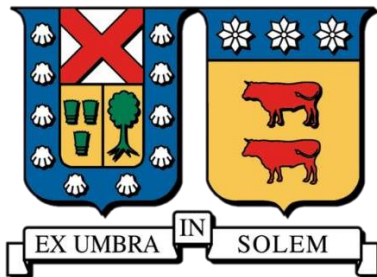


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



EFFECTO DEL ÁNGULO DE EXTRACCIÓN SOBRE EL ESFUERZO PRINCIPAL MAYOR EN MINERÍA DE PANEL CAVING.

ADRIAN ANDRES NECUL HUICHULEF

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesora Guía:

Dra. Adeline Delonca

MARZO 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: __Efecto del ángulo de extracción sobre el esfuerzo principal mayor en minería de Panel Caving.__

Nombre del candidato(a): __Adrian Andres Necul Huichulef.____

Carrera / Grado: __Ingeniería Civil en Minas____

Campus: _____ San Joaquín _____ Departamento: _____ Minas, Metalurgia y Materiales _____

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, _____ Adeline Delonca _____, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: _____ 17-03-2026 _____ Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: _____ 17-03-2026 _____ Firma: _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



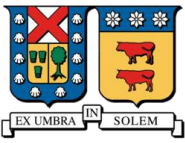
RESUMEN

El control de los esfuerzos inducidos en minería subterránea es un aspecto fundamental para garantizar la estabilidad de las excavaciones y la seguridad operacional. En métodos de explotación por hundimiento, como el panel caving, la geometría del proceso de extracción puede modificar significativamente la redistribución de esfuerzos en el macizo rocoso. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la influencia del ángulo de extracción sobre el esfuerzo principal mayor durante el desarrollo del hundimiento.

Para ello, se desarrolló un modelo numérico bidimensional mediante el software RS2 de Rocscience, representando un sistema de panel caving en distintas etapas de apertura de bateas. El análisis consideró diferentes ángulos de extracción (20° , 30° , 40° y 50°) y evaluó su comportamiento bajo distintos escenarios geomecánicos, variando parámetros relevantes del macizo rocoso tales como el GSI y la razón de esfuerzos in situ K . Los resultados fueron analizados en tres niveles representativos del sistema: nivel de hundimiento, nivel de producción y nivel sobre pila.

Los resultados muestran que el avance del proceso de extracción produce un incremento progresivo del esfuerzo principal mayor en los niveles de hundimiento y producción, mientras que el nivel sobre pila presenta una tendencia general a la disminución del esfuerzo. Asimismo, se observa que ángulos de extracción menores tienden a generar mayores concentraciones de esfuerzo en el nivel de hundimiento, mientras que ángulos mayores pueden trasladar parte de estas concentraciones hacia el nivel de producción. Adicionalmente, los resultados evidencian que valores menores de K generan mayores esfuerzos inducidos, mientras que macizos rocosos con mayores valores de GSI presentan también mayores magnitudes de esfuerzo, debido a su mayor capacidad de transmitir cargas dentro del sistema.

En conjunto, el estudio demuestra que la geometría de extracción y las condiciones geomecánicas del macizo rocoso influyen directamente en la redistribución de esfuerzos durante el panel caving, destacando la importancia de considerar estos parámetros en el diseño y planificación de operaciones subterráneas.



ABSTRACT

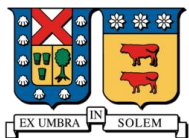
The control of induced stresses in underground mining is a fundamental aspect to ensure excavation stability and operational safety. In caving mining methods, such as panel caving, the geometry of the extraction process can significantly modify the stress redistribution within the rock mass. In this context, the objective of this study is to analyze the influence of the extraction angle on the major principal stress during the development of the caving process.

To achieve this, a two-dimensional numerical model was developed using the RS2 software from Rocscience, representing a panel caving system at different stages of drawpoint opening. The analysis considered different extraction angles (20° , 30° , 40° , and 50°) and evaluated their behavior under different geomechanical scenarios, varying relevant rock mass parameters such as the Geological Strength Index (GSI) and the in situ stress ratio K . The results were analyzed at three representative levels of the system: the undercut level, the production level, and the overlying rock mass level.

The results show that the progression of the extraction process produces a progressive increase in the major principal stress at the undercut and production levels, while the overlying level presents a general decreasing trend in stress. Additionally, smaller extraction angles tend to generate higher stress concentrations at the undercut level, whereas larger angles may transfer part of these stress concentrations to the production level.

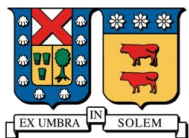
Furthermore, the results indicate that lower values of K generate higher induced stresses, while rock masses with higher GSI values also exhibit greater stress magnitudes due to their higher capacity to transmit loads within the system.

Overall, the study demonstrates that both the extraction geometry and the geomechanical conditions of the rock mass directly influence stress redistribution during panel caving, highlighting the importance of considering these parameters in the design and planning of underground mining operations.



Lista de Contenidos

1	INTRODUCCIÓN	10
1.1	Antecedentes generales	10
1.2	Objetivos	12
2	MARCO TEÓRICO	13
2.1	Ángulo de extracción	13
2.2	Esfuerzos	16
2.3	Tipos de esfuerzo en minería	17
2.4	Criterios de Falla	20
2.5	GSI Residual	22
2.6	Software RS2	22
3	METODOLOGÍA	25
3.1	Recopilación de Información	25
3.2	Elaboración de Modelos	28
3.3	Definición de Parámetros	31
3.4	Configuración Software RS2	32
3.5	Simulaciones e Interpretación	34
3.6	Extracción de Datos	36
3.7	Resultados y Análisis	36
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	37
4.1	Variación Ángulo de Extracción Caso Base	39
4.2	Variación Ángulo de Extracción para $K=1.5$	42
4.3	Variación Ángulo de Extracción $K=1$	46
4.4	Variación de K	49
4.5	Variación Ángulo de Extracción Calidad de Roca Buena	51
4.6	Variación Ángulo de Extracción Calida de Roca Mala	54
4.7	Variación GSI	57
5	DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN	59
5.1	Influencia Ángulo de Extracción	59
5.2	Influencia Condiciones de Esfuerzos Iniciales (K)	59
5.3	Influencia GSI	60
5.4	Discusión y Conclusión General	60
6	ANEXOS	61
A.	Anexos A: Tabulación de Parámetros	61



B.	Anexos B: Tabla de Resultados	62
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

Lista de Figuras

Figure 1:	Parámetro y variables Simplificadas de un Punto de Extracción (Contreras & Cornejo 2016).	14
Figura 2:	Superficie de la cavidad y zona de generación sísmica en un régimen de panel caving (Landeros, Cuellos y Rojas, 2012).....	15
Figura 3:	Esquema conceptual del ángulo de extracción (Contreras & Cornejo, 2016).....	15
Figura 4:	Componentes del tensores de esfuerzos en tres dimensiones (Imagen extraída de Galarce 2014)	17
Figura 5:	Distancia mínima de los bordes para un túnel.	23
Figure 6:	Simbología para condiciones de borde.....	24
Figure 7:	Secuencia Metodológica.	25
Figura 8 :	Corte A-A Nivel Esmeralda.....	27
Figura 9:	Corte B-B Nivel Esmeralda.....	28
Figure 10:	Dominio de Modelos.	29
Figura 11:	Geometría de Bateas.....	29
Figura 12:	Ángulo de Extracción 20°.	30
Figura 13:	Ángulo de Extracción 30°.	30
Figura 14:	Ángulo de Extracción 40°.	31
Figura 15:	Ángulo de extracción 50°.....	31
Figura 16:	Modelo en RS2.	33
Figura 17:	Secuencia de Excavación.....	34
Figura 18:	Etiquetas Nivel de Hundimiento.	35
Figura 19:	Etiquetas Nivel de Producción.....	35
Figure 20:	Etiquetas Sobre Material Fragmentado.....	36
Figura 21:	Resultados Simulación Ángulo de Extracción 30° (Caso Base).	37
Figure 22:	Gráfico Esfuerzo Principal Mayor Nivel de Hundimiento Caso Base.....	37
Figure 23:	Gráfico Esfuerzo Principal Mayor Nivel de Producción Caso Base.....	38
Figure 24:	Gráfico Esfuerzo Principal Mayor Nivel de Sobre Pila Caso Base.....	38
Figura 25:	Resultados Simulación Ángulo de Extracción 20° Caso Base.....	39
Figura 26:	Resultados Simulación Ángulo de Extracción 30° Caso Base.....	39
Figura 27:	Resultados Simulación Ángulo de Extracción 40° Caso Base.....	40
Figura 28:	Resultados Simulación Ángulo de Extracción 50° Caso Base.....	40

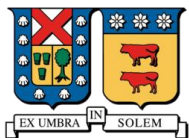
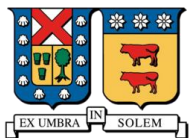


Figura 29: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Hundimiento Caso Base	40
Figura 30: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Hundimiento Caso Base	41
Figura 31: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Hundimiento Caso Base	41
Figure 32: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 20° K=1.5.....	42
Figure 33: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 30° K=1.5.....	43
Figure 34: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 40° K=1.5.....	43
Figure 35: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 50° K=1.5.....	43
Figure 36 :Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Hundimiento K=1.5.	44
Figure 37: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Producción K=1.5.	44
Figure 38: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Sobre Pila K=1.5.	45
Figura 39: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 20° K=1.	46
Figura 40: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 30° K=1.	46
Figure 41: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 30° K=1.....	46
Figure 42: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 50° K=1.....	47
Figure 43:Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Hundimiento K=1.	47
Figure 44:Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Producción K=1	48
Figure 45:Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel Sobre Pila K=1.....	48
Figura 46: Gráfico Variación de K Nivel de Hundimiento.....	49
Figura 47: Gráfico Variación de K Nivel de Producción.....	50
Figure 48: Gráfico Variación de K Nivel Sobre Pila.....	50
Figura 49: Resultados simulación ángulo de extracción 30° GSI 85.	52
Figura 50: Gráfico Variación Ángulo de extracción Nivel de Hundimiento GSI 85.....	52
Figura 51: Gráfico Variación Ángulo de Extracción Nivel de Producción GSI 85.	52
Figura 52: Gráfico Variación Ángulo de Extracción Nivel Sobre Pila GSI 85.....	53
Figure 53: Resultados simulación ángulo de extracción 30° GSI 55.	54
Figure 54: Gráfico Variación Ángulo de extracción Nivel de Hundimiento GSI 55.	55
Figure 55: Gráfico Variación Ángulo de extracción Nivel de Producción GSI 55.	55
Figura 56: Gráfico Variación Ángulo de extracción Nivel de Producción GSI 55.	56
Figura 57: Gráfico Variación GSI Nivel de Hundimiento K=2.....	57
Figura 58: Gráfico Variación GSI Nivel de Producción K=2.....	58
Figure 59: Gráfico Variación GSI Nivel Sobre Pila K=2	58



Anexos

Tabla A-1: Valores GSI según condiciones del macizo. (Hoek y brown 2002)	61
Tabla A-2: Factor D según estado del macizo. Extraída de Hoek et al., (2002).	61
Tabla A-3: Valor del μ según tipo de roca. Extraída de (Carranza-Torres & Fairhurst, 2000).	62
Tabla B-1: Resultados nivel de hundimiento 20° $K=1$.	62
Tabla B-2: Resultados Nivel de Producción 20° $K=1$	62
Tabla B-3: Resultados Nivel Sobre Pila 20° $K=1$	63
Tabla B-4: Resultados Nivel de Hundimiento 20° $K=1.5$	63
Tabla B-5: Resultados Nivel de Producción 20° $K=1.5$	63
Tabla B-6: Resultados Nivel Sobre Pila 20° $K=1.5$	64
Tabla B-7: Resultados Nivel de Hundimiento 20° $K=2$	64
Tabla B-8: Resultados Nivel de Producción 20° $K=2$	64
Tabla B-9: Resultados Nivel Sobre Pila 20° $K=2$	65
Tabla B-10: Resultados Nivel de Hundimiento 30° $K=1$	65
Tabla B-11: Resultados Nivel de Producción 30° $K=1$	65
Tabla B-12: Resultados Nivel Sobre Pila 30° $K=1$	65
Tabla B-13: Resultados Nivel de Hundimiento 30° $K=1.5$	66
Tabla B-14: Resultados Nivel de Producción 30° $K=1.5$	66
Tabla B-15: Resultados Nivel Sobre Pila 30° $K=1.5$	66
Tabla B-16: Resultados Nivel de Hundimiento 30° $K=2$	66
Tabla B-17: Resultados Nivel de Producción 30° $K=2$	67
Tabla B-18: Resultados Nivel Sobre Pila 30° $K=2$	67
Tabla B-19: Resultados Nivel de Hundimiento 40° $K=1$	67
Tabla B-20: Resultados Nivel de Producción 40° $K=1$	67
Tabla B-21: Resultados Nivel Sobre Pila 40° $K=1$	68
Tabla B-22: Resultados Nivel de Hundimiento 40° $K=1.5$	68
Tabla B-23: Resultados Nivel de Producción 40° $K=1.5$	68
Tabla B-24: Resultados Nivel Sobre Pila 40° $K=1.5$	68
Tabla B-25: Resultados Nivel de Hundimiento 40° $K=2$	69
Tabla B-26: Resultados Nivel de Producción 40° $K=2$	69
Tabla B-27: Resultados Nivel Sobre Pila 40° $K=2$	69
Tabla B-28: Resultados Nivel de Hundimiento 50° $K=1$	70



<i>Tabla B-29: Resultados Nivel de Producción 50°K=1</i>	<u>70</u>
<i>Tabla B-30: Resultados Nivel Sobre Pila 50° K=1</i>	<u>70</u>
<i>Tabla B-31: Resultados Nivel de Hundimiento 50° K=1.5</i>	<u>70</u>
<i>Tabla B-32: Resultados Nivel de Producción 50° K=1.5</i>	<u>71</u>
<i>Tabla B-33: Resultados Nivel de Producción 50° K=1.5</i>	<u>71</u>
<i>Tabla B-34: Resultados Nivel Sobre Pila 50° K=1.5</i>	<u>71</u>
<i>Tabla B-35: Resultados Nivel de Hundimiento 50° K=2</i>	<u>72</u>
<i>Tabla B-36: Resultados Nivel de Producción 50°K=2</i>	<u>72</u>
<i>Tabla B-37: Resultados Nivel Sobre Pila 50° K=2</i>	<u>72</u>



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes generales

La minería subterránea corresponde a la explotación de yacimientos minerales que se encuentran a profundidades donde la minería a cielo abierto deja de ser técnica, económica o ambientalmente viable. Este tipo de minería se desarrolla mediante excavaciones bajo la superficie terrestre, tales como túneles, galerías y piques, que permiten acceder al mineral sin la necesidad de remover grandes volúmenes de material estéril en superficie (Hartman & Mutmanský, 2002). En la minería moderna, la explotación subterránea ha adquirido una importancia creciente debido al agotamiento progresivo de yacimientos superficiales y a la necesidad de acceder a recursos minerales ubicados a mayores profundidades.

Una característica fundamental de la minería subterránea es su interacción directa con el macizo rocoso. A diferencia de la minería a cielo abierto, donde gran parte del macizo es removido, en minería subterránea la roca circundante cumple un rol estructural clave. El macizo rocoso se encuentra sometido a un estado natural de esfuerzos producto del peso de la roca suprayacente y de las condiciones tectónicas regionales. La excavación de labores subterráneas altera este equilibrio, generando redistribuciones de esfuerzos que pueden provocar deformaciones, daño estructural y fenómenos de inestabilidad si no son adecuadamente controlados (Hoek & Brown, 1980).

A medida que aumenta la profundidad de explotación, los niveles de esfuerzo *in situ* se incrementan significativamente, lo que eleva la probabilidad de concentraciones de esfuerzos alrededor de las excavaciones. En este contexto, la minería subterránea profunda enfrenta riesgos geomecánicos relevantes, tales como la sismicidad inducida y los estallidos de roca, los cuales corresponden a liberaciones súbitas de energía almacenada en el macizo rocoso. Estos fenómenos representan uno de los principales desafíos en términos de seguridad y continuidad operacional en minas subterráneas profundas (Kaiser & Cai, 2012).

Dentro de los métodos de minería subterránea, el panel caving se posiciona como una alternativa ampliamente utilizada para la explotación de yacimientos de gran volumen, baja a mediana ley y alta continuidad lateral y vertical, particularmente en la minería del cobre. Este método se basa en inducir el hundimiento progresivo del macizo rocoso mediante la extracción controlada del mineral en la base del yacimiento, permitiendo que la roca fragmenada fluya por gravedad hacia los puntos de extracción (Hustrulid & Bullock, 2001). Gracias a este mecanismo, el panel caving permite alcanzar altas tasas de producción con costos unitarios relativamente bajos, lo que lo hace económicamente atractivo para yacimientos profundos.



No obstante, el uso del panel caving implica un alto grado de interacción con el macizo rocoso y una modificación significativa de su comportamiento geomecánico. El hundimiento genera una cavidad cuya geometría, conocida como cave back, evoluciona continuamente a lo largo de la vida de la mina. Esta geometría tiene una influencia directa en la forma en que los esfuerzos se redistribuyen alrededor de los niveles de producción, hundimiento e infraestructura.

Cuando la geometría del cave back no es adecuadamente controlada, pueden generarse configuraciones desfavorables, como cavidades excesivamente planas o avances deformes del frente de hundimiento. Estas condiciones favorecen la formación de arcos de esfuerzo y zonas de alta concentración tensional, especialmente en la denominada zona de transición, ubicada entre la roca intacta y la zona ya hundida. En esta zona se concentran los mayores esfuerzos inducidos, incrementándose la probabilidad de daño, deformaciones severas de las labores, sismicidad inducida y estallidos de roca (Cornejo et al., 2016).

Experiencias operacionales en minas como El Teniente han demostrado que muchos de los problemas geomecánicos asociados al panel caving no se deben únicamente a las condiciones geológicas, sino también a un control inadecuado de la geometría del hundimiento. Un mal control de esta geometría puede amplificar los esfuerzos inducidos y aumentar significativamente el riesgo geomecánico, afectando tanto la seguridad del personal como la estabilidad de las excavaciones (Cornejo & Pardo, 2014).

En este contexto, el control geomecánico en minería por panel caving no busca eliminar los esfuerzos inducidos, lo cual resulta imposible a grandes profundidades, sino gestionarlos de manera adecuada a través del control de los parámetros operacionales que influyen en la geometría del cave back. La implementación de criterios e indicadores de control permite detectar desviaciones tempranas respecto de la geometría planificada y aplicar medidas correctivas oportunas, contribuyendo a reducir la probabilidad de sobre esfuerzos y eventos de inestabilidad. En conclusión, la minería subterránea, y en particular el método de panel caving, representa una alternativa fundamental para la explotación de yacimientos profundos en la minería actual. Sin embargo, su aplicación conlleva desafíos geomecánicos relevantes, especialmente asociados a la redistribución de esfuerzos y al riesgo de estallidos de roca. En este escenario, el adecuado control de la geometría del hundimiento se presenta como un factor clave para garantizar la seguridad, estabilidad y sostenibilidad de la operación minera.



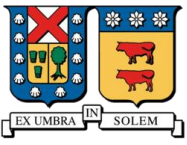
1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Evaluar la influencia del ángulo de extracción en el esfuerzo principal mayor para minería de Panel Caving

1.2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la influencia del ángulo de extracción en la generación de esfuerzos inducidos durante la apertura progresiva de bateas en minería por Panel Caving.
- Analizar el efecto de la calidad del macizo rocoso (GSI) frente a distintos ángulos de extracción
- Estudiar el efecto del ángulo de extracción frente a distintas condiciones iniciales de esfuerzos (K).



2 MARCO TEÓRICO

2.1 Ángulo de extracción

La minería subterránea corresponde a un conjunto de métodos de explotación utilizados cuando los yacimientos se encuentran a grandes profundidades o cuando las condiciones técnicas, económicas y ambientales no permiten una explotación a rajo abierto. Dentro de estos métodos, las técnicas de hundimiento por gravedad, como el panel caving, se caracterizan por aprovechar la fragmentación natural del macizo rocoso inducida por la minería, permitiendo la extracción de grandes volúmenes de mineral con altos niveles de productividad (Duplancic & Brady, 1999).

El método de panel caving ha sido ampliamente utilizado en yacimientos masivos de baja ley, como es el caso de la mina El Teniente, donde la continuidad del proceso productivo depende fuertemente del control geométrico del hundimiento. A diferencia del block caving, el panel caving presenta un crecimiento progresivo de la cavidad en el tiempo, lo que implica que la geometría del frente de hundimiento evoluciona constantemente durante la vida del panel (Cornejo, Pinochet & Caviades, 2016). Esta característica convierte al control geométrico en un elemento crítico, ya que la forma de la cavidad influye directamente en la redistribución de esfuerzos inducidos alrededor de los niveles productivos.

Uno de los conceptos fundamentales en este contexto es el proceso de extracción en condición de quiebre. Un punto de extracción se considera en quiebre cuando la altura extraída no supera aproximadamente el 30% de la altura de la columna de roca primaria. En esta etapa, el macizo aún no se encuentra completamente relajado, por lo que la velocidad de extracción debe ser cuidadosamente regulada para evitar inestabilidades prematuras (Contreras & Cornejo, 2016). La expresión matemática que permite programar la máxima velocidad de extracción que puede alcanzar un punto de extracción en quiebre en función de la altura extraída, viene dada por:

$$V(h) = \left(\left[\frac{V_f - V_i}{h_q} \right] x h + V_i \right) x d_q \quad (1)$$

Donde:

$$V(h): \text{Velocidad de extracción en quiebre} \left[\frac{T}{m^2} \right]$$

$$V_f: \text{Velocidad final en quiebre} \left[\frac{T}{m^2} \right]$$

$$V_i: \text{Velocidad inicial en quiebre} \left[\frac{T}{m^2} \right]$$

$$h_q: \text{Altura de liberación de la columna [m]}$$

d_q : Disponibilidad del punto de extracción en quiebre [%]

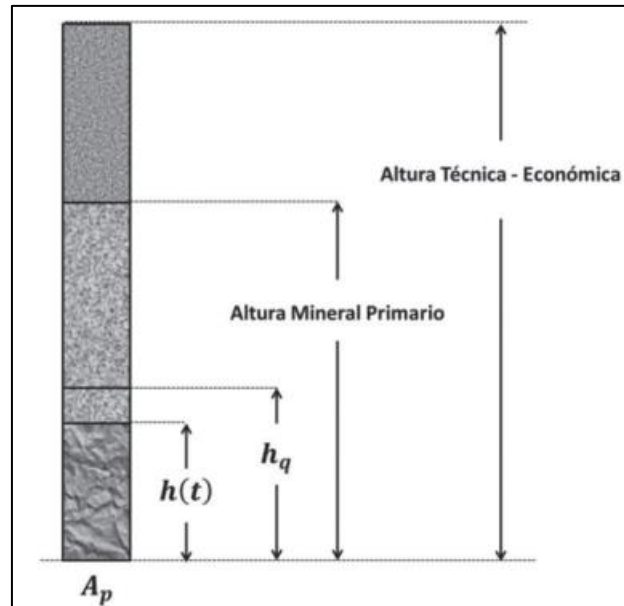


Figure 1: Parámetro y variables Simplificadas de un Punto de Extracción (Contreras & Cornejo 2016).

La velocidad de extracción en quiebre depende de diversos parámetros, entre ellos la altura extraída, la disponibilidad del punto de extracción, la densidad del material y las restricciones geométricas impuestas por el avance del frente de hundimiento.

De forma paralela al avance vertical asociado a la extracción, el crecimiento horizontal del panel se materializa a través de la incorporación de nuevas bateas. Esta incorporación de área debe mantenerse en equilibrio con la tasa de extracción, ya que un desfase entre ambos procesos puede generar geometrías desfavorables del hundimiento.

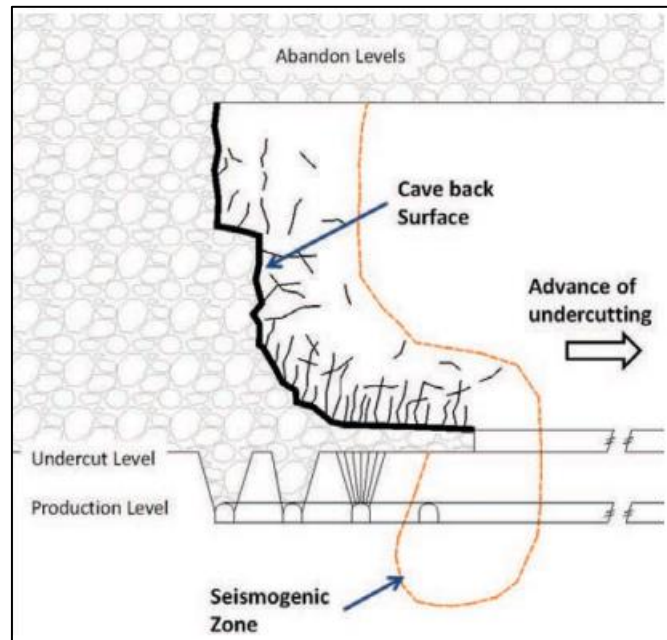


Figura 2: Superficie de la cavidad y zona de generación sísmica en un régimen de panel caving (Landeros, Cuellos y Rojas, 2012).

