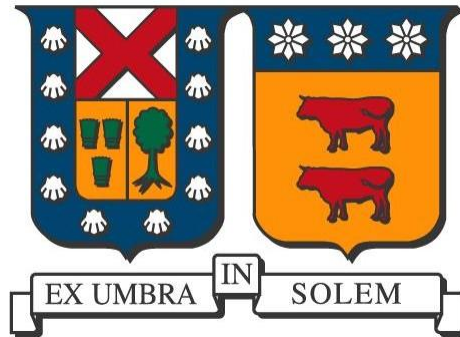


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES



**Consideración del peligro de falla frágil alrededor de una
excavación profunda en la planificación minera**

Presentado por:

THOMAS ALEXANDER ARANDA MARCHANT

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

Profesor Guía:

ADELINE DELONCA

Profesor co-guía:

GONZALO NELIS

2024
Santiago, Chile



Agradecimientos

Agradezco a mi madre Giselle, a mi padre Pablo, a mi hermano Joaquín y a mi hermana Amalia por el apoyo que me han dado durante todos estos años, además agradecer por la ayuda que siempre me han brindado cuando lo necesito. Agradecer a mi novia Valentina por su compañía en este proceso y por siempre estar para mí. Finalmente agradecer a todos los amigos que he conocido en todos estos años en la universidad que hicieron que este proceso estuviera lleno de risas y momentos gratos.



Resumen

El aumento en la explotación de minerales ha llevado a que la minería subterránea se realice a profundidades cada vez mayores, lo cual incrementa los esfuerzos in situ en los túneles. Esto provoca que la ocurrencia de falla frágil sea cada vez más común. Por este motivo, diversos autores han desarrollado métodos para predecir la probabilidad de este fenómeno, considerando distintos parámetros de entrada.

En este contexto, se realizó un estudio enfocado en la probabilidad de ocurrencia de una falla frágil la cual se define como el desprendimientos o cedencias de bloques rocosos en una excavación. Para ello, se empleó una modelación numérica de elementos finitos mediante el software RS3 de RocScience, utilizando el enfoque DISL propuesto por Diederichs (2007, 2018), el cual se basa en el criterio de falla generalizado de Hoek & Brown. En el estudio se consideraron variables como el UCS, coeficiente de Poisson, módulo de Young, densidad de la roca, profundidad de la excavación, tasa de excavación y esfuerzos in situ. Con este enfoque, se buscó obtener resultados como la profundidad de falla en el borde y en el frente del túnel en distintas tasas de avance. Asimismo, se calcularon valores asociados a la profundidad de falla, tales como el volumen inestable y el ancho de falla. La profundidad de falla es un parámetro relevante en este análisis, dado que la magnitud de la falla frágil es directamente proporcional a la profundidad alcanzada. Para validar los resultados, se realizó un análisis basado en los modelos propuestos por Martin et al. (1999) y Diederichs (2007, 2018), que emplean métodos empíricos y analíticos.

En cuanto a los resultados, se identificaron los parámetros más influyentes en la profundidad de falla máxima a lo largo del borde del túnel, los cuales son: los esfuerzos principales, la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), la razón de esfuerzos k y la tasa de excavación. Para el caso de la profundidad de falla en la primera etapa, el orden de influencia es el siguiente: esfuerzos principales, tasa de excavación, UCS y razón de esfuerzo k . En cuanto a la profundidad de falla en el frente en la primera etapa, los parámetros más influyentes son los esfuerzos principales, el UCS, la razón de esfuerzos k y la tasa de excavación. En el caso del volumen inestable y el ancho de falla, el comportamiento es similar al de la profundidad máxima en el borde del túnel. Cabe mencionar que, en el rango estudiado y bajo las condiciones del modelo, la densidad de la roca no tiene influencia en los resultados obtenidos.

A partir de los resultados obtenidos en las distintas simulaciones de este estudio y las variaciones en las tasas de excavación, se concluye que, cuando la tasa de excavación es igual o menor a 4 m/día, la probabilidad de ocurrencia de falla frágil es del 39%. En cambio, si esta tasa aumenta en un rango de entre 6 m/día y 12 m/día, la probabilidad de que ocurra este fenómeno es del 90.5%, lo cual implica un riesgo considerable en la construcción de túneles.



Abstract

The increase in mineral exploitation has led to underground mining at ever-greater depths, which elevates in-situ stresses in tunnels. This trend makes the occurrence of brittle failure increasingly common. Consequently, several authors have developed methods to predict the probability of this phenomenon, considering various input parameters.

In this context, a study was conducted focusing on the probability of a brittle failure, defined as the detachment or yielding of rock blocks in an excavation. To achieve this, finite element numerical modeling was carried out using RS3 software by RocScience, applying the DISL approach proposed by Diederichs (2007, 2018), which is based on the generalized Hoek & Brown failure criterion. The study considered variables such as UCS, Poisson's ratio, Young's modulus, rock density, excavation depth, excavation rate, and in-situ stresses. This approach aimed to obtain results such as the failure depth at the edge and face of the tunnel under different advancement rates. Additionally, values associated with failure depth, such as unstable volume and failure width, were calculated. Failure depth is a relevant parameter in this analysis, as the magnitude of brittle failure is directly proportional to the depth reached. To validate the results, an analysis was conducted based on models proposed by Martin et al. (1999) and Diederichs (2007, 2018), which employ empirical and analytical methods.

Results identified the most influential parameters in the maximum failure depth along the tunnel edge as principal stresses, UCS, stress ratio k , and excavation rate. For failure depth in the initial stage, the order of influence is as follows: principal stresses, excavation rate, UCS, and stress ratio k . For failure depth at the tunnel face in the initial stage, the most influential parameters are principal stresses, UCS, stress ratio k , and excavation rate. In the case of unstable volume and failure width, the behavior is similar to that of maximum depth along the tunnel edge. It is worth noting that, within the studied range and model conditions, rock density does not influence any of the obtained results.

Based on the results from the various simulations in this study and the changes in excavation rates, it is concluded that when the excavation rate is equal to or less than 4 m/day, the probability of brittle failure occurrence is 39%. However, if this rate increases to a range between 6 m/day and 12 m/day, the probability of this phenomenon occurring rises to 90.5%, implying a considerable risk in tunnel construction.



Contenido.

1. Introducción	10
2. Objetivos	11
2.1 Objetivo general	11
2.2 Objetivos específicos	11
3. Alcances.....	12
4. Marco teórico.....	12
4.1 Falla frágil	12
4.1.1 Parámetros relevantes de la falla frágil	14
4.1.2 Método de evaluación del peligro	17
4.2 Planificación minera	22
4.2.1 Valorización minera en la planificación	22
4.2.2 Impactos de los peligros en la planificación minera	23
4.2.3 La falla frágil en la planificación minera	24
5. Metodología	24
5.1 Modelo base	25
5.1.1 Geometría.....	25
5.1.2 Propiedades del material	26
5.1.3 Dimensionamiento	26
5.1.4 Etapas de excavación	27
5.1.5 Mallado	28
5.1.6 Condiciones de borde.....	28
5.1.7 Parámetros.....	29
5.1.8 Validación del modelo	30
5.2 Sensibilidad.....	30
5.2.1 Sensibilidad geomecánica.....	30
5.2.2 Sensibilidad de los esfuerzos	31
5.3 Interpretación de resultados	32
5.3.1 Obtención de resultados	32
5.3.2 Interpretación de resultados y validación.....	35
6. Resultados y análisis	36



6.1	Caso base.....	36
6.2	Influencia del UCS.....	39
6.3	Influencia de la densidad.....	43
6.4	Influencia de la razón de esfuerzos (k)	46
6.5	Influencia de los esfuerzos	50
6.6	resultados planificación minera	55
7.	Resumen resultados	56
8.	Discusión	60
9.	Conclusión y recomendaciones	63
10.	Referencias.....	65



Índice de figuras.

Figura 1: modelo de profundidad de falla de Martin et al. (1999).	10
Figura 2: formas de proyección de la falla frágil en un túnel profundo.	13
Figura 3: comparación de falla frágil dada distintas discontinuidades en el macizo rocoso.	14
Figura 4: modelo de falla de Martin basado en casos reales (1999).	18
Figura 5: modelo de falla de Diederichs (2007).	20
Figura 6: diferencia entre los parámetros peak y residuales en el enfoque DISL.	21
Figura 7: metodología del caso de estudio.	25
Figura 8: dimensionamiento de la caja externa y del túnel.	27
Figura 9: condiciones de borde estandarizadas aplicadas en el modelo en RS3 de RocScience. ...	29
Figura 10: forma de obtención de profundidad de falla en el programa RS3 de RocScience.	33
Figura 11: forma de obtención del ancho de falla en el programa RS3 de RocScience.	34
Figura 12: forma de obtención de la falla en la frente del túnel en RS3 de RocScience.	35
Figura 13: validación de datos base obtenidos con enfoque DISL y Martín (1999).	37
Figura 14: grafico de profundidad de falla en la primera etapa y en todo el largo del túnel, simulada con los valores de bases.	38
Figura 15: volumen inestable máximo presente en las distintas tasas de excavaciones en el modelo base.	39
Figura 16: validación de valores obtenidos al variar el UCS de cada simulación con el enfoque DISL de Diederichs (2007).	40
Figura 17: resultados de la profundidad de falla en la 1° etapa de excavación de cada modelo con variaciones del UCS.	41
Figura 18: resultados de la máxima profundidad de falla de todos los modelos con variaciones en el UCS y tasas de excavación.	42
Figura 19: resultado del volumen inestable máximo en todo el túnel de todos los modelos con variaciones en el UCS y tasa de excavación.	42
Figura 20: resultados de la falla frágil en la frente del túnel con la variación del UCS y la tasa de excavación.	43
Figura 21: validación de valores obtenidos al variar la densidad de cada simulación con el enfoque DISL de Diederichs (2007).	44
Figura 22: valores de la profundidad de falla frágil en la 1° etapa obtenidos al variar la densidad y la tasa de excavación.	45
Figura 23: profundidad de falla máxima en todo el recorrido del túnel, con variaciones en la densidad y tasa de excavación.	46
Figura 24: volumen inestable máximo en todo el túnel con variaciones en la densidad y tasa de excavación.	46
Figura 25: validación de valores obtenidos al variar la razón de esfuerzos en cada simulación con el enfoque DISL de Diederichs (2007).	47
Figura 26: resultados obtenidos de la falla frágil en la 1° etapa de excavación al variar las distintas razones de esfuerzo.	48
Figura 27: resultados de la profundidad de falla frágil máxima de todos los modelos al variar la razón de esfuerzos y tasa de excavación.	49



Figura 28: resultados del volumen inestable máximo en todo el túnel con las variaciones de razón de esfuerzo y tasa de excavación.....	49
Figura 29: resultados de la falla frágil en la frente del túnel en la 1° etapa de excavación con variaciones en la razón de esfuerzo y la tasa de excavación.....	50
Figura 30: validación de valores obtenidos al variar los esfuerzos en cada simulación con el enfoque DISL de Diederichs (2007).	51
Figura 31: resultado de la profundidad de falla en la 1° etapa de excavación con variaciones en los esfuerzos y tasa de excavación.	52
Figura 32: resultados de la profundidad de falla frágil máxima de todos los modelos al variar los esfuerzos y tasa de excavación.	53
Figura 33: resultados del volumen inestable máximo en todo el túnel con la variación del esfuerzo y tasa de excavación.	54
Figura 34: resultados de la falla frágil en la frente del túnel en la 1° etapa de excavación con variaciones en el esfuerzo y la tasa de excavación.....	55



Índice de tablas.

