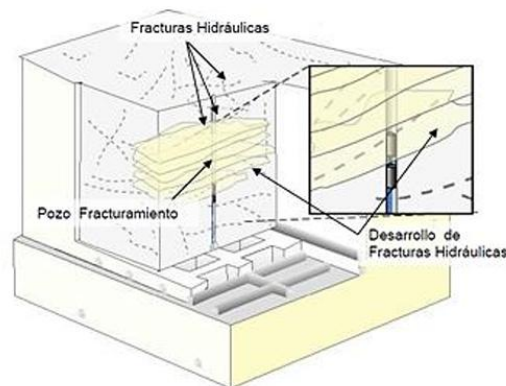


Figura 2.3: Esquema general del Fracturamiento hidráulico. [37]

2.2.2 Debilitamiento dinámico con explosivos (DDE)

Se entiende por tronadura confinada (TC) o debilitamiento dinámico con explosivos (DDE) como un método de preconditionamiento en el cual se aplican cargas controladas para inducir un daño distribuido en un volumen del macizo rocoso, esto es realizado mediante una tronadura sin una cara libre.

El objetivo de esta práctica es disipar la energía elástica acumulada en la roca, liberar las cargas tensionales, y mejorar la estabilidad de excavaciones existentes o por desarrollar. A diferencia de una tronadura de producción, esta no busca la extracción del material, sino modificar el estado de esfuerzos dentro de un volumen de roca determinado. [38]

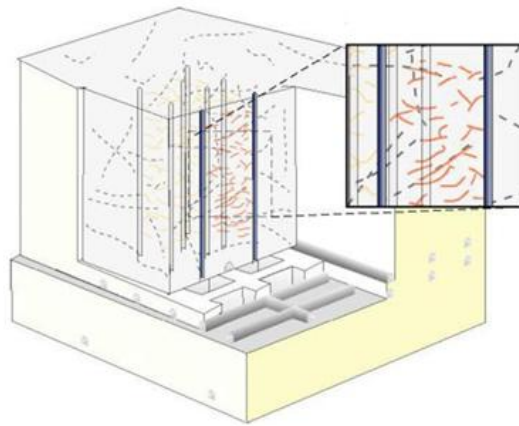


Figura 2.4: Esquema general del Debilitamiento Dinámico con Explosivos (DDE). [37]

2.3 Simulaciones Numéricas

Existen diversas formas de estudiar tanto las variaciones en los esfuerzos inducidos como el estado de la roca o el flujo gravitacional de las partículas del sistema, siendo una de estas el uso de simulaciones computacionales. [13]

La simulación numérica computacional comprende un conjunto de técnicas que emplean métodos matemáticos y algoritmos implementados en computadoras para modelar y analizar el comportamiento de sistemas complejos. [39]

Estas simulaciones pueden clasificarse según el método numérico utilizado para realizar las aproximaciones. Bajo esta categoría destacan el Método de Volúmenes Finitos (FVM), el Método de los elementos finitos (FEM), los autómatas celulares (AC), y el Método de los elementos discretos (DEM), ampliamente aplicados en el ámbito minero. Siendo todos a excepción del último, métodos continuos de simulación, es decir, se asume que la roca se comporta como un bloque homogéneo. Por otra parte, métodos

discontinuos (como puede ser DEM), suponen que el medio se forma por bloques o partículas separadas, las que se pueden desplazar entre sí, mientras que el contacto entre estas es modelado explícitamente mediante leyes de contacto. [40, 41]

En minería, la simulación numérica cumple un rol clave para garantizar la operatividad y seguridad de las faenas. Permite estudiar el comportamiento de la roca, ayudando a prevenir accidentes como estallidos de roca o colapsos estructurales (en pilares, paredes de galerías, rampas, entre otros). Asimismo, contribuye a optimizar la eficiencia en la extracción de material fragmentado en operaciones como el Block Caving. En este contexto, pueden emplearse modelaciones FVM para analizar el estado de esfuerzos en el macizo rocoso, así como análisis mediante DEM para modelar el flujo de partículas durante el proceso de extracción. Dicho modelo requiere de parámetros mecánicos obtenidos en terreno sobre la roca la cual se quiere estudiar, y así obtener un resultado preciso. [42, 43]

2.3.1 Método de los volúmenes finitos (FVM)

El método de los volúmenes finitos (Finite Volume Method, FVM) es una técnica numérica utilizada para resolver ecuaciones diferenciales en dominios continuos, especialmente en problemas de mecánica de fluidos y mecánica de medios continuos. En este método, el dominio se divide con un mallado, el cual corresponde a la división de la superficie en polígonos de comúnmente 3 o 4 lados (triángulos, cuadrados o rectángulos), cada una de estas figuras se denomina celda, donde se aplican las leyes de conservación de la masa, momento y energía a cada una de estas. [13, 44, 45, 46]

Si se quiere estudiar el comportamiento de este método aplicado a la minería, particularmente al Block Caving, este puede ser empleado para simular el comportamiento del macizo rocoso durante el proceso de hundimiento y el flujo gravitacional inducido por la extracción del mineral en la base de la columna. [47, 48, 49]

2.3.2 FLAC3D

FLAC3D es un software de simulación numérica desarrollado para el análisis geomecánico tridimensional de medios continuos, ampliamente utilizado en la ingeniería de minas. Basado en el método de volúmenes finitos (FVM), permite modelar el comportamiento mecánico de suelos, macizos rocosos, concreto y otros materiales, bajo condiciones de carga estáticas o dinámicas. Su enfoque está orientado principalmente al

estudio de problemas complejos en minería subterránea, diseño de excavaciones, estabilidad de taludes, hundimiento de bloques y comportamiento de túneles. [45, 48, 49, 50]

El entorno de modelado de FLAC3D se basa en una discretización del dominio mediante un mallado tridimensional compuesto por elementos de forma poliédrica definidos por el usuario (para la investigación, cubos de $10 \times 10 \times 10 [m^3]$). Cada uno de estos elementos se comporta según una relación esfuerzo-deformación determinada por un modelo constitutivo, el cual puede ser lineal o no lineal, y responde a las condiciones de carga y contorno impuestas en la simulación.

Entre sus principales ventajas para aplicaciones mineras se encuentra la capacidad de representar procesos de deformación progresiva, falla localizada y colapso estructural en macizos rocosos, permitiendo una evaluación realista de la estabilidad en minas de hundimiento o *Block Caving*. Para este caso en particular, y con el objetivo de simular un escenario típico de hundimiento por bloques, se emplearán dos modelos constitutivos específicos, que permiten capturar el comportamiento tanto del macizo intacto como del mismo una vez fracturado o colapsado. Estos modelos son:

- **Mohr-Coulomb:** Modelo ampliamente utilizado en la geomecánica para representar el comportamiento de materiales como suelos o rocas. Este modelo se basa en asumir que la resistencia al corte de un material depende linealmente del esfuerzo normal aplicado sobre la superficie. En la actual investigación se usará este modelo para establecer las características de la roca una vez haya fallado o colapsado.
- **Hoek & Brown:** Derivado del modelo constitutivo *Mohr-Coulomb*. Este modelo se utilizará para modelar el macizo rocoso intacto, es decir, antes de comenzar la propagación del *caving*, momento en el cual comenzará el colapso de este. Luego de dar inicio al *caving*, el mineral comenzará a fallar; será en este punto donde se cambie el modelo constitutivo.
- **Ubiquitous-Joint Model (UJM):** Modelo constitutivo usado en el software FLAC3D para definir el comportamiento mecánico de las zonas en las cuales se presentan discontinuidades. Su utilidad se ve reflejada cuando se quiere analizar el preacondicionamiento mediante la creación de fracturas en la roca.

2.3.3 Mallado

Posterior a la creación del modelo, el cual quiere ser simulado y analizado, se requiere hacer un mallado, el cual corresponde a la discretización del dominio 3D en figuras geométricas o celdas, sobre las cuales se

aproximarán las ecuaciones físicas para obtener así un resultado de la simulación. Existen los mallados estructurados, no estructurados, y también los híbridos. Los mallados estructurados pueden ser identificados visualmente por la conectividad regular entre cada uno de los elementos que lo compone, caso contrario al de los mallados no estructurados, los cuales en comparación con su contraparte, suelen ser muy buenos en la discretización de un área o de un volumen irregular, aunque poco eficientes computacionalmente. Finalmente, están los mallados híbridos, los cuales corresponden a una mezcla entre los mallados estructurados y los no estructurados, integrando las ventajas de cada uno de ellos, siendo capaces de dividir cualquier modelo, por más complejo que sea. [46, 51, 52, 53, 54]

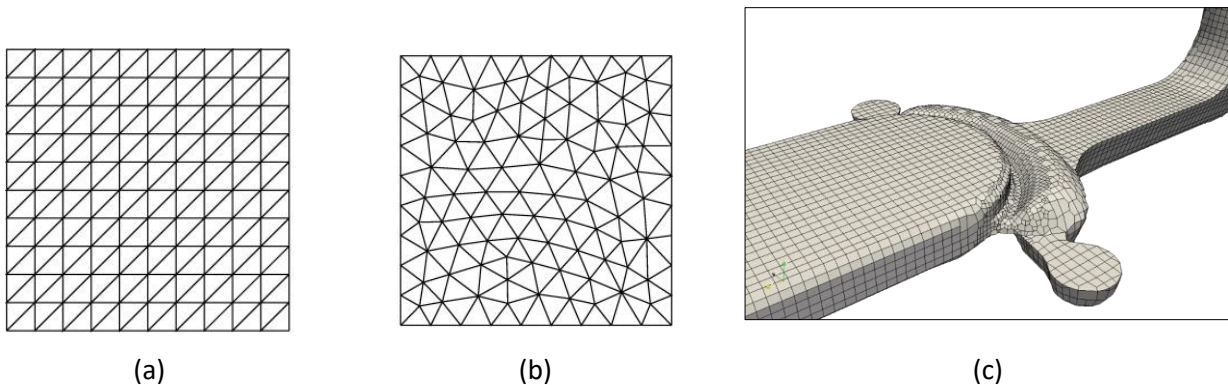


Figura 2.5: Tipos de mallado. (a) corresponde a un mallado estructurado [53]. (b) corresponde a un mallado no estructurado [53]. (c) corresponde a un mallado híbrido [54].

2.3.4 Rhinoceros

Rhinoceros es un software de modelado 3D ampliamente utilizado en áreas como el diseño industrial, la arquitectura y la ingeniería, entre otras disciplinas relacionadas con la creación de geometría compleja. Se caracteriza por su capacidad de generar y editar superficies y curvas con un alto nivel de precisión y flexibilidad. [55, 56]

Su interfaz intuitiva, junto con la compatibilidad con múltiples formatos de archivo, facilita la integración de modelos con otras herramientas de análisis y simulación. Además, permite la incorporación de plugins como Griddle, que optimiza la generación de mallados de figuras complejas, haciendo posible exportar geometrías de Rhinoceros para ser utilizadas directamente en softwares de análisis numérico como FLAC3D, lo que resulta fundamental para estudios geotécnicos, estructurales y de estabilidad en minería y obras civiles. [55, 57]

Este software es utilizado en la presente investigación para la creación de los modelos que se usarán en cada uno de los casos de estudio definidos anteriormente. de un sólido de tres dimensiones con un ángulo (manteo) dado, el cual, más adelante contendrá un set de discontinuidades. Una vez terminada la creación del sólido, este es exportado e importado en FLAC3D para continuar con el proceso.[12, 57]

2.3.5 Griddle

La presente investigación cuenta con el uso de los softwares Rhinoceros y FLAC3D, los cuales se relacionan entre sí a la hora de crear modelos, y luego realizar la simulación de este.

Griddle es un complemento para el software Rhinoceros, el cual facilita la creación de un mallado estructurado y de alta calidad, además de la opción de generar mallados volumétricos para la simulación de sólidos, como se requiere en el presente estudio. Este software admite las opciones de mallados tetraédricos (hecho a base de triángulos), hexaédricos (hecho únicamente con cuadriláteros), y hexa-dominantes (hecho en su mayoría con cuadriláteros), además de opciones de refinación del mallado, como también con opciones de reparación de mallados ya hechos, mejorando la fidelidad del modelo sin aumentar los costos computacionales. [57, 58, 59]

2.4 Modelamiento de caving

El modelamiento numérico del proceso de hundimiento en una operación de Block/Panel Caving constituye una herramienta fundamental para comprender y predecir la respuesta geomecánica del macizo rocoso. El software empleado en la presente investigación, FLAC3D, permite simular el comportamiento de la roca bajo condiciones de confinamiento, redistribución de esfuerzos y generación progresiva de fracturas. A través de la implementación de modelos constitutivos en la simulación, es posible reproducir fenómenos como el colapso gravitacional del macizo, la propagación del hundimiento y la evolución de la subsidencia en la superficie, integrando tanto parámetros geotécnicos como condiciones de borde distintas.

FLAC3D permite analizar el comportamiento geomecánico de la operación una vez comenzada. Esto se puede llevar a cabo realizando un análisis desde el nivel de hundimiento, es decir, sin considerar los puntos de extracción ni galerías usadas para el transporte del material. Se puede observar en la Figura 2.6, cómo cambia el estado de esfuerzos una vez comenzada la operación.

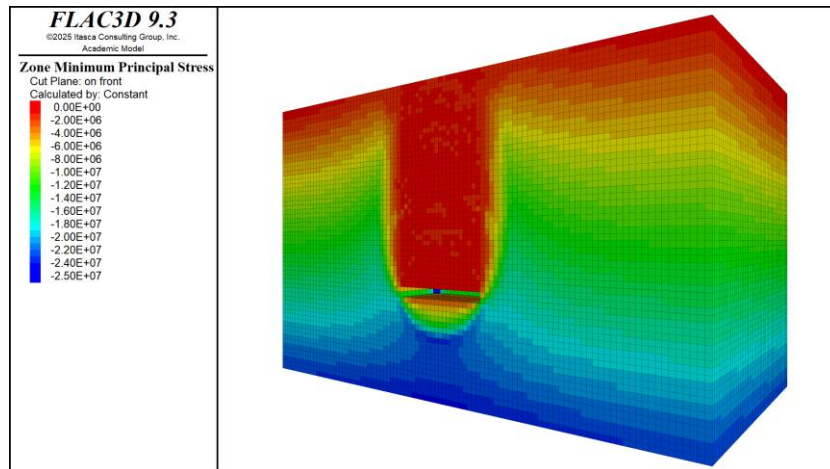


Figura 2.6: Modelo numérico genérico de Blok Caving realizado en FLAC3D con un corte transversal en el centro del nivel de hundimiento. Se puede ver en escala de colores, el esfuerzo principal menor.

Diversos estudios numéricos han sido realizados sobre el método de Block/Panel Caving los cuales buscan estudiar el comportamiento del *cave-back*. Entre estos, Castro et al. [60] realizó un acople unidireccional de los softwares FLAC3D y FlowSim para lograr estimar, mediante una simulación de flujo, el comportamiento del volumen de aire en la columna y así identificar sus potenciales riesgos y poder mantener un control del *caving*.

Es común en este tipo de estudios, realizarlo con bases en la metodología de Sainsbury [61], la cual describe las dimensiones del mallado, algunas propiedades geomecánicas, los desplazamientos que deben ser usados en la superficie de interés (cara superior del UCL), etc. Entre otros aportes de la autora al área se encuentra su estudio sobre el modelamiento mediante ubicuas [62], lo que corresponde a una forma de asignar joints a un modelo numérico; esto puede ser implementado en FLAC3D mediante el modelo Ubiquitous-Joint, el cual asigna un plano de debilidad a cada zona del mallado, definiendo tanto las propiedades geológicas como mecánicas que este pueda poseer, lo que resulta de mucha utilidad al estudiar un macizo rocoso con anisotropía.