Una incorporación excesiva de área con bajas tasas de extracción tiende a generar frentes de hundimiento planos, aumentando la concentración de esfuerzos y la probabilidad de eventos sísmicos. Por el contrario, altas tasas de extracción con baja incorporación de área pueden provocar ángulos excesivos, activación estructural y problemas de flujo, como ingreso de barro o dilución (Cornejo & Pardo, 2014).

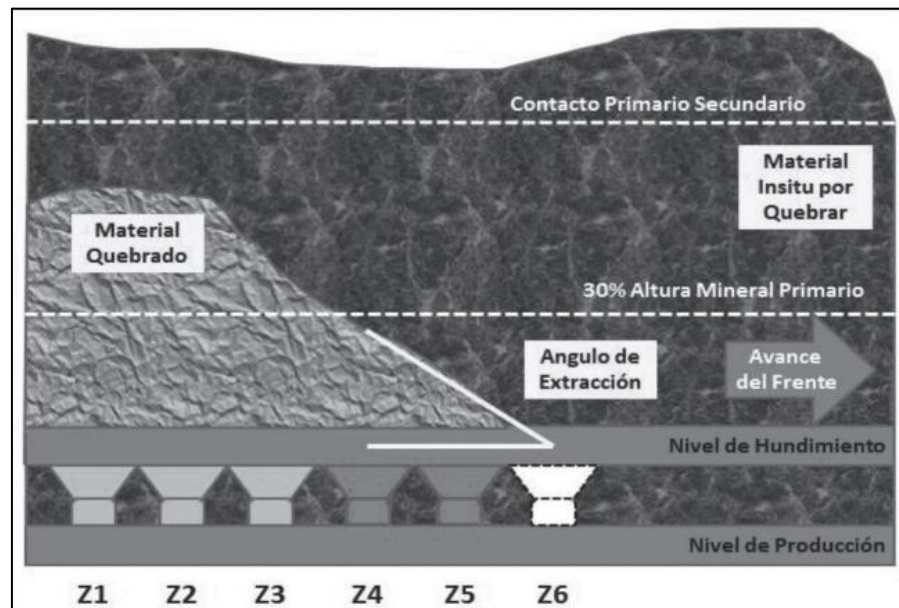
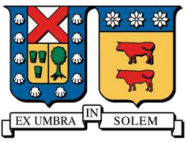


Figura 3: Esquema conceptual del ángulo de extracción (Contreras & Cornejo, 2016).



$$\alpha = \arctan \left(\frac{V_e}{V_h} \right) \quad (2)$$

Donde:

α : Ángulo de extracción [°]

V_e : Velocidad de extracción en quiebre $\left[\frac{m}{d} \right]$

V_h : Velocidad de crecimiento del frente $\left[\frac{m}{d} \right]$

La relación entre la velocidad de extracción y la velocidad de crecimiento del frente queda representada mediante el ángulo de extracción. Este ángulo corresponde al valor geométrico que define la pendiente promedio del manto de extracción, y se expresa como la razón entre la velocidad de extracción en quiebre y la velocidad de avance del frente de hundimiento. En la práctica operacional de El Teniente, el ángulo de extracción se utiliza como un parámetro de control que permite evaluar si la geometría de la cavidad se mantiene dentro de rangos aceptables desde el punto de vista geomecánico (Cornejo, Pinochet & Caviedes, 2016).

Experiencias operacionales en sectores como Reservas Norte, Diablo Regimiento y Esmeralda Sur han demostrado que desviaciones significativas del ángulo de extracción respecto de los rangos definidos pueden amplificar los esfuerzos inducidos alrededor de los niveles de hundimiento, producción y transporte. Estas condiciones han estado asociadas históricamente a la ocurrencia de estallidos de roca, colapsos locales y restricciones operacionales, comprometiendo tanto la seguridad del personal como la continuidad productiva (Landeros, Cuello & Rojas, 2012).

En este contexto, el control del ángulo de extracción no solo cumple una función productiva, sino que constituye una herramienta clave de gestión del riesgo geomecánico. Un ángulo inferior al recomendado suele asociarse a zonas con bajo crecimiento del hundimiento, generando acumulación de esfuerzos en sectores cercanos al frente. Por el contrario, ángulos superiores a los umbrales críticos indican sobre extracción localizada, lo que puede inducir inestabilidad estructural y afectar la respuesta sísmica del macizo (Cornejo & Pardo, 2014).

En consecuencia, el control adecuado de la geometría del hundimiento, y particularmente del ángulo de extracción, se reconoce hoy como uno de los principales factores para reducir la ocurrencia de sobreesfuerzos y eventos dinámicos en minería por panel caving. La integración de este parámetro en la planificación minera permite anticipar escenarios de riesgo, ajustar tasas de extracción e incorporación de área, y asegurar una explotación más segura y sostenible del yacimiento.

2.2 Esfuerzos

Los esfuerzos se definen como una fuerza aplicada en un área determinada, produciendo tensiones internas en la zona de aplicación, que pueden ocasionar el desplazamiento, la deformación o directamente la fractura,

dependiendo de donde se efectúe (Galarce Castro, 2014).

2.3 Tipos de esfuerzo en minería

Dependiendo del origen los esfuerzos se diferencian en esfuerzos in situ e inducidos. Por una parte, los esfuerzos in situ representan las condiciones de esfuerzo en un macizo rocoso intacto, donde las placas tectónicas y la gravedad (profundidad) son las responsables del valor de estos. Por otro lado, los esfuerzos inducidos representan la alteración del estado tensional del macizo, la que es provocada por cambios en el entorno o directamente por fuerzas externas (Galarce Castro, 2014).

2.3.1 Esfuerzo in situ

Los esfuerzos in situ involucran tanto esfuerzos tectónicos como esfuerzos gravitacionales, donde los primeros representan el efecto del contacto entre placas tectónicas, mientras los otros dependen de la profundidad y de la densidad. Los esfuerzos en tres dimensiones quedan determinados por esfuerzos normales y de corte, sumando un total de nueve componentes. Estos están definidos en planos y direcciones cartesianas de la siguiente forma:

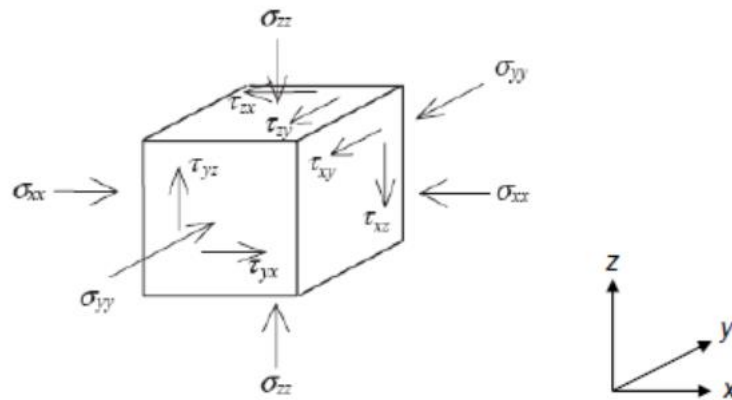


Figura 4: Componentes del tensor de esfuerzos en tres dimensiones (Imagen extraída de Galarce 2014)

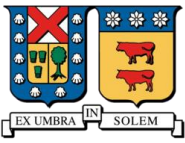
Los esfuerzos pueden ser descritos mediante el tensor de esfuerzos, el cual reúne todos sus componentes dependiendo de su plano y dirección (Galarce, 2014):

$$[II] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Donde:

σ_{ii} = Esfuerzos normales en el plano al eje i

τ_{ij} = Esfuerzo de corte en el plano normal al eje i en la dirección j



Tanto i o j puede representar al eje x, y, z .

El tensor de esfuerzo es posible someterlo a rotaciones de manera de encontrar un sistema coordinado donde los esfuerzos de corte son nulos. Este tensor define los esfuerzos principales. Para obtener la magnitud de los esfuerzos principales se buscan los valores propios, λ , del tensor de esfuerzo, según la siguiente ecuación:

$$\det(\Pi - \lambda I) = 0$$

Donde I , corresponde a la matriz identidad. Al resolver esta ecuación se obtiene el polinomio característico:

$$\lambda^3 + I_i * \lambda^2 + I_i * \lambda + I_i = 0$$

Donde I_i , $i=1, 2, 3$ representan a los invariantes de esfuerzos:

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$$

$$I_2 = \sigma_{xx} * \sigma_{yy} + \sigma_{yy} * \sigma_{zz} + \sigma_{zz} * \sigma_{xx} - (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)$$

$$I_3 = \sigma_{xx} * \sigma_{yy} * \sigma_{zz} + 2 * (\tau_{xy} * \tau_{xz} * \tau_{yz}) - (\sigma_{xx} * \tau_{yz}^2 + \sigma_{yy} * \tau_{xz}^2 + \sigma_{zz} * \tau_{xy}^2)$$

Resolviendo el polinomio, es como se obtienen las magnitudes de los esfuerzos principales σ_1, σ_2 y σ_3 . Donde:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

σ_1 : Representa la máxima compresión que experimenta el punto. Es el esfuerzo más crítico en el análisis de falla.

σ_2 : Es el esfuerzo con magnitud intermedia entre σ_1 y σ_3 . En análisis 2D el valor de este se simplifica debido a que solo influye en el comportamiento tridimensional de la roca.

σ_3 : Es el esfuerzo principal menor, representa la mínima compresión en el punto. Actúa como el esfuerzo de confinamiento, que tiende a aumentar la resistencia de la roca al corte.

Tanto los esfuerzos in situ como los inducidos se describen en términos de sus componentes principales.

2.3.2 Esfuerzo Vertical

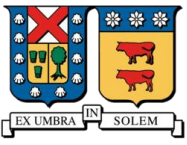
El esfuerzo vertical se define como la resultante de esfuerzos producidos por el peso de un bloque en un área determinada, siguiendo el principio de distribución de la carga en un macizo rocoso. El cálculo de este se ve reflejado por la siguiente fórmula:

$$\sigma_v = \int_0^z \rho g dz \quad (3)$$

Donde:

$$\sigma_v = \text{Esfuerzo vertical [Pa]}.$$

$$\rho = \text{Densidad de la roca} \left[\frac{Kg}{m^3} \right].$$



$g = \text{Aceleración de gravedad } \left[\frac{m}{s^2} \right].$

$z = \text{Profundidad } [m].$

2.3.3 Esfuerzo Horizontal

El esfuerzo horizontal es mucho más complejo y depende de más factores como las condiciones de borde y las propiedades de la roca, como describen diferentes autores (Herget 1988) (Amadei y Stephansson 1977). Se define la razón de esfuerzo horizontal y vertical, que permite dimensionar el esfuerzo horizontal a partir del vertical como se muestra en la siguiente formula:

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (4)$$

Donde:

$K = \text{Razón o ratio de esfuerzos}$

$\sigma_h = \text{Esfuerzo horizontal } [Pa]$

La razón K de esfuerzos contempla valores que varían entre 0 a 5.5 según estudios empíricos (Brown y Hoek 1978) y depende de la profundidad. Los valores mayores a 3 están asociados al proceso de erosión en la capa más superficial de la corteza terrestre, además de otros factores como composición de la roca y tectonismo (Sen y Sadagah 2002). A menor profundidad el valor de k es mayor, por otro lado, cuando aumenta la profundidad, el esfuerzo vertical aumenta hasta igualar al esfuerzo horizontal adquiriendo valores de k cercanos a 1. Como se suele trabajar en tres dimensiones, el ratio K varía según la orientación en la que este se trabaje. El cálculo de K en base a la orientación de trabajo se establece de la siguiente manera:

$$K_{S(E-W)} = \frac{\sigma_{H(E-W)}}{\sigma_v} \quad (5)$$

$$K_{S(N-S)} = \frac{\sigma_{H(N-S)}}{\sigma_v} \quad (6)$$

Donde:

$K_{S(E-W)} = \text{Ratio de esfuerzos orientación este – oeste.}$

$\sigma_{H(E-W)} = \text{Esfuerzo horizontal in situ orientación este – oeste } [Pa].$

$K_{S(N-S)} = \text{Ratio de esfuerzos orientación norte sur.}$

$\sigma_{H(N-S)} = \text{Esfuerzo horizontal in situ orientación norte – sur } [Pa].$

2.3.4 Esfuerzos inducidos

Un esfuerzo inducido es la modificación del estado tensional natural de un macizo rocoso como consecuencia



de la creación de una excavación, como un túnel o una cámara (Brady & Brown, 2004). Al remover la roca, las cargas que esta soportaba originalmente se redistribuyen hacia la roca circundante, alterando el equilibrio preexistente y generando nuevas zonas de esfuerzos alrededor del vacío creado.

2.4 Criterios de Falla

Un criterio de falla se define como un modelo matemático capaz de predecir la resistencia de un material. Para hacerlo, este modelo utiliza como base las propiedades propias de ese material y las condiciones de esfuerzo a las que está sometido (González & Martínez, 2022). Debido a la composición compleja y variable de un macizo rocoso, junto con los múltiples escenarios de esfuerzo que pueden presentarse, es imposible que exista un método único que se ajuste a todos los casos. Por esta razón, es necesario seleccionar distintos criterios según las condiciones específicas de cada situación. Aunque en la mecánica de rocas se han propuesto muchos modelos, cada uno enfocado en un tipo de análisis específico, para la evaluación de macizos rocosos destacan dos por su uso extendido e importancia, el criterio de Mohr-Coulomb y el de Hoek & Brown.

2.4.1 Criterio de Falla Mohr Coulomb

El criterio de falla de Mohr-Coulomb, propuesto por el físico Charles-Augustin de Coulomb en 1776, es un modelo de naturaleza lineal diseñado inicialmente para evaluar la rotura en suelos. Pese a que su comportamiento lineal estricto no concuerda exactamente con los resultados observados en ensayos triaxiales, el modelo sigue siendo uno de los más utilizados en la ingeniería. Su popularidad se debe fundamentalmente a su facilidad de implementación y comprensión (Ros Avila, 2008).

En cuanto a su formulación, el criterio se enfoca en expresar la resistencia al cizalle (τ) que un material puede soportar a lo largo de un plano potencial de falla. El modelo postula que esta resistencia es una función del esfuerzo normal (σ) que actúa sobre dicho plano, relacionando así las tensiones tangenciales y normales que influyen en la fractura (González & Martínez, 2022). La fórmula incorpora dos parámetros intrínsecos del material:

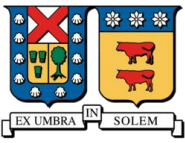
Cohesión (c): Se define como la resistencia al corte que el material posee en ausencia de cualquier esfuerzo normal.

Ángulo de fricción (ϕ): Representa el ángulo de resistencia interna del material, determinando cómo aumenta la resistencia al corte a medida que se incrementa la tensión normal.

Esta relación lineal se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (7)$$

Donde:



τ = Tensión tangencial en el plano de falla.

σ_n = Tensión normal en el plano de falla [Pa]

c = Cohesión [Pa]

ϕ = Ángulo de fricción [°]

2.4.2 Criterio de Falla Hoek & Brown

El criterio de falla de Hoek & Brown (Hoek & Brown, 1980) es un modelo de naturaleza no lineal, introducido en 1980 por Evert Hoek y Edwin Brown. Actualmente, es uno de los criterios más utilizados en la mecánica de rocas y en la industria minera, aunque su enfoque inicial fue el análisis de macizos rocosos competentes (roca dura) (Ros Avila, 2008). A diferencia del modelo lineal de Mohr-Coulomb, el criterio de Hoek-Brown incorpora parámetros geotécnicos y características geológicas directamente en su formulación. De esta manera, el modelo asigna una mayor importancia a las propiedades y condiciones reales (in-situ) del macizo rocoso. La fórmula matemática del criterio de falla se expresa de la siguiente forma:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{mi} \left(m \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (8)$$

Donde m y s son constantes del material que dependen de las propiedades de la roca. Con el tiempo se modificó la fórmula de forma que se pudiera implementar tanto para macizos rocosos duros como débiles, la fórmula generalizada se presenta de la siguiente forma:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (9)$$

Donde:

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)} \quad (10)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad (11)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (12)$$

m_b , s y a son constantes del macizo rocoso que dependen directamente de la calidad de este último, siendo definido por el valor del GSI, la constante del material intacto m_i y el factor de perturbación D . σ_1' y σ_3' son los esfuerzos efectivos principales mayor y menor, σ_{ci} es la resistencia a la compresión uniaxial de la roca. Los valores de GSI, D y m_i se encuentran tabulados en el anexo A.



2.5 GSI Residual

Diversos estudios han evidenciado que los macizos rocosos presentan un comportamiento con debilitamiento post-peak, en el cual la resistencia disminuye progresivamente debido a la fracturación del macizo, la reducción del tamaño de bloques y la degradación de la rugosidad de las discontinuidades. En este contexto, Cai et al. (2007) desarrollan una extensión del sistema Geological Strength Index (GSI) orientada a la estimación de la resistencia residual del macizo rocoso, la cual no se encontraba explícitamente definida en la formulación original del GSI. El estudio se basa en la observación de ensayos in situ, retroanálisis de taludes y modelaciones numéricas, concluyendo que la resistencia residual puede representarse mediante un GSI residual (GSI_r), obtenido a partir de la degradación estructural del macizo luego de alcanzar la resistencia pico. A partir de los resultados obtenidos mediante la reducción del volumen de bloques y de la condición de las discontinuidades, los autores proponen una relación empírica directa entre el GSI pico (GSI original) y el GSI residual, la cual representa una tendencia promedio del proceso de debilitamiento post-peak. Esta relación se expresa mediante la siguiente ecuación exponencial:

$$GSI_r = GSI e^{-0.0134 GSI} \quad (13)$$

donde el GSI corresponde al valor original del macizo rocoso en estado pre-falla, y el GSI_r representa el estado residual del macizo tras la degradación estructural. La formulación refleja que macizos de mayor calidad experimentan una reducción relativa más significativa de GSI al alcanzar el estado residual, mientras que macizos de baja calidad presentan una reducción menor, al encontrarse previamente desestructurados.

2.6 Software RS2

RS2 es un potente software de modelación numérica mediante elementos finitos (FEM) en 2D, desarrollado por Rocscience, especializado en geomecánica y análisis de estabilidad. El programa permite diseñar y analizar una amplia variedad de obras superficiales y subterráneas, estimando los esfuerzos y deformaciones basándose en el criterio de falla establecido. Para ello, utiliza una malla de nodos y aristas sobre la cual realiza los cálculos, permitiendo además incorporar refuerzos y condiciones adyacentes para un análisis más realista. Su gran ventaja es la facilidad para extraer datos mediante etiquetas, lo que agiliza la generación de gráficos e informes técnicos.

2.6.1 Diseño y Propiedades

RS2 destaca por su intuitiva interfaz de diseño, que permite una organización personalizada y fácil de usar de las geometrías. Esta funcionalidad es clave, ya que facilita diferenciar claramente las distintas zonas del

modelo, como pueden ser las excavaciones, las etapas constructivas o las diferentes unidades litológicas. Comprendiendo el flujo de trabajo en ingeniería, Rocscience también dotó al programa de una robusta compatibilidad, permitiendo importar geometrías en variados formatos desde otros softwares de diseño. Finalmente, para asegurar la precisión del análisis, el programa enfatiza la correcta definición de los límites: se debe cumplir con una distancia mínima entre los bordes del modelo y las excavaciones para evitar interferencias en los resultados. Esta distancia es un factor crítico que depende directamente de la forma y el tamaño del modelo que se está analizando.

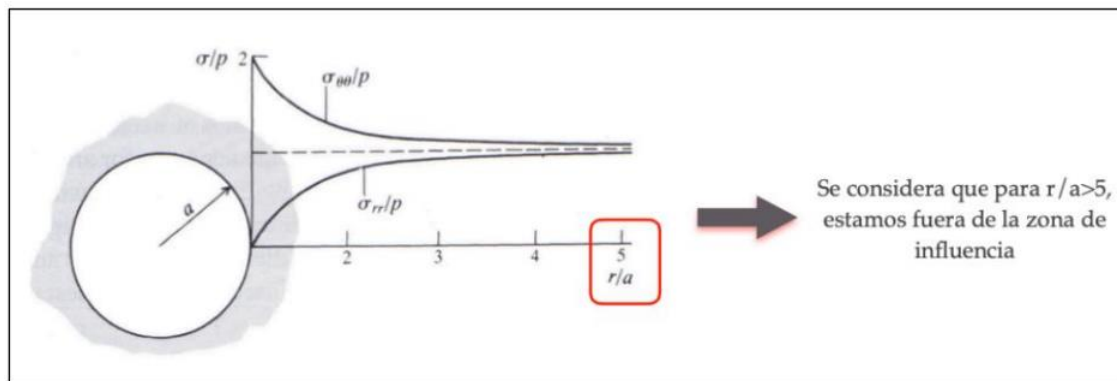


Figura 5: Distancia mínima de los bordes para un túnel.

El software también cuenta con la opción de configurar las propiedades de cada litología o estructura dispuesta en la geometría, en esta configuración se deben incluir los criterios de falla para indicar el comportamiento que tendrá el material.

2.6.2 Malla y Condiciones de Esfuerzo

Para discretizar el modelo mediante elementos finitos, es fundamental aplicar una malla de cálculo en toda la geometría. Esta malla se compone de nodos, que son los puntos exactos donde el programa realiza el cálculo de esfuerzos y deformaciones, y de arista que conectan dichos nodos, estimando los valores en las zonas intermedias.

La distancia entre los nodos define la precisión y el costo computacional de la simulación. Una distancia menor (malla más densa) implica una mayor precisión en los resultados, pero a su vez, aumenta significativamente el tiempo de simulación y consume más recursos. Por el contrario, una malla poco densa (nodos más separados) procesa rápido, pero reduce la precisión. Por ello, la clave para una correcta ejecución es asignar una densidad de malla acorde al problema, usualmente aplicando una malla más fina solo en las zonas de interés (como el contorno de una excavación) y más gruesa lejos de ellas.

Junto con la malla, es imprescindible definir el comportamiento de los esfuerzos en los bordes del modelo. Esto se hace asignando condiciones de contorno, siendo las más comunes el borde deslizante (o rodillo), que permite el movimiento a lo largo del eje aplicado, pero lo restringe en el perpendicular, y el nodo fijo (o empotramiento),

que anula cualquier tipo de movimiento en ambos ejes.

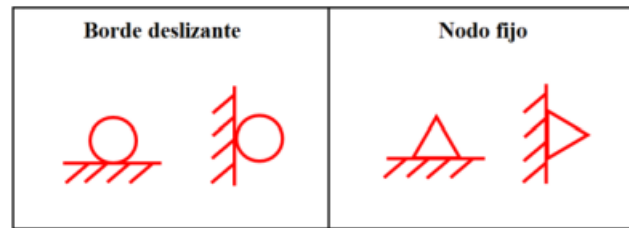


Figure 6: Simbología para condiciones de borde.

Una vez definidas las condiciones de borde (límites de desplazamiento) de la geometría, se debe incorporar el estado tensional *in-situ*. El programa permite definir estos esfuerzos de forma flexible, ya sea como gravitacionales (calculados por el peso de la roca), como cargas distribuidas o mediante una configuración personalizada. Para simular un estado 3D en el modelo 2D, RS2 permite especificar la razón de esfuerzos (K) tanto en las orientaciones del plano como la razón de esfuerzos fuera del plano. Dado que el software resuelve los cálculos de forma iterativa, el usuario debe definir los parámetros de convergencia: el número de iteraciones y la tolerancia al error. Es crucial entender que una tolerancia demasiado alta reducirá el tiempo de cálculo, pero perjudicará directamente la precisión y fiabilidad de los resultados finales.