Tabla 1: clasificación de rocas según su UCS.	15
Tabla 2: rangos promedios de UCS de distintas rocas.	15
Tabla 3: parámetros peak y residual del enfoque DISL.	21
Tabla 4: parámetros utilizados en la geometría de todas las simulaciones de esta memoria.	25
Tabla 5: rangos de parámetros para el estudio.	26
Tabla 6: variación en la tasa de excavación y etapas producidas.	28
Tabla 7: parámetros utilizados en la malla de todas las simulaciones.	28
Tabla 8: parámetros utilizados en el modelo base de todas las simulaciones.	29
Tabla 9: variaciones geomecánicas.	30
Tabla 10: valores utilizados en la sensibilidad de esfuerzo.	31
Tabla 11: valores utilizados para variar la razón de esfuerzos k.	32
Tabla 12: parámetros peak y residuales del enfoque DISL utilizados en este trabajo.	36
Tabla 13: valores obtenidos en la simulación del caso base con las distintas tasas de excavación de este estudio.	38
Tabla 14: valores de la profundidad de falla en la 1° etapa de excavación de cada modelo.	41
Tabla 15: resumen de valores obtenidos en la 1° etapa de cada excavación.	45
Tabla 16: resumen de valores de falla frágil obtenidos en la 1° etapa de cada excavación.	48
Tabla 17: resumen de datos de la profundidad de falla en la 1° etapa de excavación.	52
Tabla 18: tiempos en días y meses para la construcción de un desarrollo minero de 1000 metros, con sus variaciones en las tasas de excavación.	55
Tabla 19: parámetros y valores utilizados para calcular el beneficio actual y beneficio futuro dependiendo del tiempo que dure el desarrollo minero.	56
Tabla 20: resumen de resultados sobre la profundidad de falla frágil obtenido en todas las simulaciones del estudio con su respectiva tasa de avance, con escala de colores entre rojo y verde (color rojo mayor profundidad de falla y color verde menor profundidad de falla).	57
Tabla 21: resumen de resultados sobre el volumen inestable máximo obtenido en todas las simulaciones del estudio con su respectiva tasa de avance, con escala de colores entre rojo y verde (color rojo mayor volumen inestable y color verde menor volumen inestable).	58
Tabla 22: resumen de resultados sobre la profundidad de falla en la primera etapa obtenido en todas las simulaciones del estudio con su respectiva tasa de avance, con escala de colores entre rojo y verde (color rojo mayor profundidad de falla en la 1° etapa y color verde menor profundidad de falla en la 1° etapa).	59
Tabla 23: resumen de resultados sobre la profundidad de falla en la frente en 1° etapa obtenido en todas las simulaciones del estudio con su respectiva tasa de avance, con escala de colores entre rojo y verde (color rojo mayor profundidad de falla en la frente 1° etapa y color verde menor profundidad de falla en la frente 1° etapa).	60
Tabla 24: comparativa de resultados obtenidos con el enfoque DISL y criterio de falla de Hoek & Brown	61

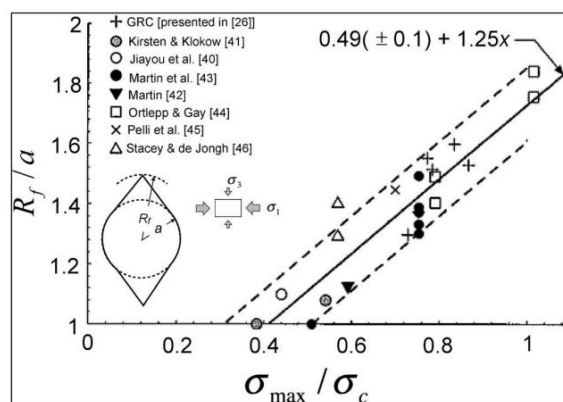


1. Introducción

Debido al agotamiento de minerales, la minería subterránea va prevaleciendo en comparación con las minas de rajo abierto. Un antecedente del tema es división Chuquicamata, la cual pasó a un proceso subterráneo debido a la viabilidad del proyecto. Dada la necesidad de trabajar con leyes menores, la extracción minera se ha ido desarrollando cada vez a mayores profundidades y en mayores cantidades de mineral extraído, esto ha generado nuevos problemas como lo son: la falla frágil, manejo de materiales, ventilación, drenaje, entre otros, son puntos para prestar atención en estas condiciones (Nordlund et al., 2013).

Comprender los peligros que podrían ocurrir en una minería subterránea profunda es esencial para desarrollar una planificación minera óptima que resguarde la seguridad del personal. Los esfuerzos in situ por las excavaciones profundas generan peligros geológicos como la falla frágil (Ramírez, 2024) lo que es un riesgo para el proceso minero. Una falla frágil según algunos autores se define como el desprendimiento súbito y violento de grandes bloques de roca como consecuencia de las grandes presiones ejercidas en el contorno de una excavación, generalmente ocurre a grandes profundidades (Medina et al., 2015). Estos eventos en minería ocurren cada vez con mayor frecuencia (Torrealba, 2008). Uno de los últimos registros en Chile fue en División El Teniente en el año 2023, donde no hubo consecuencias graves (CODELCO, 2023).

Una de las formas más utilizadas para estimar la profundidad de falla frágil (R_f) alrededor de una excavación es el gráfico presentado en la Figura 1, propuesto por Martin et al. (1999), donde se presentan variables como: radio del túnel (r), esfuerzo tangencial máximo (σ_{max}) y resistencia a la compresión uniaxial (σ_c). Diederichs (2007) proponen variaciones en este estudio, realizando cambios en la razón de esfuerzos principales k , variando la pendiente de la recta. Se han realizado variadas pruebas en terreno sobre estos modelos y se ha confirmado la aproximación de estos resultados (Orellana, 2022).



**Figura 1: modelo de profundidad de falla de Martin et al. (1999).
Fuente: Martin et al. (1999).**



Desarrollar un plan de preparación minera enfocado en la tasa de avance es un punto crucial, ya que, con estimaciones adecuadas, se llega a mejores resultados desde un punto de vista económico y operativo. La tasa de excavación depende de múltiples factores, como lo son: maquinaria, horas efectivas de trabajo, atrasos no programados, la resistencia sobre los esfuerzos en el túnel, entre otros. Es importante conocer los esfuerzos generados para conocer las restricciones del macizo rocoso, a manera de comprender los riesgos asociados y la forma de provocar reducciones o aumentos de estos. Para estimar valores de riesgos que provoquen condiciones para la falla frágil a grandes profundidades, es necesario trabajar con softwares en los cuales se puedan modelar valores reales de las condiciones expuestas. Para el diseño de un modelo es importante trabajar en 3D, lo que permite obtener resultados más reales que con la modelación en 2D, la cual para un caso de un túnel minero no considera la variación del esfuerzo en la longitud de un túnel.

Dado el riesgo asociado a la falla frágil, es fundamental comprender los factores que provocan estos eventos para garantizar una planificación segura en la construcción de túneles. Para ello, se llevará a cabo un estudio enfocado en identificar la tasa de excavación que minimice los riesgos, considerando distintos valores de esfuerzo in situ, relacionados con la profundidad del túnel. Las simulaciones se realizarán en un modelo 3D del túnel usando el software RS3 de RocScience, replicando condiciones de falla frágil en el entorno de la excavación y evaluando la tasa de avance que permita optimizar el rendimiento sin incrementar los riesgos. Para explorar las variaciones, se modificarán los valores de esfuerzo y parámetros geomecánicos, lo que permitirá observar la profundidad de la falla, un factor clave para estimar el potencial de peligro. A partir de estos resultados, se propondrán escenarios de planificación minera que consideren diferentes tasas de excavación y los niveles de riesgo asociados.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Determinar la influencia de la tasa de excavación, junto con variables relevantes, en la incidencia de la falla frágil en túneles profundos mediante técnicas de modelación 3D, con el fin de establecer una tasa de avance que minimice o elimine la ocurrencia de fallas.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar la correlación entre las características geomecánicas y la ocurrencia de fallas frágiles en función de la tasa de excavación.
- Evaluar la sensibilidad de la falla frágil en túneles profundos ante diferentes esfuerzos aplicados y tasas de avance.
- Integrar los resultados obtenidos para identificar los riesgos asociados a la tasa de excavación en el contexto de la planificación minera.



3. Alcances

Al diseñar un túnel profundo, es fundamental considerar aspectos relevantes como el esfuerzo in situ del macizo rocoso y su calidad. Según Diederichs (2007), en grandes profundidades se presentan altos valores de GSI y macizos de alta resistencia. Para analizar los resultados de manera adecuada, se utilizaron valores bajos de resistencia a la tracción, dado que en rocas competentes y de buena calidad esta resistencia es reducida (Castrejón, 2024). En este trabajo, se empleó una resistencia a la tracción constante de 7.5 MPa.

La forma de conocer el peligro que provoca una falla frágil será evaluada con la profundidad con la que esta ocurra, para esto existen diferentes modelos propuestos. Estos modelos se basan en estudios analíticos, empíricos y numéricos. Los modelos utilizados para este estudio serán los siguientes: Martin et al. (1999), Diederichs (2007) y Diederichs (2018). Estos modelos estudian el peligro de la profundidad de falla dada ciertas condiciones iniciales, para trabajar con estos modelos se necesitan parámetros de entrada, los cuales serán asignados dada la información sobre túneles profundos del enfoque DISL.

Usando el software RS3 de RocScience se modelará un túnel profundo, en donde la presencia de agua no será considerada. Al tener el modelo construido se variará la tasa de excavación, este parámetro será uno de los más importante a considerar al igual que los esfuerzos y resistencias del macizo. Los parámetros como forma del gallo, refuerzos, etc. no serán considerados en este estudio.

4. Marco teórico

4.1 Falla frágil

La falla frágil corresponde al desprendimiento de bloques rocosos dentro de una excavación subterránea (Rojas, 2022). Comúnmente se asocia a un evento sísmico desencadenado por la actividad minera que causa la liberación repentina de energía acumulada en el macizo rocoso, la cual puede deberse a heterogeneidades presentes en el macizo, vibraciones a causa de movimientos sísmicos, reactivación de fallas y actividades de tronadura (Aguilera, 2018). Así mismo, la falla frágil también se define como la destrucción estructural de diversas magnitudes, que puede ir desde la liberación violenta de ruidos hasta la proyección de partículas (Duarte, 1993).

Métodos empíricos clasifican el nivel de intensidad de la falla frágil como: sin estallido, ligero, medio y severo. La clasificación sin estallido se refiere a la situación en la que no se espera que haya sonido ni falla frágil, ya que los esfuerzos in situ no son considerables. La falla frágil ligera ocurre cuando se produce un sonido débil y el macizo rocoso circundante se deforma o agrieta sin un fenómeno de expulsión. La intensidad de falla frágil media se define como la deformación o fractura del macizo rocoso, acompañado de la expulsión de una cantidad considerable de partículas y crujidos de las rocas



circundantes. Se produce una falla frágil severa cuando el macizo rocoso estalla severamente y se expulsa de manera repentina, acompañado de un estallido fuerte y continuo (Askaripour et al., 2022).

Según Kaiser (1996) el inicio de la falla frágil se puede clasificar en 2 grandes secciones, las cuales son auto iniciado y activado remotamente. En el proceso auto iniciado los estallidos de roca son por deformación, estos ocurren dada las altas concentraciones de energía de deformación, cuando esta supera la resistencia del macizo rocoso, se produce una falla frágil súbita y violenta. El proceso de activación remota se produce dado un proceso sísmico remoto que alcanza una excavación aumentando la cantidad de energía en el macizo rocoso o un deslizamiento de falla (D. R. Castro, 2012).

La forma de la falla frágil puede ocurrir de diferentes maneras en una excavación subterránea, el desprendimiento del túnel puede ser de las paredes o del techo, además puede ocurrir por fracturamiento de la roca, pandeo o eyección de bloque (Li et al., 2019), esto se puede ver en la Figura 2. La profundidad de falla también es un parámetro importante de analizar dado que mientras esta sea mayor la energía liberada será superior, provocando mayores daños en la estructura del túnel.

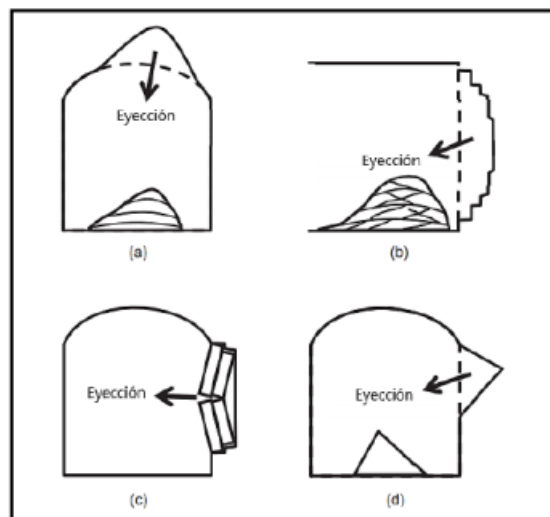


Figura 2: formas de proyección de la falla frágil en un túnel profundo.
Fuente: Li et al. (2019).

Dada la formación del macizo rocoso, si este presenta múltiples discontinuidades y se produce una falla frágil, la energía liberada desprenderá un mayor volumen del túnel, esto dada las concentraciones de esfuerzos, esta condición se puede ver en las modelaciones de Vazaios et al. (2019), que al variar las discontinuidades en el macizo rocoso llegó a los resultados de la Figura 3. Es importante conocer las discontinuidades presentes en la estructura del túnel, dado que la simplificación de este parámetro en diferentes estudios de falla frágil podría provocar una variabilidad en los resultados de profundidades de falla.