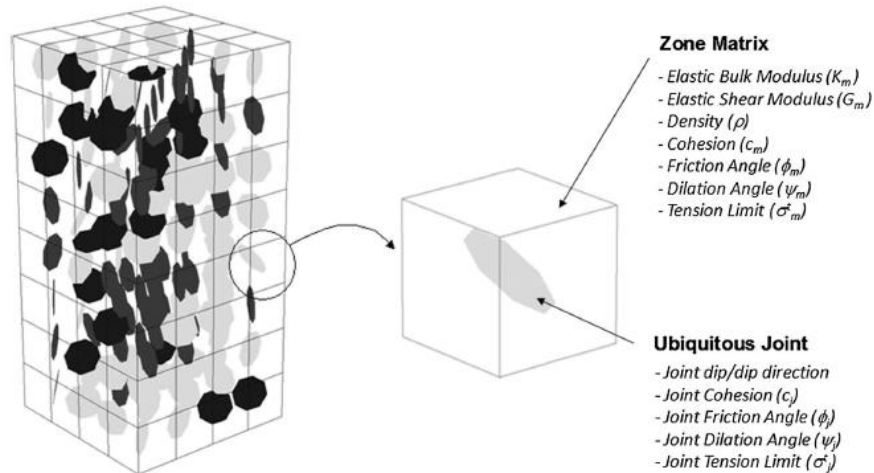


Figura 2.7. Esquema del modelo Ubiquitous-Joint. [62]

Por su parte, Sjölander M. et al. [63] desarrolló un modelo predictivo en la mina de hierro operada por Sublevel Caving, ubicada al norte de Suecia, Malmberget. El modelo fue llevado a cabo mediante un acople numérico bidireccional entre los softwares FLAC3D y CAVESIM. Este estudio buscó predecir el comportamiento tanto de la subsidencia provocada por la mina en las cercanías de zonas residenciales, como también de la estabilidad en las labores al interior de la operación.

El estudio contempló un modelo en FLAC3D v7.0, en el cual se incluyeron propiedades elásticas y mecánicas en el macizo rocoso. Incluyó también un modelo en CAVESIM, donde se agregaron parámetros como la densidad de la roca, usada para la simulación del flujo gravitacional.

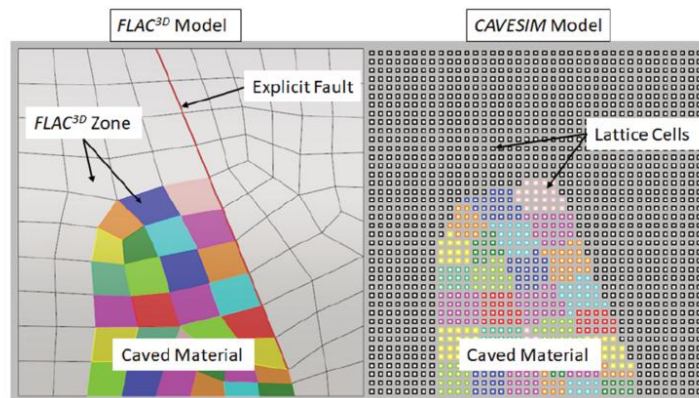


Figura 2.8. Mapa conceptual de celdas entre FLAC3D y CAVESIM. [63]

Una zona de material es removida, iniciando un desplazamiento en la roca ubicada sobre este para llenar el vacío. Este desplazamiento se guarda como una razón de flujo volumétrico, la cual es ingresada al modelo de FLAC3D

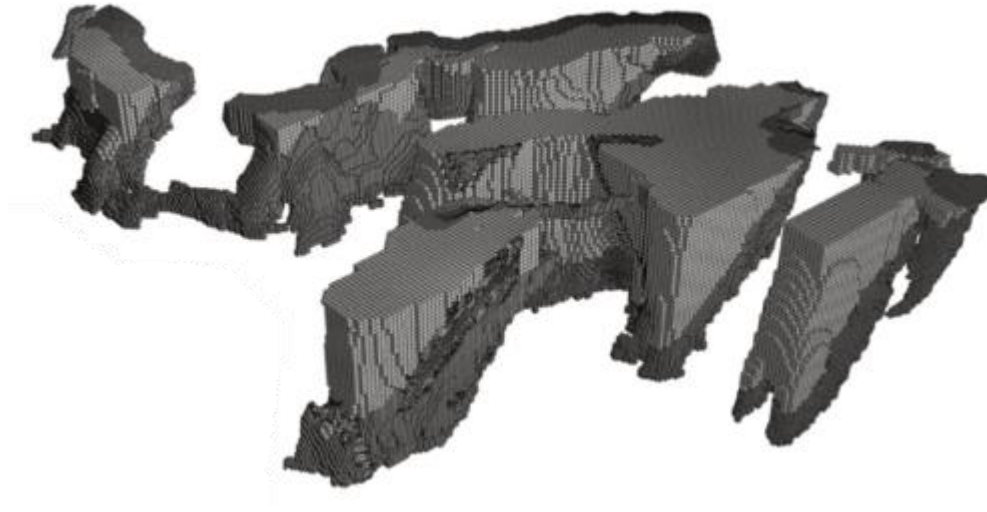


Figura 2.9. Volumen de roca excavada por la mina Malmberget en el año 2030. [63]

El estudio mostró consistencia entre los resultados de la simulación y lo visto a través de puntos de observación, lugares donde se midió el desplazamiento acumulado en una zona, entregando fidelidad en la simulación.

3 Metodología

Para poder realizar una correcta simulación del *caving* en una operación de Block Caving en cual se ha realizado un preconditionamiento con fracturamiento hidráulico (FH) se propone, el siguiente procedimiento metodológico dividido en 4 pasos principales:

1. Creación de geometrías: Se crea una geometría por cada caso de estudio, correspondientes a las zonas de FH del modelo en el software Rhinoceros.
2. Creación del modelo: Se crea la caja de dimensiones $1.000 \times 1.000 \times 600 \text{ [m}^2\text{]}$, esta corresponde al macizo rocoso del caso de estudio el cual se quiere simular.
3. Simulación: Se asignan propiedades geomecánicas tanto a la roca in-situ como a las zonas preconditionadas. Además de establecer las condiciones de borde que se usarán en cada simulación.
4. Análisis de resultados: Una vez terminada la simulación, se lleva a cabo un estudio de los resultados obtenidos de la simulación, obteniendo los estados de esfuerzo, desplazamientos, zonas del modelo que fallaron, etc. Todo esto definido para cada periodo de extracción.

La Figura 3.1 presenta una representación visual de cada paso usado en la simulación.

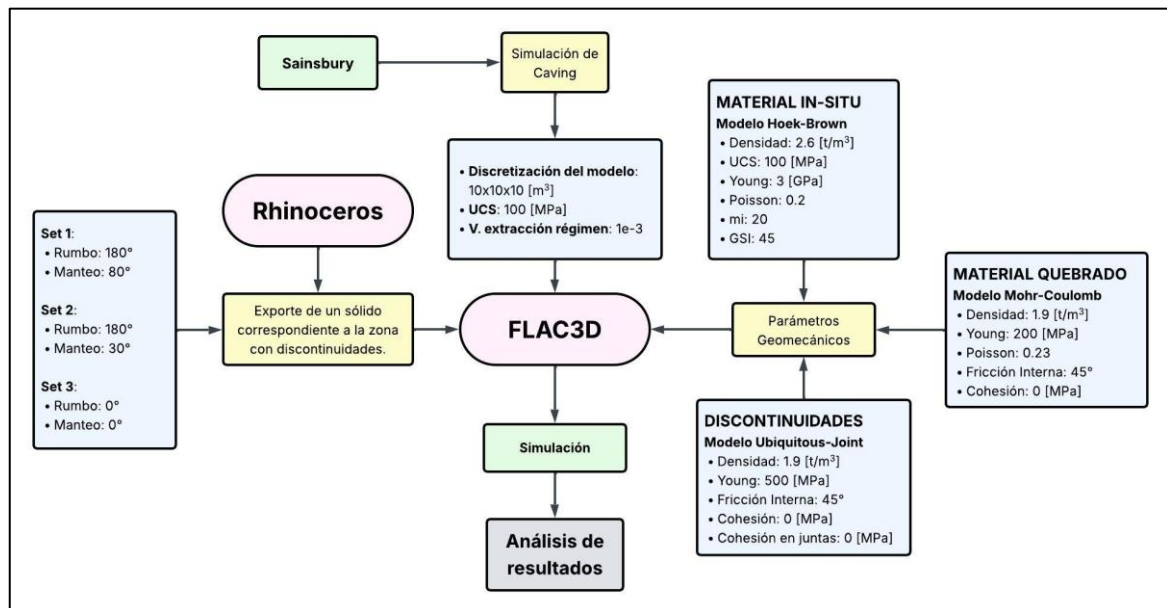


Figura 3.1: Metodología empleada para llevar a cabo la investigación.

Para llevarse a cabo, se consideraron 5 casos de estudio con diferentes combinaciones entre la inclinación del volumen de FH y la cantidad de estas, además de un caso de control sin preconditionamiento, para ver el efecto sobre la propagación del *caving*.

Cada uno de estos casos corresponden al sólido que representará la zona debilitada tras la implementación del FH. La inclinación estudiada (respecto de la horizontal) es de: 80° (casos 1 y 2), 30° (sólo caso 3), y 0° (casos 4 y 5). Siento la única diferencia entre los casos 1-2 y 4-5, la cantidad de zonas debilitadas.

En primer lugar, se debe crear un sólido en el software Rhinoceros el cual contendrá la zona del modelo que contará con discontinuidades. Este sólido se crea con una inclinación distinta para cada caso. Finalmente se importa este sólido en el software FLAC3D, donde se le asignan parámetros geomecánicos a cada zona de este para luego realizar la simulación y obtener sus resultados. La Figura 3.2 muestra estos sólidos usados en cada uno de los cinco casos de estudio:

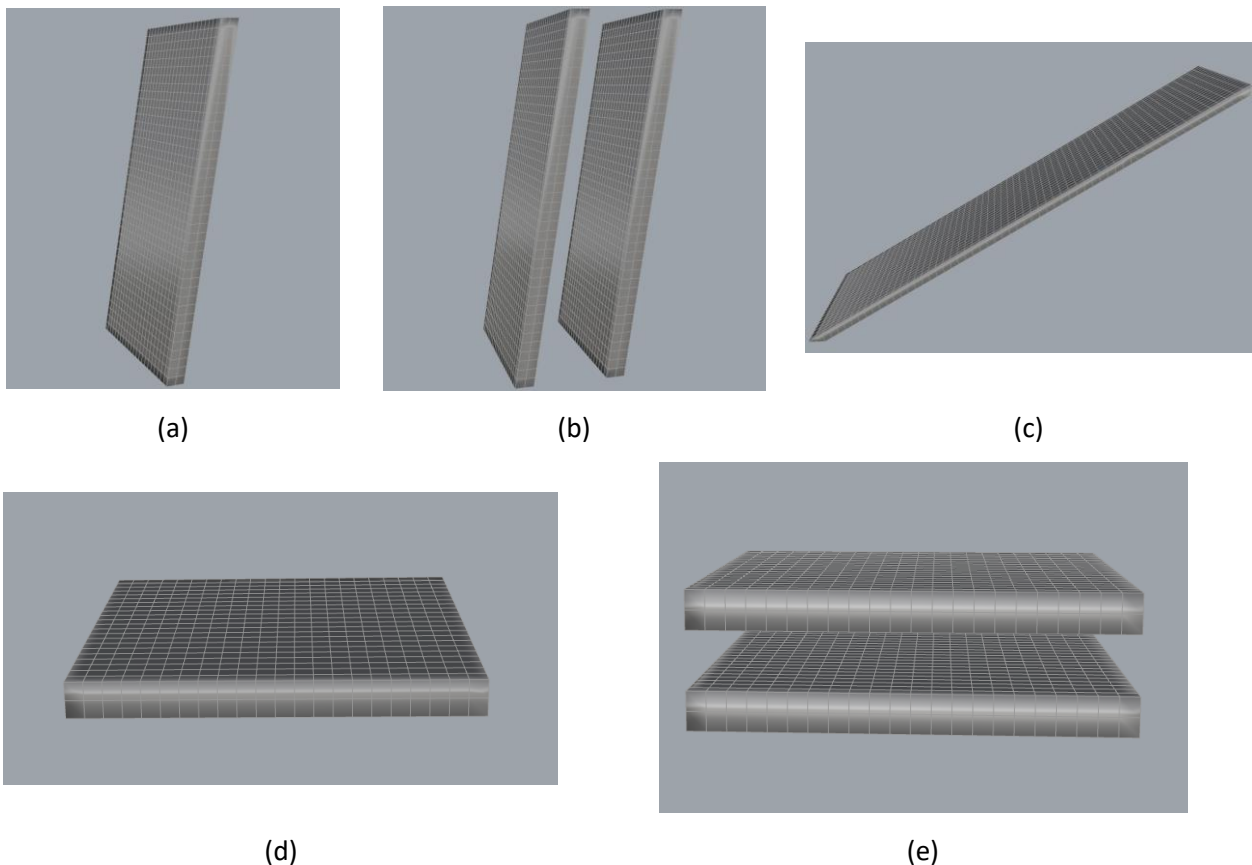


Figura 3.2: Casos de estudio seleccionados para cada una de las simulaciones. (a) Caso 1, una zona de FH con un ángulo de 80° . (b) Caso 2, dos zonas de FH con un ángulo de 80° . (c) Caso 3, una zona de FH con un ángulo de 30° . (d) Caso 4, una zona de FH con un ángulo de 0° . (e) Caso 5, dos zonas de FH con un ángulo de 0° .

Al modelo creado en Rhinoceros se agregará un bloque de $200 \times 200 \times 10 \text{ [m}^3\text{]}$, el cual estará dividido en una parte externa y una parte interna; representando ambas el nivel de hundimiento (desde ahora, UCL, por sus siglas en inglés, *Undercut Level*).



Figura 3.3: Modelo empleado en el caso de estudio N°1. En naranja, la zona que contendrá las discontinuidades producto del Fracturamiento Hidráulico. En azul, el nivel de hundimiento. No se incluye la caja del modelo en la figura.

Una vez creado este modelo, se realiza un mallado inicial, para luego ser refinado con la herramienta Griddle, creando un mallado principalmente cuadrangular, es decir, contiene mayormente rectángulos, y, en menor cantidad, triángulos, dependiendo de la zona del modelo que se requiera para el estudio. La Figura 3.4 muestra el resultado de la creación de la malla en el software Rhinoceros:

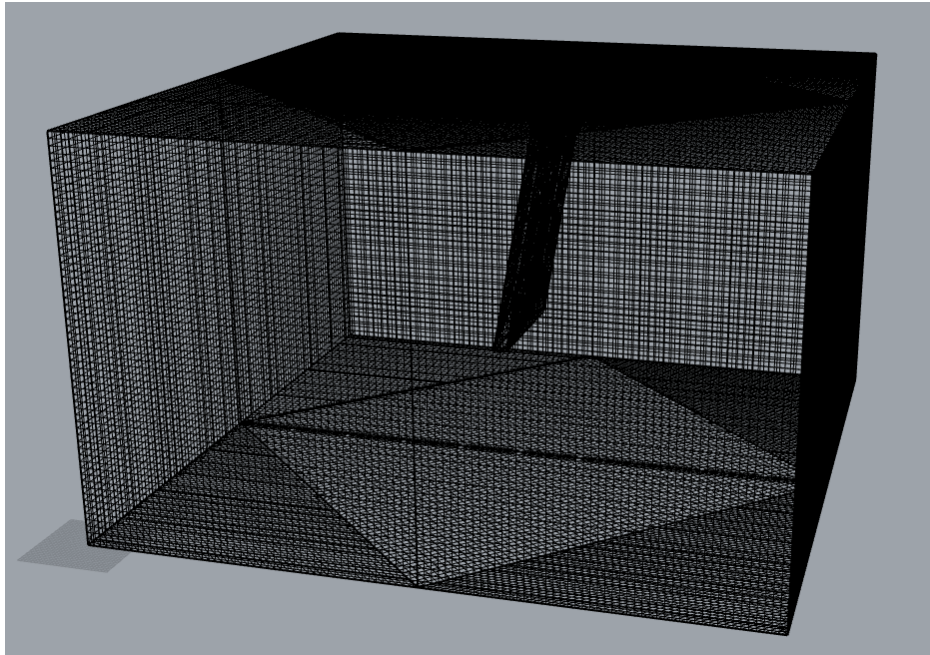


Figura 3.4: Mallado creado en Rhinoceros con complemento Griddle. Se muestra el primer caso de estudio.