2.6.3 Secuencia de Excavación e Interpretación de Resultados

El software incluye una herramienta fundamental de "stages" (etapas) que permite modelar secuencias de excavación. Esta funcionalidad no solo facilita el análisis individual de cada fase constructiva, sino que también permite realizar evaluaciones comparativas contra una etapa de referencia, lo cual es clave para visualizar la variación y redistribución de los esfuerzos a medida que avanza el proyecto. Para el posprocesamiento de resultados, el programa cuenta con el módulo "Interpret", que ofrece amplias opciones de personalización. Los usuarios pueden evaluar cualquier componente de esfuerzo, agregar fórmulas personalizadas para análisis específicos no disponibles por defecto, incluir indicadores de deformación, generar informes técnicos y posicionar etiquetas de datos libremente sobre el modelo para una visualización clara.

3 METODOLOGÍA

Se propone una metodología diseñada para cumplir con los objetivos planteados mediante una secuencia de tareas claras y bien organizadas. El resumen de la secuencia metodológica que se utilizará para completar este estudio se detalla a continuación:

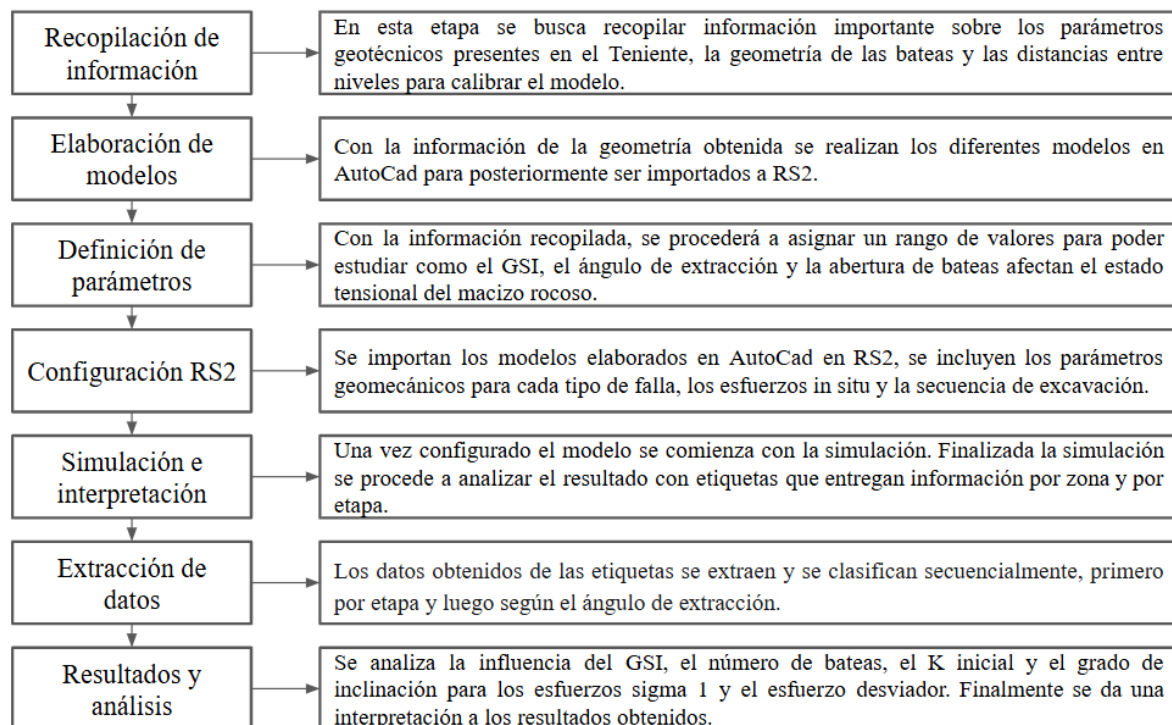


Figure 7: Secuencia Metodológica.

3.1 Recopilación de Información

En una primera etapa, se recopilaron los parámetros geotécnicos de El Teniente para su ingreso como inputs en el programa, utilizando el criterio de falla de Hoek & Brown generalizado. Como se indicó en el marco teórico, este criterio es el más adecuado para el macizo rocoso, ya que el criterio original se aplica a roca intacta. Al tratarse de un macizo con inestabilidades y fallas, se requiere un criterio que pueda establecer parámetros

de corte equivalentes, tal como lo permite el criterio generalizado (Hoek & Brown, 2019). Un informe técnico presentado en 2006, orientado a definir el campo de esfuerzos *in-situ* de la mina El Teniente (P Cavieres et al., 2006), entrega información sobre las características geotécnicas de la roca intacta y del macizo rocoso. Estas tablas se pueden ver a continuación:

Parameters	CMET	Dacite Porphyry	Tonalite and Diorite Porphyry	Breccia Braden
Young's Modulus [GPa]	60	30	45	25
Poisson Ratio	0.16	0.18	0.21	0.23
Density [ton/m ³]	2.80	2.62	2.73	2.61
Porosity [%]	4.40	3.00	4.70	7.70
UCS [MPa]	120	110	140	90
T _i [MPa]	14	12	15	6
E / UCS	500	273	321	278
UCS / T _i	8.6	9.2	9.3	15
m _i (Hoek & Brown)	9.1	20.2	9.2	11.6
σ _{ci} [MPa]	118	112	125	72
σ _{ti} [MPa]	13	6	13	6
Cohesion [MPa]	23	19	23	10
Friction Angle [°]	38	48	38	39

Tabla 1 Propiedades geotécnicas de la roca intacta en la mina El Teniente. Adaptado de Windsor et al. (2006).

Parameters	CMET	Dacite Porphyry	Tonalite and Diorite Porphyry	Breccia Braden
Young's Modulus [GPa]	36	24	36	20
Poisson Ratio	0.21	0.20	0.26	0.28
m _b (Hoek & Brown)	4.5	10.8	4.5	8.6
s (Hoek & Brown)	0.1	0.14	0.11	0.43
a (Hoek & Brown)	0.5	0.5	0.5	0.5
σ _{c-rm} [MPa]	49	60	42	50
σ _{t-rm} [MPa]	3	2	2	3
Cohesion [MPa]	9	9	8	9
Friction Angle [°]	37	45	37	41
GSI	70-85	75-90	70-90	85-100

Tabla 2: Propiedades geotécnicas del macizo rocoso en la mina El Teniente. Adaptado de Windsor et al. (2006).

3.1.1 Estado Tensional de Esfuerzos in Situ

Para una correcta calibración del modelo, un input fundamental es el estado de esfuerzos in-situ del macizo rocoso. Con este fin, se buscó información específica sobre el estado tensional del nivel Esmeralda. Un estudio realizado por Valdés (2009) establece que los esfuerzos in-situ para el sector oeste de dicho nivel en la mina El Teniente son los siguientes:

Esfuerzo	Magnitud[MPa]	Azimuth	Inclinación
Esfuerzo principal mayor	42.8	137.8	(10.8)
Esfuerzo principal intermedio	24.0	218.5	40.2
Esfuerzo principal menor	20.9	60.0	47.8

Tabla 3: Estado Tensional de los Esfuerzos in Situ Nivel Esmeralda (Valdes r).

3.1.2 Geometría de las bateas

Para definir la geometría de las bateas y el pilar corona en el modelo RS2, se utilizó como referencia la metodología descrita por Cavieres (Cavieres et al.) en su estudio sobre el dimensionamiento de mallas de extracción en roca primaria de El Teniente. Este estudio proporciona un análisis detallado para el diseño de bateas, distinguiendo entre las variantes del método Panel Caving. Para este modelo, se adoptaron las dimensiones correspondientes a la "Batea Tipo Esmeralda", diseñada para hundimiento avanzado. Esta geometría, desarrollada específicamente para las condiciones de la mina Esmeralda, se considera la base más representativa para la simulación.

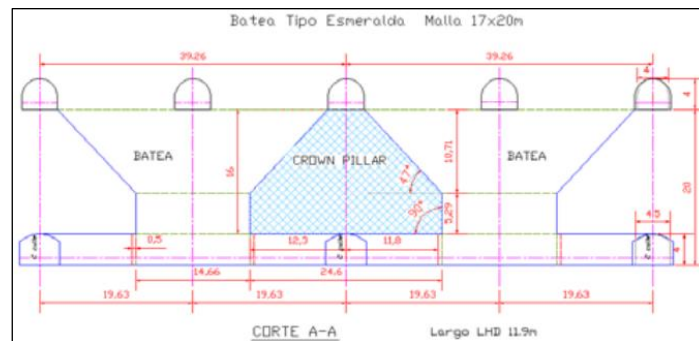


Figura 8 :Corte A-A Nivel Esmeralda. Adaptado de (Cavieres et al)

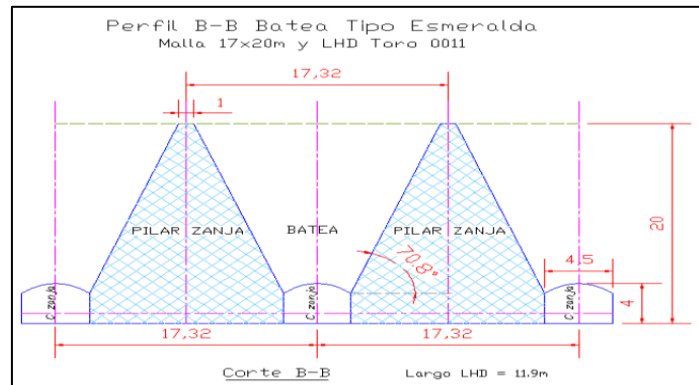


Figura 9: Corte B-B Nivel Esmeralda. Adaptado de (Cavieres et al)

3.2 Elaboración de Modelos

Con el objetivo de optimizar la eficiencia del estudio, se determinó trabajar con un modelo bidimensional (plano x-y). Esta decisión se fundamenta en que los parámetros de evaluación no exigen un análisis tridimensional, lo que permite una reducción considerable en los tiempos de cálculo. El diseño geométrico se llevará a cabo en AutoCAD, aprovechando su interoperabilidad directa con el software de análisis RS2. Previo a la modelación, es imperativo ajustar las dimensiones del dominio según las recomendaciones técnicas (ver figura 5), asegurando así que las condiciones de borde no alteren la fiabilidad de los resultados.

Para evaluar los efectos que tiene el ángulo de extracción en los esfuerzos inducidos, se propone diseñar 4 modelos distintos con ángulos de 20° , 30° , 40° y 50° . Debido al valor de σ_1 y σ_3 se decidió colocar la profundidad del nivel de hundimiento a 725 metros bajo la superficie de manera que σ_3 coincidiera con el esfuerzo que genera la roca por su propio peso a esa profundidad. Además, se estableció un dominio de 1200 m de alto y 2000 m de ancho.

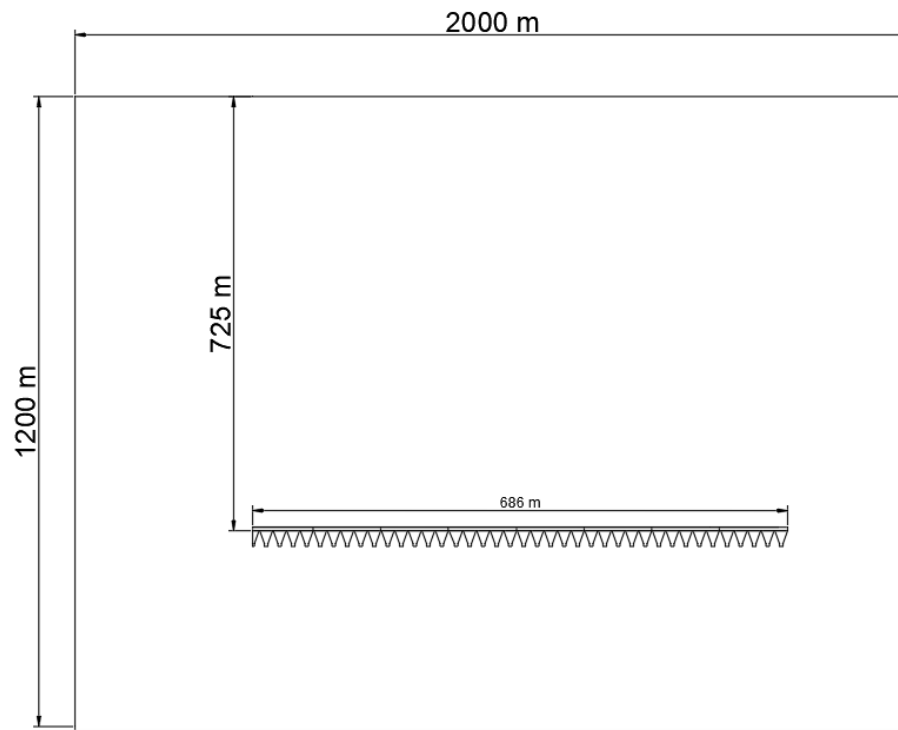


Figure 10: Dominio de Modelos.

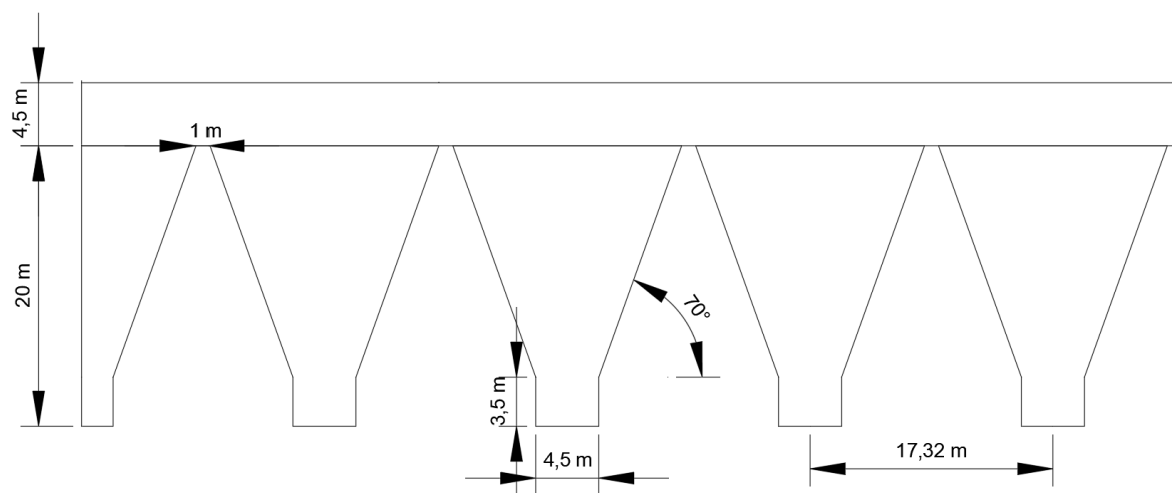


Figura 11: Geometría de Bateas.

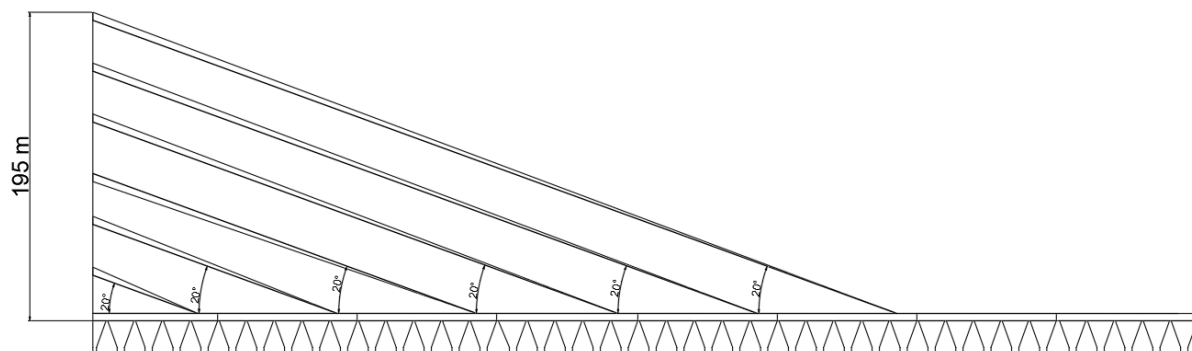


Figura 12: Ángulo de Extracción 20° .

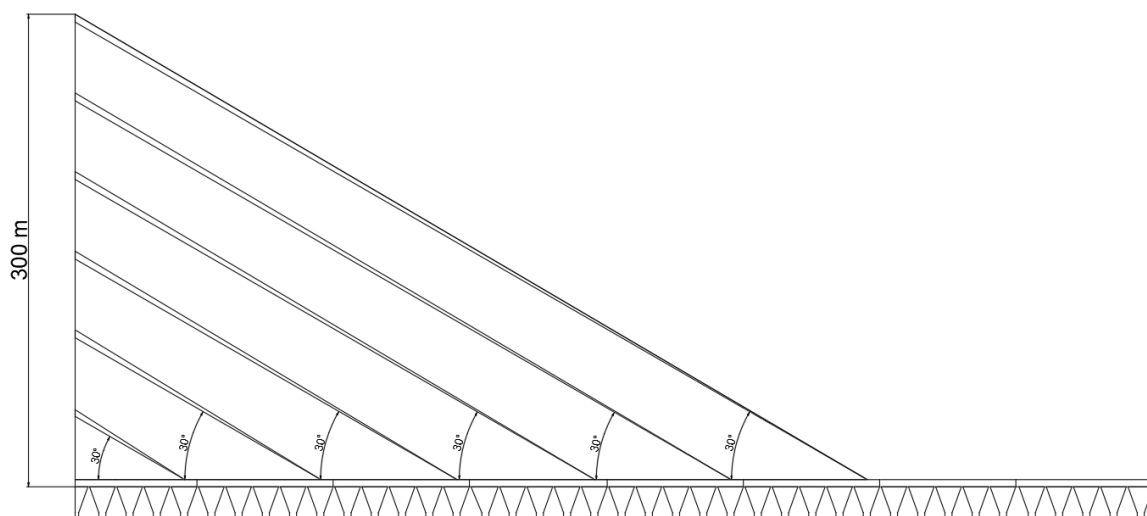


Figura 13: Ángulo de Extracción 30° .

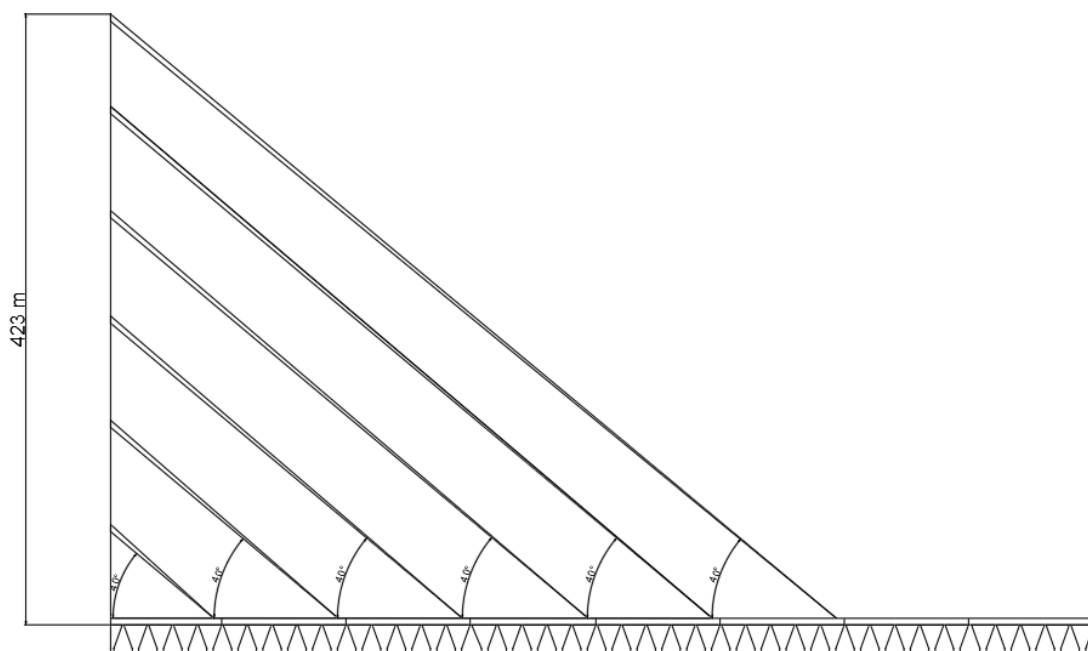


Figura 14: Ángulo de Extracción 40°.

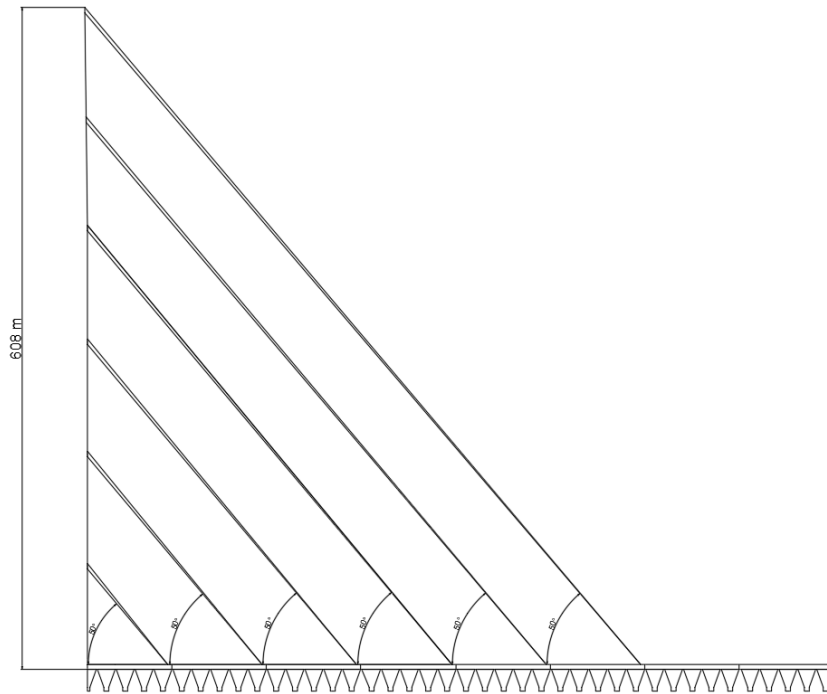


Figura 15: Ángulo de extracción 50°.

Con respecto a la excavación subterránea, se dispuso una zona de caving de 700 metros de largo. El alto del caving dependerá del ángulo a analizar, sin embargo, la altura máxima es de 195 metros para 20°, 300 metros de alto para 30°, 423 metros de alto para 40° y 608 metros de alto para 50°, la que se divide en un total de 40 bateas del mismo tamaño. Cada batea mide 17,32 metros de ancho y 20 metros de alto, además de un túnel de extracción de 4,5 metros de ancho y 4 metros de alto.

3.3 Definición de Parámetros

En base a la información recopilada del macizo rocoso presente en el Teniente, se decide trabajar con la roca CMET la cual tiene un valor de 120 de UCS y con un valor de GSI que varia entre 70 a 85 siendo una roca que va de competente a muy competente. Como los antecedentes sobre el nivel Esmeralda informan la incorporación de fracturamiento hidráulico, se decide tambien analizar la roca CMET con valores que van de 55 a 85 GSI, de manera de ver el efecto que tiene el ir reduciendo la calidad del macizo rocoso en los esfuerzos inducidos provocados por la extracción de la roca. Las unidades geotécnicas quedaron definidas de la siguiente manera:

	Densidad	Coefficiente de Poisson	UCS	GSI	GSI residual	mi	Módulo de Young	Clidad de roca
	Kg/m	-	Mpa	-	-	-	Mpa	-
Lito 1	2800	0.16	120	85	27.21	9.1	36000	Muy buena
Lito 2	2800	0.16	120	80	27.39	9.1	36000	Muy buena-Buena
Lito 3	2800	0.16	120	75	27.45	9.1	36000	Buena
Lito 4	2800	0.16	120	70	27.40	9.1	36000	Buena
Lito 5	2800	0.16	120	65	27.20	9.1	36000	Buena-Regular
Lito 6	2800	0.16	120	60	26.85	9.1	36000	Regular
Lito 7	2800	0.16	120	55	26.32	9.1	36000	Regular

Tabla 4: Propiedad Geotécnicas a Analizar.

Considerando que el mecanismo fundamental del hundimiento implica la fragmentación progresiva del macizo rocoso, es necesario simular la respuesta geomecánica de la roca en su estado fracturado. Para ello, se incorporó al modelo una nueva unidad geotécnica representativa de esta condición. Se seleccionó el criterio de falla de Mohr-Coulomb, dado que su formulación describe adecuadamente el comportamiento friccionante de materiales intensamente fracturados o granulares (similares al material hundido), asignándoles las siguientes propiedades:

	Densidad	Coefficiente de Poisson	UTS	Angulo de fricción	Cohesión	Módulo de Young
	Kg/m ³	-	Mpa	°	Mpa	Mpa
Roca Fragmentada	1800	0.25	0.05	38	0.05	300

Tabla 5: Propiedades Roca Fragmentada.