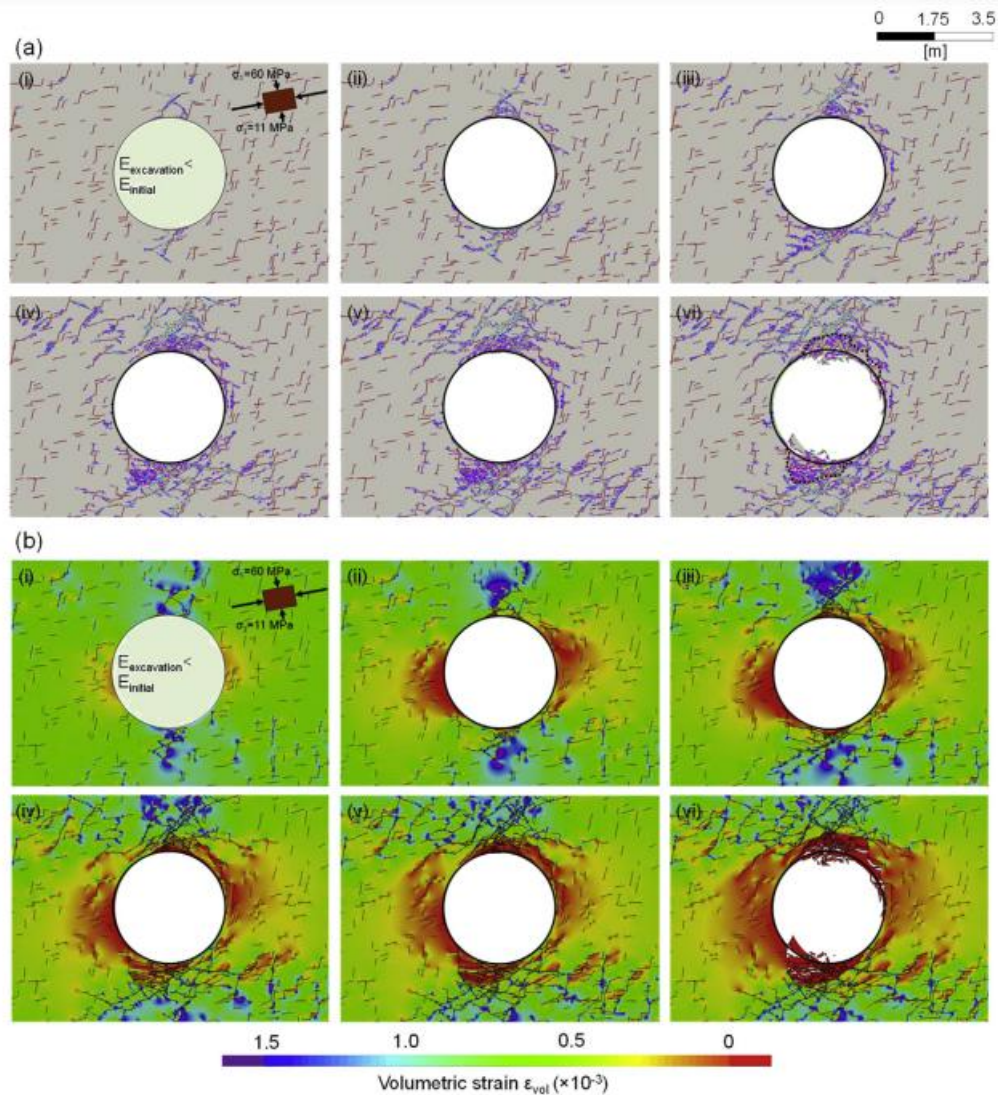


Figura 3: comparación de falla frágil dada distintas discontinuidades en el macizo rocoso. Fuente: Vazaios et al. (2019).

4.1.1 Parámetros relevantes de la falla frágil

Los parámetros más relevantes para estudiar la falla frágil son: UCS, resistencia a la tracción, módulo de Young, deformación, coeficiente de Poisson, GSI, esfuerzos in situ y esfuerzos totales. Muchos de estos parámetros son inherentes a la roca, mientras que otros se obtienen en función del contexto en el que se realiza la medición.

La resistencia uniaxial de la roca, conocida por las siglas UCS (Uniaxial Compressive Strength), representa el valor máximo de resistencia que la roca puede soportar bajo compresión uniaxial. Este valor varía según la configuración geológica de cada material. Esta propiedad de la roca determina la dureza



que esta posee, por ende, es un factor relevante para tener en consideración dada las distintas construcciones subterráneas que se podrían llegar a realizar en rocas con distintos UCS. Una descripción sobre la dureza de la roca en base a el UCS según Kwasniewski & Takahashi (2010) es la observada en la Tabla 1.

**Tabla 1: clasificación de rocas según su UCS.
Fuente: ISMR (2010).**

Descripción	Resistencia a la Compresión (MPa)
Extremadamente blanda	< 1
Muy blanda	1 – 5
Blanda	2 – 25
Moderadamente blanda	25 – 50
Dura	50 – 100
Muy dura	100 – 250
Extremadamente dura	250

Algunos de los valores promedio de UCS de diferentes tipos de roca se presentan en la Tabla 2, donde es posible observar las variaciones de dureza entre ellos. Además, se puede entender que, debido a su origen, las propiedades de las rocas pueden variar considerablemente.

Tabla 2: rangos promedios de UCS de distintas rocas.

tipo de roca	UCS promedio
Granito alterado	76
dacita	83
Arenisca	102
caliza	113
Mármol	113
Granito sano	172
Andesita	196
basalto	196
Gabro	211
Dolomía	292

La resistencia a la tracción es otro parámetro al cual se debe prestar atención, este parámetro indica la máxima resistencia en tracción uniaxial de una roca antes de su fractura, este índice al igual que el anterior depende de la composición geológica y los parámetros externos que pueden afectar dicha roca. La cuantificación de este parámetro se obtiene con el ensayo de tracción, este valor generalmente se encuentra entre un rango de 5 a 10% del UCS de dicha roca.



La deformación de la roca se puede definir de distintas maneras, la roca al estar bajo distintos esfuerzos puede reaccionar con deformaciones tipo elásticas o tipo plásticas. La deformación elástica ocurre cuando una roca, sometida a ciertos esfuerzos externos, regresa a su forma original una vez que estos esfuerzos son removidos. En cambio, la deformación plástica se manifiesta cuando, al retirar los esfuerzos, la roca no recupera su forma original, quedando permanentemente deformada. Para representar la deformación elástica de una roca se utiliza el módulo de Young, el cual relaciona la deformación de la roca con el esfuerzo aplicado, tal como se aprecia en la ecuación (1). Las rocas con un alto módulo de Young se deforman menos con el esfuerzo aplicado, en cambio en una roca con un bajo módulo de Young su deformación es mayor bajo cargas de esfuerzo.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1)$$

Donde:

E: módulo de Young (Pa).
 σ : esfuerzo (Pa).
 ϵ : deformación.

Otro parámetro para tener en consideración relacionado con la deformación de la roca es el coeficiente de Poisson, este factor relaciona la deformación transversal con la deformación axial, el rango de este valor generalmente se encuentra entre 0 a 0.5. Rocas con bajo coeficiente de Poisson son más compresibles, en cambio con un alto coeficiente de Poisson son más incompresibles. La ecuación (2) representa este factor, generalmente esta fórmula lleva el signo negativo dado que la deformación transversal es de dirección opuesta a la deformación axial.

$$\nu = \frac{-\epsilon \text{ transversal}}{\epsilon \text{ axial}} \quad (2)$$

El índice Geological Strength Index o GSI propuesto por Hoek (1994) abarca un rango de 0 a 100, siendo similar al RMR donde 0 es la peor calidad y 100 la mejor. Esta clasificación consiste en que mediante una inspección visual del macizo rocoso se logre determinar las propiedades de este. Este método fue creado para clasificar el macizo según sus discontinuidades, fracturamiento, formación geológica y/o espaciamiento entre las estructuras. Actualmente esta clasificación es el principal índice de entrada para el criterio Hoek & Brown, además es un índice efectivo para ver la posibilidad de ocurrencia del proceso de falla. Para que la falla frágil ocurra el GSI debe estar superior a 70 (Russo et al., 2020).

Los esfuerzos in situ, son definidos como esfuerzos existentes previo a una excavación subterránea (Gonzales de vallejo et al., 2002), esto significa que el esfuerzo de un macizo está definido por el peso de este mismo, por lo tanto, la composición del esfuerzo in situ depende de la gravedad, la densidad del material y la profundidad de este mismo (Ramírez, 2022), esto lo podemos observar en la ecuación (3).



$$\sigma_{in-situ} = g \cdot h \cdot \rho \quad (3)$$

Los esfuerzos inducidos dado la actividad minera implica un aumento a los esfuerzos in situ, esto significa que el esfuerzo total de una construcción subterránea se exprese como en la ecuación (4). Además, dada las orientaciones de los esfuerzos principales y la razón de esfuerzos, se logra determinar un esfuerzo más elevado en el contorno del túnel y un esfuerzo menor en la cara de este (Vazaios et al., 2019).

$$\sigma_{total} = \sigma_{in-situ} + \sigma_{inducido} \quad (4)$$

4.1.2 Método de evaluación del peligro

La estimación del potencial de riesgo de una falla frágil se determina principalmente por su profundidad. Obtener resultados precisos sobre la profundidad de la falla es complejo, pero los modelos actuales pueden proporcionar resultados óptimos. Entre los métodos más estudiados para estimar la profundidad de la falla se encuentra el modelo de Martin et al. (1999), que es un método empírico basado en datos recopilados de diversas operaciones mineras. Otro enfoque utilizado es el método de Diederichs (2007), que se fundamenta analíticamente en los casos descritos por Martin et al. (1999). Más recientemente, el método de Diederichs (2018) utiliza herramientas numéricas avanzadas para mejorar la precisión en la estimación de la profundidad de la falla.

4.1.2.1 Profundidad de falla de Martin (1999)

Como se mencionó anteriormente, la propuesta sobre la profundidad de falla de Martin et al. (1999), se basa en un método empírico el cual recolecta datos de diferentes excavaciones subterráneas, en esta se propone una relación entre la profundidad de falla (R_f) y el radio del túnel (α), además utiliza valores tales como el esfuerzo tangencial máximo (σ_{max}) y la resistencia a la compresión uniaxial (σ_c). La ecuación (5) relaciona estos parámetros que se muestran a continuación:

$$\frac{R_f}{\alpha} = 0.49 (\pm 0.1) + 1.25 \left(\frac{\sigma_{max}}{\alpha} \right) \quad (5)$$

Los parámetros anteriormente mencionados se muestran en la Figura 4, en donde además se incluyen los valores de algunas experiencias de excavaciones subterráneas. Se logra apreciar que el modelo creado por Martin et al. (1999) se ajusta de buena manera en relación con sus experiencias empíricas.

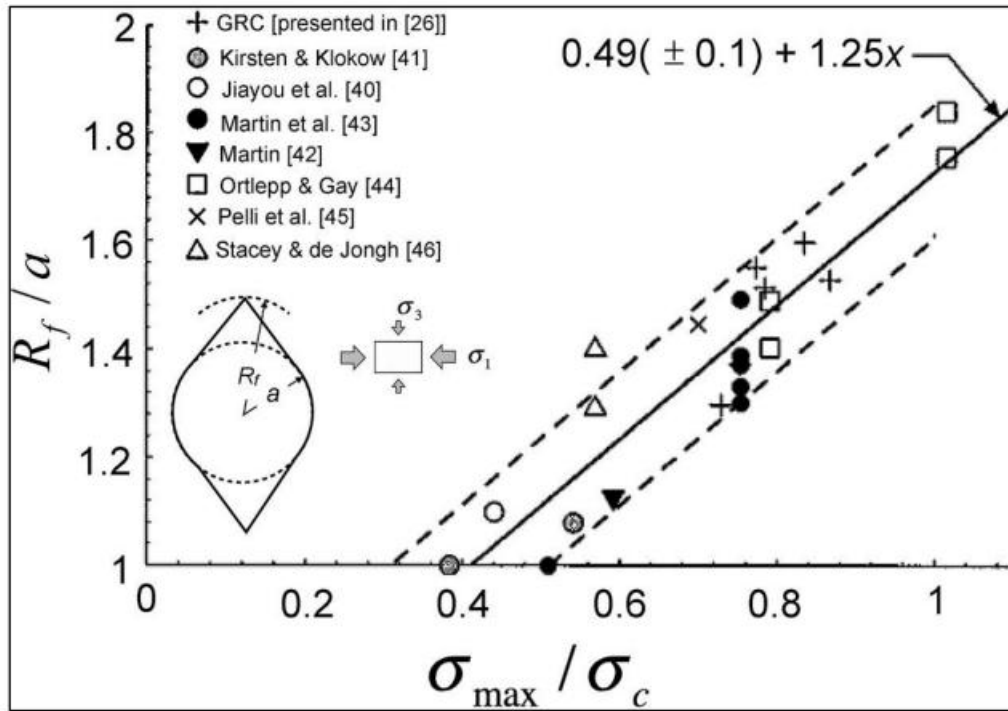


Figura 4: modelo de falla de Martin basado en casos reales (1999).

Fuente: Martin et al. (1999).