Luego, se importa el modelo creado en Rhinoceros en el software FLAC3D donde se le asignan los parámetros geomecánicos que se usarán en el modelo cargado. Este modelo cargado incluye, la caja, la cual corresponde a un paralelepípedo de $1.000 \times 1.000 \times 600 \text{ [m}^3\text{]}$, el UCL, el cual corresponde a otro paralelepípedo dividido en dos partes, la zona exterior y la interior, y finalmente, la zona que representa el debilitamiento producto del FH, la cual depende de cada caso de estudio.

Una vez realizado esto, se procede de la siguiente manera: se realiza una primera simulación para evaluar el estado de la roca in-situ. Luego, se dan características de roca quebrada al UCL. Finalmente, se aplican velocidades de desplazamiento en el techo del UCL, las cuales varían desde el centro del techo hasta los bordes (siendo siempre mayor en el centro).

Para la simulación de cada mes de producción en FLAC3D, se agregaron desplazamientos en cada nodo del mallado en el techo del nivel de hundimiento, a modo de representación de la excavación y el efecto que tiene esta sobre el material. Para esto se aumentó la velocidad de extracción progresivamente entre los meses 1 y 4, luego, esta alcanza un estado de régimen y se mantiene constante desde este último hasta el mes 12. Estos desplazamientos se detallan en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1: Velocidades de extracción por mes en cada zona del techo del UCL.

	Centro del techo del UCL	Borde del techo del UCL
Mes 1	-5×10^{-4}	-2×10^{-4}
Mes 2	$-7,7 \times 10^{-4}$	-5×10^{-4}
Mes 3	-1×10^{-3}	$-7,7 \times 10^{-4}$
Mes 4	-1×10^{-3}	-1×10^{-3}
...	...	...
Mes 12	-1×10^{-3}	-1×10^{-3}

Tras realizar distintas simulaciones, se decidió por separar el primer mes de simulación en 4 periodos (semanas), esto debido a la rápida propagación de uno de los casos de estudio. Esta simulación se realizó con la misma velocidad del Mes 1 durante estos 4 periodos iniciales. Para llevar a cabo estas simulaciones, se decidió de forma arbitraria usar 12.000 steps para la simulación de cada mes, y 4.000 steps para la simulación de una semana de producción. Al terminar las simulaciones se analizó el estado del modelo con las zonas que fallaron de alguna forma (ya sea por compresión o tracción), obteniendo así el estado del caveback luego de cierto periodo de producción.

Una vez detalladas las velocidades que serán usadas en la parte superior del UCL para simular la extracción, se definen los parámetros usados para definir la roca en cada uno de sus estados, los cuales se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros usados en los distintos modelos constitutivos. Hoek & Brown, Mohr-Coulomb, Ubiquitous-Joint Model.

Parámetro	Unidad	Valor (Roca intacta)	Valor (Roca fracturada)	Valor (UJM)
Densidad	$[kg/m^3]$	2.600	2.100	1.900
Módulo de Young	$[Pa]$	3×10^9	$0,2 \times 10^9$	$0,5 \times 10^9$
Constante m_i		20		
UCS	$[Pa]$	100×10^6		
Razón de Poisson		0,2	0,23	
GSI		45		
Ángulo de fricción interna	$[^\circ]$		45	
Cohesión	$[Pa]$		0	0
Cohesión de la discontinuidad				0

En cuanto a la dirección de las fracturas creadas producto del fracturamiento hidráulico, estas siguen una dirección perpendicular al esfuerzo principal menor. Debido a la condición de esfuerzos dispuesta en el modelo ($k = 1.5$), es decir, $\sigma_h > \sigma_v$, las fracturas seguirán un *dip* de 0° , y un *dip-direction* arbitrario, ya que no tendrá efecto producto de la nula inclinación de estas. [64]

La Figura 3.5 muestra una relación esfuerzo vs. deformación de la roca usada en los modelos. Se puede ver el cambio que se hará en el modelo constitutivo entre la roca intacta y la misma ya fracturada. Así, se comenzará con el modelo constitutivo de Hoek & Brown, y una vez esta roca colapse, se le será asignada el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb.

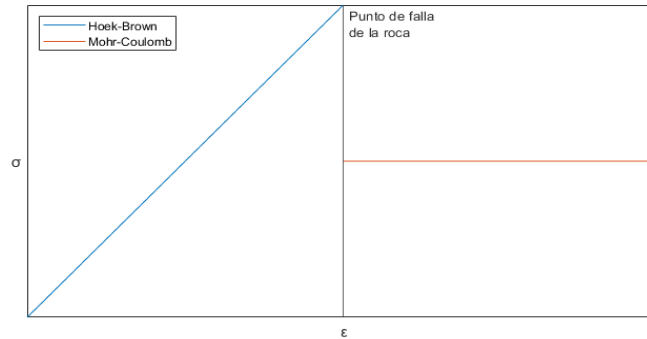


Figura 3.5: Gráfico esfuerzo-deformación. Se especifica el modelo constitutivo usado para cada estado de la roca.

Por otra parte, para lograr un modelamiento correcto de los cinco casos de estudio, se aplicaron condiciones de borde al modelo, estableciendo desplazamientos iguales a 0 en las caras izquierda, derecha, frontal, trasera, e inferior, sin incluir la cara superior, donde los cambios en la topografía, además del desplazamiento del material desde esta se vería afectado al definir algún tipo de condición en esa zona, lo que podría llevar a resultados erróneos.

El código usado para cada uno de los casos fue hecho con el lenguaje de programación FISH y puede ser dividido en distintas partes de acuerdo con el funcionamiento de cada línea de código, este se puede resumir con el diagrama de flujo presentado en la Figura 3.6 [45].

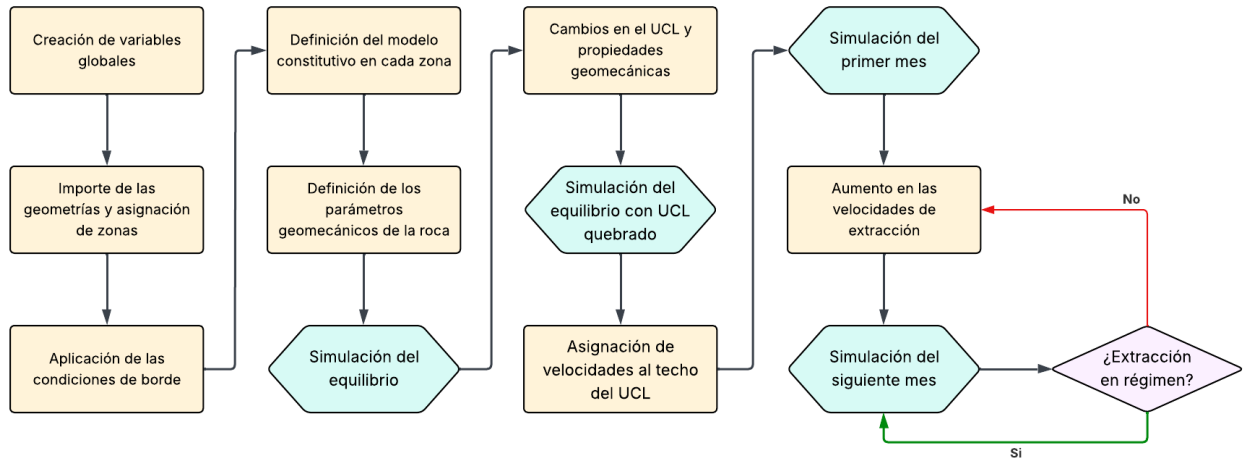


Figura 3.6: Diagrama de flujo del script FISH usado en las simulaciones de cada uno de los casos de estudio.

La Figura 3.5 muestra el paso a paso del código FISH usado en FLAC3D. En primer lugar se crean variables que serán usadas para la definición de los grupos, slots, geometrías, etc. Luego se cargan las geometrías, correspondientes al mallado del caso de estudio, y las zonas externas e internas del nivel de hundimiento. Luego, se asignan las condiciones de borde del modelo, correspondientes a desplazamientos 0 en todas las caras de este, a excepción de la cara superior, la cual se verá afectada por los esfuerzos externos y/o gravedad. Seguido a esto, se define el modelo constitutivo usado en cada zona del modelo, además de las propiedades mecánicas del macizo rocoso.

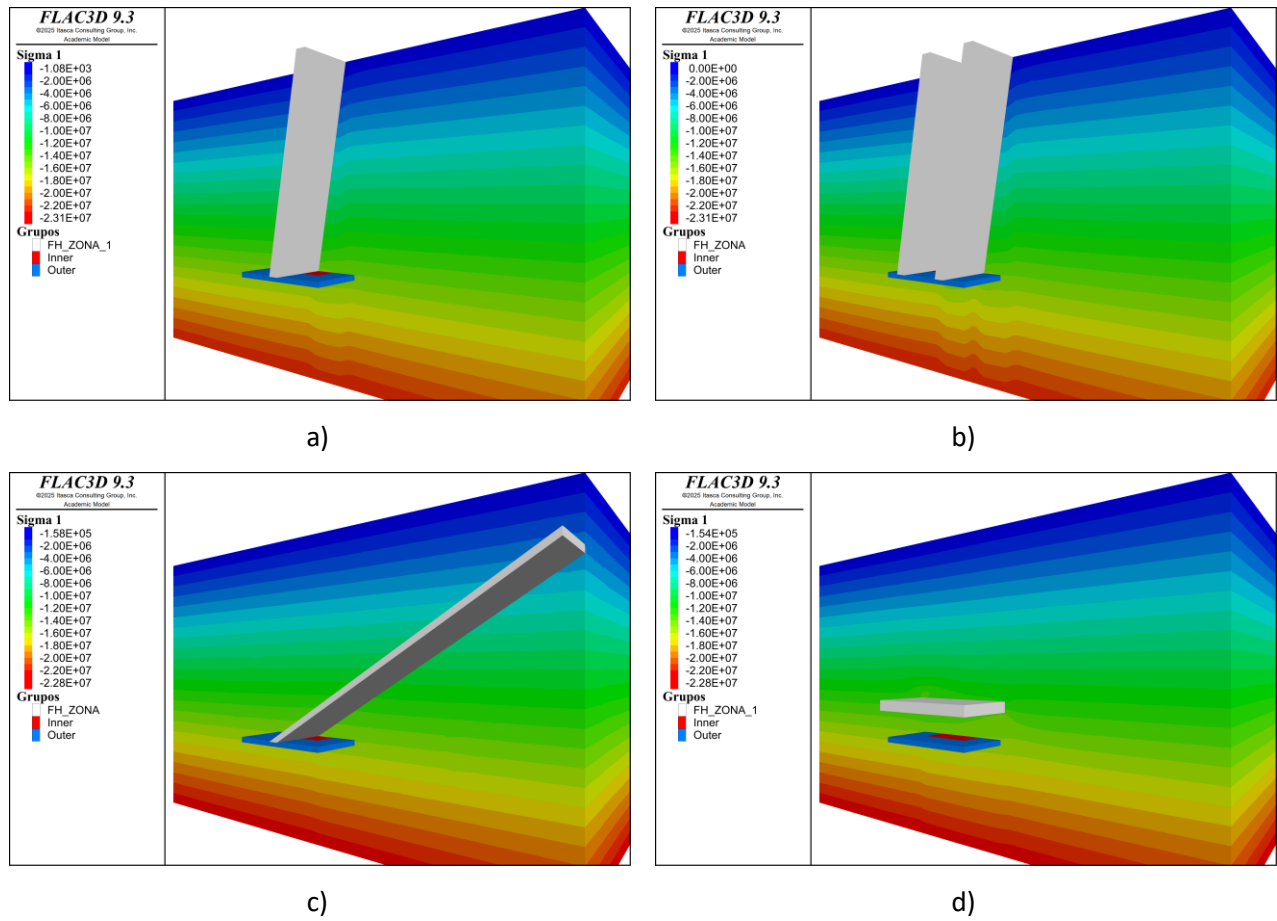
Una vez definidas las propiedades, se simula el estado de equilibrio del modelo, el cual corresponde a un paso crucial en la simulación, dado que aquí se logran distribuir las cargas litostáticas producto de la profundidad del modelo. Luego, se aplican propiedades de material quebrado al nivel de hundimiento y se simula nuevamente un estado de equilibrio.

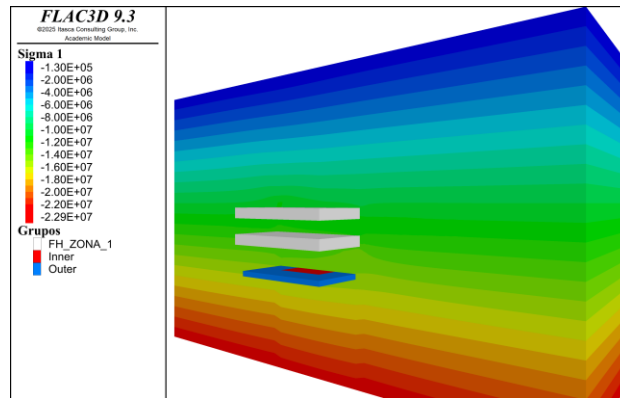
Finalmente, se aplican las velocidades en el techo del UCL y se comienza a simular cada periodo de producción. Estas velocidades irán aumentando hasta tener una extracción en régimen (a partir del tercer mes).

4 Resultados y Análisis

Se analizó el comportamiento del *caving* durante un año de producción, obteniendo resultado después de cada mes. Esto no incluye el primer mes de simulación, ya que este fue dividido en 4 semanas, obteniendo sus resultados al finalizar cada una de estas.

La Figura 4.1 muestra el estado de equilibrio de cada uno de los casos de estudio:





e)

Figura 4.1. Estado de equilibrio de los 5 casos. A) Caso 1. B) Caso 2. C) Caso 3. D) Caso 4. E) Caso 5.

Se puede ver en la figura anterior el estado de cada caso antes de simular la producción. Cada uno de estos cuenta con el nivel de hundimiento en la zona baja (azul y rojo), y la/s zona/s en las cuales se aplica el fracturamiento hidráulico (blanco). Se muestra además con un gradiente de colores, el esfuerzo principal mayor.

4.1 Caso 1

El primer caso de estudio corresponde al modelo numérico con una única zona de fracturamiento hidráulico con un manto de 80° con respecto a la horizontal, ubicado en la zona central del UCL.

Este caso presentó una rápida propagación del *caving* en los primeros periodos de producción, aunque, debido a la alta calidad de la roca y a la baja cantidad de fracturas inducidas por el preconditionamiento, esta velocidad se vio drásticamente disminuida luego de solo 2 semanas de producción, alcanzando una altura de 330 [m], aumentando solo 120 [m] respecto del estado inicial.

La Figura 4.2 muestra la evolución de este primer caso de estudio durante las primeras 4 semanas de producción.