3.4 Configuración Software RS2

Los diseños hechos en AutoCAD fueron importados al programa RS2 en formato “.dxf”, que es el tipo de archivo que admite como método de compatibilidad. Para cumplir con esta tarea fue necesario separar las componentes del diseño en capas o “layers”, ya que así el programa podía distinguir si se trataba de excavaciones, etapas, bordes, discontinuidades o nivel freático. En el software, se incorporaron las 7 unidades geotécnicas mencionadas en la Tabla x, utilizando la herramienta “define material properties”. En esta misma herramienta se define el criterio de falla a utilizar, que sería Hoek & Brown generalizado para el macizo rocoso y Mohr-Coulomb para roca fragmentada, en donde se agregaron las características descritas en la tabla antes referida. Para limitar el desplazamiento del modelo se debían aplicar condiciones de borde, las que son capaces de restringir un solo eje (símbolo circular), o ambos ejes (símbolo triangular). Se utilizó la restricción de un eje para los costados y la zona inferior, mientras que la restricción de dos ejes se usó en las esquinas. Al tratarse de un programa de modelación numérica se requiere de una malla base donde realizar los cálculos, en la cual se puede configurar la densidad y la discretización según se requiera. En este caso en particular se aumentó tres veces la densidad de malla y se discretizó una vez, llegando a una distancia entre nodos menor a 2 metros en la zona de interés. El modelo en el programa quedaba de la siguiente manera:

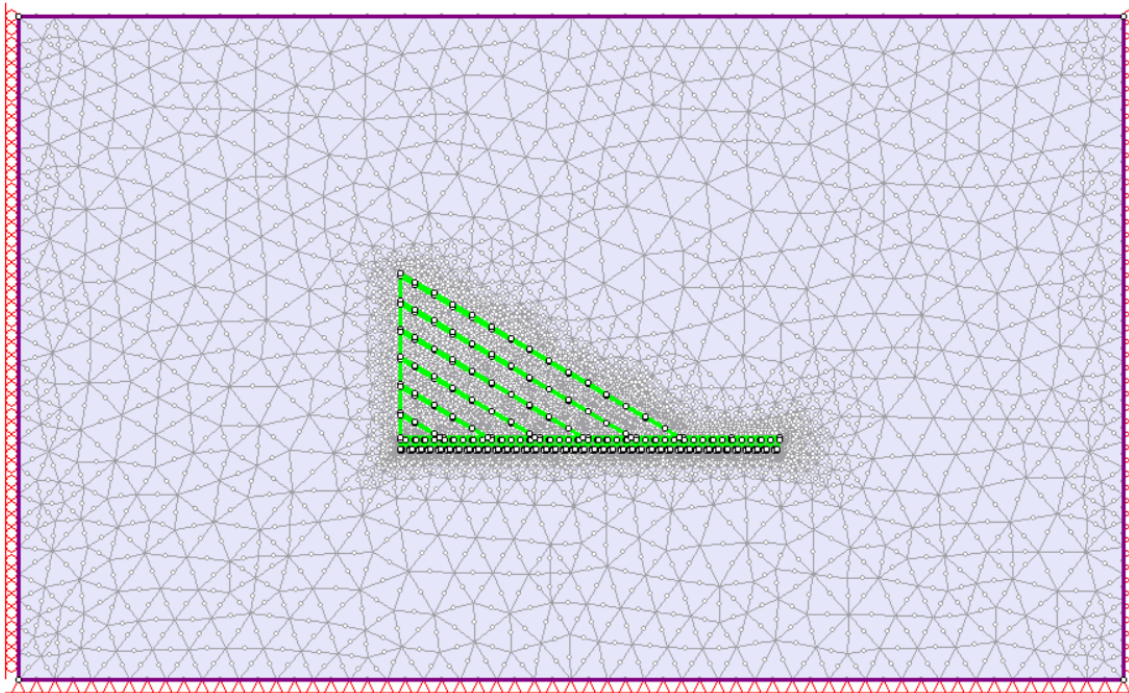


Figura 16: Modelo en RS2.

Por otro lado, se debía configurar el estado tensional del modelo, donde se tenía la opción de aplicar esfuerzos externos o dejar los esfuerzos gravitacionales. En este caso se aplicaron solo los esfuerzos gravitacionales, configurando el ratio K del lugar, tanto de norte a sur y de este a oeste. Al tener un modelo que será evaluado en dos dimensiones, el ratio K de norte a sur se mantuvo constante en 1, mientras que de este a oeste se configuró con valores de ratio 1; 1,5 y 2; buscando representar la condición de esfuerzos para muchos lugares.

3.4.1 Secuencia de Excavación

Utilizando la herramienta “stages” se comenzó a diseñar la secuencia de excavación. Primero se fracturaron las primeras 5 bateas, en donde se pasó de un estado de macizo rocoso intacto a material fragmentado. Como en Panel Caving la extracción de mineral no es uniforme (se extrae menos mineral en los puntos que fueron agregados últimamente) se decidió realizar una configuración que simulara la extracción del mineral por bateas. Como RS2 no es un software creado para analizar entornos dinámicos la conclusión fue eliminar material fragmentado en la parte superior de este, debido a que lo que se extrae en las bateas es el mismo espacio vacío que se genera en la parte superior del material fragmentado. Una vez eliminada la parte superior de los primeros dos puntos de extracción, se procede a liberar el espacio de los siguientes dos puntos. Sin embargo, el espacio vacío en los dos puntos anteriores fue rellenado por material fragmentado. Esto se hace secuencialmente hasta llegar a la última batea abierta. Las bateas se van abriendo de 5 en 5 de manera de llegar hasta las 30 bateas abiertas.

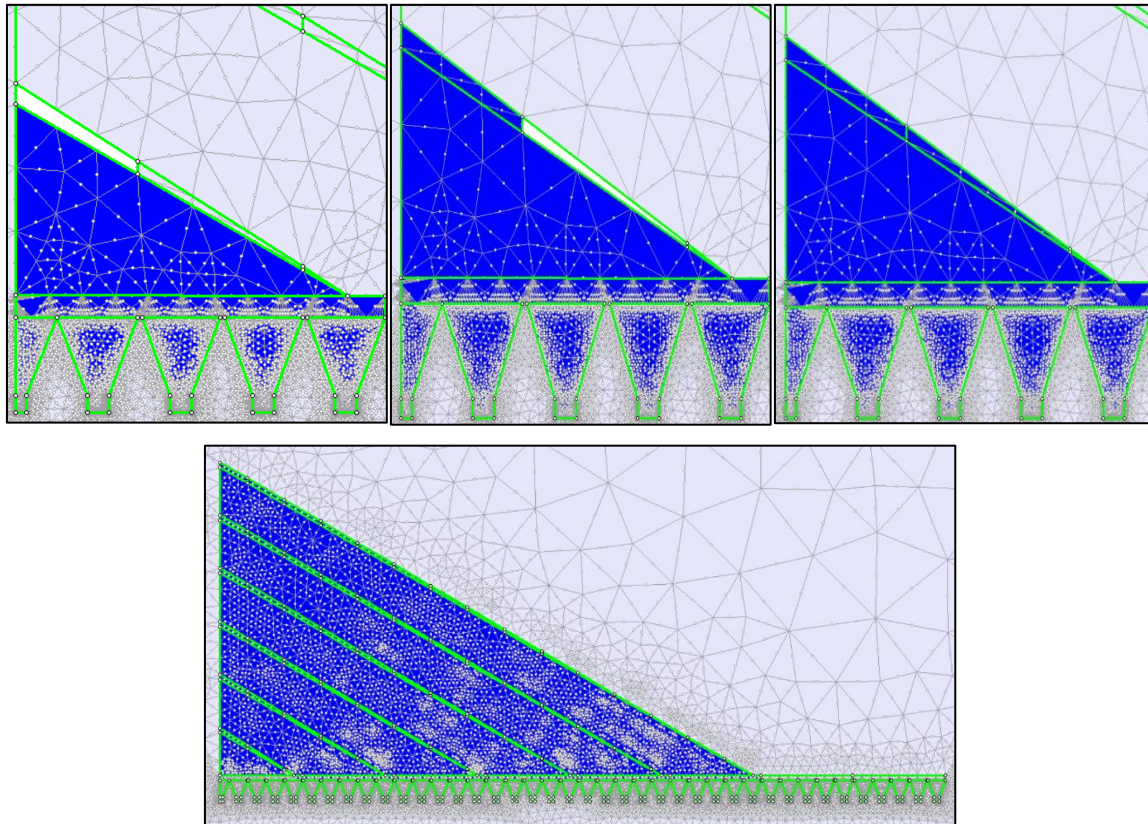


Figura 17: Secuencia de Excavación.

Con el objetivo de cumplir el objetivo general de evaluar la influencia del ángulo de extracción en panel caving, se hizo la misma secuencia de excavación, pero variado el ángulo de extracción con el fin de poder realizar una comparación entre diferentes modelos.

3.5 Simulaciones e Interpretación

Contando todos los modelos realizados se tuvo un total de 84 simulaciones, que se dividieron en 4 ángulos de extracción (20°, 30°, 40° y 50°), demorando de 60 a 90 minutos aproximadamente por cada una. La distribución de las simulaciones antes mencionadas se muestra a continuación:

Variables	Cantidad	Valores que puede tomar las variables
Litologías	7	Lito (1),(2),(3),(4),(5),(6),(7)
Ratio K	3	(K=1); (K=1.5); (K=2)
Ángulo de extracción	4	20°, 30°, 40° Y 50°
Total	84	Combinación de variables

Tabla 6: Cantidad de Simulaciones Realizadas.

El programa cuenta con un complemento llamado “interpret”, el que permite visualizar los resultados de varias maneras, siendo posible observar parámetros interesantes como σ_1 , σ_3 , SF, etc. En este caso se visualizó el comportamiento de σ_1 a lo largo del nivel de hundimiento, nivel de producción y toda la columna que se

encuentra sobre la pila fragmentada (Nivel Sobre Pila). Para lograr esto se incorporaron 600 etiquetas en el nivel de hundimiento y producción y 700 etiquetas para el nivel sobre pila. Para visualizar los resultados, el software tiene la opción de incorporar múltiples etiquetas de datos, acomodando la posición según sea conveniente. Como parte del objetivo es evaluar el comportamiento de σ_1 en función del ángulo de extracción se propuso colocar las etiquetas en el nivel de hundimiento, el nivel de producción y todo lo que se encuentra sobre la pila fragmentada, ya que, estas son las zonas que concentran más esfuerzos inducidos a medida que avanza el caving.

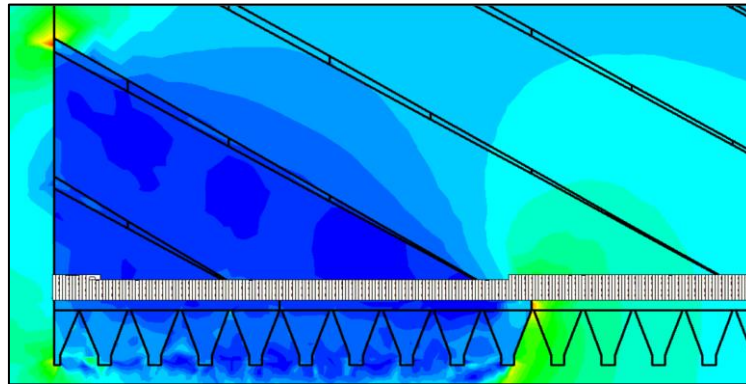


Figura 18: Etiquetas Nivel de Hundimiento.

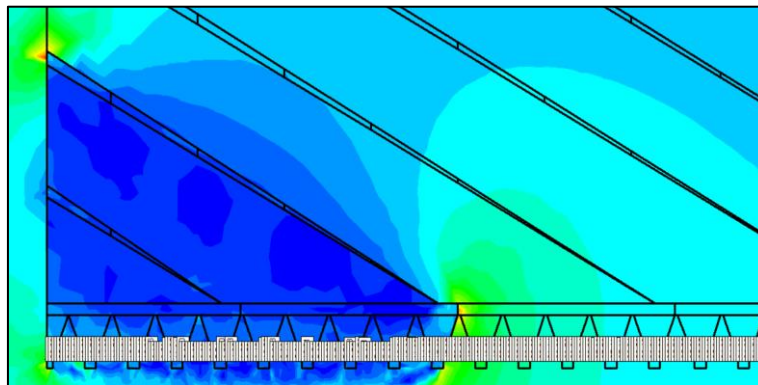


Figura 19: Etiquetas Nivel de Producción.

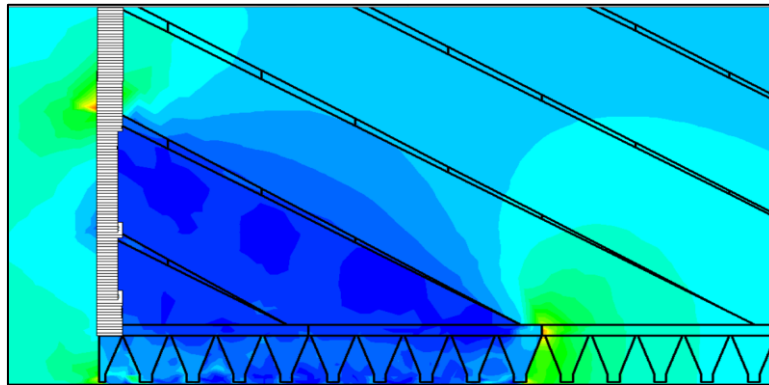


Figure 20: Etiquetas Sobre Material Fragmentado.

3.6 Extracción de Datos

Los datos se extrajeron conforme a la apertura de bateas, con la finalidad de comprender como evoluciona el esfuerzo a medida que avanza el hundimiento. Las etapas se dividen en 5 bateas abiertas, 10 bateas abiertas, 15 bateas abiertas, 20 bateas abiertas, 25 bateas abiertas y 30 bateas abiertas. La cantidad enorme de etiquetas que se usaron para la extracción de datos fue necesaria para comprender de una forma más detallada el comportamiento del esfuerzo principal mayor. Para poder hacer una mejor comparación entre los ángulos se tomó el esfuerzo peak que se genera en cada nivel para cada ángulo.

3.7 Resultados y Análisis

Para lograr un buen análisis se decide establecer un caso base para estudiar el comportamiento del ángulo de extracción. Se define que el caso base tiene un ángulo de extracción igual a 30° , un GSI igual a 70 y con una relación de esfuerzo $K=2$.

Una vez obtenido los resultados se decidió comparar el esfuerzo peak que genera cada ángulo de extracción con el caso base establecido. Luego se compararon los resultados, pero para condiciones iniciales de K distintas ($K=1.5$ Y $K=2$). Finalmente se realizó nuevamente el mismo análisis, pero considerando valores de GSI diferente. Todos los resultados serán presentados en gráficos para poder tener un mejor análisis.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En primera instancia se presenta el comportamiento del esfuerzo principal mayor para el caso base establecido. La finalidad es observar cómo se comporta el esfuerzo principal mayor en el nivel de hundimiento, el nivel de producción y el nivel sobre pila.

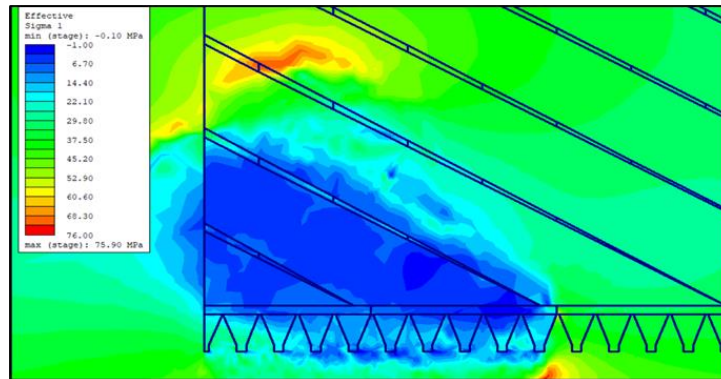


Figura 21: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 30° (Caso Base).

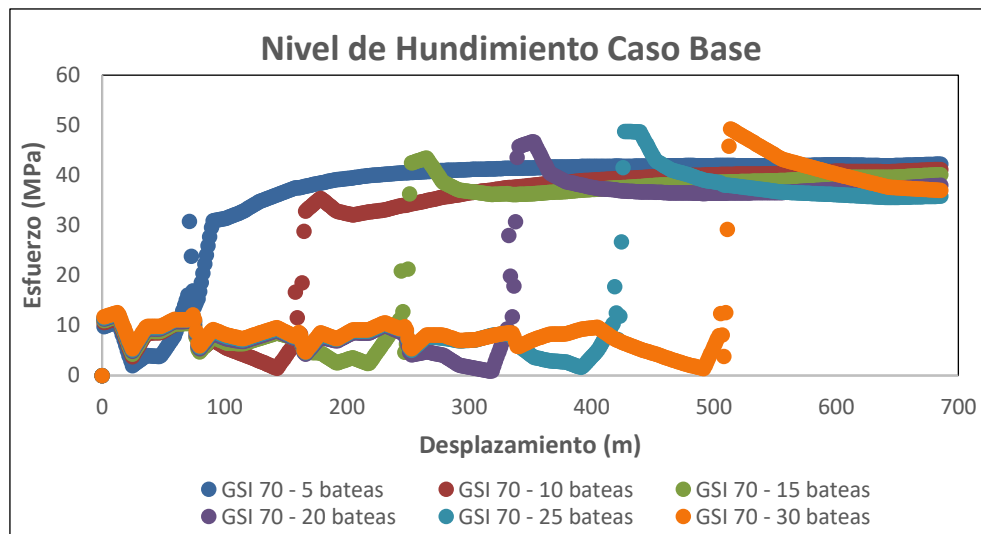


Figure 22: Gráfico Esfuerzo Principal Mayor Nivel de Hundimiento Caso Base.

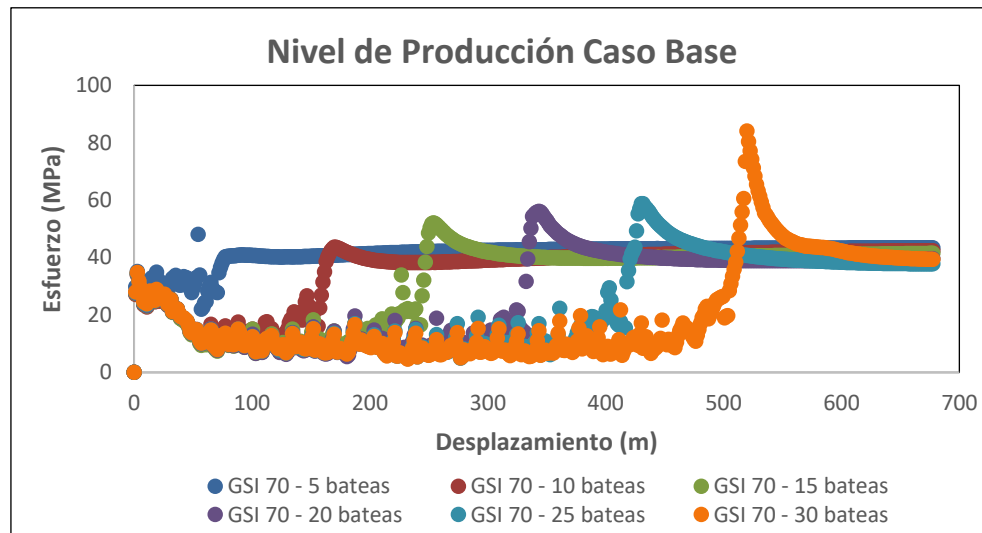


Figure 23: Gráfico Esfuerzo Principal Mayor Nivel de Producción Caso Base.

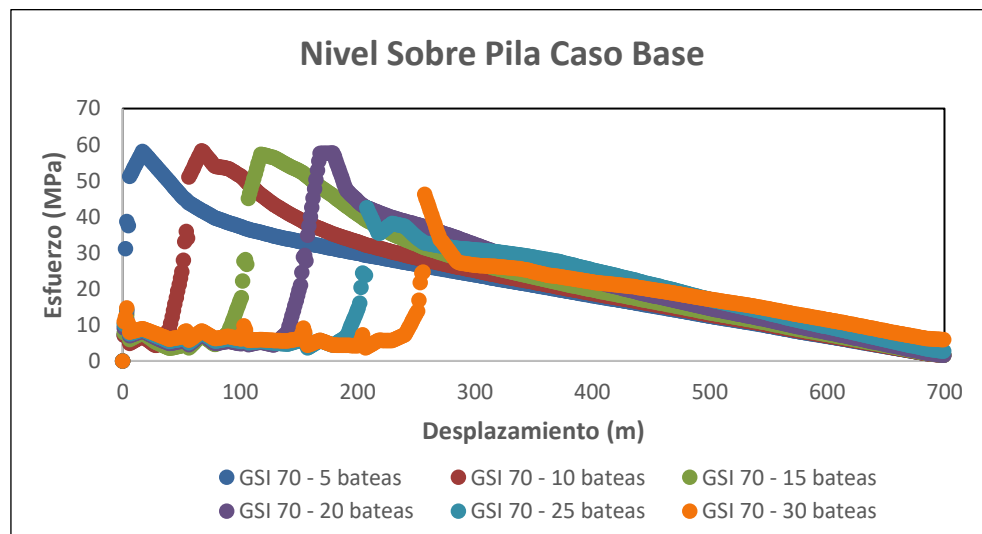


Figure 24: Gráfico Esfuerzo Principal Mayor Nivel de Sobre Pila Caso Base.

Respecto a los resultados obtenidos para los distintos niveles analizados en el caso base, se observa un comportamiento general similar del esfuerzo principal mayor. En una primera etapa, el esfuerzo aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor máximo, para posteriormente disminuir y estabilizarse en un valor aproximadamente constante, tanto en el nivel de Hundimiento como en el nivel de Producción. En el caso del nivel Sobre Pila, el esfuerzo también alcanza un valor máximo; sin embargo, a diferencia de los niveles anteriores, presenta un decaimiento progresivo a medida que aumenta la distancia.

El comportamiento observado en los niveles de Hundimiento y Producción resulta coherente, ya que ambos se encuentran a una profundidad similar, por lo que el esfuerzo tiende a estabilizarse y aproximarse nuevamente a los valores del esfuerzo in situ. Por el contrario, el nivel Sobre Pila presenta una tendencia decreciente del esfuerzo, lo cual puede explicarse por la ubicación de las etiquetas en la parte superior del material fragmentado, cercana a la superficie. En este contexto, a medida que disminuye la profundidad, el esfuerzo principal mayor se reduce, reflejando menor carga de la roca, asociada a niveles más superficiales. Debido al comportamiento del esfuerzo principal, especialmente enfocándonos en el esfuerzo máximo que genera, es que se decide analizar el comportamiento del ángulo de extracción en base al esfuerzo máximo que genera cada ángulo.

4.1 Variación Ángulo de Extracción Caso Base

El caso base establece un GSI igual a 70 y un $K=2$. A continuación se presentan las simulaciones y los resultados obtenidos variando el ángulo de extracción para los distintos niveles estudiados.

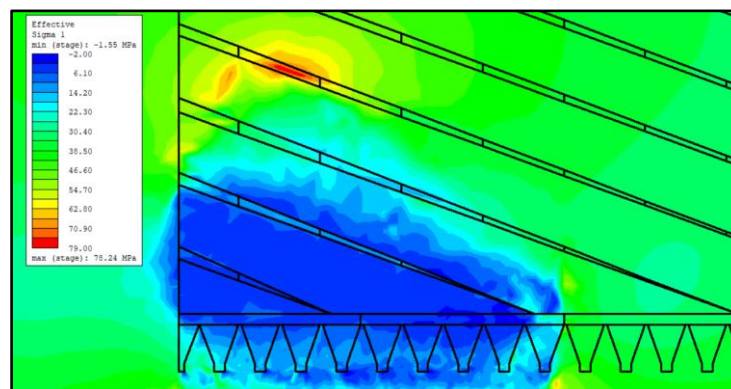


Figura 25: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 20° Caso Base.

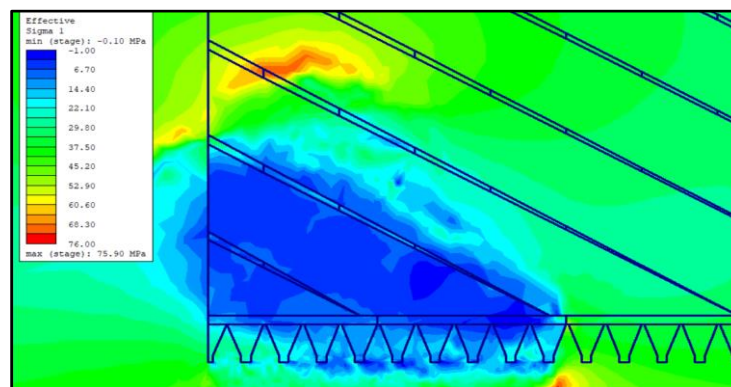


Figura 26: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 30° Caso Base.