4.1.2.2 Profundidad de falla Diederichs (2007)

El método de estimación de la profundidad de falla de Diederichs (2007), tiene una base en los resultados obtenidos por Martin et al. (1999). Este es un método analítico el cual utiliza un análisis numérico más riguroso, el método se basa en una serie de pasos de cálculo para obtener un resultado adecuado. Los pasos que se deben seguir para estimar la profundidad de falla según Diederichs (2007) son los siguientes:

1. Obtener un resultado estimado de los esfuerzos principales en un plano 2D perpendicular al avance del túnel.
2. Obtener el inicio de fracturas (CI).
3. Calcular la razón de resistencia (SR).

$$SR = \frac{3\sigma_1 - \sigma_3}{CI} \quad (6)$$

4. Determinar la razón de los esfuerzos principales K .



$$K = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \quad (7)$$

5. Calcular los factores de calibración.

$$M = 0.4 \cdot K^{-0.27}; N = 0.65 \cdot K^{0.14} \quad (8)$$

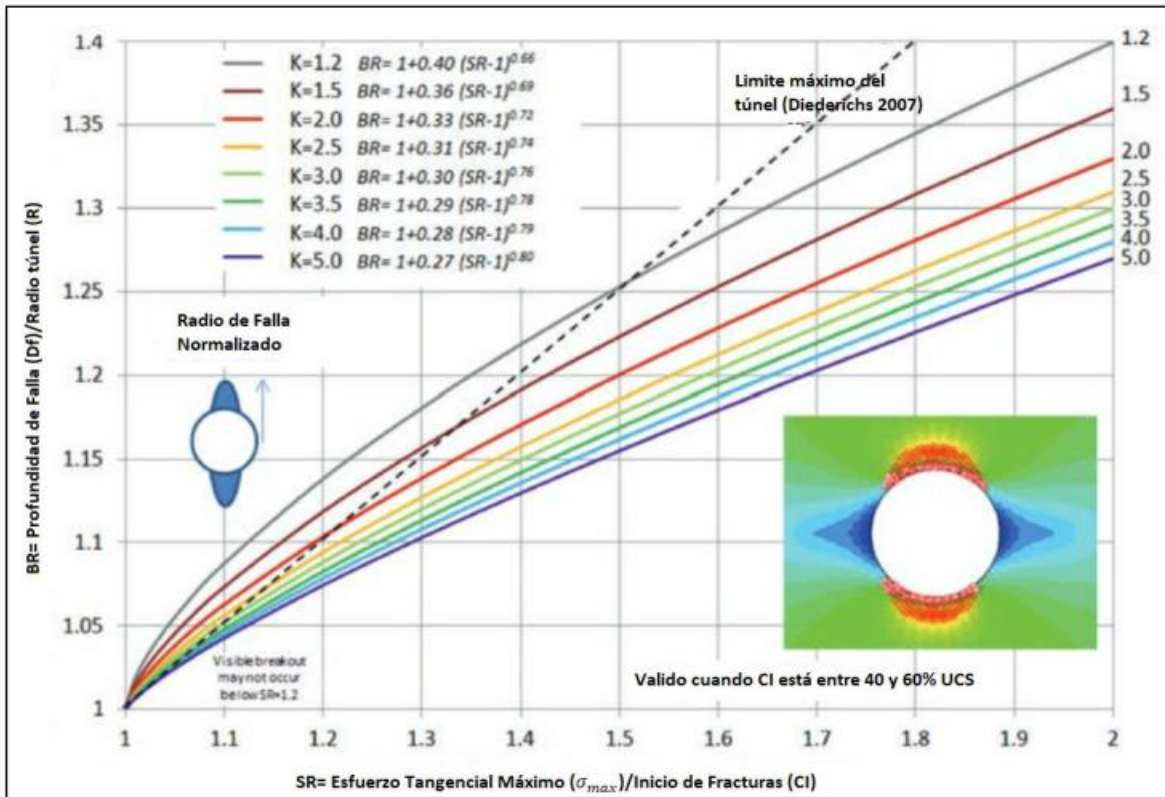
6. Calcular la razón de ruptura (BR).

$$BR = 1 + M(SR - 1)^N \quad (9)$$

7. Predicción de la profundidad de falla (Df - fault Depth).

$$Df = BR \cdot R ; R = \text{radio del tunel} \quad (10)$$

Con los resultados obtenidos al seguir los pasos propuestos por Diederichs (2007), el autor grafica una serie de resultados, en los cuales realiza una variación en la razón de esfuerzos principales k . Estos varían al compararlos con los resultados de Martin et al. (1999), lo cual se puede observar en la Figura 5, donde Diederichs (2007) grafica sus valores con sus respectivas variaciones de las razones de esfuerzo.



**Figura 5: modelo de falla de Diederichs (2007).
Fuente: Diederichs (2018).**

4.1.2.3 Enfoque DISL de Diederichs (2007, 2018)

El enfoque DISL es un método que se enfoca principalmente en la simulación de la falla frágil en un software. Sus siglas significan Damage Initiation Spalling Limit, este método se basa en los parámetros de criterio de falla generalizado no lineal de Hoek & Brown para estimar y simular el límite de falla frágil de un macizo rocoso con determinadas características geológicas, esfuerzos in-situ y esfuerzos inducidos (Ramírez, 2022).

Este enfoque utiliza los parámetros de inicio de fractura (CI), resistencia a la compresión uniaxial (UCS), la resistencia a la tracción (T) y los parámetros modificados de Hoek & Brown, los cuales se presentan en la Tabla 3. El inicio de fractura es la magnitud de esfuerzo bajo cierto confinamiento previo al proceso de fracturación del macizo rocoso, si este valor se desconoce se recomienda utilizar un valor aproximado que varíe entre el 40% a 50% del UCS.



Tabla 3: parámetros peak y residual del enfoque DISL.
Fuente: Perras & Diederichs (2016).

Modelo	Parámetros de Resistencia máxima o peak		Parámetros de Resistencia residual	
	Parámetro H&B modificado	Valor o Ecuación	Parámetro H&B modificado	Valor o Ecuación
DISL	a_p	0,25	a_r	0,75
	s_p	$\left(\frac{CI}{UCS}\right)^{\frac{1}{a_p}}$	s_r	0,001
	m_p	$s_p \cdot \frac{UCS}{T}$	m_r	6-12

Los parámetros modificados de Hoek & Brown presentan valores residuales y peak. En los parámetros peak la cohesión es elevada y la fricción es baja. En los parámetros residuales la fricción es elevada y hay una pérdida de cohesión, esto permite simular una falla frágil y ver de manera modelada un debilitamiento en el macizo rocoso por deformación. Estos parámetros se pueden ver en la Figura 6 (Ramírez, 2022).

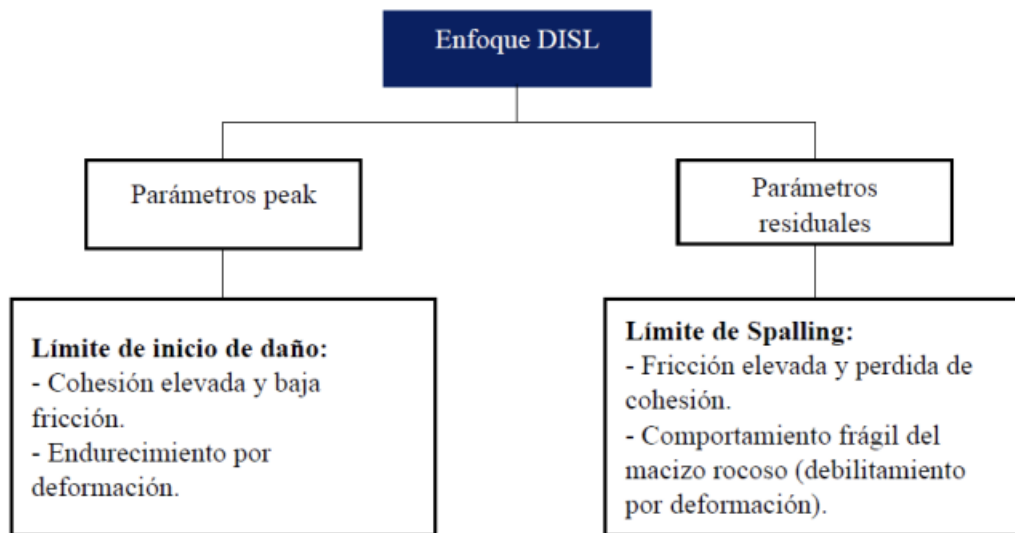


Figura 6: diferencia entre los parámetros peak y residuales en el enfoque DISL.
Fuente: Ramírez (2022).

Los parámetros modificados de Hoek & Brown se relacionan con el comportamiento del macizo rocoso, dado que la cohesión del material se representa por la disminución del parámetro “s” y la fricción del material se relaciona directamente con el parámetro “m”. El factor “mr” representa la homogeneidad y



heterogeneidad del macizo rocoso, siendo los valores menores la representación de un macizo heterogéneo (Orellana, 2022).

4.2 Planificación minera

El proceso de planificación minera determina diferentes aristas y tiempos en el proceso minero, esta se puede realizar a corto, mediano y/o largo plazo. Dentro de la planificación se calculan aspectos relevantes que plantean la vida útil y rentabilidad de una mina, entre estos aspectos se encuentran: la envolvente económica, la tasa de extracción y la disponibilidad de planta (Castro et al., 2023). Al realizar una planificación en la tasa de excavación es necesario conocer los riesgos geomecánicos del sector, lo cual puede condicionar el factor extractivo, por lo tanto, realizar una buena planificación de mediano a largo plazo ayuda a mantener a niveles óptimos en la planta de operaciones, la maquinaria, el equipo humano, entre otros aspectos.

En la planificación ideal en el ámbito de equipos mineros, las maquinarias estarán siempre en uso, sin contar con los tiempos programados de mantenimiento. Dado esto es necesario conocer la tasa de extracción óptima para los equipos utilizado, como por ejemplo las configuraciones entre pala y LHD conociendo las distintas cantidades de baldadas para completar el equipo de carga. Esta planificación debe ser aplicada en todo momento, tanto como en el desarrollo minero como en la extracción de minerales de valor. Conocer el valor adecuado de la tasa de extracción dada la geomecánica ayudará a estimar tiempos y costos de un proyecto, además de mejorar las actividades relacionadas en este aspecto.

La planificación minera depende de variados aspectos técnicos y económicos, por lo que al comparar una explotación subterránea con una a cielo abierto hay variadas similitudes, pero también hay importantes diferencias. Las semejanzas del plan minero independientes del método de extracción del mineral son: modelo de recursos, modelo geomecánico, modelo económico, valorización de bloques, envolvente económica, secuencia de extracción, diseño minero, plan de producción y valorización económica del plan. Las diferencias en la planificación entre un método de cielo abierto y subterráneo son: método de explotación, enfoque mayor de geomecánica en método subterráneo, selectividad, dilución, ventilación, desarrollos y preparación (Marín, 2024). En el aspecto de la geomecánica en la construcción de túneles, existen diversos softwares los cuales logran dar resultados aproximados sobre las posibles condiciones de esfuerzos de la construcción, algunos de estos softwares permiten obtener resultados similares a las condiciones reales y con una gran visualización, algunos de los programas más reconocidos son el RS3 de RocScience y FLAC3D de Itasca.

4.2.1 Valorización minera en la planificación

Para comprender la importancia de la valoración minera, es necesario entender que esta impacta de manera significativa en el país, en las comunidades y en su desarrollo, ya que genera empleos y dinamiza la economía local. Además, dentro del contexto de la valoración minera, es crucial conocer cómo las empresas se valoran a sí mismas en periodos de largo, mediano y corto plazo.



El valor de una mina se basa principalmente en la cantidad de beneficio que se puede obtener al extraer un mineral específico. Para ello, es fundamental conocer la composición del yacimiento, lo que implica identificar los minerales presentes, su ley y la cantidad disponible (Heber, 2019). Además de estos aspectos, es necesario tener en cuenta diversos parámetros para estimar adecuadamente el beneficio esperado. Entre estos se incluyen: el precio del mineral en el mercado, la tasa de recuperación del mineral, los costos de extracción y procesamiento, las posibles fluctuaciones del precio en el mercado, los impuestos y tasas de descuento, así como los costos variables y fijos. Con el conocimiento de estos factores, se puede emplear la ecuación (11) para estimar el valor neto aproximado de la mina en un sistema de bloques. Asimismo, si se desea conocer el beneficio posterior derivado de la extracción de este mineral, se puede utilizar la ecuación (12), la que permite calcular el valor futuro esperado.

$$V = p \cdot Cu \cdot L \cdot R - (Cm + Cp) \quad (11)$$

Donde:

V: beneficio neto esperado.

p : precio del mineral.

Cu : ley del mineral.

L: tonelaje.

R: tasa de recuperación.

Cm : costo mina.

Cp : costo planta.

$$VP = \frac{V}{(1 + r)^t} \quad (12)$$

Donde:

VP: valor futuro esperado.

r : tasa de descuento.

t : periodo en años.

La importancia de una buena planificación minera radica en que una gestión adecuada puede maximizar el beneficio esperado, dado que la tasa de descuento tiene un menor impacto cuando el tiempo de recuperación es más corto, lo que aumenta el valor presente de los flujos futuros.

4.2.2 Impactos de los peligros en la planificación minera

Comprender el impacto que puede generar un posible evento descontrolado en minería es difícil de dimensionar. Por ello, es crucial considerar las formas de mitigar estos sucesos y contar con medidas de control y remediación en caso de que ocurra un incidente. Según Ormeno (2021) es importante planificar



y gestionar con experiencia, además menciona la importancia de conocer la opinión de los trabajadores de distintas áreas sobre los posibles riesgos asociados en cada tarea que cada uno de ellos realiza.

Al planificar a corto plazo, es fundamental considerar peligros como las condiciones de la roca, la ventilación del lugar, las fallas y los riesgos operacionales. Para cada uno de estos aspectos, se debe implementar un programa de gestión adecuado, ya que la falta de planificación puede afectar negativamente la seguridad de los trabajadores, el rendimiento de la maquinaria y el entorno minero al momento de responder a estos eventos.