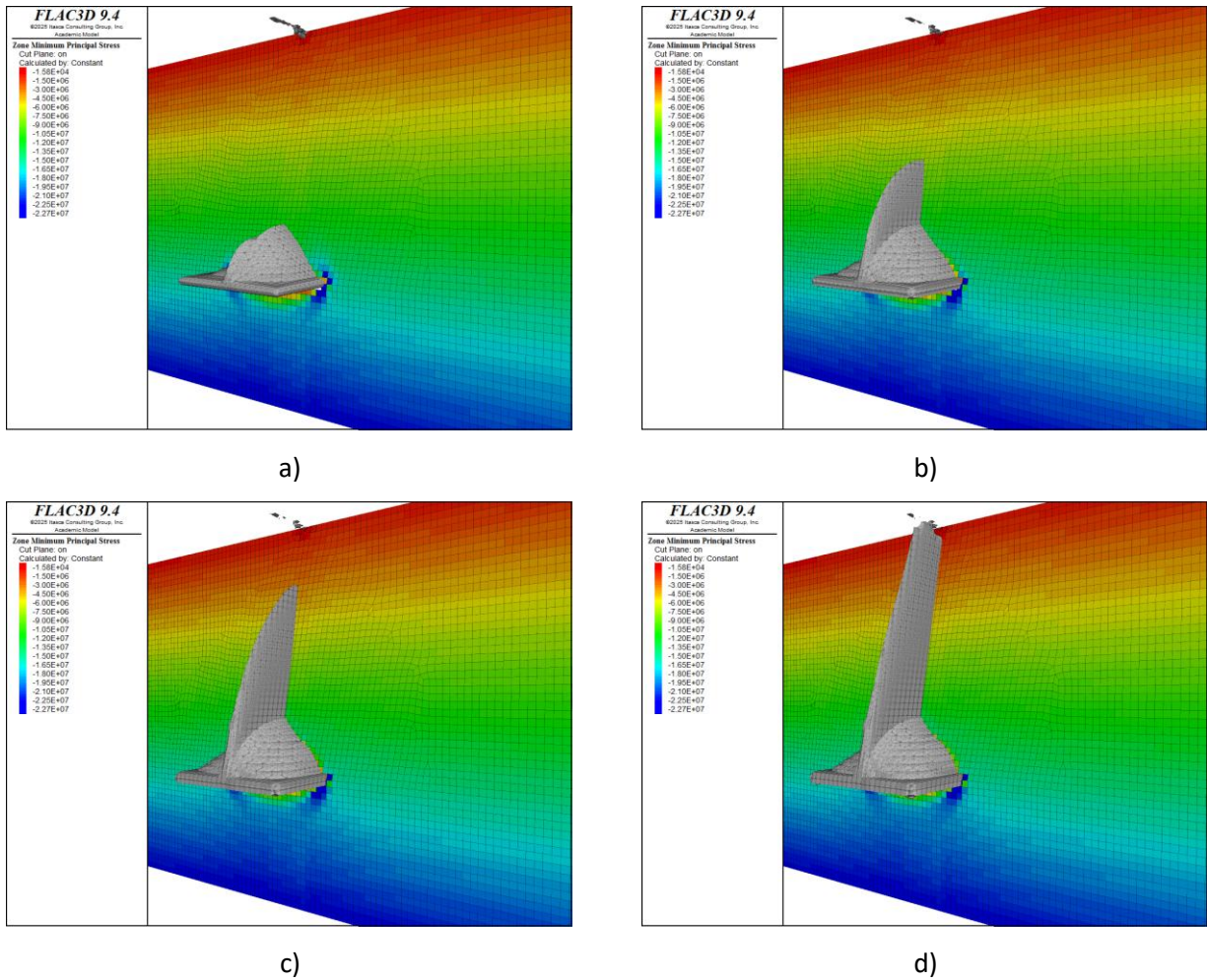


Figura 4.2. Cave-back en el caso 1, luego de: a) una semana. b) dos semanas. c) tres semanas. d) cuatro semanas.

De la figura anterior se puede observar la rápida velocidad de propagación del *caving* a través de la zona de preacondicionamiento, esto debido a que se trata de material ya fracturado, lo que facilita este proceso. Sin embargo, al analizar el resto de la zona, notamos una lenta propagación.

En la Figura 4.3 se muestra la variación en el cave-back luego de una semana, seis meses y 12 meses de producción, pudiéndose notar una variación muy lenta entre estos periodos.

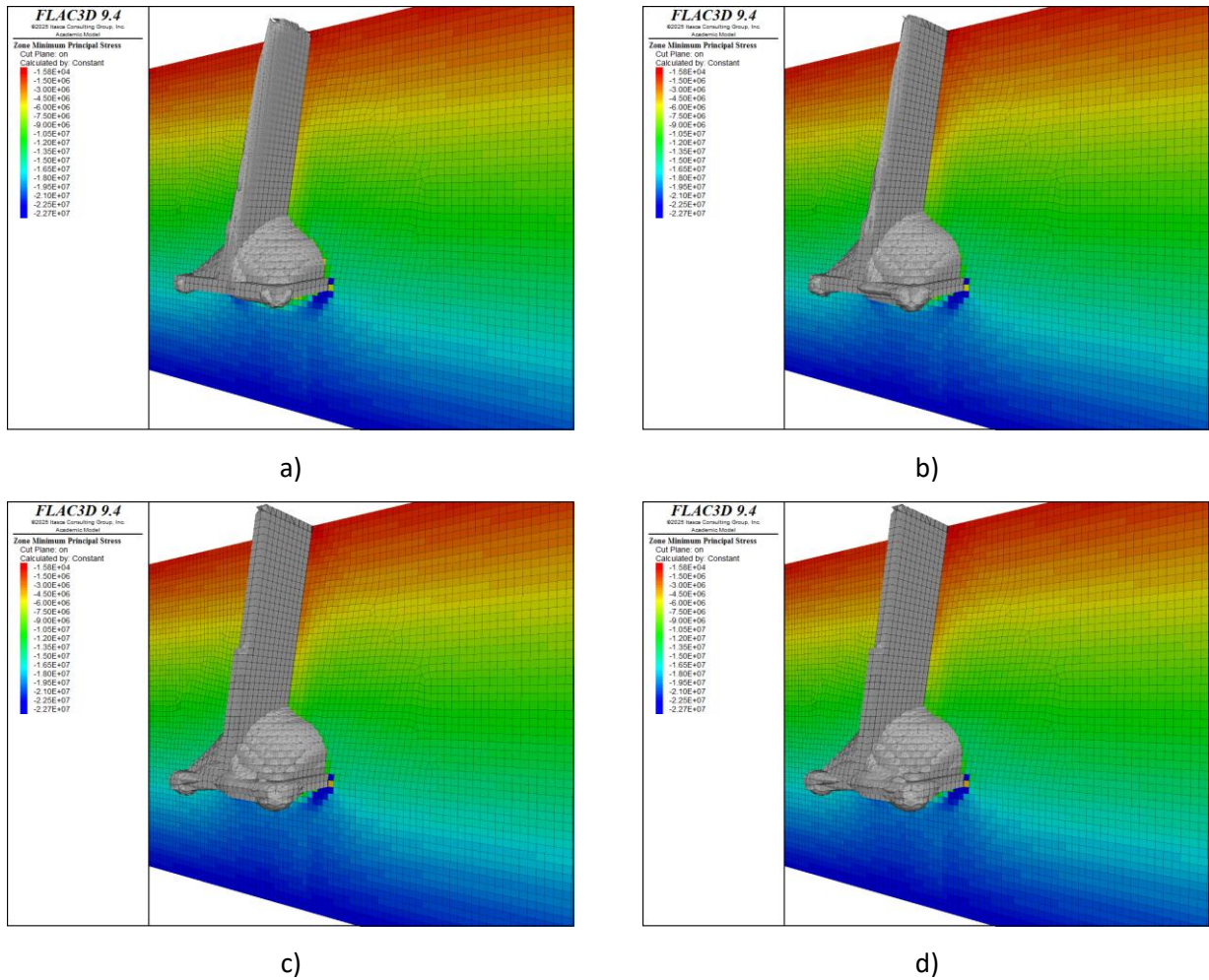


Figura 4.3: Caso 1. Estado del cave-back luego de: a) 2 meses de producción. b) 3 meses de producción. c) 8 meses de producción. d) 12 meses de producción.

Se puede notar en la figura anterior, los periodos posteriores al primer mes en donde se notó un cambio en la altura del cave-back, siendo estas variaciones hasta el tercer mes de producción. Se puede notar también que, al analizar tanto la figura anterior como la Figura 4.2, la propagación del *caving* en etapas tempranas de la producción muestra un rápido avance, sin embargo, a partir del segundo mes, esta velocidad cae drásticamente, deteniendo la propagación de este.

4.2 Caso 2

El segundo caso de estudio, similar al primero, corresponde a la misma configuración, pero esta vez con dos zonas de fracturamiento hidráulico con un manto de 80° con respecto a la horizontal en cada una de ellas, separadas 50 [m] entre sí.

Al comparar las velocidades de propagación entre todos los casos de estudio, se tiene que, esta configuración fue la más rápida de las 5, siendo también la única en lograr conectar con la topografía. Esto debido a que la cantidad de fracturas inducidas por el fracturamiento hidráulico fueron suficientes para lograr facilitar el hundimiento de tal forma que, logró conectar con la topografía luego de solo tres meses de producción.

La Figura 4.4 se presenta a continuación. Detalla la geometría del cave-back luego de 1 mes de producción, dividido semanalmente.

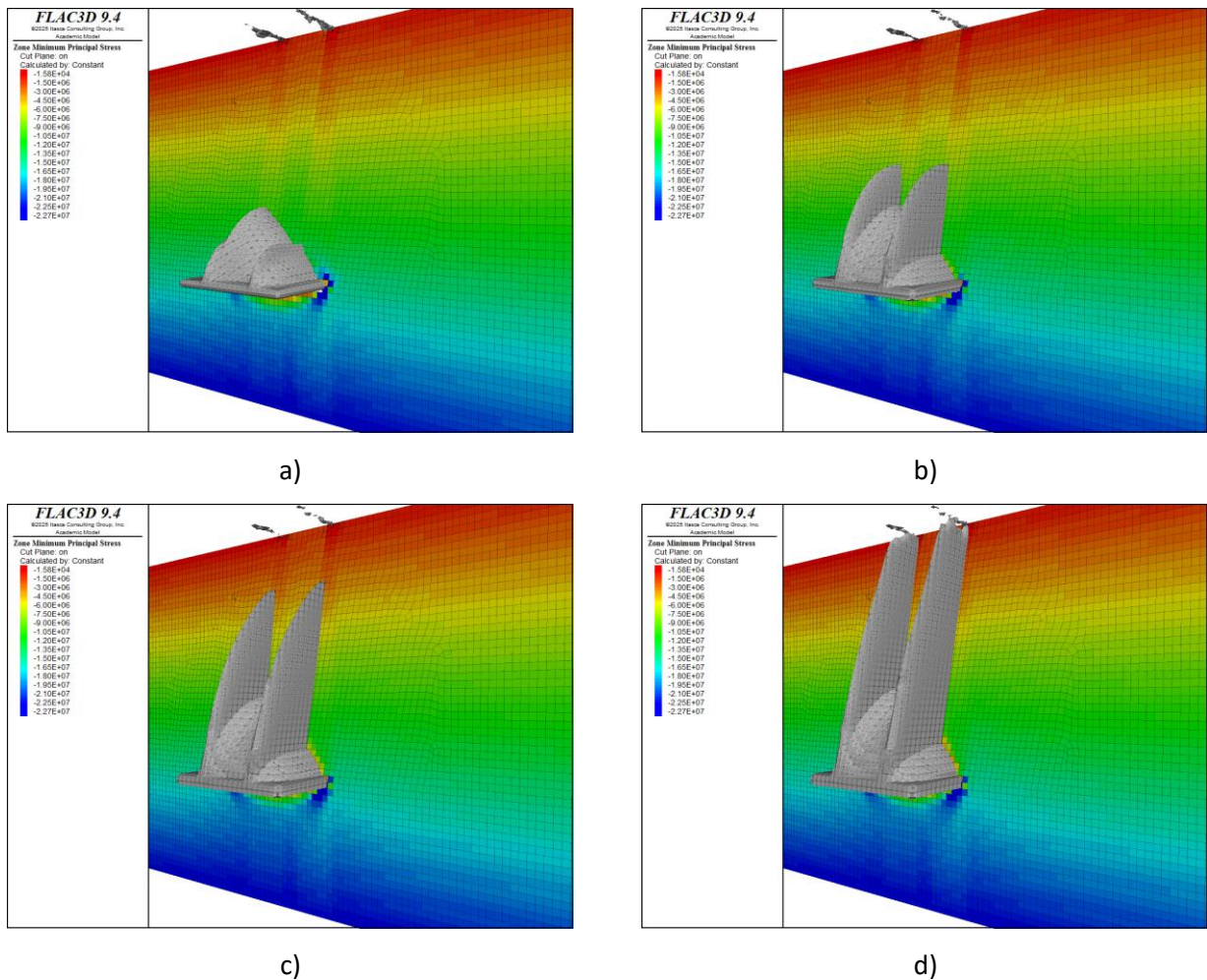


Figura 4.4. Caso 2. Primeras cuatro semanas de producción.

De forma similar al Caso 1, este se propaga muy rápidamente a través de las zonas preacondicionadas, debido a que, las fracturas presentes ayudan a la continuidad de este fenómeno. Se puede observar también que, a pesar del corto periodo de simulación, este ya muestra un mejor resultado en comparación al resto.

En la Figura 4.5 se puede ver la evolución del *cave-back* durante el periodo estudiado. Siguiendo la dirección de las zonas con fracturamiento hidráulico y aumentando rápidamente la propagación en los primeros 3 meses, alcanzando la topografía en ese tiempo.

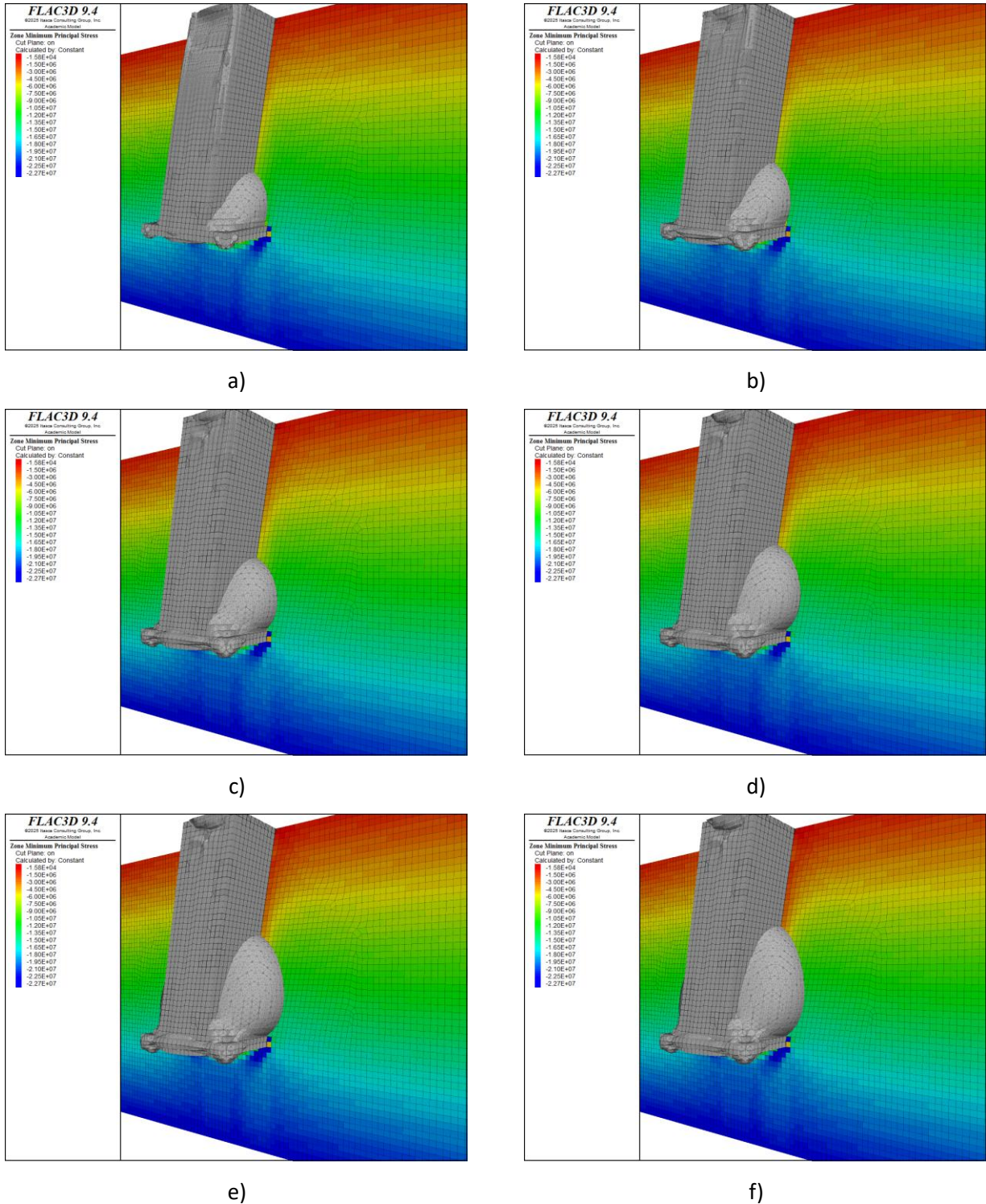


Figura 4.5: Caso 2. Estado del *cave-back* luego de: a) 2 meses de producción. b) 3 meses de producción. c) 5 meses de producción. d) 7 meses de producción. e) 9 meses de producción. f) 12 meses de producción.