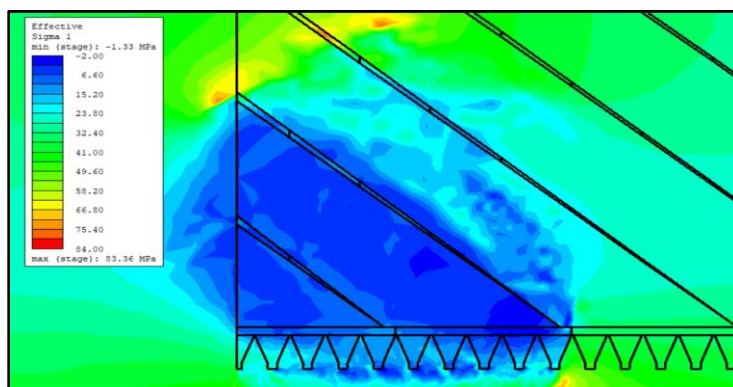


Figura 27: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 40° Caso Base.

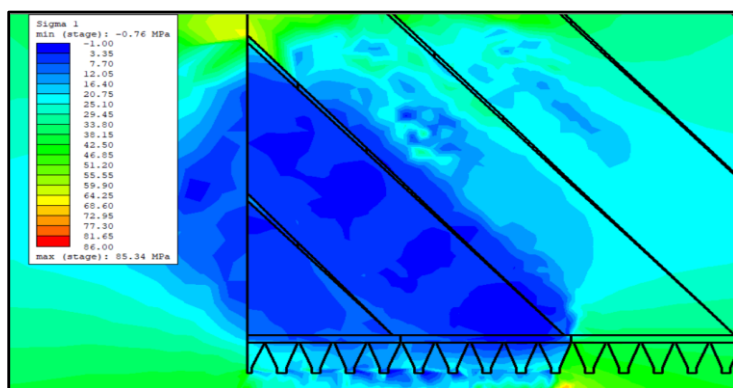


Figura 28: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 50° Caso Base.

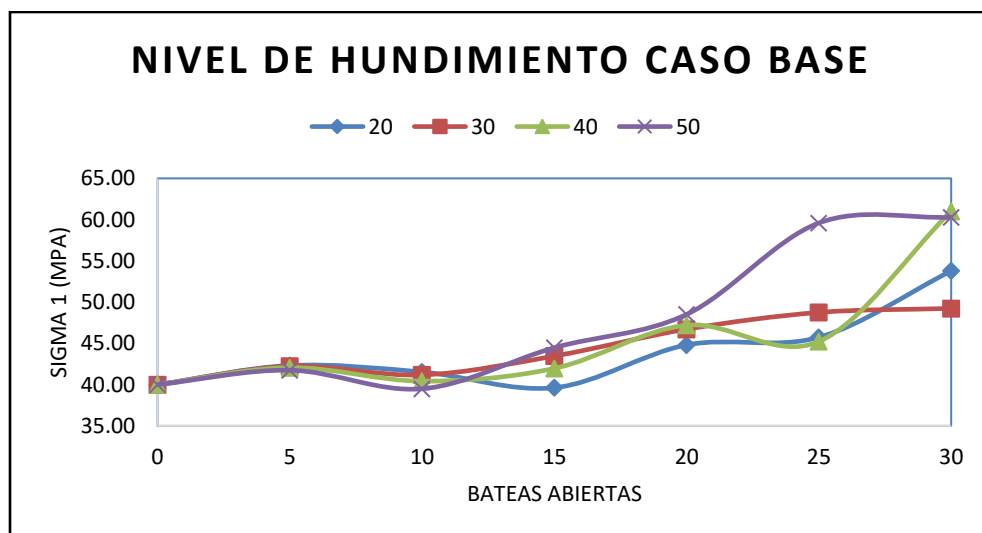


Figura 29: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Hundimiento Caso Base

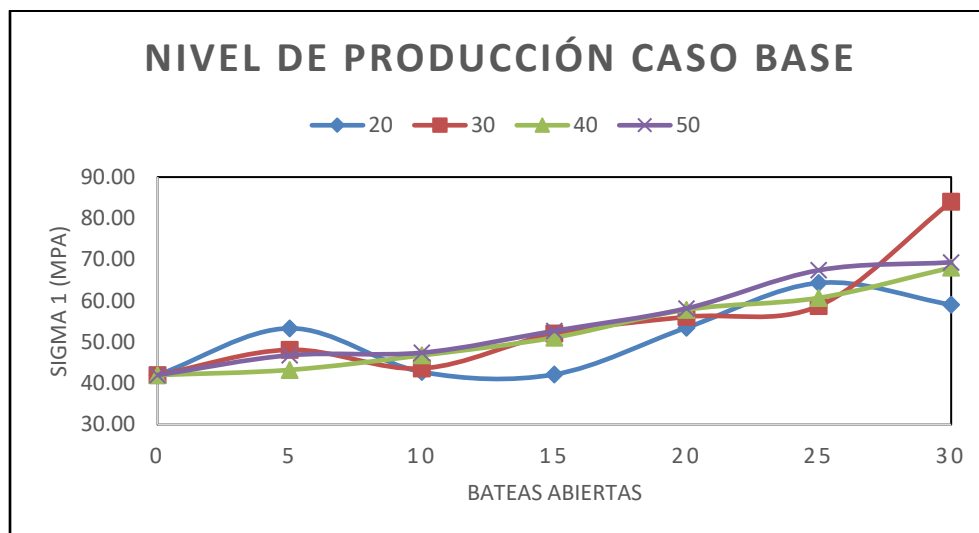


Figura 30: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Hundimiento Caso Base

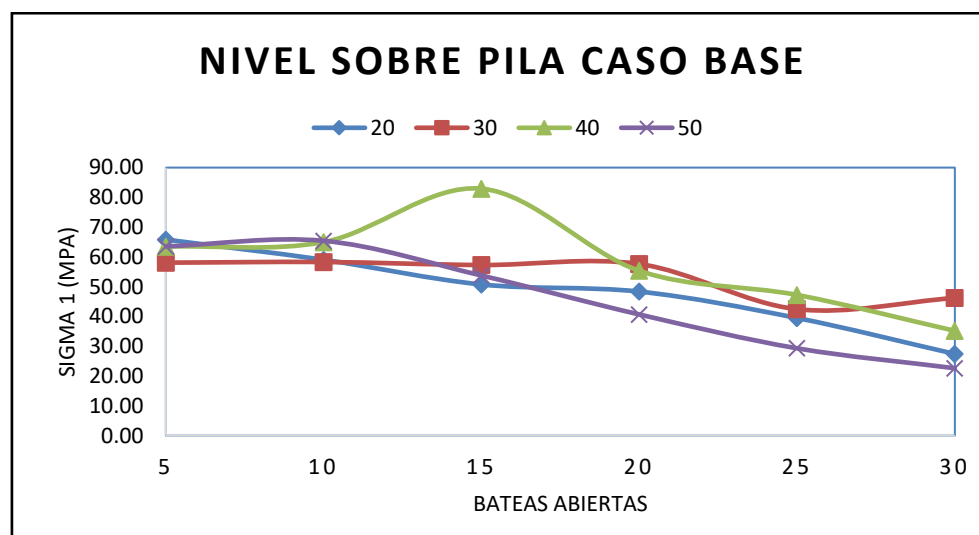


Figura 31: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Hundimiento Caso Base

Para el nivel de Hundimiento el esfuerzo presenta una tendencia creciente a medida que se abren bateas, aunque con pequeñas fluctuaciones intermedias. Entre 0 y 15 bateas las diferencias entre ángulos son menores y los valores se mantienen en torno a 40-45 MPa, lo que indica un comportamiento relativamente estable en etapas tempranas. A partir de 20 bateas se observa una separación más clara entre curvas, especialmente para los ángulos mayores. El ángulo 50° muestra el incremento más marcado, alcanzando cerca de 60 MPa hacia las 30 bateas, seguido por 40°. En cambio, 30° presenta una evolución más controlada y menor variabilidad. Esto indica que la influencia del ángulo se vuelve más relevante en etapas avanzadas del hundimiento.

En el nivel de Producción se genera un comportamiento más fluctuante. Entre 5 y 20 bateas los valores de esfuerzo para los distintos ángulos son relativamente cercanos, lo que sugiere que en esta etapa intermedia la geometría no genera diferencias significativas en la concentración de esfuerzos. Sin embargo, hacia las 25–30 bateas se produce una variación importante. El ángulo de 30° incrementa bruscamente hasta aproximadamente 85 MPa, convirtiéndose en el mayor Peak del modelo. Los ángulos 40° y 50° también aumentan, pero se mantienen en torno a los 70 MPa, mientras que 20° alcanza valores cercanos a 60 MPa.

En el nivel Sobre Pila el comportamiento es diferente. El esfuerzo alcanza un Peak intermedio principalmente marcado por el ángulo de 40° generando un valor de 85 MPa cuando se tienen 15 bateas abiertas, luego tiende a disminuir progresivamente hacia las 30 bateas. En las primeras etapas las curvas son bastante similares, pero luego se observa mayor sensibilidad al ángulo en el tramo medio del avance. Posteriormente, el esfuerzo disminuye en todos los casos, lo que se asocia a la menor profundidad del punto donde se genera el mayor esfuerzo y la reducción del confinamiento.

4.2 Variación Ángulo de Extracción para $K=1.5$

Para este caso se mantiene el valor del GSI, pero se varían las condiciones de esfuerzo in situ, estableciendo un valor de $K=1.5$.

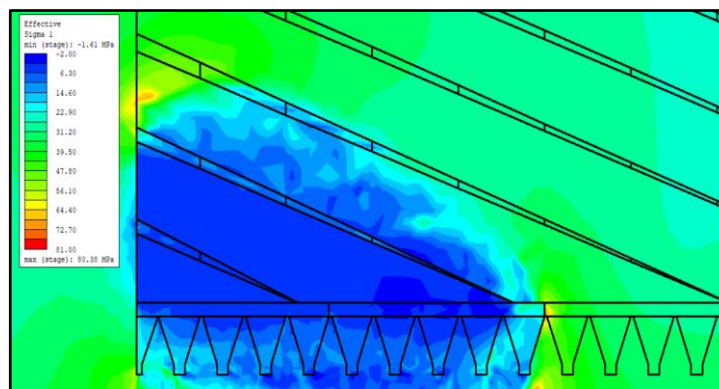


Figure 32: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 20° $K=1.5$.

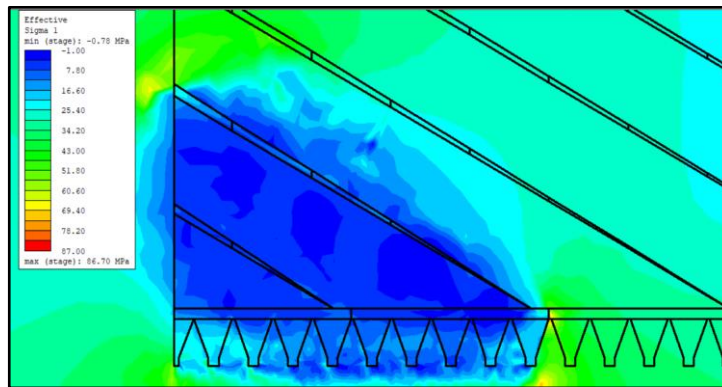


Figure 33: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 30° $K=1.5$.

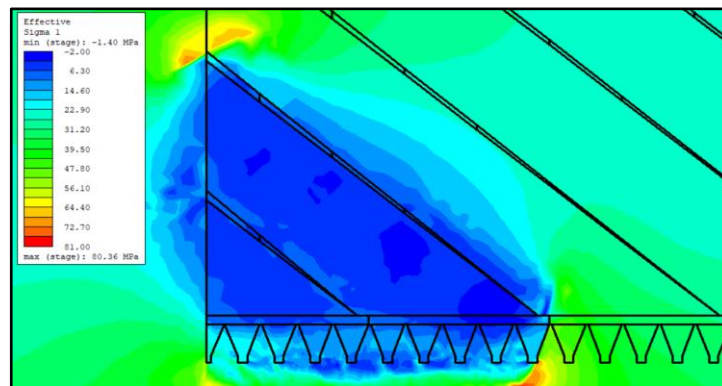


Figure 34: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 40° $K=1.5$.

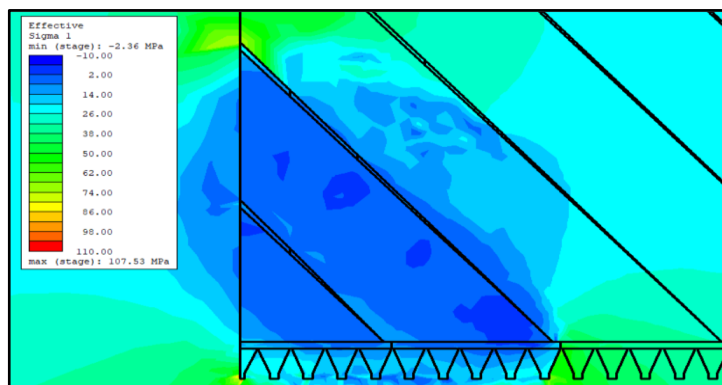


Figure 35: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 50° $K=1.5$.

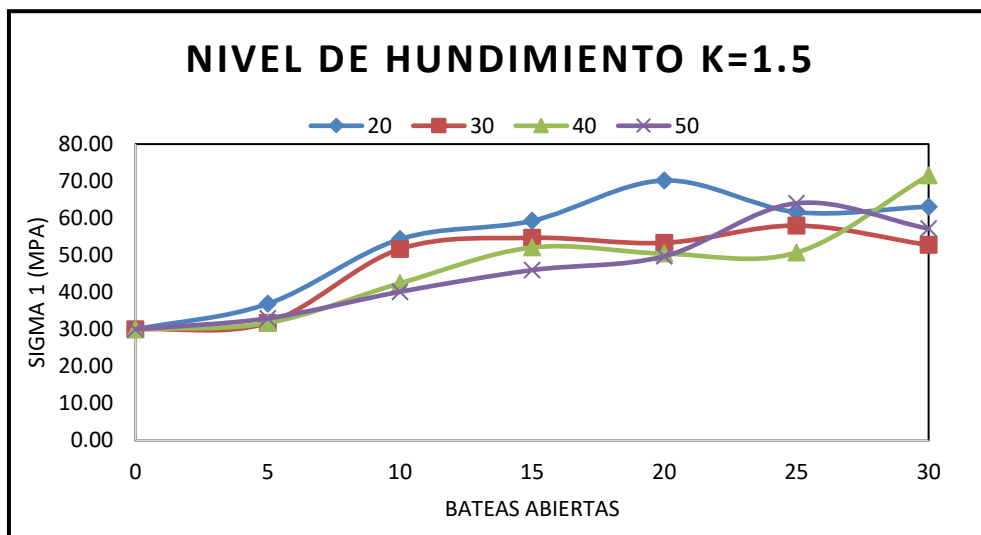


Figure 36 :Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Hundimiento K=1.5.

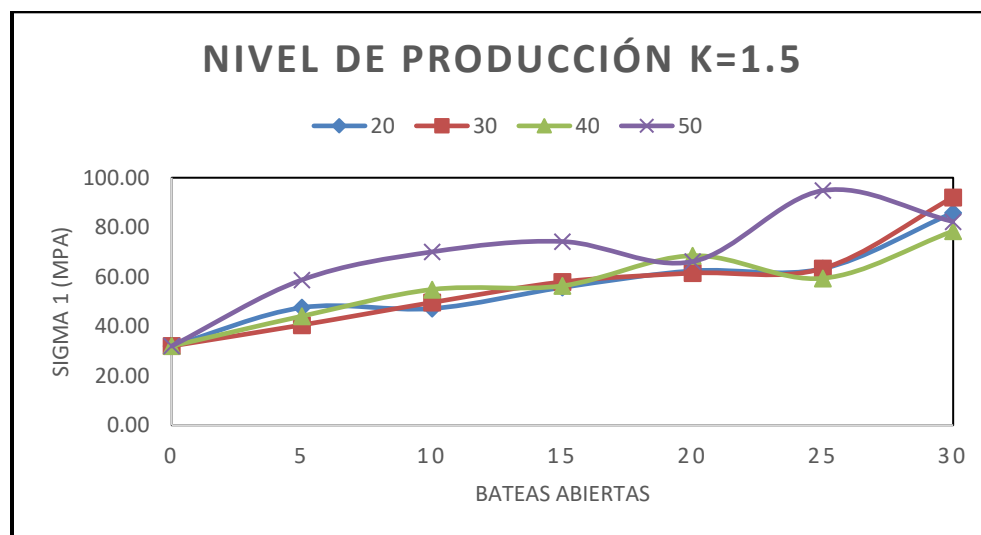


Figure 37: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Producción K=1.5.

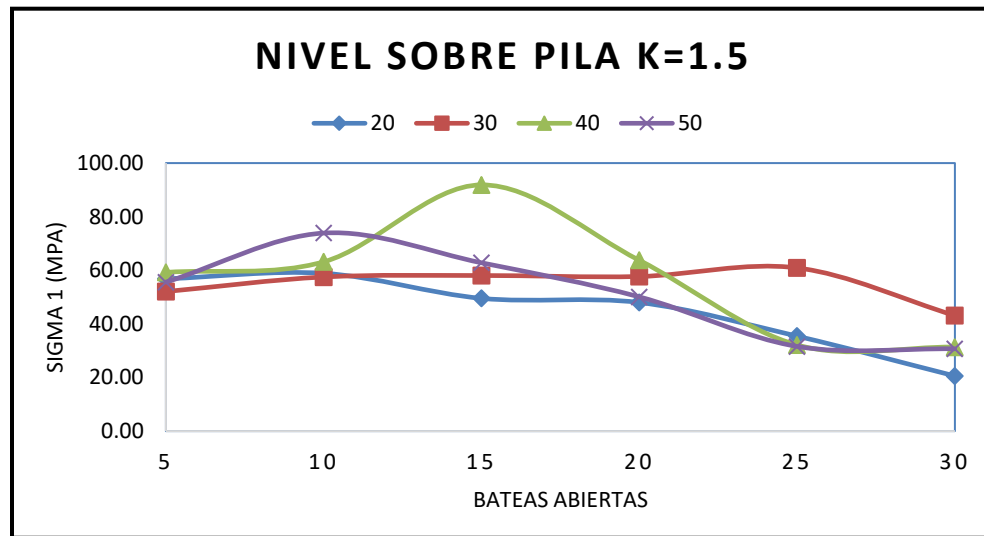


Figure 38: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Sobre Pila K=1.5.

En el nivel de Hundimiento se aprecia que desde las primeras etapas de apertura los ángulos de 20° y 30° tienden a registrar valores de esfuerzo ligeramente superiores al resto. Si bien las diferencias iniciales no son muy grandes, la tendencia es consistente, ambas curvas se ubican por encima de 40° y 50° en los primeros tramos. Lo que sugiere que, en etapas tempranas, estas geometrías generan mayor esfuerzo.

En el nivel de Producción el esfuerzo principal mayor presenta un comportamiento progresivo, pero con variaciones importantes según la etapa de apertura. En las primeras bateas, el ángulo de 50° genera un aumento más marcado del esfuerzo en comparación con los demás, alcanzando valores cercanos a 70 MPa hacia las 10 bateas, mientras que los otros ángulos se mantienen entre 45-55 MPa. Entre 15 y 20 bateas las curvas tienden a acercarse, con valores similares en torno a los 60–70 MPa, lo que indica una respuesta más similar del sistema en esa etapa intermedia. Sin embargo, a partir de 25 bateas aparecen los mayores incrementos. 50° alcanza un peak intermedio cercano a 95 MPa, mientras que a las 30 bateas el mayor esfuerzo lo presenta 30°, con valores también en torno a 90 MPa. Esto demuestra que en este escenario el ángulo más crítico cambia según el momento del avance, y que las mayores concentraciones no se producen de forma constante, sino en etapas avanzadas específicas del desarrollo del panel.

En el nivel Sobre Pila el esfuerzo principal mayor presenta un comportamiento distinto al observado en producción, caracterizado por un Peak intermedio seguido de un decaimiento progresivo. El mayor esfuerzo del nivel se registra alrededor de las 15 bateas para el ángulo 40°, alcanzando aproximadamente 90 MPa, lo que indica una alta sensibilidad del sistema en la etapa media del avance. Sin embargo, a partir de las 20 bateas todos los ángulos muestran una tendencia descendente.

4.3 Variación Ángulo de Extracción K=1

Para este caso se mantiene el valor del GSI, pero se varían las condiciones de esfuerzo in situ, estableciendo un valor de $K=1$.

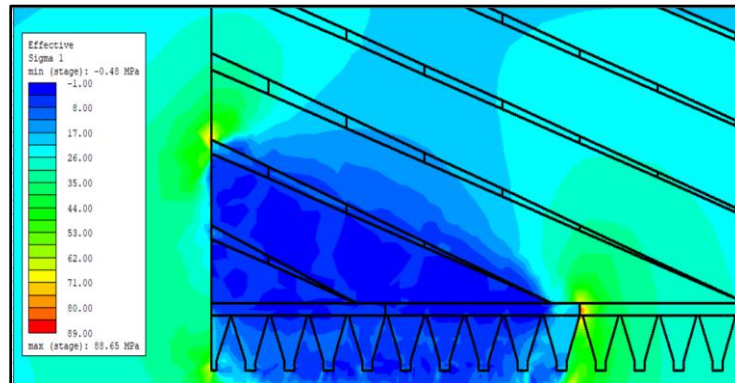


Figura 39: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 20° $K=1$.

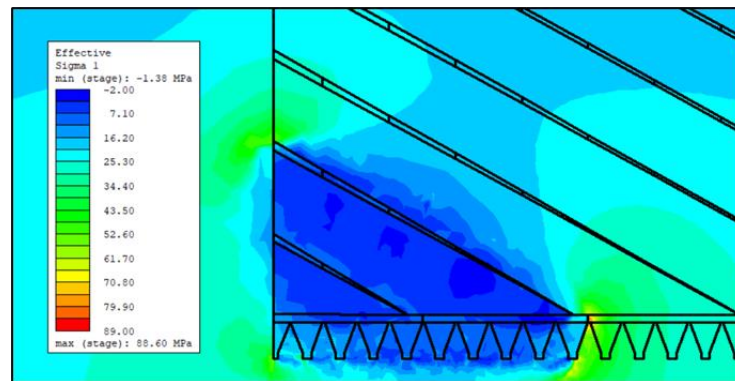


Figura 40: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 30° $K=1$.

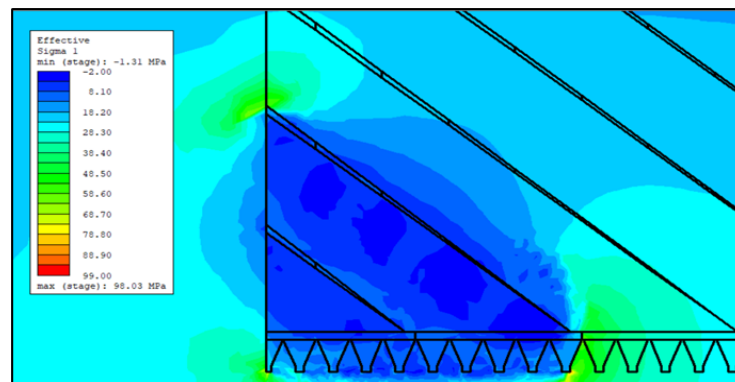


Figure 41: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 30° $K=1$.

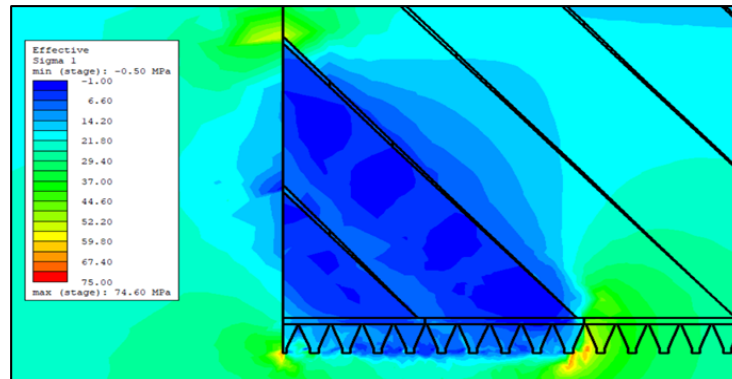


Figure 42: Resultados Simulación Ángulo de Extracción 50° K=1.