4.2.3 La falla frágil en la planificación minera

La ocurrencia de falla frágil ocurre cada vez con mayor frecuencia, puede ocurrir por variados factores, entre los más importantes son: el aumento de los esfuerzos in situ, la mala o nula fortificación o un avance demasiado rápido. Es debido estas condiciones donde una planificación en corto, mediano y largo plazo es adecuada. Según Brown & Hoek (1980) las gestiones para controlar estos incidentes van desde reconocer el cambio de los esfuerzos del sector, escoger de manera adecuada la fortificación, una revisión sobre la calidad de los elementos fortificantes instalados e ir adecuándose a los cambios que el proyecto necesite de manera profesional y capacitada.

Una de las formas de lograr evitar una falla frágil gracias a una buena planificación es saber el método correcto de fortificación, para esto según Araya (2023) es importante realizar simulaciones y pruebas de laboratorio sobre el mejor sistema de fortificación, específicamente en los pernos a utilizar y el grosor adecuado al momento de utilizar shotcrete, dejando en segundo plano el sistema de mallado y otros elementos de fortificación.

5. Metodología

En este caso de estudio se plantea analizar la ocurrencia de una falla frágil en un túnel circular profundo, para esto se analizarán resultados de modelos en 3D que contarán con variaciones en determinados parámetros, los cuales serán mencionados en esta sección. La forma de trabajo se presenta en la Figura 7, además se detalla a continuación:

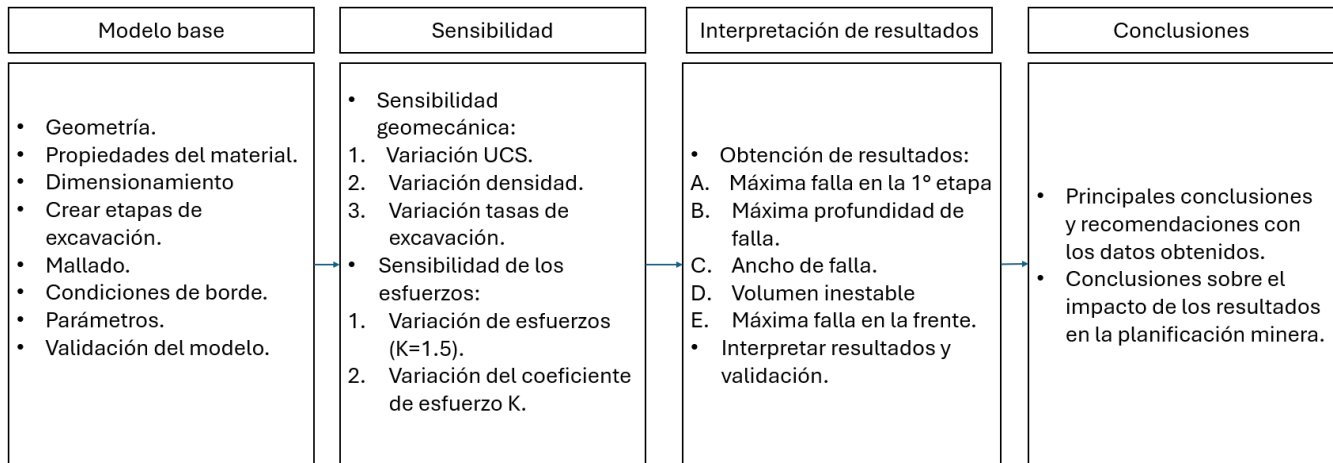


Figura 7: metodología del caso de estudio.

5.1 Modelo base

Para lograr una caracterización adecuada de un modelo base al momento de simular, es importante llegar a resultados esperados, que en este caso es la ocurrencia de la falla frágil, a continuación, se explica la forma de crear correctamente este modelo para obtener estos resultados y realizar una posterior validación de ellos.

5.1.1 Geometría

Para la construcción correcta de la geometría se utilizan cilindros en el túnel, esto permite dar una forma circular a este mismo, los valores utilizados en esta sección son: eje X de (15, 15), en el eje Z de (15, 15) y en el eje Y estos valores dependerán de las distintas tasas de excavación, ya que este parámetro nos indica el largo del túnel en cada etapa. En la opción de radio se utiliza un valor de 2.5 metros, las subdivisiones se dejan de manera determinada, es decir 20 y en la sección de rol se utilizará la opción de excavación, ya que lo que se está diseñando es el túnel ya construido. Los datos resumidos se pueden ver en la Tabla 4.

Tabla 4: parámetros utilizados en la geometría de todas las simulaciones de esta memoria.

Parámetros de la geometría		
	inicio	final
Eje X	15	15
Eje Y	2-4-6-8-12	2-4-6-8-12
Eje Z	15	15
Rol	Excavación	



Subdivisión	20
Radio (m)	2.5

5.1.2 Propiedades del material

Para conocer las propiedades adecuadas del material es esencial conocer el contexto de la simulación, por lo tanto, es importante conocer valores y rangos estimados sobre: profundidad del túnel, densidad de la roca, módulo de Poisson, UCS, módulo de Young, esfuerzo principal mayor y esfuerzo principal menor. El rango de los valores a utilizar serán los indicados en la Tabla 5, estos valores fueron obtenidos por Gonzales de Vallejo et al. (2002) y Vergara (2006). Al modelar y obtener resultados se mantendrán variables fijas, esto con la finalidad de conocer la influencia de la tasa de excavación y no ver resultados afectados por otras variables.

Tabla 5: rangos de parámetros para el estudio.

Parámetro	Rango	Fuente de información
UCS (MPa)	120-250	Gonzales de Vallejo (2002)
E (GPa)	30-50	
V	0.2-0.3	
Densidad de roca (t/m ³)	2.60-2.8	Vergara (2006)
GSI	65-71	
profundidad (m)	1500-3000	
UCS (MPa)	120-250	Este trabajo
E (GPa)	40	
V	0.25	
Densidad de roca (t/m ³)	2.6-2.8	
profundidad (m)	1500-3500	
GSI	>70	

5.1.3 Dimensionamiento

La influencia de una construcción subterránea tiene la condición de afectar otras construcciones cercanas, según Brady & Brown (2006) una aproximación que se ajusta correctamente a la realidad es que la



influencia del diámetro del túnel se extiende hasta 5 veces la distancia del propio túnel. La construcción del túnel en el modelo consta de un diámetro de 5 metros, debido que es el diámetro utilizado en las últimas construcciones de División El Teniente de Codelco (CODELCO, 2024). El software RS3 de RocScience permite construir una caja externa al túnel, esto logra representar las distintas condiciones que se presentan en el túnel, es decir, los esfuerzos in situ, la calidad de roca, presencia de agua, resistencias de la roca intacta, entre otros parámetros.

La modelación consta de la representación de un túnel circular de 5 metros de diámetro, con una caja externa de 30 metros, esto se puede ver representado en la Figura 8. En esta se aplican los valores mencionados anteriormente en la sección de propiedades del material.

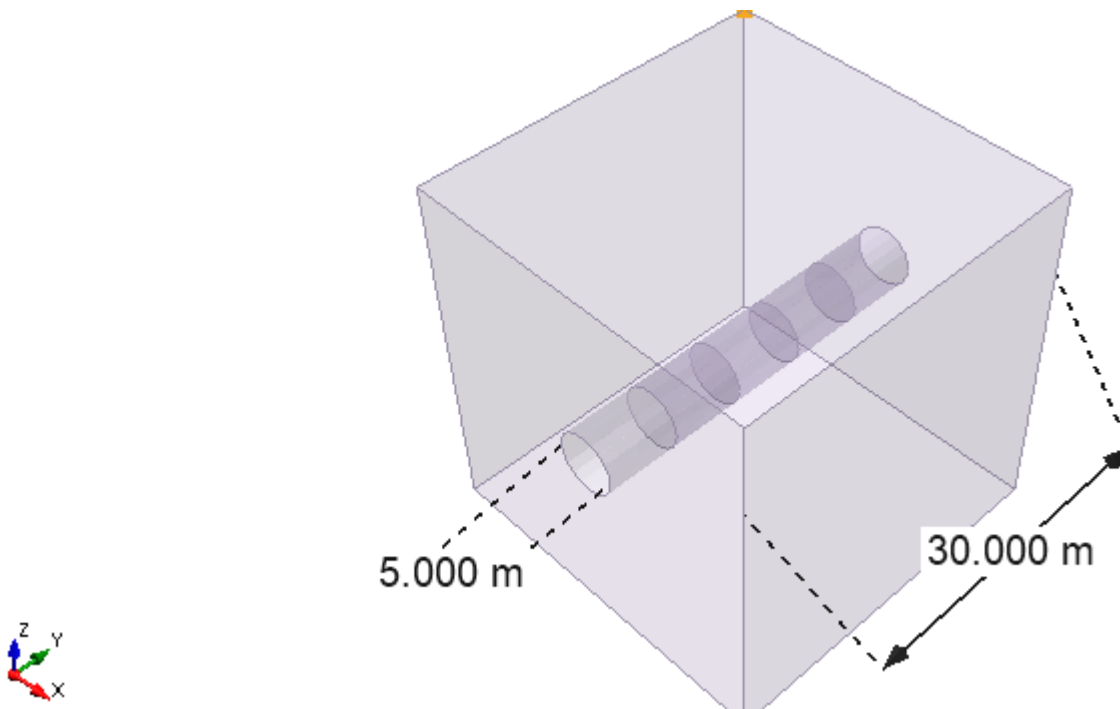


Figura 8: dimensionamiento de la caja externa y del túnel.

5.1.4 Etapas de excavación

La tasa de excavación se representa como etapas en el modelo, para comprobar la influencia de la tasa de avance se realizarán diferentes modelos, los cuales serán similares en los parámetros de la caja externa, pero se diferenciarán en las etapas que contendrán. Para conocer la influencia de la profundidad del túnel, se realizarán nuevos modelos con pequeñas diferencias en los parámetros, los cuales serán mencionados más adelante.



Las variaciones en la tasa de excavación se pueden ver en la Tabla 6, este parámetro será el más importante en este caso de estudio para determinar la influencia en la ocurrencia de falla frágil. Se escogieron estas tasas de avances debido a los metros que actualmente se trabaja en la industria o se podrían trabajar en el futuro.

Tabla 6: variación en la tasa de excavación y etapas producidas.

tasa de excavación	etapas
2 m/día	15
4 m/día	8
6 m/día	5
8 m/día	4
12 m/día	3

5.1.5 Mallado

El mallado en este caso de estudio será de tipo tetraedros de 4 nodos y de gradación, además tendrá un tamaño mínimo de 0.2 metros y máximo de 2 metros en las áreas más alejadas del túnel, esto se aplica con el fin de obtener resultados adecuados en la cercanía del túnel y optimizar el recurso computacional. Para asegurar un mallado correcto en la sección del túnel, se creará una refinación de esta área, creando un mallado graduado de 0.2 metros, con una extensión de 0.8 metros, esto se podrá ver resumido en la Tabla 7.

Tabla 7: parámetros utilizados en la malla de todas las simulaciones.

Mallado	
Tipo malla	tetraedro de 4 nodos
Malla	graduada
Min. Elemento(m)	0.2
Max. Elemento(m)	2
Refinación túnel	graduado
Extensión(m)	0.8

Al aplicar estos valores en el programa se obtendrá una cantidad aproximada de 240 mil nodos y cerca de 1.4 millones de elementos en la malla, asegurando una calidad optima del mallado.

5.1.6 Condiciones de borde



Las condiciones de borde del estudio son un factor relevante, esto es dado que, al crear la caja externa en el estudio, esta deberá representar la realidad dado los parámetros ingresados en ella, por lo que crear condiciones de borde adecuadas permite que el modelo no tenga influencias de parámetros físicos no reales y externos, que afecten los resultados. Para este caso se utilizará la herramienta propia del software RS3 de RocScience el cual bloquea el desplazamiento triaxial del modelo, las condiciones de borde aplicada se ven en la Figura 9.

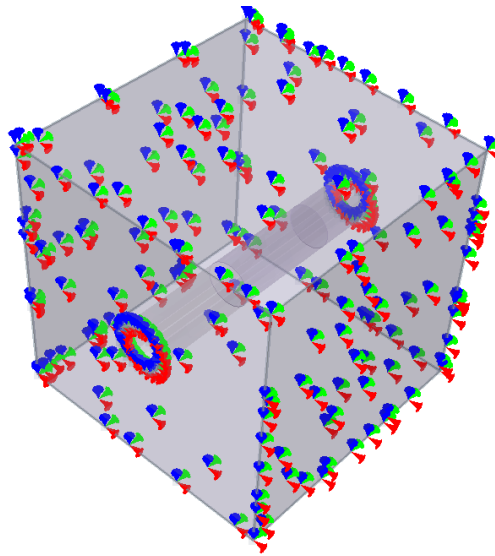


Figura 9: condiciones de borde estandarizadas aplicadas en el modelo en RS3 de RocScience.

5.1.7 Parámetros

Para obtener la ocurrencia de la falla frágil en el modelo, ya sea en gran o menor medida, es importante conocer los parámetros adecuados para provocar este fenómeno. Para esto se utilizarán rangos de altos esfuerzos y de una calidad de roca competente, estos valores se pueden observar en la Tabla 8, estos parámetros serán utilizados en el modelo base de todo el proyecto, los cuales se variarán dependiendo del caso específico de estudio.

Tabla 8: parámetros utilizados en el modelo base de todas las simulaciones.