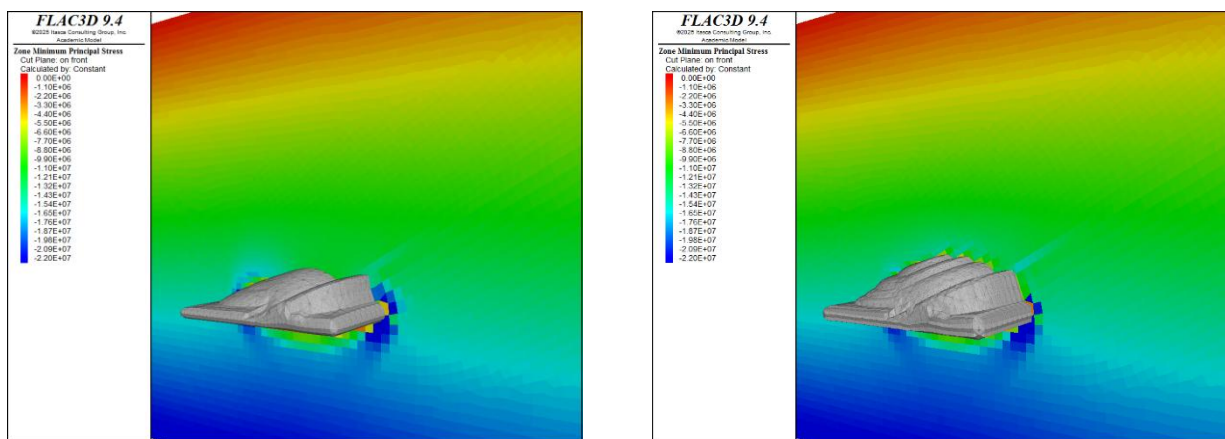
Este segundo caso mostró cambios en la altura del cave-back durante el inicio hasta el tercer mes de producción, colgándose luego de este último periodo. El estado del cave-back se muestra en la Figura 4.5. Luego, al analizarse junto a la Figura 4.4, ambas mostraron los cambios en el *caving* en dicho caso de estudio al término de cada periodo, propagándose en primera instancia sobre las zonas con preconditionamiento debido a tratarse de zonas con muchas juntas, facilitando este proceso. Luego, el *caving* se propaga entre ambas zonas preconditionadas, y, finalmente, una vez alcanzada la topografía este comienza a propagar por fuera de estas.

4.3 Caso 3

En el tercer caso de estudio se analizó el comportamiento del *caving* en una operación de Block Caving genérica, en la cual se usó fracturamiento hidráulico en el centro del UCL con un manto de 30° con respecto a la horizontal.

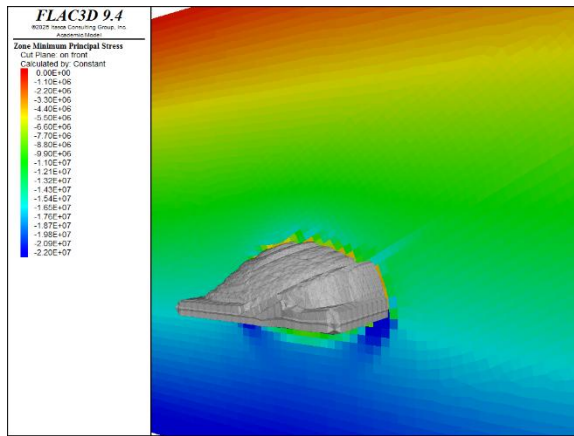
Ahora, en cuanto a velocidad de propagación del *caving*, este caso mostró el peor desempeño, alcanzando una altura de solo 310 [m] luego de 12 meses de producción. Este bajo resultado se atribuye a las condiciones geomecánicas de la roca, las cuales, al tratarse de una única zona con fracturamiento hidráulico, con un manto tan bajo, no es capaz de generar grietas suficientes que bajen la calidad del macizo y permitan una rápida propagación del hundimiento. Asimismo, el manto del preconditionamiento juega un papel fundamental a la hora de lograr la propagación del *caving*, ya que, al tener este un ángulo menor que el ángulo de reposo del material quebrado, este último tendrá dificultades para lograr un correcto flujo gravitacional.

La siguiente Figura muestra el estado del *cave-back* durante el primer mes de producción.

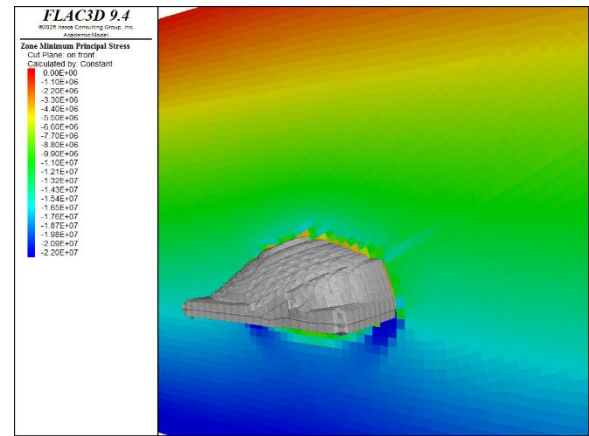


a)

b)



c)

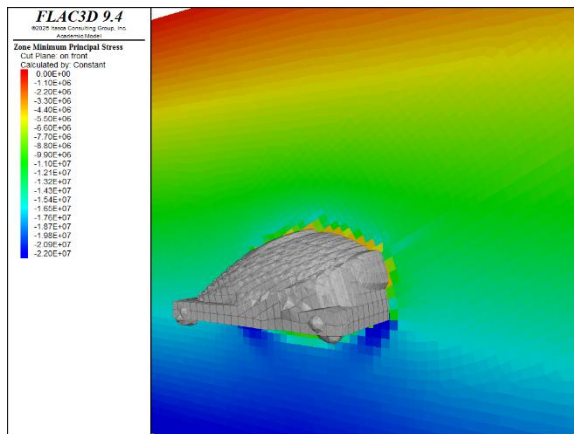


d)

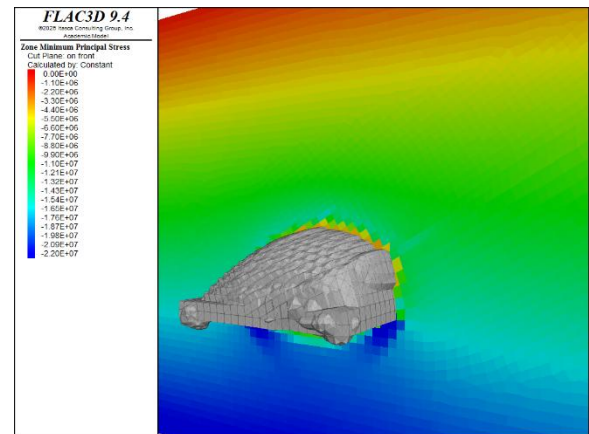
Figura 4.6. Caso 3. Cave-back semanal.

En la Figura anterior se puede ver claramente la baja velocidad de propagación del *caving*, debido a la baja variación en la geometría del *cave-back* luego del primer mes de producción.

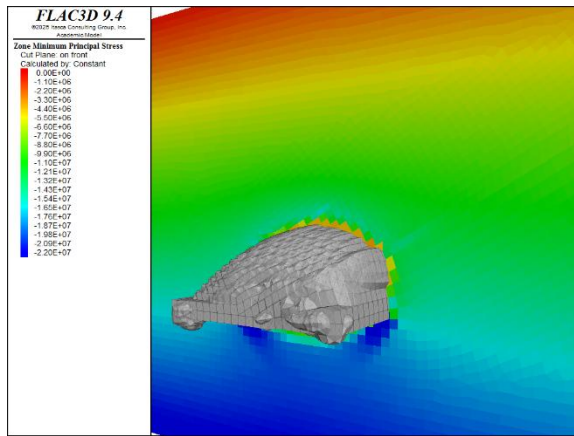
La Figura 4.7 muestra el estado del *cave-back* luego de 3 meses, 6 meses y 12 meses de producción. Se puede ver claramente la zona donde fue aplicado el precondicionamiento, y la baja velocidad de propagación del hundimiento.



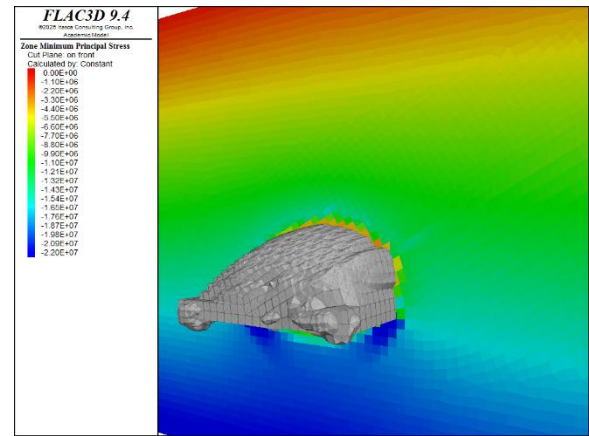
a)



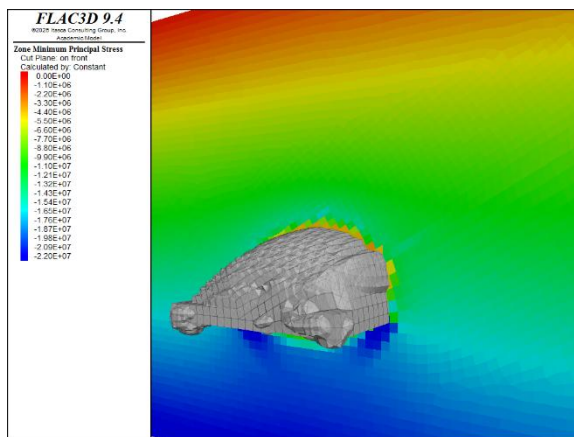
b)



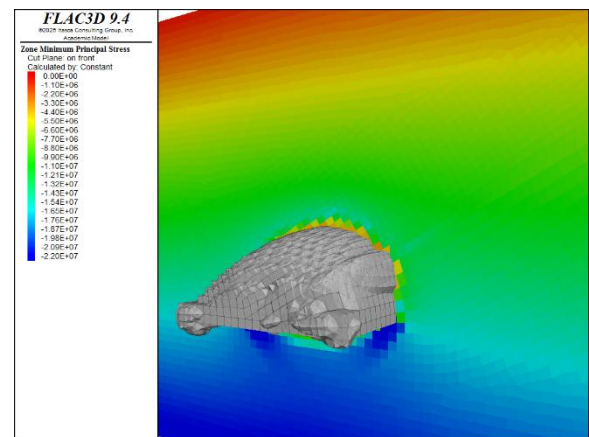
c)



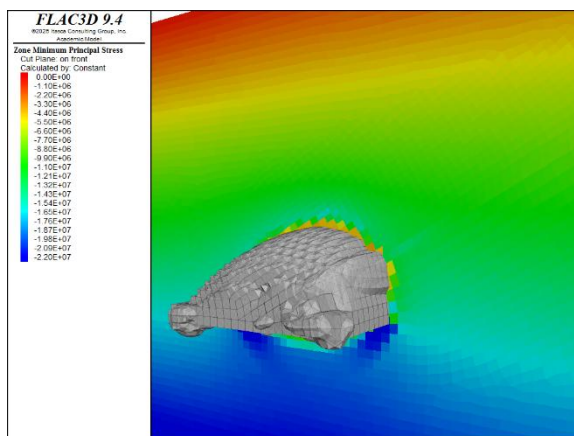
d)



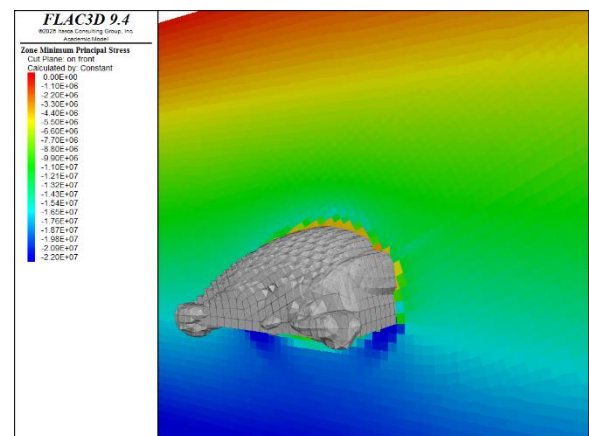
e)



f)



g)



h)

Figura 4.7: Caso 3. Estado del cave-back luego de: a) 2 meses de producción. b) 3 meses de producción. c) 4 meses de producción. d) 5 meses de producción. e) 6 meses de producción. f) 8 meses de producción. g) 10 meses de producción. h) 12 meses de producción.

En la Figura anterior se analizan todos los periodos del estudio en los cuales hubo un cambio en la altura del cave-back, comportamiento el cual fue notado desde el inicio de la operación hasta el mes 6. Sin embargo,

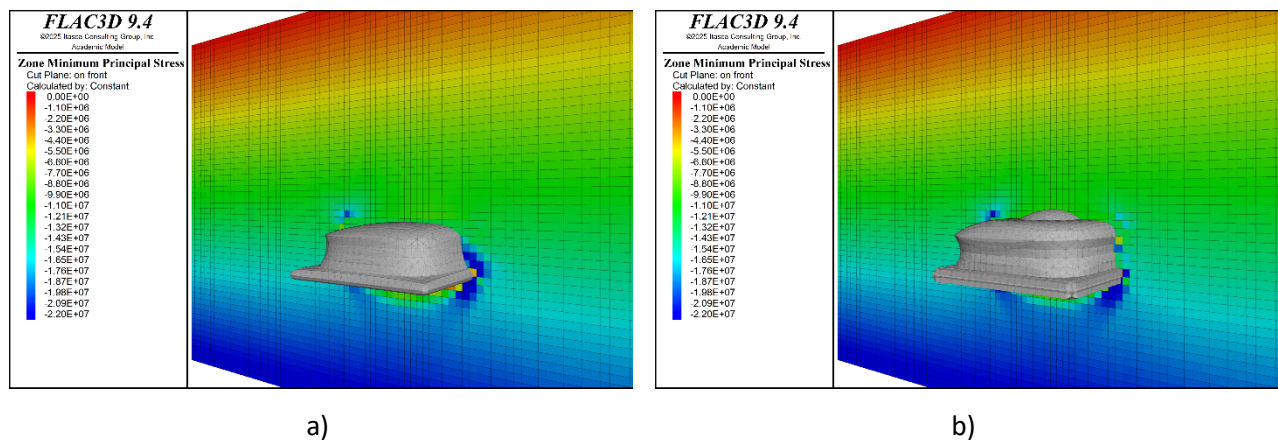
la velocidad a la cual se propagó el *caving* fue disminuyendo hasta este último periodo, en el cual se colgó y se detuvo.