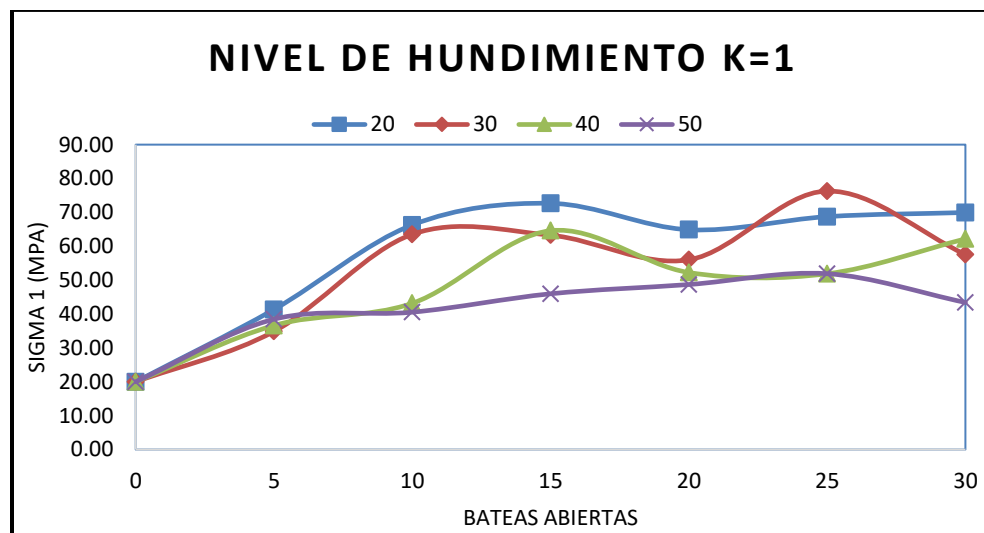


Figure 43: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Hundimiento K=1.

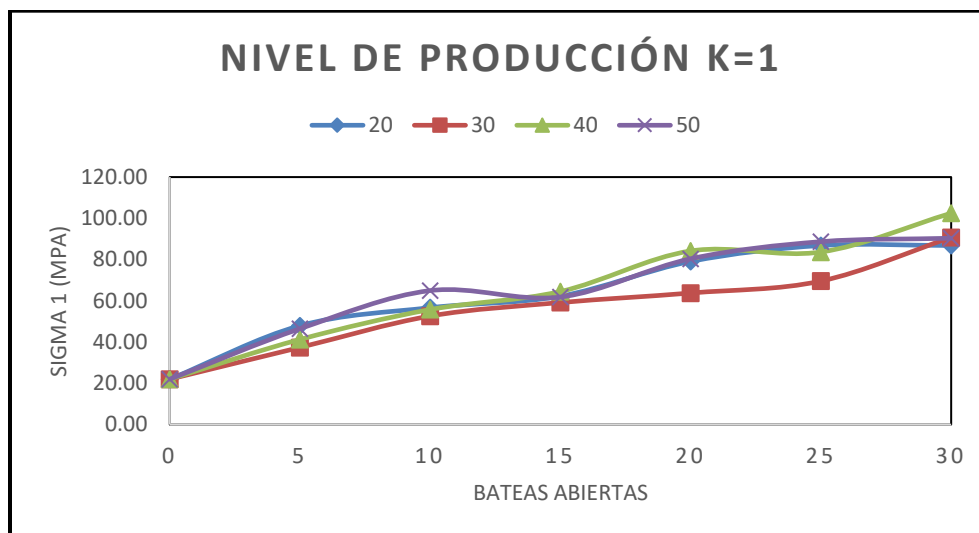


Figure 44: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel de Producción K=1

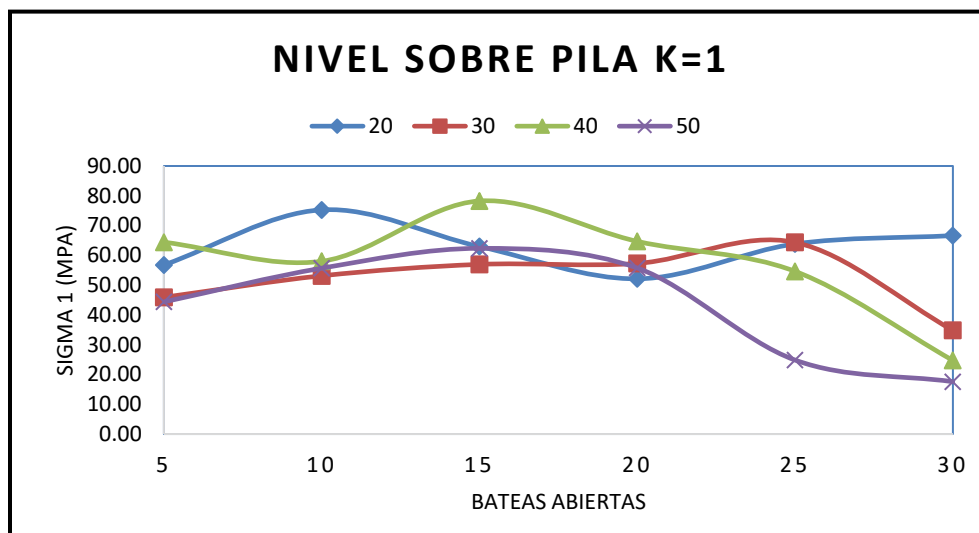


Figure 45: Gráfico Comportamiento Ángulo de Extracción Nivel Sobre Pila K=1.

En el nivel de Hundimiento, el esfuerzo aumenta rápidamente durante las primeras etapas del avance, pasando desde valores cercanos a 20 MPa hasta aproximadamente 60–70 MPa hacia las 10–15 bateas. En este tramo inicial, el ángulo 20° muestra los mayores valores de esfuerzo, alcanzando cerca de 72 MPa alrededor de las 15 bateas. Posteriormente el comportamiento se vuelve más fluctuante: el esfuerzo disminuye levemente hacia las 20 bateas, para luego aumentar nuevamente en algunos ángulos. El ángulo 30° alcanza el mayor peak intermedio del gráfico en torno a 75 MPa cerca de las 25 bateas, mientras que 20° mantiene valores relativamente altos hacia el final. En contraste, el ángulo 50° presenta el

comportamiento más estable y con menores magnitudes de esfuerzo durante gran parte del avance.

En el nivel de producción el comportamiento vuelve a ser el más crítico en términos de magnitud absoluta del esfuerzo. Durante las primeras 10 bateas el esfuerzo aumenta rápidamente desde aproximadamente 20 MPa hasta valores entre 50 y 65 MPa, siendo el ángulo 50° el que presenta el incremento más pronunciado en esta etapa inicial. Posteriormente, entre 10 y 20 bateas, las curvas tienden a acercarse, con valores cercanos a 60–80 MPa, lo que indica una respuesta relativamente similar entre ángulos de extracción. Sin embargo, hacia las 30 bateas se observa el mayor incremento del gráfico, donde el ángulo 40° alcanza el mayor esfuerzo del nivel, cercano a 100 MPa, seguido por 20° y 50° con valores cercanos a 90 MPa, mientras que 30° se mantiene ligeramente por debajo. Esto confirma nuevamente que el nivel de producción concentra los mayores esfuerzos del sistema bajo esta condición.

En el nivel Sobre Pila, el comportamiento vuelve a diferenciarse claramente de los otros niveles. Inicialmente se observan esfuerzos relativamente elevados, con valores entre 55 y 75 MPa en las primeras 10–15 bateas, destacando el ángulo 20° con un peak cercano a 75 MPa alrededor de 10 bateas. Posteriormente, el esfuerzo presenta una tendencia descendente en la mayoría de los ángulos, especialmente en 40° y 50°, que disminuyen significativamente hacia las 30 bateas, alcanzando valores cercanos a 25 MPa y 18 MPa, respectivamente.

4.4 Variación de K

En esta sección se corrobora la influencia del valor de K manteniendo un ángulo de extracción de 30° y la misma calidad de roca (GSI 70). Los resultados obtenidos son los siguientes:

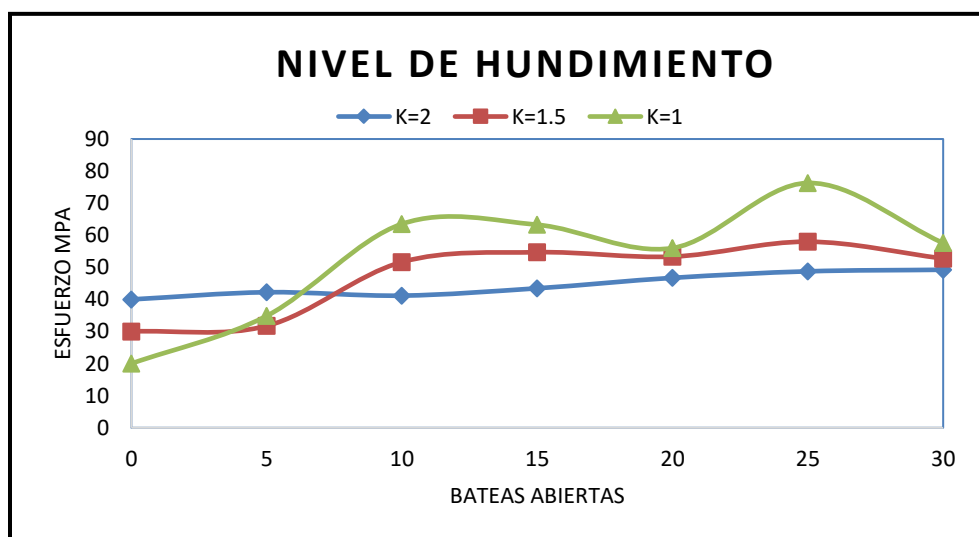


Figura 46: Gráfico Variación de K Nivel de Hundimiento

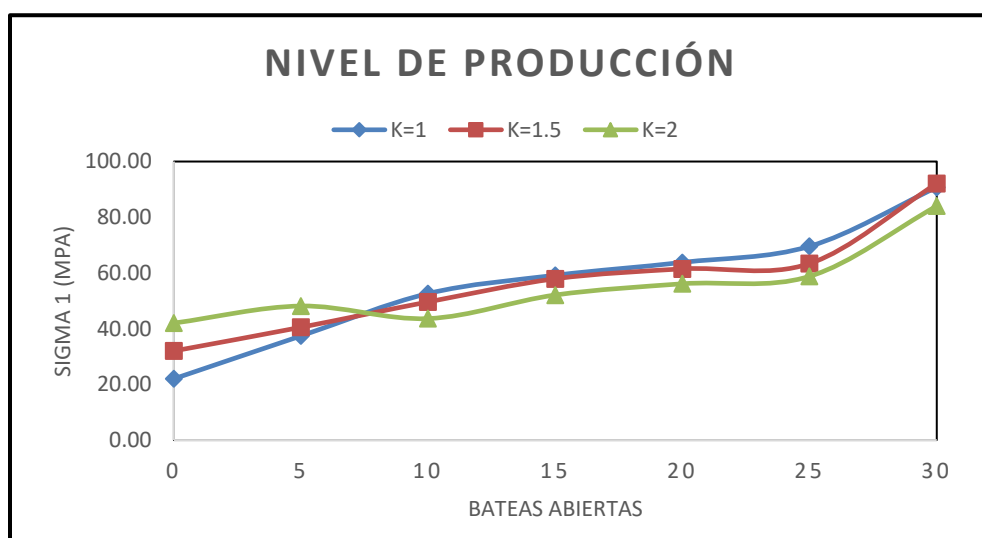


Figura 47: Gráfico Variación de K Nivel de Producción.

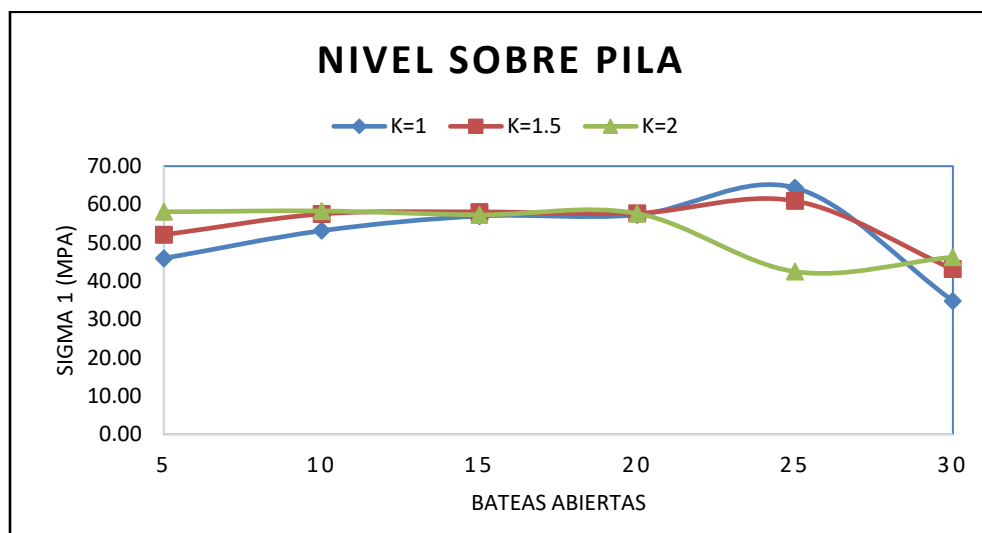


Figure 48: Gráfico Variación de K Nivel Sobre Pila.



En el nivel de Hundimiento se observa que el esfuerzo presenta un incremento general a medida que se abren las bateas, aunque con diferencias claras entre los valores de K . En las primeras etapas del avance el caso $K = 2$ presenta los mayores esfuerzos, con un valor igual a 40 MPa, mientras que $K = 1.5$ se mantiene alrededor de 30 MPa y $K = 1$ comienza con el valor más bajo de 20 MPa. Sin embargo, esta tendencia cambia rápidamente a medida que aumenta la apertura. A partir de 10 bateas, el caso $K = 1$ pasa a generar los mayores esfuerzos del nivel, alcanzando aproximadamente 64 MPa, mientras que $K = 1.5$ llega a valores cercanos a 50 MPa y $K = 2$ se mantiene alrededor de 40 MPa. Hacia etapas avanzadas, el escenario con $K = 1$ continúa dominando el comportamiento del esfuerzo, alcanzando un peak cercano a 76 MPa en 25 bateas, mientras que $K = 1.5$ se mantiene en torno a 58 MPa y $K = 2$ presenta los valores más bajos del conjunto con un valor de 49 MPa. Esto evidencia una separación clara entre los tres escenarios a medida que el hundimiento progresa.

En el nivel de Producción el comportamiento muestra una tendencia de aumento progresivo del esfuerzo para todos los valores de K . En las primeras bateas se observa que $K = 2$ presenta los valores más altos seguido por $K = 1.5$ y finalmente $K = 1$. No obstante, a medida que se abren las bateas las diferencias entre los tres escenarios tienden a reducirse. Entre 10 y 20 bateas los tres casos convergen en un rango similar de esfuerzos, aproximadamente entre 50 y 63 MPa, mostrando una respuesta bastante parecida en esta etapa del avance. Hacia las 30 bateas los esfuerzos aumentan nuevamente y los valores se mantienen relativamente cercanos entre sí. El mayor valor corresponde a $K = 1.5$, con aproximadamente 92 MPa, seguido por $K = 1$ con cerca de 90 MPa, mientras que $K = 2$ alcanza valores cercanos a 85 MPa.

En el nivel Sobre Pila el comportamiento es distinto al observado en los otros niveles. Inicialmente los tres escenarios presentan valores relativamente similares, entre 45 y 58 MPa, con $K = 2$ mostrando los mayores esfuerzos en las primeras mediciones. Entre 10 y 20 bateas los valores se mantienen cercanos entre sí, con esfuerzos alrededor de 56–58 MPa, lo que indica un comportamiento bastante homogéneo del sistema en esta etapa. Sin embargo, hacia 25 bateas se observa una mayor separación entre los escenarios: el caso $K = 1$ alcanza el mayor esfuerzo con 65 MPa, mientras que $K = 1.5$ se mantiene alrededor de 60 MPa y $K = 2$ presenta una disminución importante hasta aproximadamente 42 MPa. Finalmente, hacia las 30 bateas los esfuerzos disminuyen en todos los casos, siendo $K = 1$ el que presenta la caída más pronunciada.

4.5 Variación Ángulo de Extracción Calidad de Roca Buena

En esta sección se presentan los resultados obtenidos cuando se varía el ángulo de extracción con una calidad de roca igual a 85 GSI y manteniendo un valor de $K=2$.

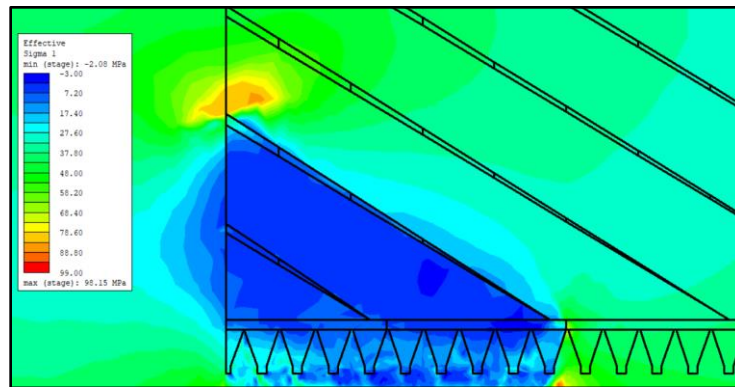


Figura 49: Resultados simulación ángulo de extracción 30° GSI 85.

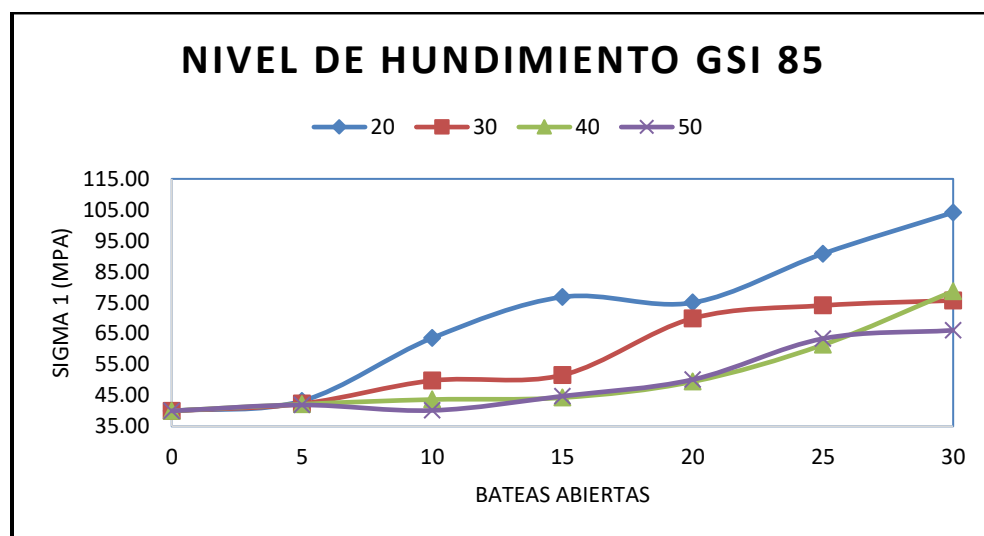


Figura 50: Gráfico Variación Ángulo de extracción Nivel de Hundimiento GSI 85.

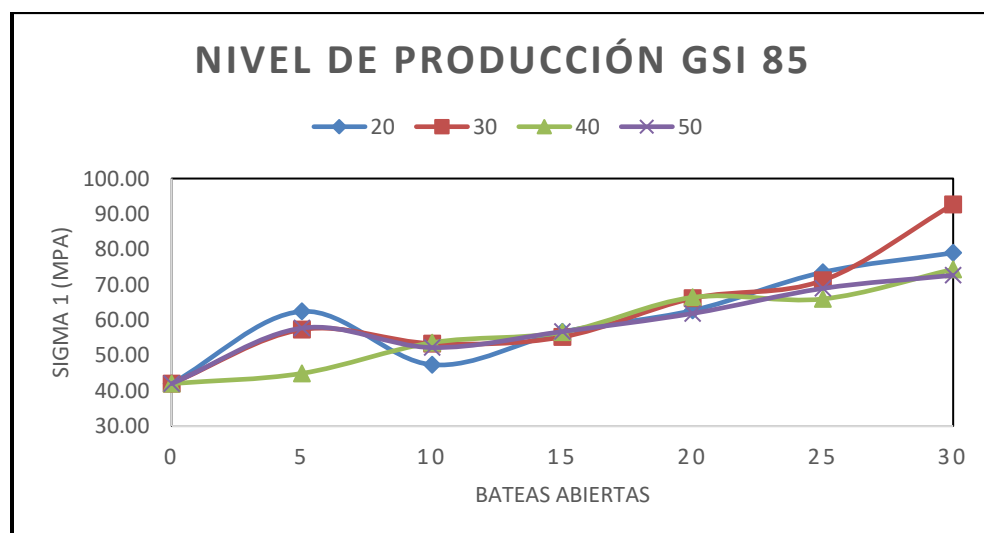


Figura 51: Gráfico Variación Ángulo de Extracción Nivel de Producción GSI 85.

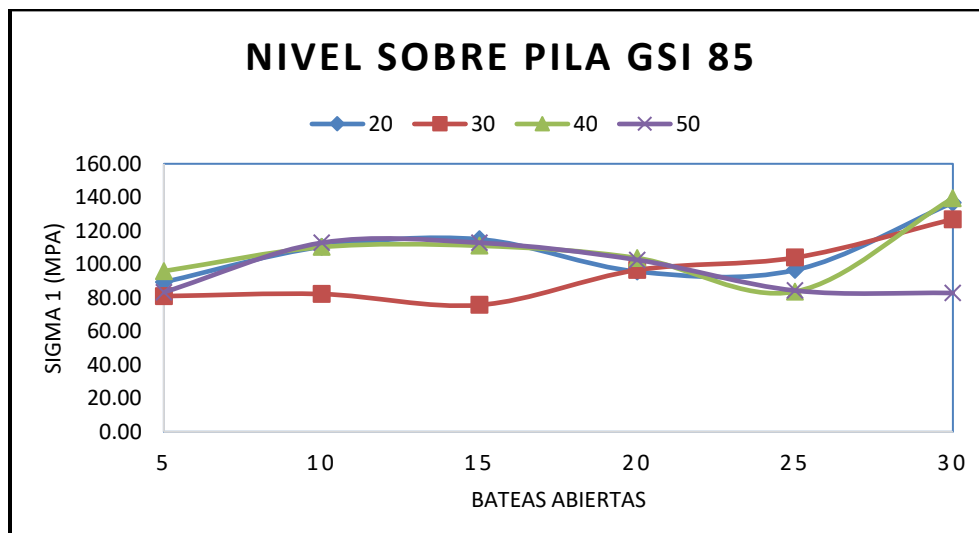


Figura 52: Gráfico Variación Ángulo de Extracción Nivel Sobre Pila GSI 85.

En el nivel de hundimiento se observa que el esfuerzo aumenta progresivamente a medida que se incrementa la apertura de bateas, aunque con diferencias claras entre los distintos ángulos de extracción. Durante las primeras etapas del proceso todos los ángulos presentan valores muy similares. Sin embargo, a partir de 10 bateas comienza a observarse una clara diferenciación entre los escenarios. El ángulo de 20° presenta un aumento considerable del esfuerzo, alcanzando aproximadamente 60 MPa, mientras que los demás ángulos se mantienen en valores cercanos a 40–50 MPa. Esta tendencia se mantiene y se acentúa hacia las etapas finales del avance del panel. El máximo esfuerzo del nivel se registra para el ángulo de 20°, el cual alcanza aproximadamente 100 MPa en 30 bateas, superando ampliamente al resto de los ángulos. Por otro lado, los ángulos 30°, 40° y 50° presentan un comportamiento relativamente similar entre sí, alcanzando valores finales cercanos a 70–80 MPa.