Modelo base	
UCS (MPa)	190
GSI	>70
densidad (ton/m ³)	2.7
Esfuerzo (MPa)	$\sigma_3= 41, \sigma_1=62$
k	1.5



E (GPa)	40
v	0.25

5.1.8 Validación del modelo

Para poder realizar una validación adecuada del modelo, se crea un ambiente propenso a una falla frágil, es decir, se utilizarán parámetros de altos esfuerzos in situ, roca de calidad competente, resistencias altas y GSI superiores a 70. Posterior a esto se verá en el software RS3 de RocScience el desplazamiento total de la roca alrededor del túnel, la profundidad de falla frágil, el ancho de la falla frágil, los elementos cedidos en la frente del túnel y el volumen inestable. Al tener resultados sobre la ocurrencia de la falla frágil y verificar que, al utilizar los parámetros, lo ocurrido en el software es similar a lo ocurrido en la realidad será validado el modelo al compararlo con el potencial de Diederichs (2007), posterior a esto se realizaran variaciones de los parámetros dentro de un rango crítico, todo esto para seguir observando la falla frágil y su sensibilidad con los distintos valores anteriormente mencionados.

5.2 Sensibilidad

Para analizar la influencia de la tasa de excavación en los distintos parámetros geomecánicos, se partirá de un modelo base, sobre el cual se realizarán variaciones en el UCS, densidad y la tasa de excavación. Adicionalmente, se llevará a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de los esfuerzos en la ocurrencia de falla frágil, y se realizarán comparaciones al modificar la razón de esfuerzos K. Los valores específicos utilizados en esta sección se detallan a continuación.

5.2.1 Sensibilidad geomecánica

Para comprender la influencia de los parámetros geomecánicos en este estudio se realizarán variaciones al modelo base, el cual utiliza los parámetros de la Tabla 8. Los rangos en los que se variara el proyecto se muestran en la Tabla 9, estos parámetros fueron obtenidos dado el estudio de Ramírez (2022), los valores que no están indicados en esta sección no sufrirán modificación y se mantendrán constantes en todas las simulaciones de este estudio.

Tabla 9: variaciones geomecánicas.

Variaciones geomecánicas	
Parámetros	Valores
UCS (MPa)	120-160-190-220-250
densidad (ton/m ³)	2.6-2.7-2.8



tasa de excavación (m/día)	2-4-6-8-12
-------------------------------	------------

Los parámetros modificados se integrarán en toda la caja externa del túnel, siempre manteniendo una variación por simulación, posterior a esto se registrarán todos los resultados obtenidos.

El parámetro de la tasa de excavación será uno de los más importantes a la hora de realizar este estudio, es por esto que se realizaran todas las simulaciones con los distintos datos mencionados con todas las tasas de excavaciones mostradas en la Tabla 6, es importante considerar que para el diseño de cada etapa se deben crear distintos modelos, ya que el programa no permite realizar variaciones al momento de realizar una simulación, por lo tanto se crearan 5 modelos de iguales características pero con distintas tasas de excavación.

5.2.2 Sensibilidad de los esfuerzos

Para analizar la influencia de los esfuerzos en la simulación presentada en este estudio, se llevarán a cabo variaciones en los esfuerzos principales in situ, así como modificaciones en la razón de esfuerzos k. Para esto se utilizarán los valores presentados en la Tabla 8 sobre el modelo base modificando la sección de esfuerzos, los parámetros a utilizar en esta sección se presentan en la Tabla 10. Los valores que se utilizarán al variar la razón de esfuerzos se presentan en la Tabla 11, junto con los parámetros que servirán como base para la simulación, los cuales se han mantenido constantes a lo largo de todo el estudio.

Tabla 10: valores utilizados en la sensibilidad de esfuerzo.

Parámetros de sensibilidad de esfuerzos	
UCS (MPa)	190
Profundidad (m)	1500-2500-3500
densidad (ton/m ³)	2.7
Tasa de excavacion (m/día)	2-4-6-8-12
Esfuerzo (MPa)	$\sigma_3=41, \sigma_1=62; \sigma_3= 68, \sigma_1=102; \sigma_3= 95, \sigma_1=142$
k	1.5

Los valores utilizados se obtuvieron con el aumento de la profundidad en el túnel, enlazado con el estudio de Martin et al. (1999) con el fin de obtener valores significativos en las distintas profundidades de fallas ocurridas en el estudio.



Tabla 11: valores utilizados para variar la razón de esfuerzos k.

Parámetros de sensibilidad k	
UCS (MPa)	190
densidad (ton/m ³)	2.7
Tasa de avance (m/día)	2-4-6-8-12
k	1.5-1.8-2.1
Esfuerzo (MPa)	$\sigma_3=41, \sigma_1=62; \sigma_3=41, \sigma_1=73; \sigma_3=41, \sigma_1=85$

5.3 Interpretación de resultados

Para interpretar los resultados en este estudio, se realizarán diferentes comparativas entre los resultados obtenidos dada las diferencias en ciertos parámetros nombrados, además se realizarán comparaciones con los estudios en los cuales se basó esta memoria. Para tener una buena interpretación de los datos es importante la forma de obtención de estos mismos, la forma adecuada de esta información se detalla más adelante.

5.3.1 Obtención de resultados

A. Falla frágil en la 1° etapa

Para registrar el resultado de la falla frágil en la primera etapa de cada simulación se medirá desde el borde del túnel en la etapa 1° y se registrará, esto se puede observar en la Figura 10.

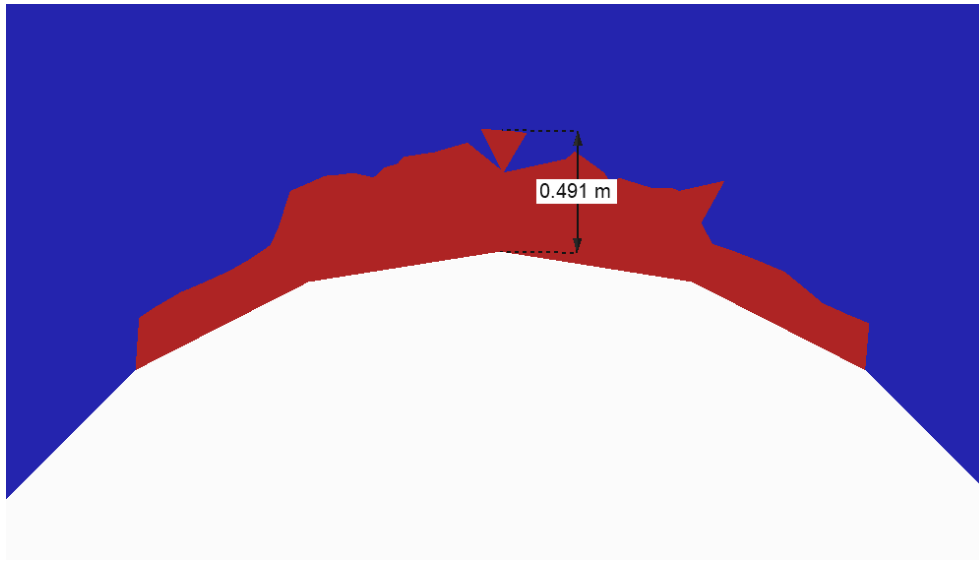


Figura 10: forma de obtención de profundidad de falla en el programa RS3 de RocScience.

B. Máxima profundidad de falla

Para la obtención de la máxima profundidad de falla en el túnel se buscará la falla mayor a lo largo del túnel y se medirá desde el borde del techo hasta el final de la falla, al igual que la falla en la primera etapa, la forma de obtención es similar al señalado en la Figura 10.

C. Ancho de falla

El ancho de falla a medir será el que este en la posición de la máxima profundidad de falla. La forma de obtener este valor se representa en la Figura 11, donde se utiliza una vista 2D del perfil y se registra su valor. Al igual que el caso anterior, se registrarán todos los datos de las diferentes simulaciones.

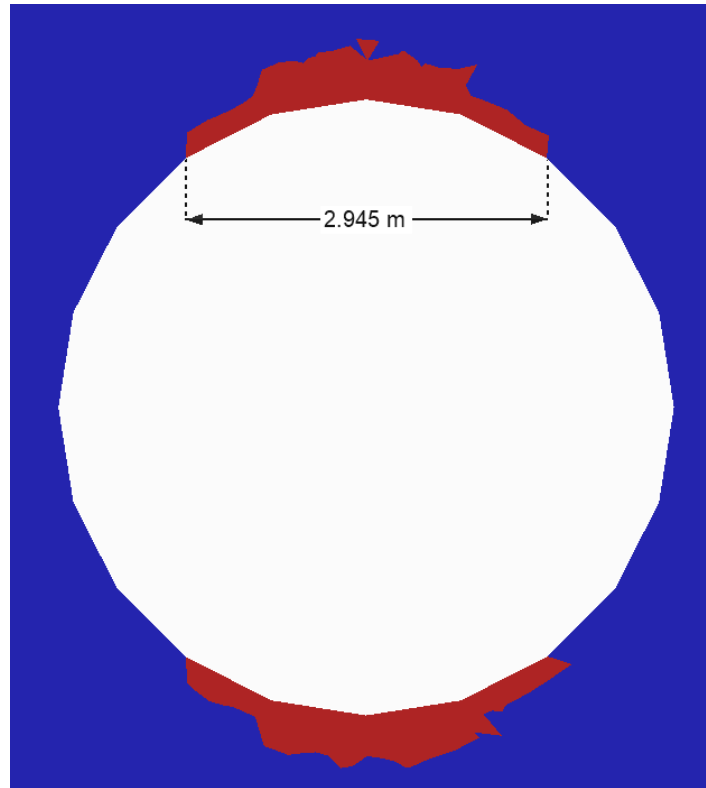


Figura 11: forma de obtención del ancho de falla en el programa RS3 de RocScience.

D. Volumen inestable

El volumen inestable máximo de este estudio será considerado como el volumen que se desplaza en 1 metro lineal en la ubicación de la máxima profundidad de falla. Este parámetro será obtenido según la ecuación (11).

$$\text{volumen inestable} = \text{maxima profundidad de falla} * \text{ancho de falla} * 1 \quad (11)$$

E. Máxima falla en la frente

La máxima falla en la frente se ira registrando en cada etapa de extracción, es decir, si el largo del túnel a excavar es de 30 metros y la tasa de avance es de 2 m/día, se registrarán 15 fallas en la frente. La forma de obtener este valor se observa en la Figura 12.

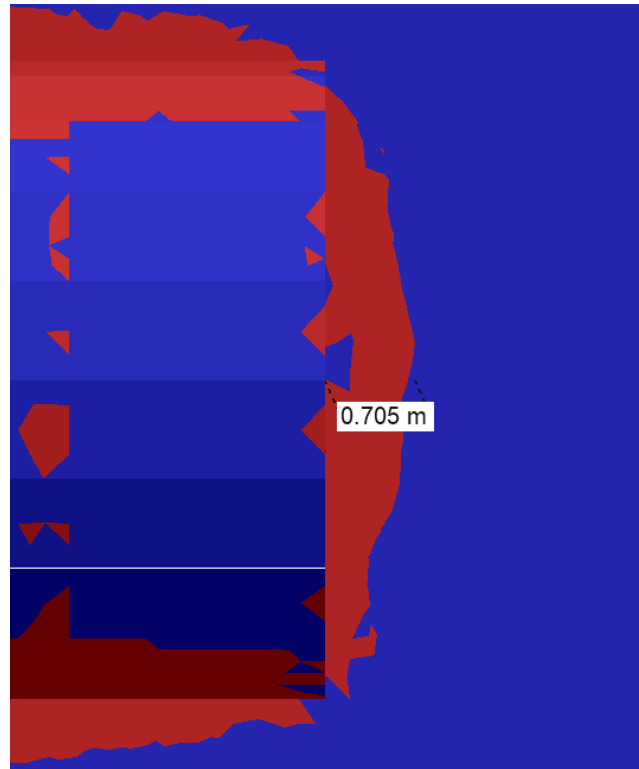


Figura 12: forma de obtención de la falla en la frente del túnel en RS3 de RocScience.

5.3.2 Interpretación de resultados y validación

Para evaluar la importancia de los resultados obtenidos, se efectuarán comparaciones entre los modelos simulados y sus variaciones. Esta sección incluirá gráficos, figuras y tablas para facilitar el análisis. El objetivo es comprender la influencia de los parámetros geomecánicos y de esfuerzos en las distintas tasas de avance. Finalmente, se obtendrán conclusiones sobre cuál tasa de avance, bajo diversas condiciones, presenta un mayor riesgo de falla frágil y cuál sería la tasa óptima que minimiza este riesgo. Para ello, se presentarán diferentes tiempos que podría tardar en realizarse un desarrollo minero simplificado.

Para validar correctamente los resultados, se emplea el modelo de Diederichs (2007). En este proceso, se graficará el potencial de falla propuesto por el autor y se comparará con los resultados obtenidos en este estudio. Los resultados deben ser consistentes con los citados por Diederichs y ubicarse cercano a la curva que este define, ya que la aparición de la falla frágil debe estar vinculada al método de cálculo empleado en las simulaciones. Para verificar adecuadamente los valores, se utilizará la profundidad de falla mencionada en secciones anteriores, la cual se muestra en la ecuación (12).

$$\text{profundidad de falla} = \text{profundidad registrada} + \text{radio del tunel} \quad (12)$$



6. Resultados y análisis

Los resultados obtenidos gracias a la metodología planteada anteriormente permiten conocer la ocurrencia de la falla frágil en diferentes grados de desprendimiento y en distintas condiciones. Las variaciones que se presentarán a continuación serán señaladas debidamente en cada sección, además al finalizar todas las combinaciones de simulación se realizara una tabla resumen de todos los datos obtenidos.