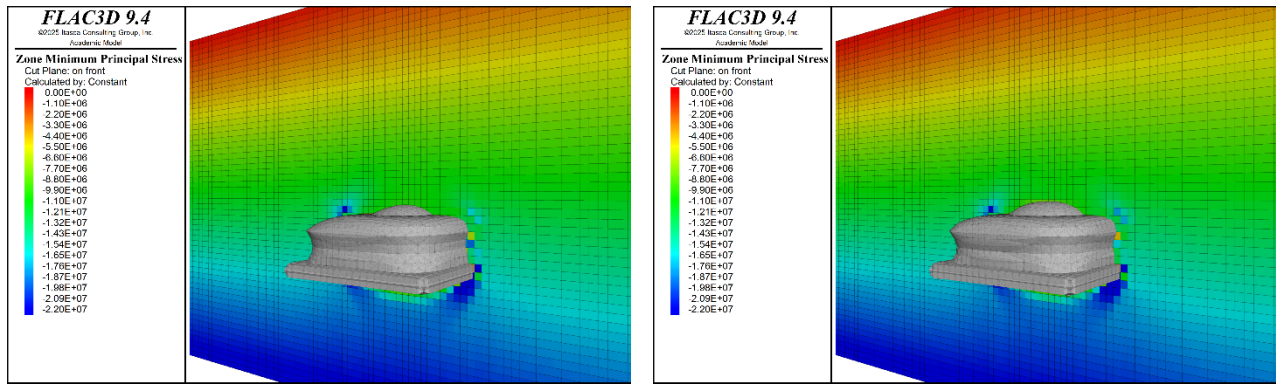
4.4 Caso 4

En el cuarto caso de estudio se analizó el efecto sobre el *caving* de una operación a la cual se le aplicó fracturamiento hidráulico de forma horizontal a una distancia de 20 [m] sobre el UCL.

En lo que respecta a la velocidad del hundimiento, este caso mostró un resultado intermedio en comparación a los otros, siendo mayor al Caso 3, pero menor al Caso 1. Por otra parte, este caso, junto al Caso 5, debido a la similitud entre ambos -cada uno con zonas de preconditionamiento horizontales, variando únicamente la cantidad de estas- presentaron una particularidad con respecto al *cave-back*, el cual aumentó de forma abrupta al conectar con la zona de preconditionamiento, incrementando así la velocidad a la cual se propaga el hundimiento.

La Figura 4.8 muestra el estado del *cave-back* durante el primer mes de producción, el cual fue dividido en sus cuatro semanas, de este modo, se puede obtener más información de la geometría de este en este periodo inicial.





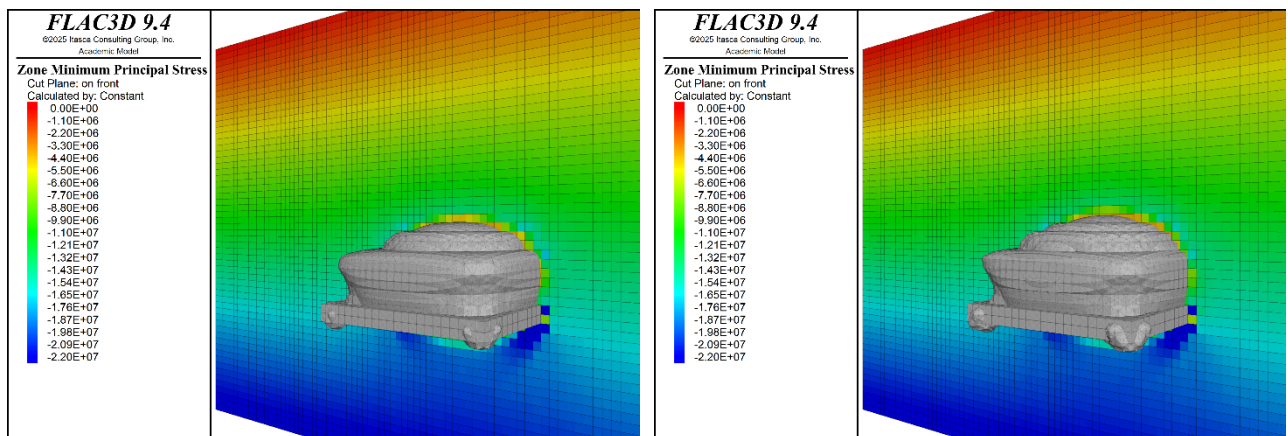
c)

d)

Figura 4.8. Caso 4. Estado del cave-back durante el primer mes de producción.

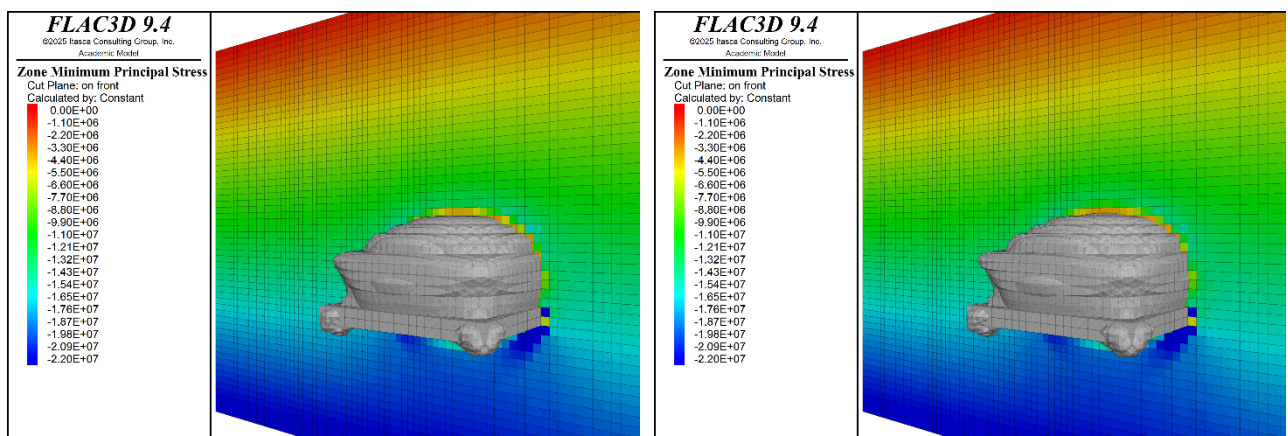
La Figura anterior muestra la rápida propagación del *caving* en este caso de estudio en las primeras fases de la producción, sin embargo, una vez alcanzada la zona a la cual se le aplicó fracturamiento hidráulico, la velocidad de propagación disminuye drásticamente, dificultando el proceso.

La Figura 4.9 muestra el proceso en las etapas tardías de producción.



a)

b)



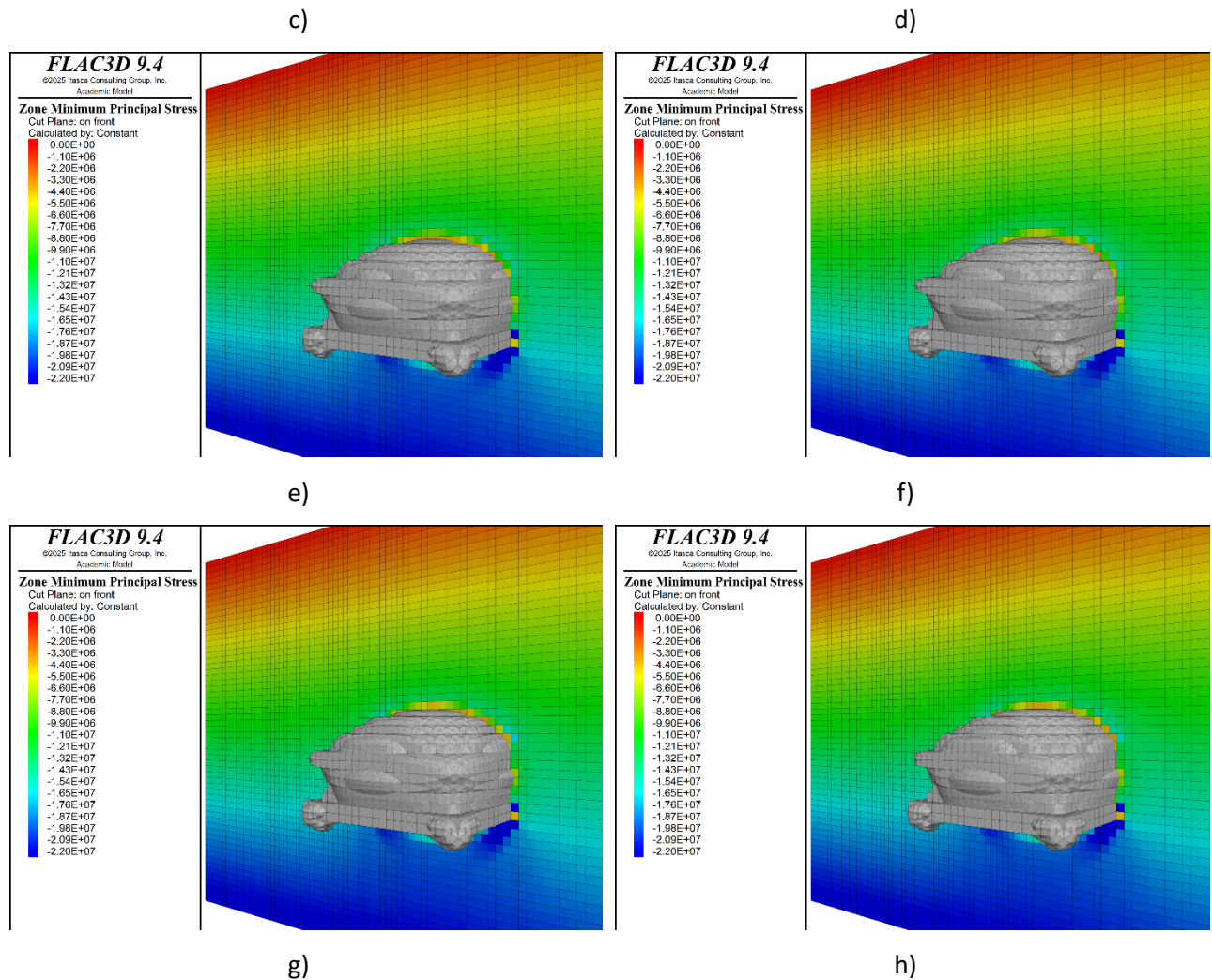


Figura 4.9: Caso 4. Estado del cave-back luego de: a) 2 meses de producción. b) 3 meses de producción. c) 4 meses de producción. d) 5 meses de producción. e) 6 meses de producción. f) 7 meses de producción. g) 9 meses de producción. h) 12 meses de producción.

Se puede ver de la Figura anterior que, luego del primer mes, se sigue manteniendo la baja velocidad de propagación una vez alcanzada la zona preconditionada, esto pudiendo notarse en el bajo aumento en la altura del cave-back con cada mes de producción.

4.5 Caso 5

Por último, en el quinto caso a estudiar, similar al caso 4, se aplicó fracturamiento hidráulico de forma horizontal sobre el UCL, aunque ahora fueron dos las zonas de preconditionamiento, separadas 50 [m] entre sí.

En cuanto al hundimiento, este mostró una velocidad muy acelerada producto de la distribución de las zonas de fracturamiento hidráulico, alcanzando una altura de 400 [m] luego de 12 meses de producción. Si bien, este caso mostró un comportamiento similar al del caso anterior, al contar con una zona extra, el hundimiento aumentó aún más respecto del caso antes nombrado.

La Figura 4.10 muestra la geometría del cave-back durante las primeras cuatro semanas de producción.

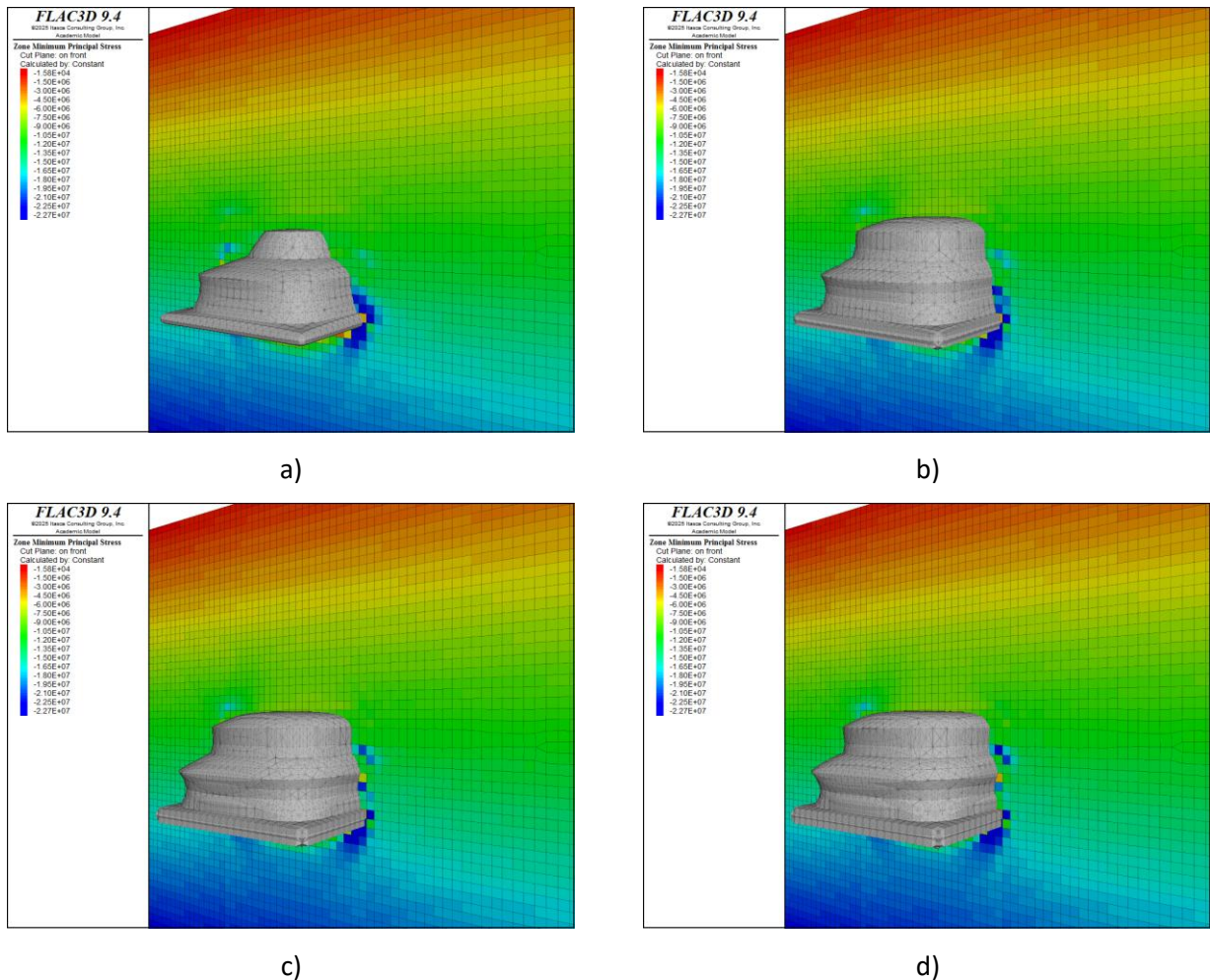
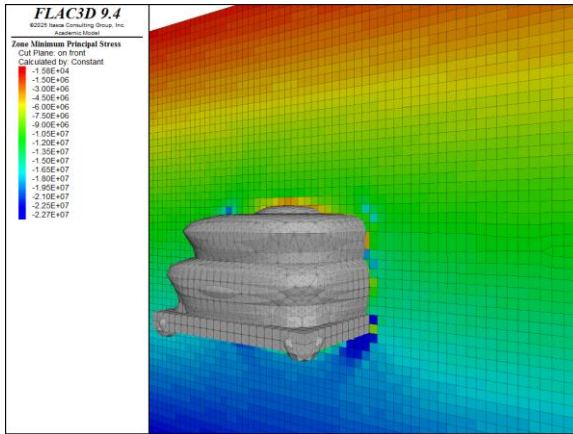


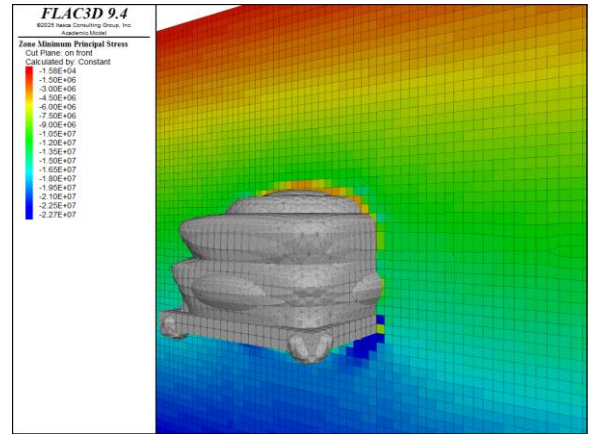
Figura 4.10. Caso 5. Estado del cave-back durante el primer mes de producción.