En el nivel de producción el comportamiento del esfuerzo también muestra un aumento progresivo a medida que se abren las bateas, aunque con un patrón algo más fluctuante en las primeras etapas. En las primeras bateas el ángulo de 20° presenta un incremento importante, alcanzando aproximadamente 60 MPa, mientras que los demás ángulos se mantienen entre 45 y 60 MPa. Posteriormente, alrededor de 10 bateas, el esfuerzo del ángulo de 20° disminuye levemente, mostrando un comportamiento más fluctuante que el resto. Entre 15 y 25 bateas los cuatro escenarios presentan valores relativamente cercanos, situándose entre 55 y 70 MPa, lo que indica que en esta etapa las diferencias entre ángulos no son muy marcadas. Hacia el final del proceso se observa nuevamente una separación entre los escenarios. El ángulo de 30° alcanza el mayor esfuerzo del nivel, con aproximadamente 90 MPa, mientras que el ángulo de 20° llega a cerca de 80 MPa, y los ángulos 40° y 50° se mantienen alrededor de 70–75 MPa.

El nivel sobre pila presenta el comportamiento más variable de los tres niveles analizados. En las primeras etapas los esfuerzos son considerablemente mayores que en los otros niveles, con valores que oscilan entre 80 y 115 MPa dependiendo del ángulo de extracción. Durante estas etapas iniciales, los ángulos 20°, 40° y 50° presentan valores relativamente similares, alcanzando esfuerzos cercanos a 110–115 MPa, mientras que el ángulo 30° se mantiene ligeramente por debajo, con valores entre 75 y 80 MPa.

Posteriormente, entre 20 y 25 bateas, se observa una disminución del esfuerzo para algunos escenarios. En particular, los ángulos 40° y 50° muestran una caída significativa, llegando a valores cercanos a 80–85 MPa. El ángulo 20° también presenta una leve reducción antes de volver a incrementarse hacia las etapas finales. Finalmente, en 30 bateas se observa un aumento importante del esfuerzo para algunos ángulos. El ángulo de 40° alcanza el mayor valor del nivel, con aproximadamente 140 MPa, seguido por el ángulo de 20° con valores cercanos a 135 MPa. En contraste, el ángulo de 50° presenta uno de los valores más bajos del gráfico, cercano a 80 MPa.

4.6 Variación Ángulo de Extracción Calida de Roca Mala

En esta sección se presentan los resultados obtenidos cuando se varía el ángulo de extracción con una calidad de roca igual a 55 GSI y manteniendo un valor de $K=2$.

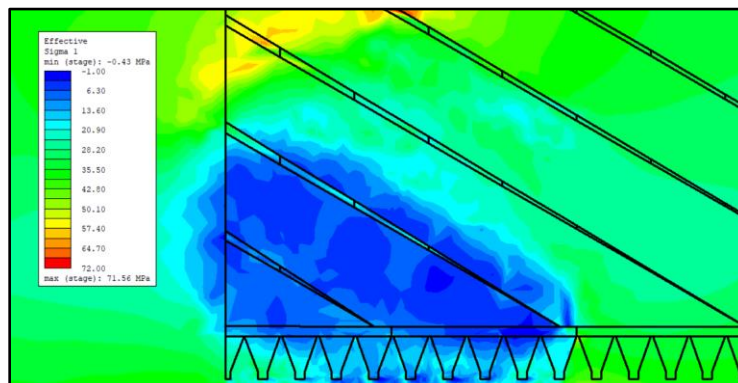


Figure 53: Resultados simulación ángulo de extracción 30° GSI 55.

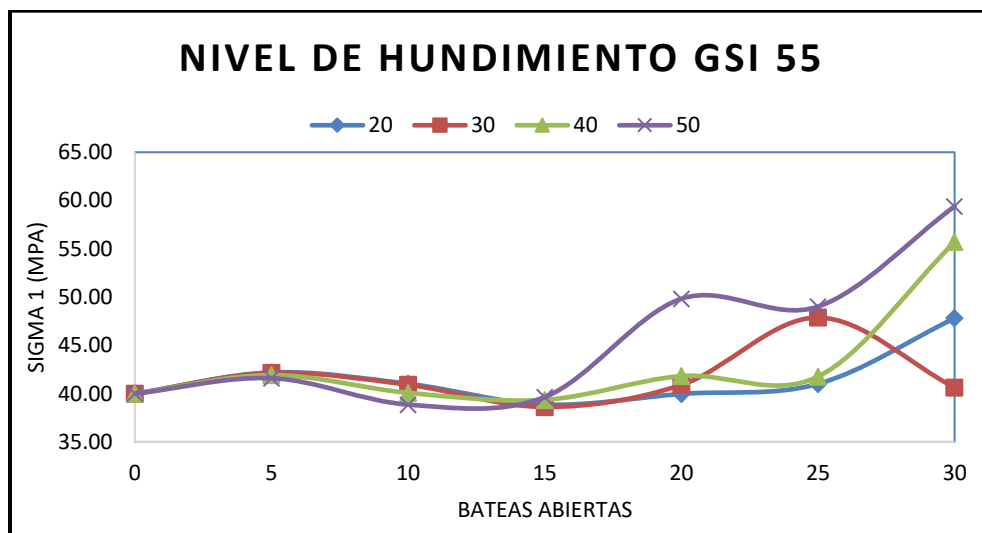


Figure 54: Gráfico Variación Ángulo de extracción Nivel de Hundimiento GSI 55.

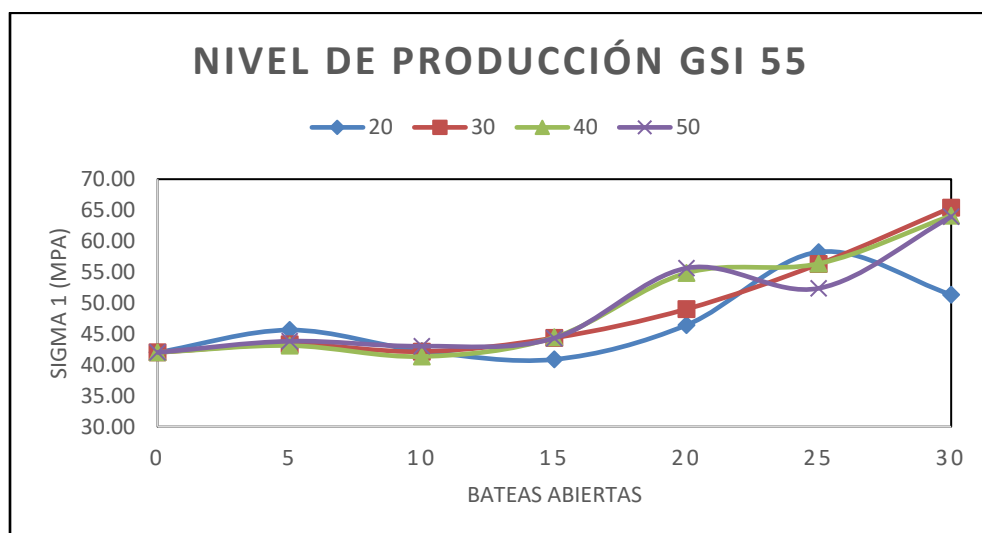


Figure 55: Gráfico Variación Ángulo de extracción Nivel de Producción GSI 55.

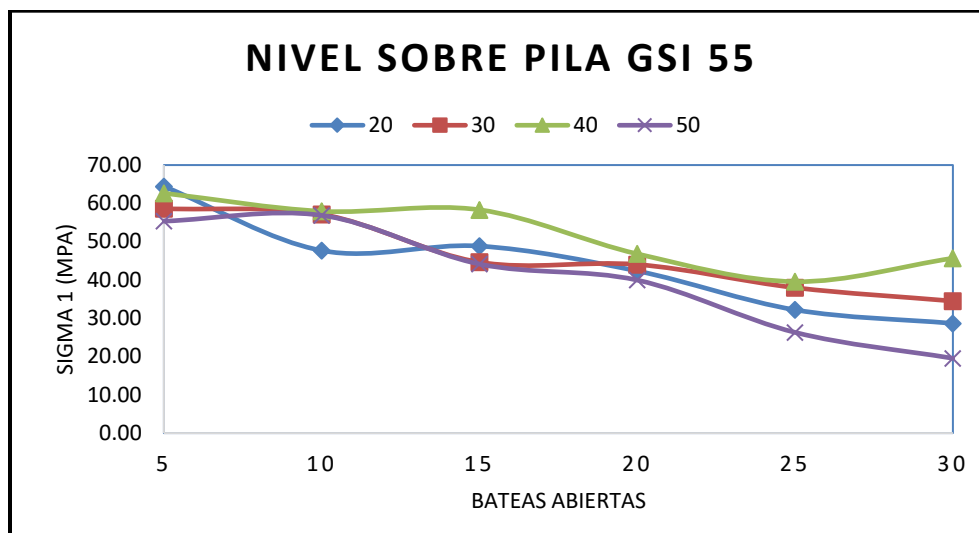


Figura 56: Gráfico Variación Ángulo de extracción Nivel de Producción GSI 55.

En el nivel de hundimiento se observa que durante las primeras etapas del proceso los cuatro ángulos presentan un comportamiento muy similar. Entre 0 y 10 bateas los valores de esfuerzo se mantienen cercanos a 40–45 MPa, lo que indica que en las condiciones iniciales la influencia del ángulo de extracción aún es limitada. A partir de aproximadamente 15 bateas comienzan a observarse diferencias entre los escenarios. El ángulo de 50° presenta un incremento más marcado del esfuerzo, alcanzando cerca de 50 MPa en 20 bateas, mientras que los demás ángulos se mantienen alrededor de 40–45 MPa. Posteriormente, hacia 25 bateas, los ángulos 30° y 50° muestran valores ligeramente superiores al resto, situándose cerca de 45–50 MPa, mientras que los ángulos 20° y 40° permanecen próximos a 40 MPa. Finalmente, en 30 bateas, el mayor esfuerzo corresponde al ángulo de 50°, que alcanza aproximadamente 60 MPa, seguido por el ángulo de 40° con valores cercanos a 55 MPa. En contraste, los ángulos 20° y 30° presentan valores menores, alrededor de 45 MPa y 40 MPa, respectivamente.

En el nivel de producción, inicialmente, todos los ángulos parten con valores similares cercanos a 40 MPa, manteniéndose relativamente estables durante las primeras etapas del proceso. Entre 5 y 15 bateas los esfuerzos se mantienen dentro de un rango acotado entre 40 y 45 MPa, lo que indica un comportamiento bastante uniforme entre los distintos ángulos. Sin embargo, a partir de 20 bateas comienza a observarse un aumento progresivo del esfuerzo para todos los escenarios. Hacia 25 bateas, los ángulos 20° y 40° presentan valores ligeramente superiores, cercanos a 55–60 MPa, mientras que los ángulos 30° y 50° se mantienen alrededor de 50–55 MPa. Finalmente, en 30 bateas se alcanza el mayor nivel de esfuerzo del gráfico, donde los ángulos 30° y 40° presentan los valores más altos, cercanos a 65 MPa, seguidos por el ángulo de 50° con aproximadamente 64 MPa aproximadamente, mientras que el ángulo de 20° presenta un valor menor cercano a 51 MPa.



Para el nivel Sobre Pila en las primeras etapas los esfuerzos se sitúan entre 55 y 65 MPa, siendo relativamente similares para todos los ángulos. Sin embargo, entre 10 y 20 bateas se observa una reducción progresiva del esfuerzo, alcanzando valores cercanos a 40–45 MPa, donde el ángulo de 40° tiende a presentar valores levemente superiores. Posteriormente, hacia 25 bateas la disminución se acentúa, destacando el caso del ángulo de 50°, que presenta una caída significativa. Finalmente, en 30 bateas se registran los menores esfuerzos del nivel, con valores cercanos a 20 MPa para el ángulo de 50°, mientras que el ángulo de 40° muestra un leve aumento.

4.7 Variación GSI

En esta sección se presentan los resultados que se obtuvieron al variar solo el valor del GSI para un ángulo de extracción de 30° y un K igual a 2. Los resultados obtenidos son los siguientes:

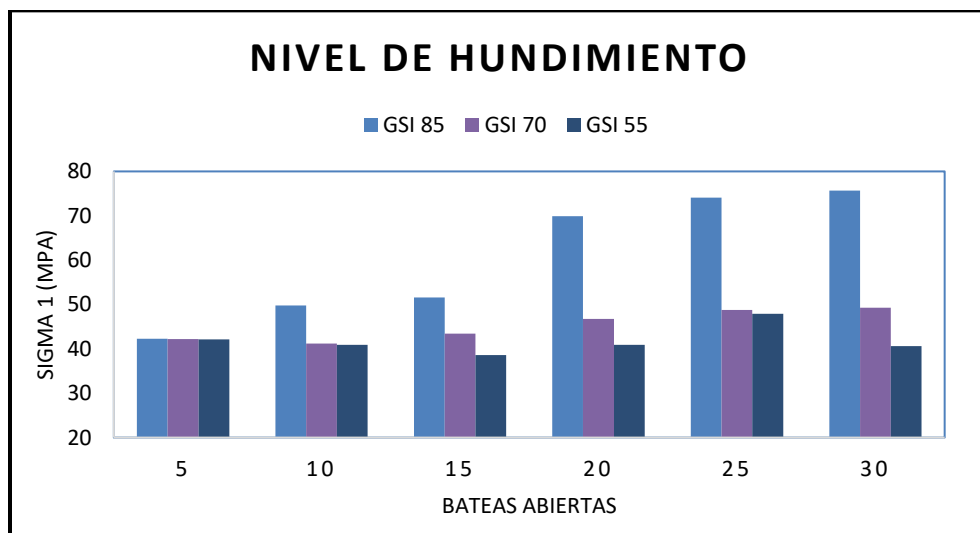


Figura 57: Gráfico Variación GSI Nivel de Hundimiento K=2.

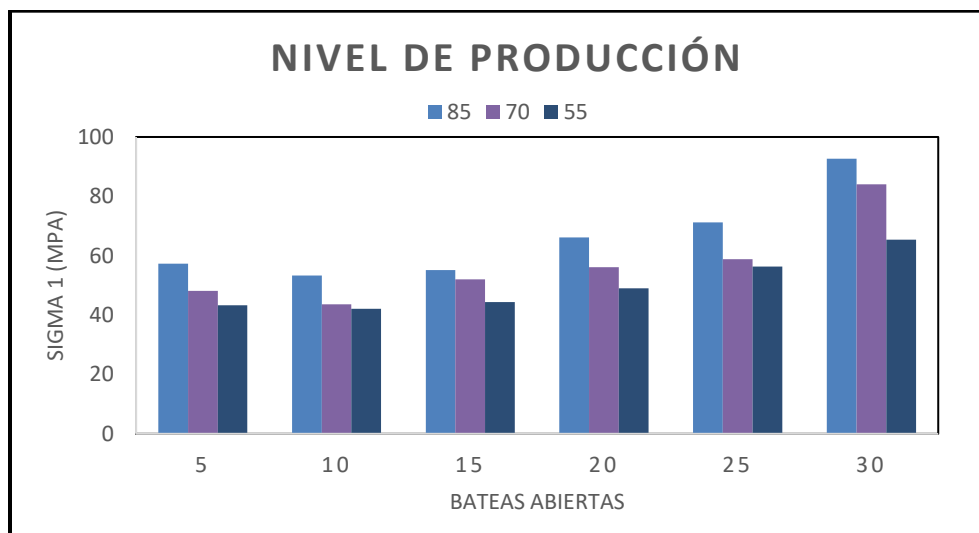


Figura 58: Gráfico Variación GSI Nivel de Producción K=2

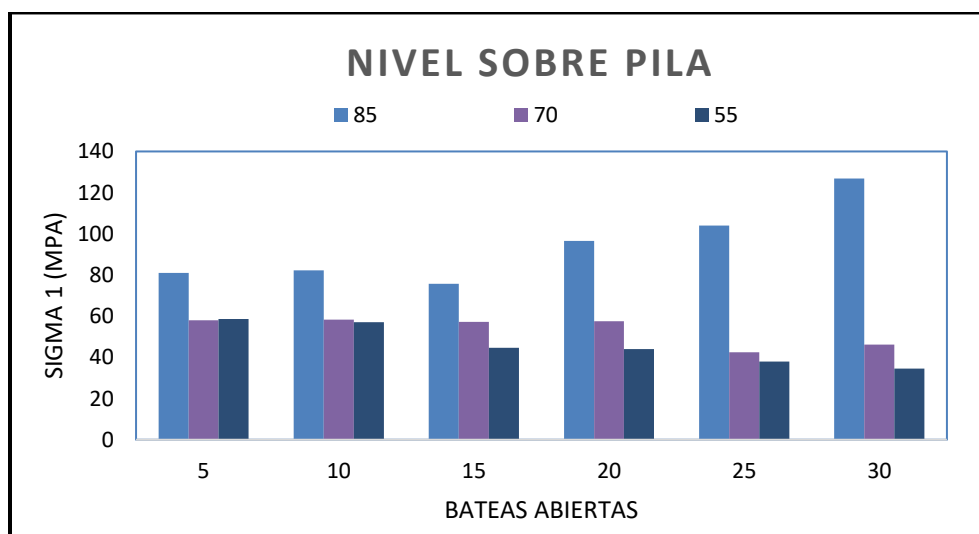


Figure 59: Gráfico Variación GSI Nivel Sobre Pila K=2

En el nivel de hundimiento se observa que las diferencias entre los valores de GSI son pequeñas en las primeras etapas del proceso, con esfuerzos cercanos a 42 MPa en 5 bateas. Sin embargo, a medida que aumenta la apertura de bateas las diferencias se hacen más evidentes. El escenario con GSI 85 presenta un incremento progresivo del esfuerzo, alcanzando aproximadamente 75 MPa en 30 bateas, mientras que GSI 70 se mantiene cercano a 49 MPa y GSI 55 alrededor de 40 MPa.

En el nivel de producción también se observa un aumento progresivo del esfuerzo con la apertura de bateas. Desde las primeras etapas el escenario GSI 85 presenta los mayores valores, seguido por GSI 70 y finalmente GSI 55. Esta tendencia se mantiene durante todo el proceso, alcanzando en 30 bateas aproximadamente 92 MPa para GSI 85, 84 MPa para GSI 70 y 65 MPa para un GSI 55.



El nivel sobre pila presenta las mayores magnitudes de esfuerzo del modelo y diferencias más marcadas entre los valores de GSI. El escenario GSI 85 muestra un aumento progresivo del esfuerzo con el avance de las bateas, alcanzando cerca de 125 MPa en 30 bateas. En contraste, los casos GSI 70 y GSI 55 presentan una tendencia general de disminución del esfuerzo, llegando aproximadamente a 45 MPa y 35 MPa, respectivamente. Esto evidencia que la calidad del macizo rocoso influye fuertemente en la magnitud de los esfuerzos en este nivel.

5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

5.1 Influencia Ángulo de Extracción

Los resultados muestran que el ángulo de extracción influye principalmente en la forma en que se redistribuyen los esfuerzos entre los niveles de hundimiento y producción. En general, los ángulos menores 20° y 30° tienden a generar mayores concentraciones de esfuerzo en el nivel de hundimiento, especialmente a medida que aumenta la apertura de bateas. Esto sugiere que ángulos más bajos favorecen una transferencia más directa de cargas hacia el frente del panel, concentrando los esfuerzos en esta zona. Por el contrario, los ángulos mayores tienden a reducir las concentraciones de esfuerzo en el nivel de hundimiento, pero en varios escenarios generan valores mayores en el nivel de producción, lo que indica una redistribución de cargas hacia niveles inferiores del sistema.

En el nivel Sobre Pila, los esfuerzos tienden a disminuir con el avance del proceso. Este comportamiento se explica principalmente por la menor profundidad efectiva y la pérdida progresiva de confinamiento asociada al desarrollo del hundimiento. En este nivel, se observó que ángulos menores generan mayor esfuerzo en la mayoría de los casos, mientras que, ángulos mayores generan menor esfuerzo a medida que se avanza en el frente. Esto se podría interpretar como ángulos mayores favorecen a no generar un sobreesfuerzo sobre el cave back. Sin embargo, al extraer más rápido tengo una redistribución mas abrupta del esfuerzo principal por lo que con el software utilizado es difícil observar la redistribución de esfuerzos en base a la velocidad de extracción

En conjunto, los resultados indican que el ángulo de extracción no sólo modifica la magnitud del esfuerzo, sino también el nivel donde éste se concentra, generando un equilibrio geomecánico entre hundimiento, producción y Sobre Pila.

5.2 Influencia Condiciones de Esfuerzos Iniciales (K)

El análisis de los distintos escenarios de K muestra que el estado de esfuerzos iniciales influye directamente en la magnitud de los esfuerzos inducidos durante el proceso de extracción. En términos generales, los resultados evidencian que valores menores de K generan mayores concentraciones de esfuerzo en el sistema, particularmente en los niveles de hundimiento y producción. Este comportamiento se observa de



manera consistente en varios escenarios, donde los casos $K = 1$ y $K = 1.5$ presentan esfuerzos superiores en comparación con el escenario $K = 2$. Esto sugiere que condiciones de menor confinamiento horizontal favorecen la concentración de esfuerzos alrededor del frente de extracción. Además, en los escenarios con valores menores de K se observa que la influencia del ángulo de extracción se vuelve más evidente, especialmente en el nivel de hundimiento, donde los ángulos menores amplifican las concentraciones de esfuerzo. Esto confirma que la geometría del panel interactúa directamente con el campo de esfuerzos iniciales para definir la redistribución de cargas durante el hundimiento.

5.3 Influencia GSI

Los resultados también muestran que la calidad del macizo rocoso tiene una influencia significativa en la magnitud de los esfuerzos desarrollados. En general, los escenarios con GSI más altos presentan mayores valores de esfuerzo en comparación con aquellos con GSI menores. Este comportamiento se observa en todos los niveles, donde, el escenario GSI 85 genera los mayores valores de esfuerzo. Esto puede explicarse porque un macizo rocoso más competente posee mayor rigidez y capacidad de transmitir esfuerzos, favoreciendo la acumulación de tensiones. Por el contrario, en macizos con GSI menores los valores de esfuerzo tienden a ser más bajos y las diferencias entre ángulos se reducen. Esto sugiere que macizos más fracturados o deformables tienden a disipar parte de las tensiones mediante deformación o fracturamiento, reduciendo la concentración de esfuerzos inducidos por la geometría del panel.

5.4 Discusión y Conclusión General

Los resultados evidencian que el ángulo de extracción modifica la distribución de esfuerzos entre los distintos niveles del sistema. En general, ángulos menores tienden a concentrar mayores esfuerzos en el nivel de hundimiento, mientras que ángulos mayores tienden a trasladar parte de estas concentraciones hacia el nivel de producción, lo que coincide con estudios de control geométrico del caving en minas como El Teniente (Cornejo & Pardo, 2014; Cornejo, Pinochet & Caviedes, 2016).

Por otro lado, los resultados evidencian que valores menores del coeficiente K generan mayores concentraciones de esfuerzo inducido. Esto puede explicarse considerando que valores menores de K se asocian generalmente a mayores profundidades, donde el esfuerzo vertical aumenta y tiende a igualarse con el esfuerzo horizontal. En estas condiciones, el mayor confinamiento favorece el desarrollo de concentraciones de esfuerzo alrededor de las excavaciones. Estudios empíricos indican que el valor de K depende de la profundidad y de factores geológicos como la composición de la roca y la tectónica regional (Brown & Hoek, 1978; Sen & Sadagah, 2002), lo que permite interpretar que los escenarios con K más bajos representan condiciones de mayor profundidad y, por tanto, mayores esfuerzos in situ.

En conjunto, los resultados muestran que el comportamiento geomecánico del sistema está controlado por

la interacción entre la geometría del panel, el estado de esfuerzos iniciales y la calidad del macizo rocoso, donde el ángulo de extracción influye principalmente en la redistribución de los esfuerzos, mientras que las condiciones geomecánicas del macizo determinan la magnitud de las concentraciones generadas durante el proceso de explotación.

6 ANEXOS

A. Anexos A: Tabulación de Parámetros

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS			
From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR
		Very rough, fresh unweathered surfaces	Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	Smooth, moderately weathered and altered surfaces	Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY			
DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES					
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A
		80			N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	70			
		60			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	50			
		40			
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	30			
		20			
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A		10

Tabla 7: Valores GSI según condiciones del macizo. (Hoek y brown 2002)

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	D = 0
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass.	D = 0
	Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	D = 0.5 No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	D = 0.8
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	D = 0.7 Good blasting D = 1.0 Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal.	D = 1.0 Production blasting
	In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	D = 0.7 Mechanical excavation

Tabla 8: Factor D según estado del macizo. Extraída de Hoek et al., (2002).