Los parámetros utilizados en el modelo DISL referentes a los parámetros peak y residuales son calculados gracias a lo planteado por Perras & Diederichs (2016), esto se puede observar en la Tabla 12, aquí se utiliza un parámetro de tracción aproximado de 7.5 MPa y un UCS de 190 MPa, los cuales son valores bases en el estudio, lo cual provoca los resultados señalados.

Tabla 12: parámetros peak y residuales del enfoque DISL utilizados en este trabajo.

Enfoque DISL			
Parámetro H&B modificado	Este estudio	Parámetro H&B modificado	Este estudio
a_p	0,25	a_r	0,75
s_p	0,0625	s_r	0,001
m_p	1,528	m_r	9
Dilatación	-	Dilatación	0

6.1 Caso base

Para la correcta validación del caso base se realizó la comparación con el potencial de Diederichs (2007) y con los casos validados de Martin et al. (1999), se observa que los datos obtenidos con las diferentes tasas de excavación se adecuan de buena forma a la línea de tendencia del modelo utilizado en este estudio. Los datos graficados con sus respectivas comparaciones se pueden ver en la Figura 13, donde se verifica una similitud de resultados entre los distintos avances en el modelo base. La variación en el SR es nula, debido a que no se modifica ningún factor de este eje.

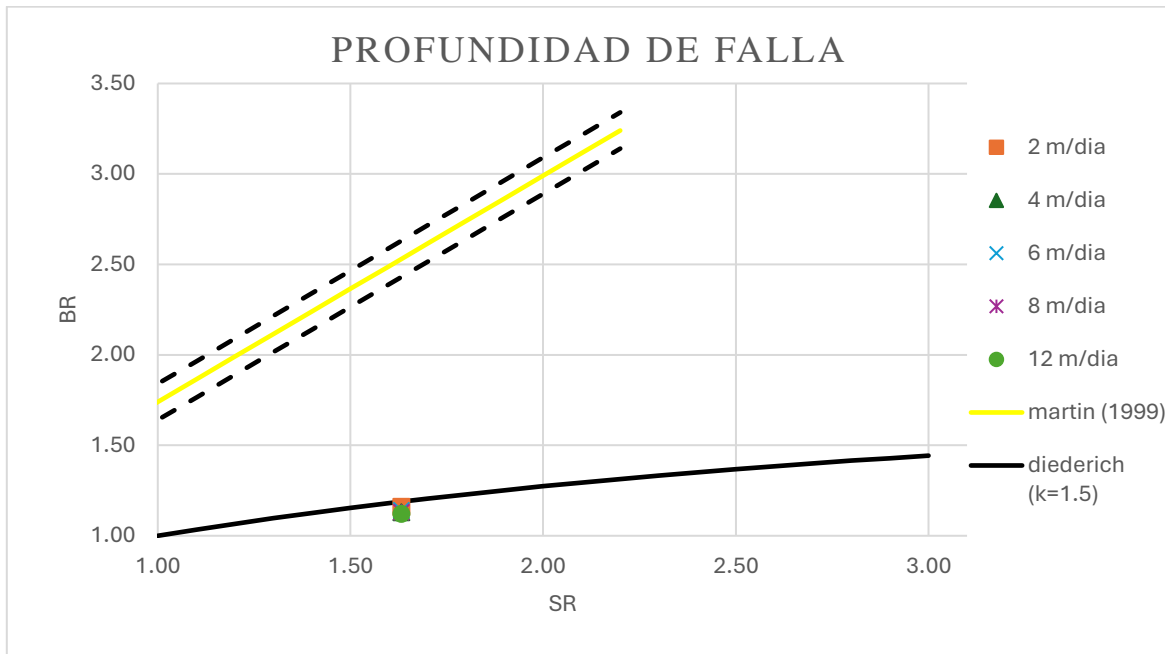


Figura 13: validación de datos base obtenidos con enfoque DISL y Martin (1999).

En la Tabla 13 se puede observar los resultados del modelo base, aquí se logra apreciar la diferencias y similitudes que existen entre las distintas tasas de excavaciones. Se observa que independiente de la tasa de excavación, no hay falla frágil en la frente del túnel, esto se debe principalmente a las condiciones del modelo base, además se visualiza que el proceso de falla frágil en la primera etapa parte en la tasa de 6 m/día. En la Figura 14 se observa la comparación entre la falla frágil en la primera etapa de excavación y la máxima profundidad de falla que logra ocurrir en todo el túnel. Se visualiza una clara tendencia en aumento en las etapas de 6 m/día, 8 m/día y 12 m/día sobre la falla frágil, pese a que en las etapas de 2 m/día y 4 m/día la presencia de falla es nula, en cambio ocurre un proceso distinto al momento de observar la máxima profundidad de falla en todo el túnel, aquí se aprecia que la máxima falla es similar en todas las tasas de avance, indicando que el comportamiento final del túnel se logra explicar por el contexto geomecánico de este.

El valor sobre el volumen inestable máximo es un indicador aproximado sobre la peligrosidad de elementos cedidos que puede ocurrir donde se encuentra la falla mayor en todo el recorrido del túnel, este parámetro logra permitir una mejor visualización del grave problema de la falla frágil. En la Figura 15, se logra apreciar las diferencias de volúmenes en cada simulación, la cual puede ser explicada por el ancho de falla, el cual puede variar dependiendo de la ubicación dentro del túnel y/o el avance del túnel.

El análisis del comportamiento de las fallas frágiles en la frente del túnel, bajo las condiciones del modelo base, muestra una ausencia de fallas. La tasa de avance, en el contexto de esta excavación y con los parámetros mencionados, no genera perturbaciones ni influye en la aparición de fallas en la frente del túnel.



Tabla 13: valores obtenidos en la simulación del caso base con las distintas tasas de excavación de este estudio.

Resumen de los valores obtenidos						
Avance por día	1° falla en la frente (m)	mayor falla en el frente (m)	1° falla en el borde (m)	Máxima profundidad de falla (m)	ancho de falla (m)	volumen inestable máximo (m ³)
2 m/día	0	0	0	0.69	3.21	2.21
4 m/día	0	0	0	0.62	3.66	2.27
6 m/día	0	0	0.37	0.66	4.07	2.69
8 m/día	0	0	0.44	0.62	3.22	2.00
12 m/día	0	0	0.53	0.6	3.76	2.26

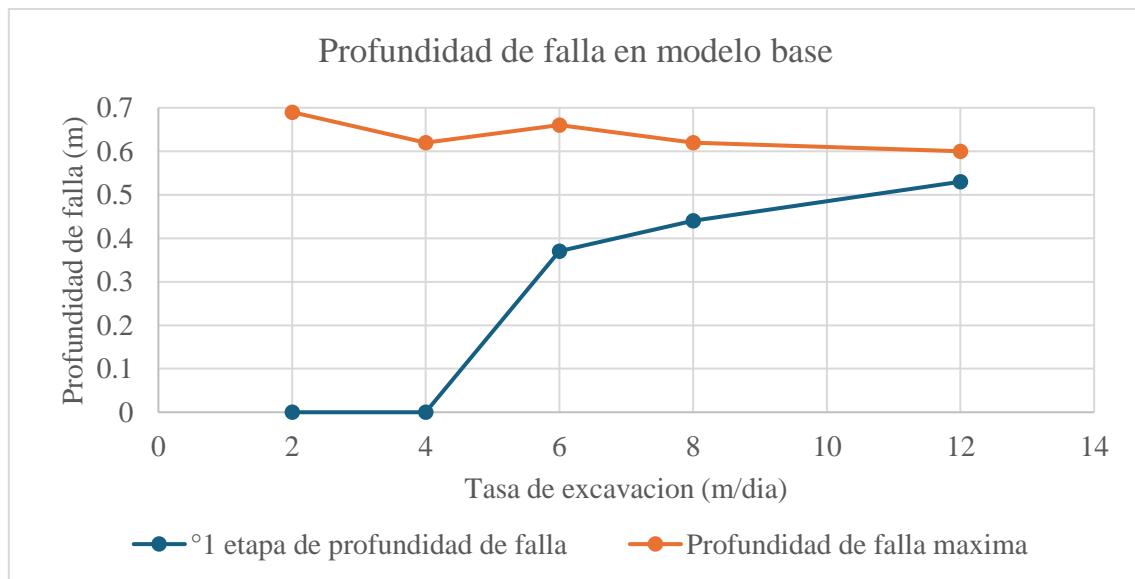


Figura 14: grafico de profundidad de falla en la primera etapa y en todo el largo del túnel, simulada con los valores de bases.

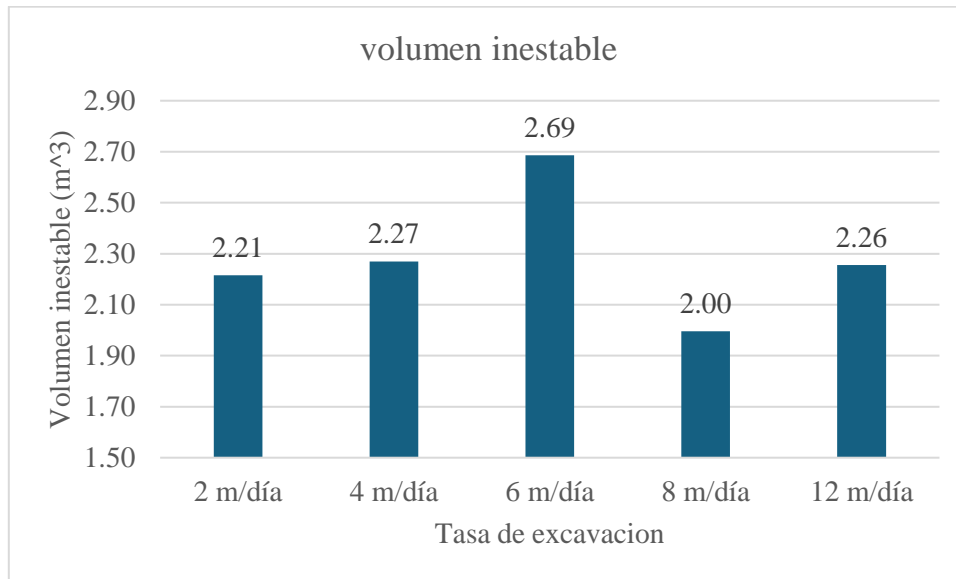


Figura 15: volumen inestable máximo presente en las distintas tasas de excavaciones en el modelo base.

6.2 Influencia del UCS

Para poder validar los resultados obtenidos, estos se graficaron con el modelo propuesto por Martin et al. (1999) y el potencial de Diederichs (2007). En la Figura 16 podemos observar como todos los valores tienden a seguir el patrón sobre el modelo propuesto por Diederichs, además se puede notar que en las mismas tasas de excavación con UCS similares no se registran grandes diferencias, en cambio al cambiar el parámetro del UCS si se registran fallas más profundas y lo que genera un volumen inestable mayor, mencionar que para este apartado se enfocó en la falla máxima en todo el recorrido del túnel y no solo en la primera etapa de este. Al observar los valores con UCS mayores se observa que la falla a ocurrir es mínima o nula, esto provoca que estos valores se alejen un poco de lo propuesto por Diederichs, pero se justifica dada la baja probabilidad de falla frágil.

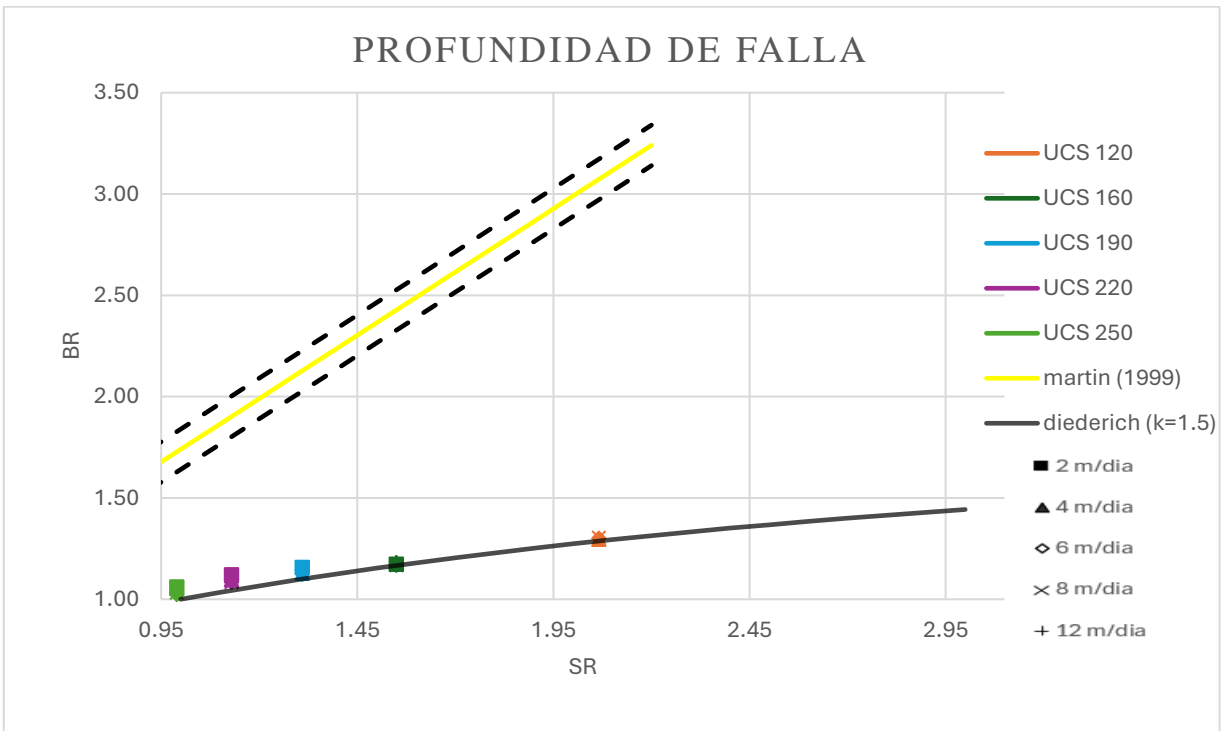


Figura 16: validación de valores obtenidos al variar el UCS de cada simulación con el enfoque DISL de Diederichs (2007).