En la Figura 4.10 se puede observar como el cave-back conecta rápidamente con la primera zona donde se le aplica fracturamiento hidráulico y continua con esa velocidad luego de la cuarta semana, contrario al Caso 4, donde parecía haberse colgado luego de la segunda semana de producción.

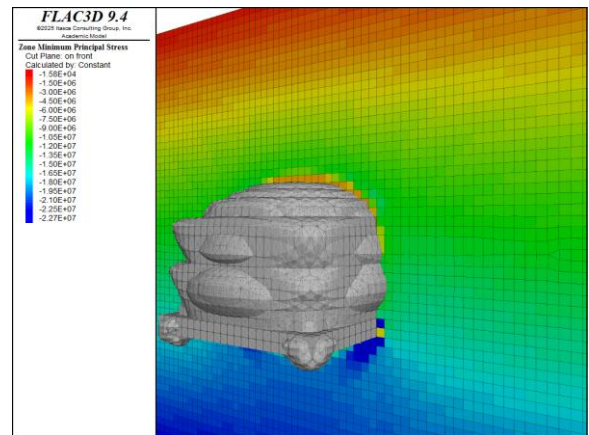
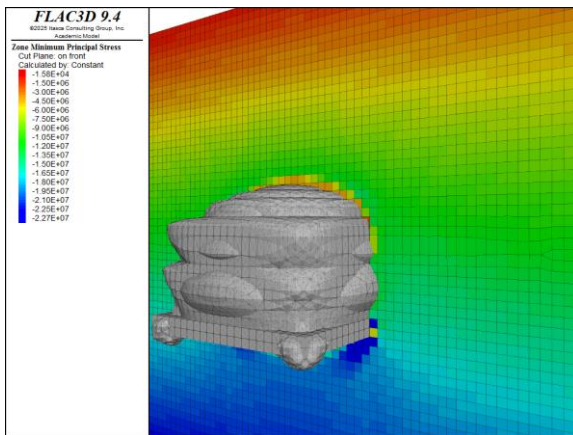
A continuación, la Figura 4.11 muestra la geometría del cave-back a lo largo del periodo de estudio.



a)



b)



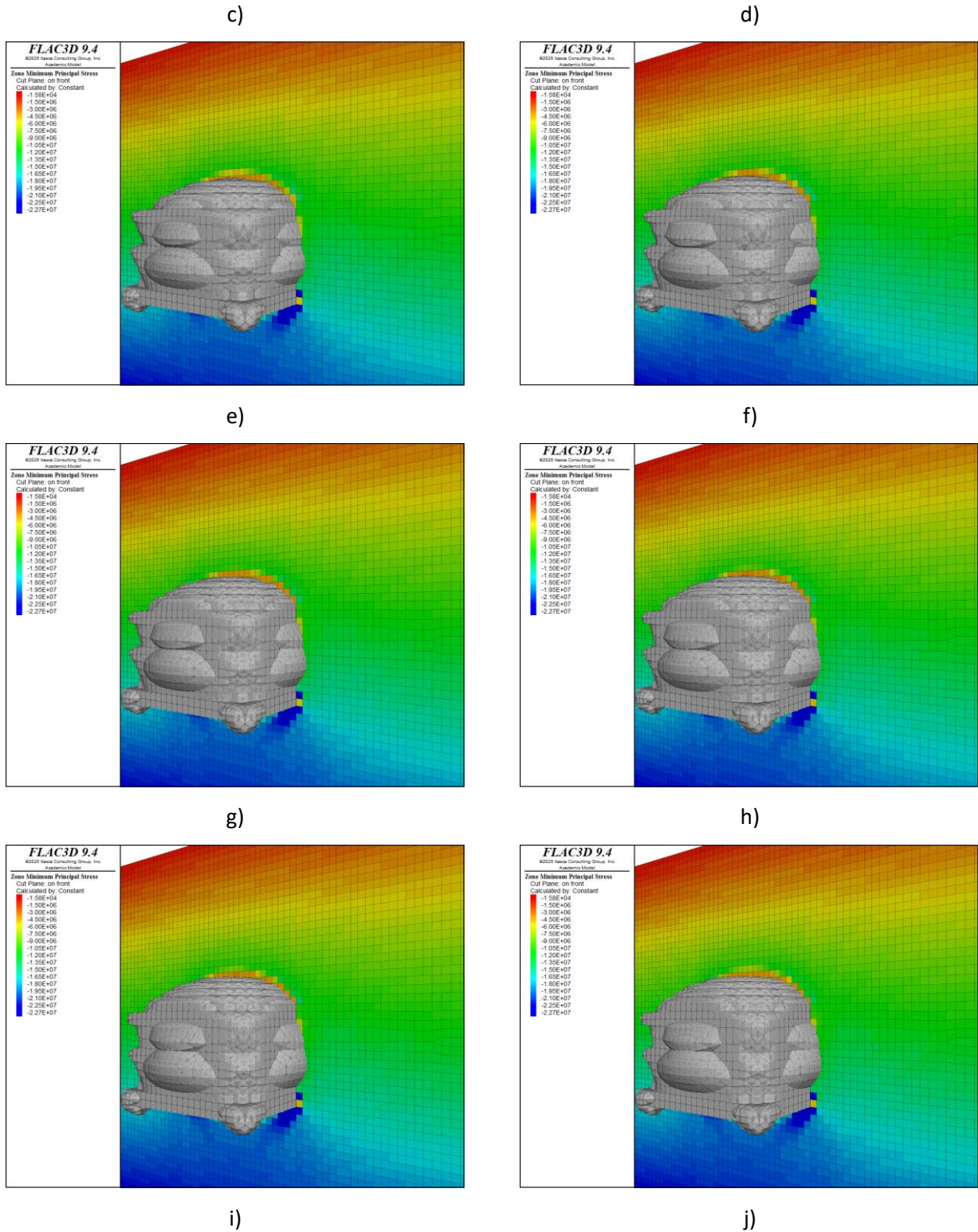


Figura 4.11: Caso 5. Estado del cave-back luego de: a) 2 meses de producción. b) 3 meses de producción. c) 4 meses de producción. d) 5 meses de producción. e) 6 meses de producción. f) 7 meses de producción. g) 8 meses de producción. h) 9 meses de producción. i) 10 meses de producción. j) 12 meses de producción.

A simple vista se puede ver que, el cave-back en este caso se comporta de forma similar al Caso 4. Este avanza rápidamente hacia las zonas que presentan fracturamiento hidráulico, facilitando el *caving*, sin embargo, una vez alcanzada la última zona preconditionada, este se cuelga y no continúa avanzando.

En cuanto a la velocidad de propagación, esta comenzó muy alta al inicio de la simulación, sin embargo, disminuyó rápidamente, mostrando una variación muy lenta luego del segundo mes, y una propagación casi nula luego del quinto periodo.

4.6 Análisis general de resultados

La Figura 4.12 muestra la altura del caveback de cada caso en cada periodo. Se puede observar la división en el primer mes de producción en los cinco casos de estudio, donde este fue dividido en cuatro semanas, y así, obtener un resultado más preciso durante este tiempo. Por otra parte, todos los casos comienzan con una altura base correspondiente a la cara superior del UCL, la cual está a 210 [m] respecto de la base del modelo.

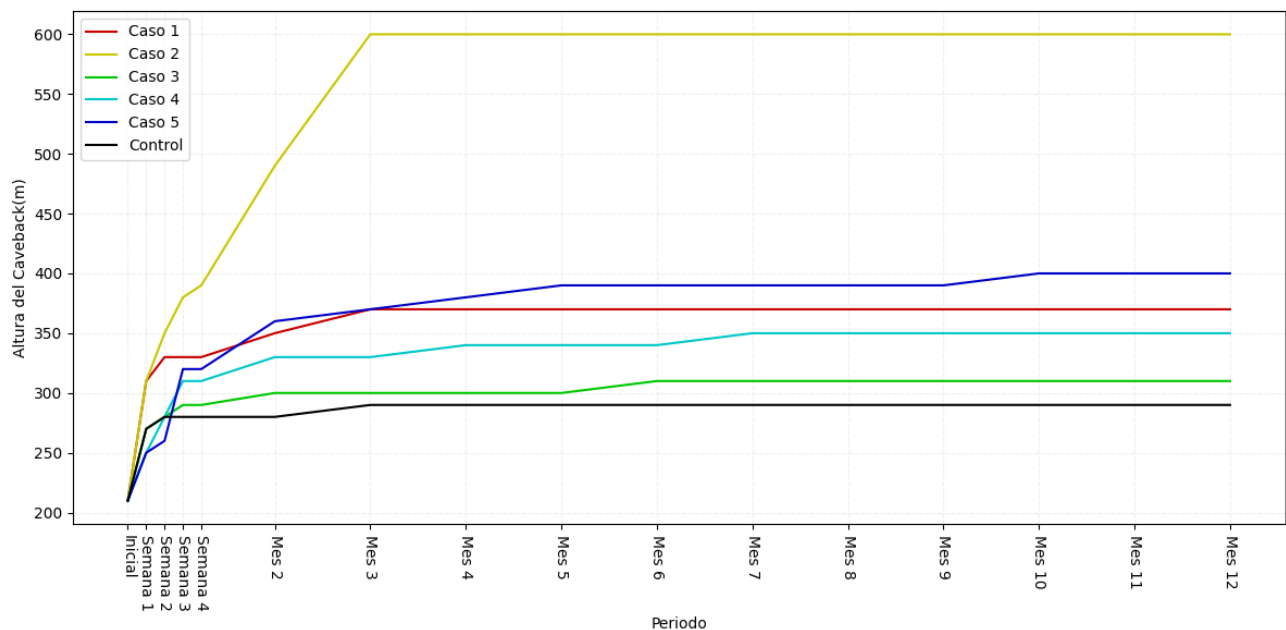


Figura 4.12: Gráfico Periodo vs. Altura del Caveback.

Se puede ver con facilidad el comportamiento del *caving* en cada uno de los casos de estudio, además de un caso de control, el cual se usó para tener un punto de comparación para los demás. En orden de la velocidad de propagación mayor a menor, el segundo caso de estudio fue el que se propagó más rápido, alcanzando la topografía al cabo de tres meses de producción, superando la altura de propagación los demás escenarios. Se

tienen luego tres casos intermedios, siendo estos en orden descendente en la velocidad de propagación, el caso 5 (dos zonas de PA horizontales), el caso 1 (una zona de PA con un manteo de 80°), y el caso 4 (una zona de PA horizontal). Finalmente, se tiene el caso 3 (una zona de PA con un manteo de 30°), el cual no logró propagar de buena forma el *caving*, aumentando solamente en 100 [m], desde $z = 210$ [m] hasta $z = 310$ [m].

5 Conclusiones

A partir de las simulaciones realizadas para los cinco casos de estudio, se determinó que el comportamiento del caving varía significativamente según las condiciones geométricas y geomecánicas impuestas. El caso 2 fue el único en el cual el hundimiento se propagó rápidamente, alcanzando la superficie después de tres meses de producción, evidenciando la fuerte influencia del preacondicionamiento aplicado.

Los resultados permiten concluir que tanto el fracturamiento hidráulico como el ángulo de fricción interna del material juegan un rol determinante en la velocidad y dirección de propagación del caving. En particular, los casos con dos zonas de preacondicionamiento mostraron una mayor velocidad de avance en comparación con sus contrapartes con una única zona fracturada.

Asimismo, el estado de esfuerzos inicial, definido mediante una razón de esfuerzos horizontales/verticales de 1.5, influye directamente en la orientación de las fracturas inducidas y, por ende, en la estabilidad de la operación en su totalidad.

Al comparar la altura final del caveback entre los casos estudiados, el caso 3 representa la condición más desfavorable. Esto se debe a la combinación de una única zona de preacondicionamiento y un manto menor al ángulo de fricción interna del material, lo que dificulta el desarrollo del caving y disminuye su propagación.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten afirmar que, en operaciones de Block Caving, la geometría y orientación de las discontinuidades —naturales o inducidas— condicionan fuertemente la eficiencia del proceso de hundimiento y, en consecuencia, la recuperación durante la etapa de producción.

6 Discusiones

Los resultados muestran comportamientos diferenciados entre los cinco casos de estudio, los cuales pueden explicarse por la combinación de tres factores principales: la extensión del fracturamiento hidráulico, el ángulo de fricción interna del material y el estado de esfuerzos regional.

a) Fracturamiento hidráulico: El preacondicionamiento busca reducir la resistencia de la roca y generar planos de debilidad que faciliten el avance del caving. A mayor fracturamiento, mayor velocidad de propagación. Esto se observa con claridad en los casos 2 y 5, donde dos zonas fracturadas producen un hundimiento más veloz que en los casos con una única zona (casos 1 y 4).

b) Ángulo de fricción interna: El comportamiento del macizo está altamente condicionado por la relación entre el manteo del plano fracturado y el ángulo de fricción interna del material. Cuando el manteo es menor que dicho ángulo, la fracturación presenta dificultades para quebrarse verticalmente, reduciendo la velocidad de hundimiento. Este efecto es especialmente notorio en el caso 3.

c) Estado de esfuerzos: La razón de esfuerzos definida ($\sigma_h = 1.5 \sigma_v$) influye en la orientación de las fracturas inducidas y, por ende, en la forma en que el caving se desarrolla. Las fracturas creadas actúan como zonas de debilidad y condicionan el crecimiento del caveback, como se observa en la propagación vertical antes de interceptar la zona fracturada en los casos 4 y 5.

Estos factores explican por qué los casos 1 y 2 presentan una propagación rápida, mientras que los casos 4 y 5 muestran un cambio brusco en la altura del caveback al interceptar la zona preacondicionada. Asimismo, justifican por qué el caso 3 se posiciona como el escenario más crítico, al combinar una fracturación insuficiente con una geometría desfavorable respecto al ángulo de fricción interna.

Finalmente, al considerar el paralelismo entre el fracturamiento hidráulico y el comportamiento mecánico de discontinuidades naturales, los resultados pueden extrapolarse a escenarios reales donde familias de joints, diaclasas o planos de estratificación condicionan la estabilidad del macizo. En particular, planos con manteos bajos favorecen la formación de cuñas y arcos compresivos, reduciendo la tasa de propagación del caving y afectando directamente la recuperación del mineral.