Rock type	Class	Group	Texture		
			Coarse	Medium	Fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone (19)	Siltstone (9)
	Non-clastic	Organic	Coal (8-21)		
		Carbonate	Breccia (20)	Limestone (8-10)	
METAMORPHIC	Non-foliated		Marble (9)	Hornfels (19)	Quartzite (24)
	Slightly foliated		Migmatite (30)	Amphibolite (25-31)	Mylonites (6)
	Foliated		Gneiss (33)	Schists (4-8)	Phyllites (10)
IGNEOUS	Light		Granite (33)		Rhyolite (16)
			Granodiorite (30)		Dacite (17)
	Dark		Gabbro (27)	Dolerite (19)	Basalt (17)
		Extrusive pyroclastic	Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)

Tabla 9: Valor del μ_i según tipo de roca. Extraída de (Carranza-Torres & Fairhurst, 2000).

B. Anexos B: Tabla de Resultados

Máximos 20° K=1						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	42.65	68.97	85.29	85.02	102.72	92.06
80	42.23	68.42	85.09	84.93	97.37	88.96
75	42.29	67.79	77.58	84.16	79.49	76.94
70	41.35	66.29	72.68	64.88	68.75	69.97
65	40.95	61.23	52.23	59.48	54.56	63.28
60	38.96	47.43	48.80	54.89	53.18	58.42
55	38.60	45.51	46.83	49.73	52.00	53.32

Tabla 10: Resultados nivel de hundimiento 20° K=1.

Máximos 20° K=1						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	42.32	48.35	59.79	66.58	72.65	75.23
80	48.23	47.83	59.83	66.40	72.20	75.41
75	45.06	47.64	59.64	64.77	69.60	71.51
70	38.33	47.94	56.68	62.25	79.09	86.82
65	37.06	47.68	54.06	61.00	78.76	85.01
60	35.60	46.32	51.82	57.70	76.10	75.09
55	35.51	46.16	51.07	54.11	63.28	72.23

Tabla 11: Resultados Nivel de Producción 20° K=1

Máximos K=1 20°						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	67.21	95.77	94.48	116.31	79.65	88.80
80	60.21	83.32	94.03	102.90	78.77	79.66
75	59.20	85.64	80.67	63.06	66.80	76.80
70	56.78	75.27	62.95	52.11	63.83	66.63
65	49.30	64.63	50.75	52.82	56.56	24.29
60	51.35	52.31	54.46	52.08	44.48	22.38
55	48.47	51.58	47.72	49.53	36.44	23.38

Tabla 12: Resultados Nivel Sobre Pila 20° K=1

Máximos 20° K=1.5						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	41.08	65.10	80.93	79.98	96.63	114.74
80	41.26	64.96	79.95	80.06	96.78	96.38
75	38.19	61.26	69.11	78.83	71.48	70.05
70	36.88	54.32	59.28	70.17	61.63	63.11
65	33.55	52.89	47.90	55.19	56.22	58.11
60	33.55	49.39	46.09	54.02	49.37	58.28
55	32.87	40.58	45.44	50.31	48.38	55.57

Tabla 13: Resultados Nivel de Hundimiento 20° K=1.5

Máximos 20° K=1.5						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	58.62	48.94	59.66	66.67	72.39	77.61
80	51.23	49.03	57.62	65.59	71.92	80.41
75	47.74	48.33	57.41	64.81	69.70	72.65
70	47.51	47.14	55.67	62.38	63.28	85.84
65	43.11	46.36	55.14	58.55	63.55	64.62
60	40.33	45.15	52.27	56.33	59.45	63.79
55	37.07	42.32	47.93	53.58	59.70	60.20

Tabla 14: Resultados Nivel de Producción 20° K=1.5

Máximos 20° K=1.5						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	60.20	80.67	91.63	84.22	95.18	81.58
80	61.59	68.57	90.46	87.66	87.09	92.40
75	56.05	66.67	65.14	74.27	77.48	77.43
70	56.83	58.88	49.54	47.99	35.43	20.58
65	46.77	57.77	47.28	40.47	33.03	23.77
60	47.29	45.71	45.13	41.69	35.06	20.12
55	48.48	46.10	44.00	39.79	34.18	24.05

Tabla 15: Resultados Nivel Sobre Pila 20° K=1.5

Máximos 20° K=2						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	43.21	63.56	76.82	74.98	90.80	104.14
80	43.03	41.58	72.13	73.86	91.97	106.43
75	42.97	41.61	43.71	55.03	47.65	63.95
70	42.32	41.53	39.63	44.82	45.74	53.78
65	42.27	41.25	39.37	47.69	46.25	50.47
60	42.25	41.23	39.29	46.05	41.91	50.25
55	42.20	41.02	38.87	39.97	41.01	47.81

Tabla 16: Resultados Nivel de Hundimiento 20° K=2

Máximos 20° K=2						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	62.41	47.34	56.62	62.69	73.50	78.97
80	53.35	44.12	53.12	66.89	72.11	78.61
75	54.96	42.97	49.91	57.71	55.21	64.20
70	53.34	42.75	42.16	53.50	64.33	59.06
65	50.22	42.47	45.54	54.80	62.91	59.15
60	47.49	42.44	43.09	50.10	62.00	60.44
55	45.62	42.23	40.88	46.43	58.23	51.35

Tabla 17: Resultados Nivel de Producción 20° K=2

Máximos 20° K=2						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	89.36	110.44	114.92	95.65	96.58	136.77
80	67.21	58.40	99.71	101.62	114.82	105.07
75	66.64	59.23	80.10	60.10	35.97	28.19
70	65.82	59.04	50.75	48.36	39.50	27.43
65	64.36	51.02	49.55	45.49	38.18	32.31
60	61.66	49.02	49.68	40.98	35.45	27.05
55	64.42	47.67	48.84	42.33	32.19	28.64



Tabla 18: Resultados Nivel Sobre Pila 20° K=2

Máximos 30° K=1						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	37.82	65.25	74.81	80.85	92.60	75.41
80	37.99	65.37	74.84	69.11	92.11	76.13
75	37.20	63.37	62.00	56.41	81.50	72.53
70	34.86	63.53	63.27	56.01	76.30	57.58
65	34.58	56.77	61.30	53.90	62.84	53.36
60	32.45	53.90	57.29	50.10	54.29	52.43
55	33.25	41.21	56.65	47.92	51.06	44.58

Tabla 19: Resultados Nivel de Hundimiento 30° K=1

Máximos 30° K=1						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	40.32	53.74	64.73	72.70	74.99	82.07
80	38.12	53.86	64.65	66.97	74.42	101.29
75	37.48	53.32	62.46	65.88	72.48	96.00
70	37.40	52.62	59.16	63.80	69.58	90.74
65	37.47	52.07	58.85	61.65	66.61	100.08
60	37.72	50.32	57.57	67.61	63.07	99.35
55	37.73	48.85	57.26	63.93	61.57	82.85

Tabla 20: Resultados Nivel de Producción 30° K=1

Máximos 30° K=1						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	57.16	95.95	66.84	74.15	137.84	143.05
80	48.10	95.79	63.67	73.35	137.84	143.46
75	44.26	91.03	62.67	72.60	103.10	130.52
70	45.92	53.13	56.96	57.29	64.33	34.82
65	43.93	53.82	53.35	48.18	50.94	76.27
60	42.42	49.15	43.69	47.74	46.26	38.87
55	42.35	44.92	42.40	46.45	41.31	34.62

Tabla 21: Resultados Nivel Sobre Pila 30° K=1

Máximos 30° K=1.5						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	34.20	57.80	66.50	81.04	82.86	91.22
80	33.31	56.80	64.80	78.59	81.98	84.75
75	31.75	55.14	52.72	60.99	67.42	67.02
70	31.75	51.66	54.71	53.34	58.00	52.76
65	31.75	44.34	47.79	51.99	61.47	53.51
60	31.72	41.25	44.08	50.47	51.89	47.98
55	31.72	38.56	46.36	48.11	53.00	46.85



Tabla 22: Resultados Nivel de Hundimiento 30° K=1.5

Máximos 30° K=1.5						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	45.49	52.71	63.65	73.59	72.66	77.54
80	44.94	53.46	59.89	71.38	71.99	81.56
75	41.63	52.24	58.01	64.82	68.64	86.62
70	40.50	49.60	57.91	61.46	63.38	92.09
65	40.64	48.53	55.14	58.85	63.92	89.97
60	40.88	46.81	52.33	57.50	58.70	86.22
55	40.92	45.96	52.32	54.05	56.62	83.22

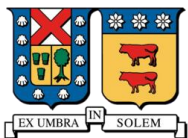
Tabla 23: Resultados Nivel de Producción 30° K=1.5

Máximos 30° K=1.5						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	70.97	92.43	78.56	89.95	165.41	175.09
80	62.08	75.69	78.99	70.06	116.97	115.54
75	63.61	63.70	61.87	69.24	66.93	64.05
70	52.08	57.51	58.06	57.70	60.90	43.12
65	49.77	56.76	49.37	49.30	41.69	46.65
60	45.66	54.19	44.44	44.28	39.85	63.09
55	45.76	49.64	42.60	44.14	40.72	41.16

Tabla 24: Resultados Nivel Sobre Pila 30° K=1.5

Máximos 30° K=2						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	42.31	49.79	51.58	69.91	74.07	75.70
80	42.28	46.14	54.25	53.63	72.24	66.07
75	42.24	44.57	48.44	51.60	52.71	43.64
70	42.23	41.18	43.47	46.72	48.75	49.24
65	42.22	41.15	39.37	44.53	50.32	49.91
60	42.18	41.14	41.75	42.42	49.16	47.34
55	42.15	40.92	38.62	40.90	47.88	40.64

Tabla 25: Resultados Nivel de Hundimiento 30° K=2



Máximos 30° K=2						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	57.30	53.33	55.20	66.12	71.19	92.70
80	56.07	44.45	54.63	61.79	68.01	122.52
75	52.18	46.12	54.26	58.11	63.44	88.96
70	48.13	43.62	52.08	56.11	58.78	84.02
65	47.22	42.65	47.51	52.18	58.42	84.65
60	44.77	42.36	49.59	50.71	56.97	65.57
55	43.33	42.13	44.36	49.01	56.30	65.41

Tabla 26: Resultados Nivel de Producción 30° K=2

Máximos 30° K=2						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	81.00	82.23	75.71	96.60	103.99	126.87
80	64.00	77.55	73.56	84.24	75.81	92.54
75	58.47	73.44	73.44	73.71	61.71	57.45
70	58.08	58.30	57.28	57.63	42.46	46.23
65	57.09	59.67	47.71	48.32	43.19	47.79
60	55.29	60.65	45.58	43.93	40.59	48.93
55	58.63	57.14	44.63	44.03	37.97	34.48

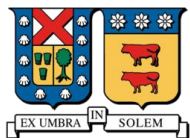
Tabla 27: Resultados Nivel Sobre Pila 30° K=2

Máximos 40° K=1						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	40.30	66.54	72.60	72.68	96.70	79.23
80	39.89	66.79	72.08	61.91	58.93	66.86
75	38.32	63.28	67.14	58.12	55.96	61.67
70	36.63	43.17	64.60	52.25	51.89	62.19
65	36.33	43.35	47.28	50.53	49.25	64.90
60	34.09	41.39	45.41	47.46	49.64	71.79
55	34.30	40.36	44.31	45.82	46.42	59.42

Tabla 28: Resultados Nivel de Hundimiento 40° K=1

Máximos 40° K=1						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	42.17	58.03	70.87	76.56	76.65	117.00
80	41.98	59.17	68.21	82.66	79.11	112.43
75	41.70	58.44	68.13	83.43	97.42	106.06
70	41.28	55.78	64.52	84.19	83.67	102.48
65	41.39	58.51	62.96	79.24	80.53	99.41
60	41.18	55.88	55.40	68.96	65.58	72.54
55	41.12	48.70	53.23	63.83	60.07	65.62

Tabla 29: Resultados Nivel de Producción 40° K=1



Máximos 40° K=1						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	68.36	64.96	93.74	114.58	70.92	114.36
80	68.07	63.16	93.74	114.82	68.91	107.88
75	68.09	59.85	90.12	113.74	65.83	25.84
70	64.41	58.00	78.26	64.68	54.62	24.71
65	52.41	57.74	77.30	62.21	30.67	31.51
60	46.32	56.23	76.26	49.35	24.91	28.39
55	44.77	48.62	74.76	48.84	24.63	25.88

Tabla 30: Resultados Nivel Sobre Pila 40° K=1

Máximos 40° K=1.5						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	33.34	53.77	59.19	63.88	82.66	83.41
80	33.46	54.86	59.17	63.18	71.93	69.05
75	31.73	52.88	57.07	53.42	57.43	69.02
70	31.72	42.42	52.09	50.44	50.72	71.53
65	31.69	41.57	46.90	48.93	48.03	61.11
60	31.62	39.73	44.39	47.20	47.83	58.41
55	31.61	38.02	43.64	45.69	44.71	57.47

Tabla 31: Resultados Nivel de Hundimiento 40° K=1.5

Máximos 40° K=1.5						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	43.63	60.12	64.80	76.58	76.34	81.32
80	43.77	59.51	66.19	73.17	69.41	74.99
75	43.93	58.84	60.22	82.93	63.37	84.85
70	44.07	54.85	56.33	68.50	59.37	78.44
65	44.19	53.07	56.13	71.33	54.46	76.95
60	43.34	51.63	52.69	60.78	58.78	78.24
55	42.41	48.32	51.72	57.46	55.73	72.11

Tabla 32: Resultados Nivel de Producción 40° K=1.5

Máximos 40° K=1.5						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	84.01	94.62	121.08	148.59	94.66	130.70
80	83.38	83.33	121.30	102.94	82.81	83.63
75	68.01	83.52	94.09	78.64	66.66	29.99
70	59.23	63.17	91.87	63.73	32.14	31.36
65	50.89	63.74	81.94	49.75	40.91	27.09
60	49.42	59.45	76.10	50.92	40.60	25.66
55	49.38	55.43	54.39	41.34	28.98	27.76

Tabla 33: Resultados Nivel Sobre Pila 40° K=1.5

Máximos 40° K=2						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	42.18	43.68	44.29	49.46	61.34	78.69
80	42.12	43.11	43.83	47.49	52.28	63.30
75	42.08	43.32	42.56	48.07	49.62	65.58
70	42.06	40.42	41.97	47.21	45.22	61.03
65	42.03	40.45	41.65	46.68	43.01	56.25
60	41.96	40.33	41.00	45.19	43.65	54.88
55	41.92	40.09	39.36	41.83	41.77	55.70

Tabla 34: Resultados Nivel de Hundimiento 40° K=2

Máximos 40° K=2						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	44.89	53.59	56.52	66.40	65.95	74.31
80	44.98	49.28	54.05	64.25	65.09	71.37
75	44.20	47.41	53.70	58.85	67.72	72.09
70	43.26	46.79	51.09	57.85	60.73	68.05
65	43.23	45.43	49.81	55.23	49.65	63.72
60	43.16	43.91	47.09	54.23	50.11	65.09
55	43.11	41.34	44.44	54.85	56.36	64.11

Tabla 35: Resultados Nivel de Producción 40° K=2

Máximos 40° K=2						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	95.93	110.29	111.07	103.71	83.71	139.46
80	67.31	79.89	110.56	72.92	61.38	71.31
75	63.72	71.37	87.05	65.32	55.34	50.85
70	63.48	64.98	82.93	55.35	47.24	35.19
65	59.00	66.83	59.59	47.86	42.83	39.81
60	62.01	65.45	60.48	48.37	39.27	35.62
55	62.65	57.94	58.31	46.81	39.56	45.67

Tabla 36: Resultados Nivel Sobre Pila 40° K=2

Máximos 50° K=1						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	38.65	55.81	71.67	72.22	85.09	59.82
80	38.27	56.05	63.19	56.93	71.86	58.15
75	38.45	42.99	50.51	55.53	57.36	44.79
70	38.47	40.54	45.98	48.71	51.90	43.41
65	32.44	41.41	46.27	47.92	53.57	43.81
60	35.02	39.39	43.68	46.98	48.75	45.47
55	32.19	38.43	43.10	46.99	50.07	47.98

Tabla 37: Resultados Nivel de Hundimiento 50° K=1

Máximos 50° K=1						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	45.48	66.82	80.32	67.66	80.41	126.22
80	45.04	66.10	79.42	66.55	75.67	103.16
75	44.68	62.74	68.97	85.41	70.84	88.43
70	46.48	64.97	61.84	80.40	88.69	90.35
65	42.89	51.73	59.48	70.06	64.49	77.66
60	43.32	52.26	57.58	75.66	69.42	72.30
55	39.82	48.69	49.17	65.07	68.60	64.87

Tabla 38: Resultados Nivel de Producción 50°K=1

Máximos 50° K=1						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	44.86	55.41	64.43	60.91	61.45	24.93
80	43.78	56.26	63.28	52.69	60.25	21.55
75	44.87	56.09	62.82	55.83	27.09	17.77
70	44.36	55.69	62.34	55.73	24.83	17.57
65	44.03	55.26	57.67	23.84	21.05	20.47
60	45.51	53.47	55.73	22.23	24.45	25.40
55	41.82	53.67	48.58	22.47	24.08	25.23

Tabla 39: Resultados Nivel Sobre Pila 50° K=1

Máximos 50° K=1.5						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	33.61	44.09	60.03	65.52	75.67	82.50
80	33.24	42.10	57.83	54.79	72.04	74.58
75	33.01	39.96	58.14	54.25	59.49	88.76
70	32.97	40.12	45.99	49.72	64.03	57.17
65	33.14	39.91	45.70	48.75	57.78	58.45
60	33.22	38.78	45.04	52.58	57.24	58.57
55	32.92	37.56	44.65	49.31	53.62	55.56

Tabla 40: Resultados Nivel de Hundimiento 50° K=1.5

Máximos 50° K=1.5						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	49.82	72.93	69.89	71.03	70.70	90.36
80	47.94	55.31	55.89	67.50	68.84	97.71
75	47.73	52.90	56.53	65.83	65.38	85.36
70	58.74	70.06	74.22	66.13	94.82	82.27
65	43.02	51.33	52.18	58.70	63.24	71.27
60	45.26	49.74	51.16	56.59	60.39	66.93
55	43.21	47.04	49.37	51.39	57.51	60.83

Tabla 41: Resultados Nivel de Producción 50° K=1.5

Máximos 50° K=1						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	44.86	55.41	64.43	60.91	61.45	24.93
80	43.78	56.26	63.28	52.69	60.25	21.55
75	44.87	56.09	62.82	55.83	27.09	17.77
70	44.36	55.69	62.34	55.73	24.83	17.57
65	44.03	55.26	57.67	23.84	21.05	20.47
60	45.51	53.47	55.73	22.23	24.45	25.40
55	41.82	53.67	48.58	22.47	24.08	25.23

Tabla 42: Resultados Nivel de Producción 50° K=1.5

Máximos 50° K=1.5						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	67.59	82.69	92.66	86.39	79.83	25.08
80	67.85	83.18	91.72	87.80	62.55	32.88
75	62.71	83.05	83.17	73.32	62.07	30.82
70	55.60	73.89	62.80	50.09	31.60	30.71
65	57.36	68.27	46.66	34.29	31.73	28.79
60	51.96	58.37	53.30	36.61	29.57	27.36
55	47.33	54.90	45.96	28.82	28.02	24.73

Tabla 43: Resultados Nivel Sobre Pila 50° K=1.5

Máximos 50° K=2						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	41.92	40.15	44.78	50.11	63.36	66.05
80	41.87	40.13	44.82	48.87	60.93	76.25
75	41.79	39.58	43.25	48.12	62.25	68.46
70	41.75	39.50	44.48	48.51	59.60	60.29
65	41.70	39.31	43.43	46.24	54.15	61.96
60	41.65	39.20	42.17	44.47	53.93	73.73
55	41.60	38.86	39.65	49.83	49.02	59.40

Tabla 44: Resultados Nivel de Hundimiento 50° K=2

Máximos 50° K=2						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	57.70	52.20	56.72	61.84	68.92	72.64
80	51.07	49.66	54.00	59.03	65.82	78.62
75	47.72	48.41	52.85	56.79	68.40	73.74
70	46.81	47.42	52.73	58.17	67.42	69.34
65	46.25	46.39	50.50	55.69	60.15	66.37
60	44.70	46.12	48.75	53.57	57.59	62.63
55	43.82	43.01	44.32	55.63	52.37	63.94

Tabla 45: Resultados Nivel de Producción 50°K=2

Máximos 50° K=2						
GSI	5 bateas	10 bateas	15 bateas	20 bateas	25 bateas	30 bateas
85	83.34	112.84	112.86	102.63	84.32	82.87
80	74.69	93.10	90.33	90.01	42.25	23.93
75	64.53	67.97	71.49	52.63	24.37	25.21
70	63.55	65.41	53.76	40.68	29.33	22.62
65	56.78	63.31	50.43	40.63	24.95	22.37
60	56.16	62.45	48.12	38.43	26.46	21.94
55	55.35	56.86	44.14	39.95	26.30	19.53

Tabla 46: Resultados Nivel Sobre Pila 50° K=2



7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Comostrarán, & Pardo, C. (2014). Management indicators for the cave geometry control, El Teniente mine. En *Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving (Caving 2014)*. Universidad de Chile.

Cornejo, J., Pinochet, A., & Caviedes, C. (2016). *Geometric control for strategic mine planning at El Teniente Mine*. En *Proceedings of the Seventh International Conference & Exhibition on Mass Mining (MassMin 2016)*. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.

Duplancic, P., & Brady, B. H. (1999). *Characterisation of caving mechanisms by analysis of seismicity and rock stress*. En *Proceedings of the Ninth International Congress on Rock Mechanics* (Vol. 2, pp. 1049–1053).

Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). *Introductory mining engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). *Underground excavations in rock*. Institution of Mining and Metallurgy.

Hustrulid, W. A., & Bullock, R. L. (2001). *Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies*. SME.

Kaiser, P. K., & Cai, M. (2012). *Rockburst support reference book*. Geomechanics Research Centre.

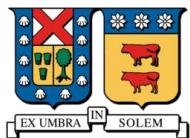
Landeros, P., Cuello, D., & Rojas, E. (2012). *Cave back management at Reservas Norte Mine, Codelco Chile, El Teniente Division*. En *Proceedings of the Sixth International Conference & Exhibition on Mass Mining (MassMin 2012)*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.

Galarce Castro, T. F. (2014). *Modelo de esfuerzos in-situ para Chile y su incidencia en el diseño minero subterráneo* [Universidad de Chile].

Amadei, B., and O. Stephansson. *Rock Stress and its measurements*. London: Chapman & Hall, 1977.

Brown, E.T., and E. Hoek. "Trends in relationships between measured in-situ stressess and depth." *Rock Mechanics and Mining Sciences* 15 (1978): 211-215.

Sen, Z., and B.H. Sadagah. "Probabilistic Horizontal Stress Ratios in Rock." *Mathematical Geology* 34, no. 7 (2002).



Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2004). *Rock Mechanics: For Underground Mining* (3rd ed.). Springer.

Jaeger, J. C., Cook, N. G. W., & Zimmerman, R. W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics* (4th ed.). Blackwell Publishing.

González, A., & Martínez, P. (2022). Criterios de rotura en rocas.

Ros Avila, J. (2008). Análisis comparativo de los criterios de rotura de Hoek&Brown y MohrCoulomb en el estudio de estabilidad en macizos rocosos.

Hoek, E., & Brown, E. T. (1980). Underground excavations in Rock. *Int. Min. Metall. London*, 401

Brown, E. T. (2019). The Hoek-Brown failure criterion and GSI — 2018 edition (Rocscience Learning Resource). Rocscience Inc.
<https://static.rocscience.cloud/assets/resources/learning/hoek/2019-The-Hoek-Brown-failure-criterion-and-GSI-2018-edition-1.pdf>

Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (s. f.). HOEK-BROWN FAILURE CRITERION – 2002 EDITION.

Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (2002). Application of the Convergence-Confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(2), 187-213. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(00\)00046-8](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00046-8)

Windsor, C. R., Cavieres, P., Villaescusa, E., & Pereira, J. (2006, junio). *Rock stress tensor measurements at El Teniente Mine, Chile* [Presentación de artículo]. International Symposium on In Situ Rock Stress, Trondheim, Noruega.

Valdés Ponce, R. I. (2009). *Análisis con y sin forzamiento del crecimiento del sector oeste de Mina Esmeralda* [Memoria de título, Universidad de Chile].

Cai, M., Kaiser, P. K., Tasaka, Y., & Minami, M. (2007). *Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(2), 247–265. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.07.005>

A. Karzulovic, (2005). Efecto de la geometría de socavación en los pilares del UCL, sector Esmeralda. Estudio DT-CG-05-01, Codelco, Mina El Teniente.