6.1 Recomendaciones

Al compilar los resultados del Caso número 3, una de las conclusiones a las que se llegó fue que, mediante un análisis físico, el ángulo de fricción interna fue un factor clave a la hora de predecir si ocurrirá o no la propagación del *caving*. Si bien, esto cuenta con un trasfondo físico y geotécnico, no se encontraba dentro de los límites del estudio, por lo que no se llevaron a cabo simulaciones numéricas que lo justifiquen. Es por esta razón que se recomienda, en un futuro, realizar simulaciones en las que, se tengan zonas de fracturas muy cercanas al ángulo de fricción interna del material. A modo de ejemplo, si se tiene un material con un ángulo de fricción interna de 60° , realizar simulaciones con una zona de PA con ángulos de $\pm 20^\circ$ respecto del ángulo mencionado anteriormente.

Por otra parte, se menciona el efecto de las discontinuidades creadas producto del fracturamiento hidráulico, las cuales, debido a limitaciones del estudio no se analizó si realmente tienen un efecto en la propagación del *caving*, por lo que se recomienda realizar distintas configuraciones de esfuerzos principales en el modelo y por ende, distintas orientaciones de los joints generados a partir del preacondicionamiento.

Referencias

- [1] “Banco Mundial – Desarrollo sostenible, resiliencia y crecimiento económico.” Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/ext/es/home>
- [2] “Consejo Minero.” Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://consejominero.cl/>
- [3] “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions – Analysis - IEA.” Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- [4] “Ministerio de Energía y Minas - MINEM - Plataforma del Estado Peruano.” Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/minem>
- [5] D. E. Nicholas, “Method selection - A numerical aproach,” Tucson, Arizona, 1981.
- [6] A. Azadeh, M. Osanloo, and M. Ataei, “A new approach to mining method selection based on modifying the Nicholas technique,” *Appl Soft Comput*, vol. 10, no. 4, pp. 1040–1061, Sep. 2010, doi: 10.1016/J.ASOC.2009.09.002.
- [7] “Eficiencia, seguridad y sostenibilidad bajo tierra | Rumbo Minero.” Accessed: Nov. 21, 2025. [Online]. Available: https://www.rumbominero.com/portada2/eficiencia-seguridad-y-sostenibilidad-bajo-tierra/?utm_source=chatgpt.com
- [8] “Tecnologías avanzadas en la minería subterránea.” Accessed: Nov. 21, 2025. [Online]. Available: https://www.repemex.com.mx/tecnologias-avanzadas-en-la-mineria-subterranea/?utm_source=chatgpt.com
- [9] S. Xavier Valencia Morales, “Metodología de análisis de la confiabilidad de planes de desarrollo y preparación minera subterránea en corto plazo basado en simulación,” 2022.
- [10] S. Melati *et al.*, “Block Caving Mining Method: Transformation and Its Potency in Indonesia,” *Energies* 2023, Vol. 16, Page 9, vol. 16, no. 1, p. 9, Dec. 2022, doi: 10.3390/EN16010009.
- [11] P. A. Dowd, “Mining technology,” *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, vol. 123, no. 3, p. 119, Sep. 2014.
- [12] J. Wang, D. B. Apel, Y. Pu, R. Hall, C. Wei, and M. Sepehri, “Numerical modeling for rockbursts: A state-of-the-art review,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 457–478, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.JRMGE.2020.09.011.

- [13] “Experimental and Numerical Modelling Research into Coal Mine Gas Outbursts and Rock Bursts | France - Itasca Consultants S.A.S. EN.” Accessed: Nov. 21, 2025. [Online]. Available: https://www.itasca.fr/en/software/experimental-and-numerical-modelling-research-into-coal-mine-gas-outbursts-and-rock-bursts?utm_source=chatgpt.com
- [14] E. Folgoso Lozano, “Introduction to the Simplified Caving Predicting Tool SCPT,” *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 2023 168:6, vol. 168, no. 6, pp. 294–298, Jun. 2023, doi: 10.1007/S00501-023-01359-Y.
- [15] Y. Hebert and G. Sharrock, “Three-dimensional simulation of cave initiation, propagation and surface subsidence using a coupled finite difference–cellular automata solution,” Australian Centre for Geomechanics, 2018, pp. 151–166. doi: 10.36487/acg_rep/1815_09_hebert.
- [16] H. Wagner, “Deep Mining: A Rock Engineering Challenge,” *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2019 52:5, vol. 52, no. 5, pp. 1417–1446, Apr. 2019, doi: 10.1007/S00603-019-01799-4.
- [17] V. Marinos, P. Marinos, and E. Hoek, “The geological strength index: applications and limitations,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 2005 64:1, vol. 64, no. 1, pp. 55–65, Feb. 2005, doi: 10.1007/S10064-004-0270-5.
- [18] D. Laubscher, “A practical manual on block caving,” Oct. 2000.
- [19] E. T. Brown and J. Kruttschnitt, “Block caving geomechanics,” 2002.
- [20] L. Felipe, O. Espinoza, and M. M. Muñoz, “Evaluación de automatización de operaciones unitarias en minería subterránea,” 2020, Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174493>
- [21] P. F. Cayo Vargas, “Metodologías de agendamiento óptimo en labores de preparación minera de Panel Caving para horizonte de mediano plazo a través de modelamiento en UDESS,” 2021, Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184224>
- [22] G. F. Gambino, J. P. Harrison, and A. Bedi, “Parameter characterisation for rock mass preconditioning using hydraulic fracturing,” *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses*, pp. 695–700, May 2014, doi: 10.1201/B16955-119.
- [23] V. Sedláč, “Energy evaluation of de-stress blasting.” Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/26401840_Energy_evaluation_of_de-stress_blasting

- [24] R. Gómez and E. Labbé, "Una opción para el paso a la minería subterránea masiva: la actual metodología aplicada en Chile del 'block caving,'" *Boletín Geológico y Minero*, vol. 130, pp. 181–198, 2019, doi: 10.21701/bolgeomin.130.1.011.
- [25] B. H. G. Brady and E. T. Brown, "Rock Mechanics For Underground Mining," Jan. 2006. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/49184303>
- [26] M. K. Larson and T. Lavoie, "Calibrating a caving model for sedimentary deposits - Estimation of load distribution between gob and abutment," Jun. 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/305807799>
- [27] "IMASS | Chile - Itasca Chile SpA EN." Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.itasca.cl/en/software/imass>
- [28] J. A. Canales Hernández, "Análisis experimental de esfuerzos inducidos por flujo gravitacional en minería de Block/Panel Caving," 2016, Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/138558>
- [29] J. A. Castillo and E. A. Villegas, "Optimización de planes mineros en minas explotadas por Panel Caving incluyendo actividades de preparación minera," 2018, Accessed: Nov. 16, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/159413>
- [30] Y. Ferreira, "Estado del arte del preacondicionamiento en la explotación minera subterránea," Santiago, 2019.
- [31] I. D. Gottreux Vollet, "Pre acondicionamiento con el uso de debilitamiento dinámico con explosivos en minería por caving," Oct. 2016, doi: 10.7764/TESISUC/ING/16843.
- [32] J. Sougarret, L. Quiñones, R. Morales, and R. Apablaza, "New vision in caving mining in Andina Division, Codelco Chile," 2004.
- [33] A. Catalan, I. Onederra, and G. Chitombo, "Evaluation of intensive preconditioning in block and panel caving—Part I, quantifying the effect on intact rock," *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, vol. 126, no. 4, pp. 209–220, Oct. 2017, doi: 10.1080/14749009.2017.1300724.
- [34] A. P. Fraser-Harris *et al.*, "Experimental Investigation of Hydraulic Fracturing and Stress Sensitivity of Fracture Permeability Under Changing Polyaxial Stress Conditions," *J Geophys Res Solid Earth*, vol. 125, no. 12, p. e2020JB020044, Dec. 2020.

- [35] O. Kolawole and I. Ispas, "Interaction between hydraulic fractures and natural fractures: current status and prospective directions," *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 2019 10:4, vol. 10, no. 4, pp. 1613–1634, Sep. 2019, doi: 10.1007/S13202-019-00778-3.
- [36] R. Heidari Moghaddam and A. Golshani, "Experimental study on fracture propagation in anisotropy rock under cyclic hydraulic fracturing," *Eng Fract Mech*, vol. 295, p. 109775, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.ENGFRACMECH.2023.109775.
- [37] R. Gómez, "Preacondicionamiento Del Macizo Rocos. Resumen desarrollo tecnológico del preacondicionamiento - Codelco 1999-2010." Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/398248264/Cap-3-Preacondicionamiento-del-Macizo-Rocos-pdf>
- [38] T. Zvarivadza, C. Yi, S. Dineva, M. Onifade, M. Khandelwal, and B. Genc, "Reflections on destress blasting for deep level hardrock mining: Key considerations for successful application of the techniques," *J South Afr Inst Min Metall*, vol. 125, no. 6, pp. 317–338, 2025, doi: 10.17159/2411-9717/3686/2025.
- [39] Z. Millán, L. De, L. A. Torre, L. Oliva, and D. C. Berenguer, "Simulación numérica. Ecuación de difusión," *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, vol. 15, no. 2, pp. 29–38, 2011, Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: <https://revistas.uned.es/index.php/RIBIM/article/view/42561>
- [40] O. C. Zienkiewicz, "The Finite Element Method Fifth edition Volume 1: The Basis," 2000.
- [41] A. Lisjak and G. Grasselli, "A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 301–314, Aug. 2014, doi: 10.1016/J.JRMGE.2013.12.007.
- [42] "El método de volúmenes finitos." Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.esss.com/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>
- [43] "Método de los elementos discretos: ¿qué es?" Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: <https://kotengenharia.com.br/es/metodo-dos-elementos-discretos-o-que-e/>
- [44] R. Castro, L. Arancibia, D. Guzman, and J. Henriquez, "Experiments and simulation of gravity flow in block caving through FlowSim," *Caving 2018: Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving*, 2018 15-17 October, Vancouver, pp. 313–322, Oct. 2018, doi: 10.36487/ACG_REP/1815_21_CASTRO.

- [45] J. Pino, “Análisis de esfuerzos en caserones inclinados mediante modelamiento numérico tridimensional,” Jul. 2021.
- [46] J. R. Shewchuk, “Tetrahedral Mesh Generation by Delaunay Refinement,” 1970.
- [47] R. González, “Desarrollo de FlowSim 3.0: simulador de flujo gravitacional para minería de Block/Panel Caving,” 2014, Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/132302>
- [48] S. Li, Z. Zhao, B. Hu, T. Yin, G. Chen, and G. Chen, “Three-Dimensional Simulation Stability Analysis of Slopes from Underground to Open-Pit Mining,” *Minerals* 2023, Vol. 13, Page 402, vol. 13, no. 3, p. 402, Mar. 2023, doi: 10.3390/MIN13030402.
- [49] A. B. Avanessian, “Numerical Modeling of Pillar Performance in Room and Pillar Mining in Very Weak Sandstone,” Jul. 2018.
- [50] M. Fuenzalida, M. Pierce, and T. Katsaga, “REBOP–FLAC3D hybrid approach to cave modelling,” Australian Centre for Geomechanics, 2018, pp. 297–312. doi: 10.36487/acg_rep/1815_20_pierce.
- [51] J. R. Shewchuk, “Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation,” *Computational Geometry*, vol. 22, no. 1–3, pp. 21–74, May 2002, doi: 10.1016/S0925-7721(01)00047-5.
- [52] “FLAC3D 7.0 Geometry Mesh Tutorial | Sweden - Itasca Consultants AB EN.” Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.itasca.se/en/learning/tutorials/flag3d-7-0-geometry-mesh-tutorial>
- [53] H. R. Hiester, M. D. Piggott, P. E. Farrell, and P. A. Allison, “Assessment of spurious mixing in adaptive mesh simulations of the two-dimensional lock-exchange,” *Ocean Model (Oxf)*, vol. 73, pp. 30–44, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.OCEMOD.2013.10.003.
- [54] “Hybrid Mesh – Pro-Simulation.” Accessed: Nov. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.pro-simulation.it/en/technology/hybrid-mesh/>
- [55] “Rhino - Features.” Accessed: Nov. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.rhino3d.com/features/>
- [56] “What does NURBS mean and why should I care?” Accessed: Nov. 21, 2025. [Online]. Available: <https://wiki.mcneel.com/rhino/nurbs>
- [57] “Griddle | US Minneapolis - Itasca Consulting Group, Inc.” Accessed: Nov. 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.itscag.com/software/griddle>

- [58] "CAD-Based Meshing Capabilities | Itasca International." Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.itascainternational.com/software/cad-based-meshing-capabilities>
- [59] "What is Griddle? - Itasca Software." Accessed: Nov. 17, 2025. [Online]. Available: <https://itascasoftware.com/resources/what-is-griddle/>
- [60] R. Castro, D. Oyarzo, R. Gómez, K. Suzuki, and M. Cifuentes, "Coupling Geomechanical and Gravity Flow Models to Obtain More Representative Flow Simulations and Air-Gap Risk Identification in Caving Mining," *Int J Numer Anal Methods Geomech*, vol. 49, no. 1, Oct. 2024, doi: 10.1002/nag.3880.
- [61] B.-A. Sainsbury, "A model for cave propagation and subsidence assessment in jointed rock masses," Aug. 2012.
- [62] B. L. Sainsbury and D. P. Sainsbury, "Practical Use of the Ubiquitous-Joint Constitutive Model for the Simulation of Anisotropic Rock Masses," *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2017 50:6, vol. 50, no. 6, pp. 1507–1528, Feb. 2017, doi: 10.1007/S00603-017-1177-3.
- [63] M. Sjölander, L. Jonsson, B. Figueiredo, J. Sjöberg, and F. Ersholm, "Analysis of caving and ground deformations in Malmberget using a coupled CAVESIM-FLAC3D model," Australian Centre for Geomechanics, 2022, pp. 781–796. doi: 10.36487/acg_repo/2205_53.
- [64] M. Zoback, "Reservoir Geomechanics," 2010.

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

Título: Simulación numérica de propagación de caving en FLAC3D tras Fracturamiento Hidráulico.		
Nombre Memorista: CRISTOBAL ANDRÉS QUIROZ VARGAS		
Modalidad	Proyecto	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	EXCELENTE	 Prof. René E. Gómez P.
Calificación	6.8	
Fecha	05/12/2025	
 Prof. Ramón Díaz N.		Ingeniero Supervisor:
		Institución: Universidad de Concepción
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Roberto Gómez Espina		
Resumen		
Debido al agotamiento de los recursos superficiales, la minería subterránea se vuelve cada vez más común. Esto trae consigo nuevos desafíos geomecánicos, tales como los cambios en los esfuerzos a los que está sometida la roca, cambios en la operatividad de la mina, o bien, cambios en la mineralogía presente. Dichos cambios en la roca se hacen muy notables cuando se llega a una cota muy baja con respecto a la topografía, pudiendo encontrar una roca de una dureza muy superior en comparación con la roca más superficial. Este fenómeno dificulta la extracción mediante el método de Block/Panel Caving, debido a la forma en la que funciona el mismo, dependiendo de la gravedad y del desconfinamiento de la roca para permitir que esta fluya a través de los puntos de extracción; lo que se ve dificultado cuando se trata de una roca de muy buena calidad geotécnica. Es esta la razón por la que se vuelve común el uso del preacondicionamiento de la roca. El fracturamiento hidráulico (FH) es un método de preacondicionamiento del macizo rocoso, el cual consiste en inyectar agua a través de perforaciones, a una presión tal que logre fracturar la roca. De este modo, se obtendrá una roca de menor calidad, la cual facilitará el hundimiento de esta durante la operación. La presente investigación busca simular el comportamiento del cave-back tras la aplicación de fracturamiento hidráulico con un ángulo o manto con respecto a la horizontal, con el fin de predecir el comportamiento de este en		