En la Figura 17 se observa el comportamiento de la falla frágil en la primera etapa de excavación de cada simulación, es decir, la profundidad de falla en la primera etapa del túnel o la nula profundidad de esta. En esta figura se verifica que con un UCS de 120 MPa la presencia de falla ocurre independiente de la tasa de excavación. Para un UCS de 160 MPa ocurre un proceso similar al anterior, pero con fallas de menor tamaño. Con un UCS de 190 MPa ocurre un proceso distinto ya que en construcciones con 2 y 4 m/día no ocurre una falla frágil en la 1ª etapa, en cambio si el avance es superior o igual a 6 m/día si hay un proceso de ocurrencia de falla frágil. Al tener un UCS de 220 MPa la presencia de falla frágil solo se presenta en construcciones si el avance es mayor o igual a 8 m/día. Finalmente, al realizar el estudio con un UCS de 250 MPa la presencia de falla frágil no ocurre en ninguna tasa de excavación de este estudio. En la Tabla 14 se presenta una tabla resumen de estos datos.

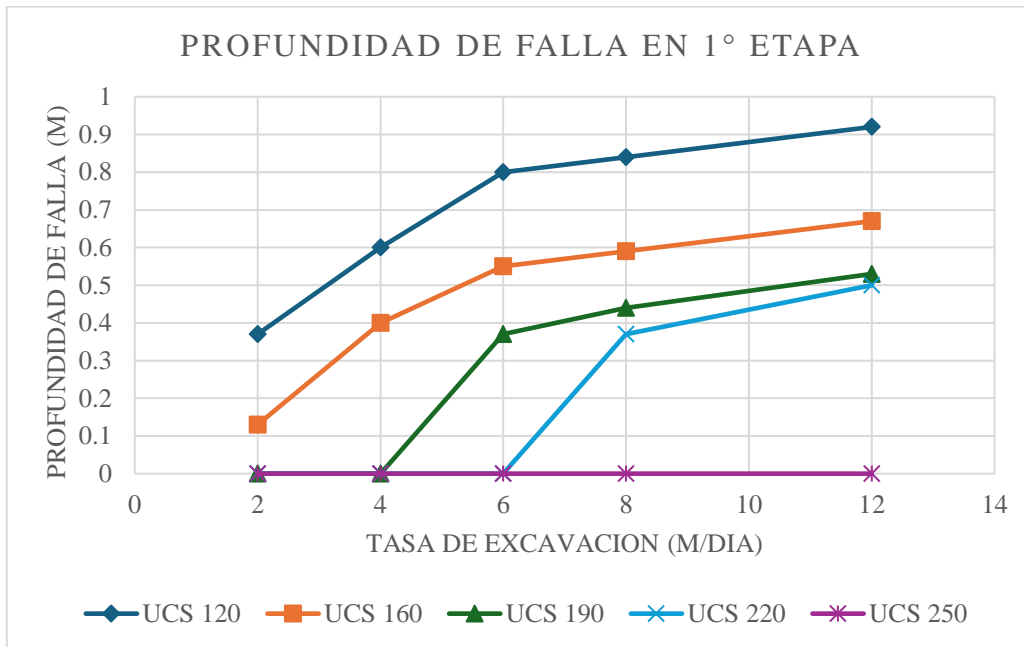


Figura 17: resultados de la profundidad de falla en la 1° etapa de excavación de cada modelo con variaciones del UCS.

Tabla 14: valores de la profundidad de falla en la 1° etapa de excavación de cada modelo.

UCS (MPa)	profundidad de falla en 1° etapa				
	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
120	0.37	0.6	0.8	0.84	0.92
160	0.13	0.4	0.55	0.59	0.67
190	0	0	0.37	0.44	0.53
220	0	0	0	0.37	0.5
250	0	0	0	0	0

La Figura 18 corresponde a la máxima profundidad de falla de cada simulación, es decir, se consideran todas las etapas de la simulación y se realizan variaciones en la resistencia a la compresión uniaxial y la tasa de avance. Los valores obtenidos y registrados corresponden a las zonas 100% plastificadas en las cuales se logra ver una tendencia sobre la disminución de la profundidad de falla al aumentar el UCS de la roca, de igual manera se observa que la profundidad de falla en cada etapa de excavación es similar al mantener el UCS, esto es un indicador sobre la dominancia en la sensibilidad del UCS sobre la tasa de avance. Además, al observar este parámetro en las distintas tasas de excavación se logra ver un claro patrón, el cual indica un comportamiento similar en cada uno de los casos. Al visualizar la Figura 19 se ratifica lo mencionado anteriormente sobre la dominancia del parámetro del UCS al momento de la profundidad de falla, ya que el volumen inestable mayor ocurre con un UCS de 120 MPa y el volumen



inestable menor ocurre con un UCS de 250 MPa, siendo el valor del UCS menor y mayor de este estudio respectivamente. En la Tabla anexo 1 se presenta los datos utilizados en esta sección.

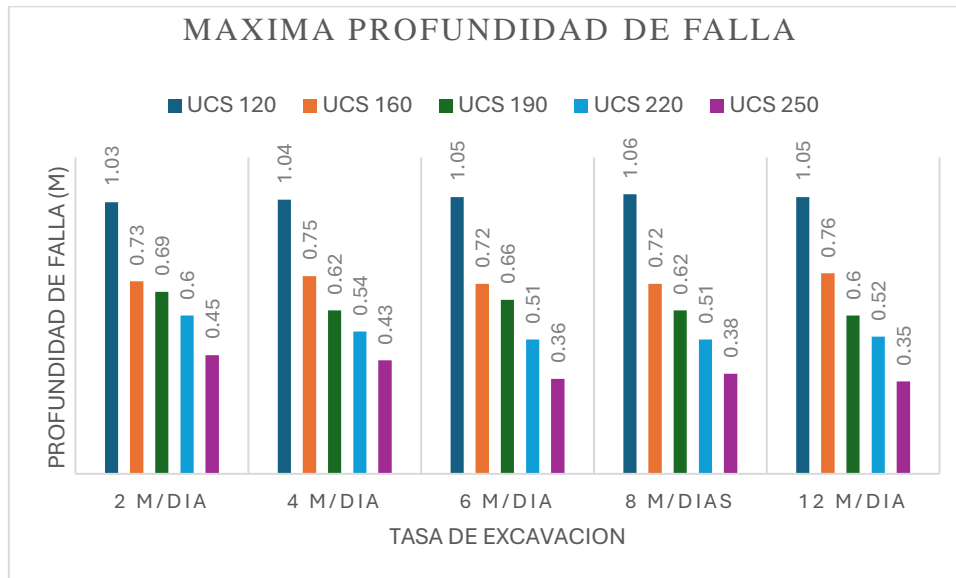


Figura 18: resultados de la máxima profundidad de falla de todos los modelos con variaciones en el UCS y tasas de excavación.

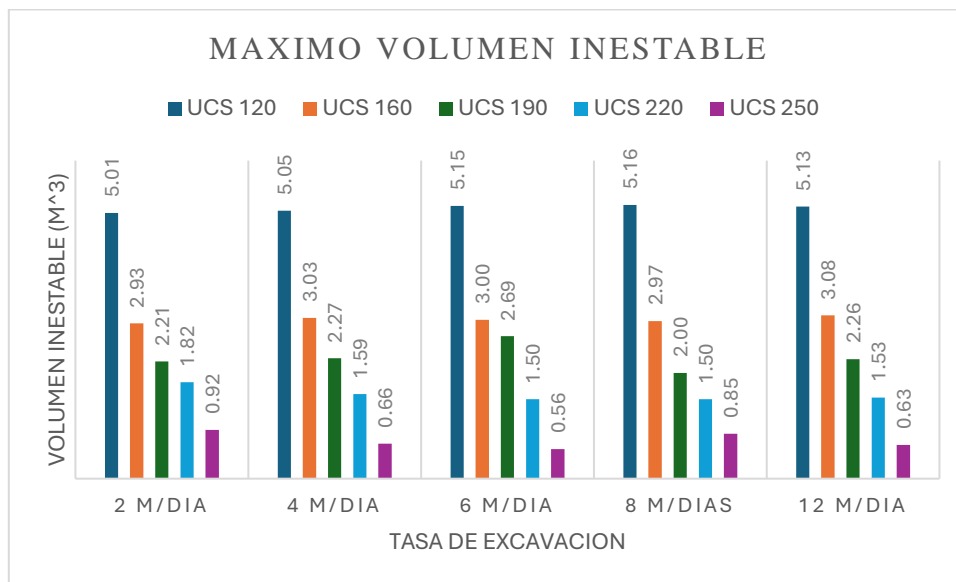


Figura 19: resultado del volumen inestable máximo en todo el túnel de todos los modelos con variaciones en el UCS y tasa de excavación.



En la Figura 20 se puede observar la falla frágil en la primera etapa enfocado en la frente del túnel, al igual que en el caso anterior el parámetro del UCS es el dominante en esta sección, aquí se logra apreciar que con un UCS de 120 y 160 MPa ocurre falla en la frente del túnel, con UCS superiores no ocurre falla en la frente sin importar las distintas tasas de avance, esto indica que la frente es menos sensible en comparación con el borde del túnel dada las condiciones del UCS y la profundidad de falla.

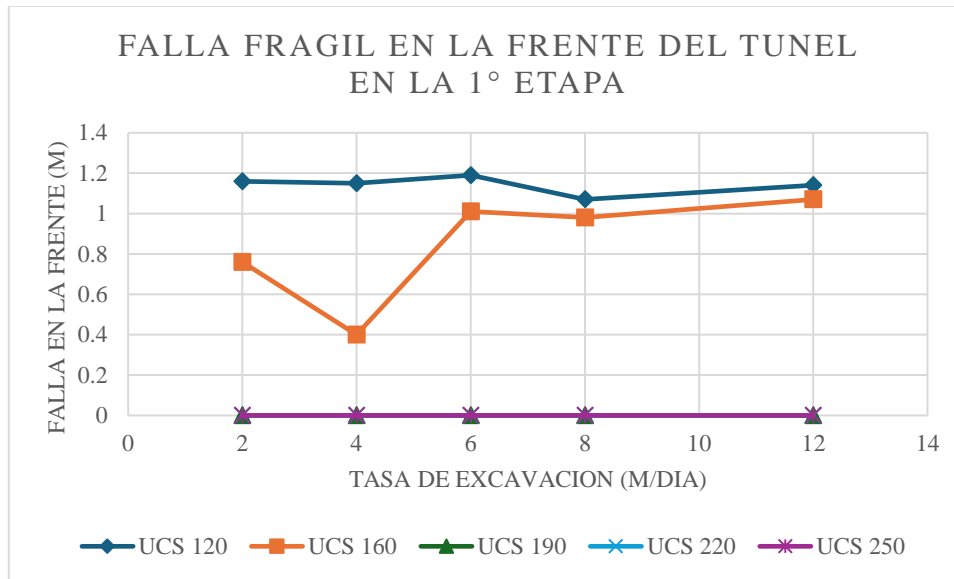


Figura 20: resultados de la falla frágil en la frente del túnel con la variación del UCS y la tasa de excavación.

6.3 Influencia de la densidad

Al validar los valores obtenidos según el modelo de Diederichs (2007) y Martin et al. (1999) podemos observar que los parámetros obtenidos no sufren cambios abruptos al depender de la densidad (ton/m^3), los resultados se pueden observar en la Figura 21, donde se aprecia que la sensibilidad en la densidad no afecta los datos, además se observa que estos valores se encuentran en una zona cercana a el potencial propuesto por Diederichs (2007) indicando que los valores se ajustan a su modelo. los valores no sufren variaciones en los parámetros de esfuerzos, UCS o inicio de fractura de falla (ci), lo que provoca que los resultados solo puedan tener una variación en el eje vertical.

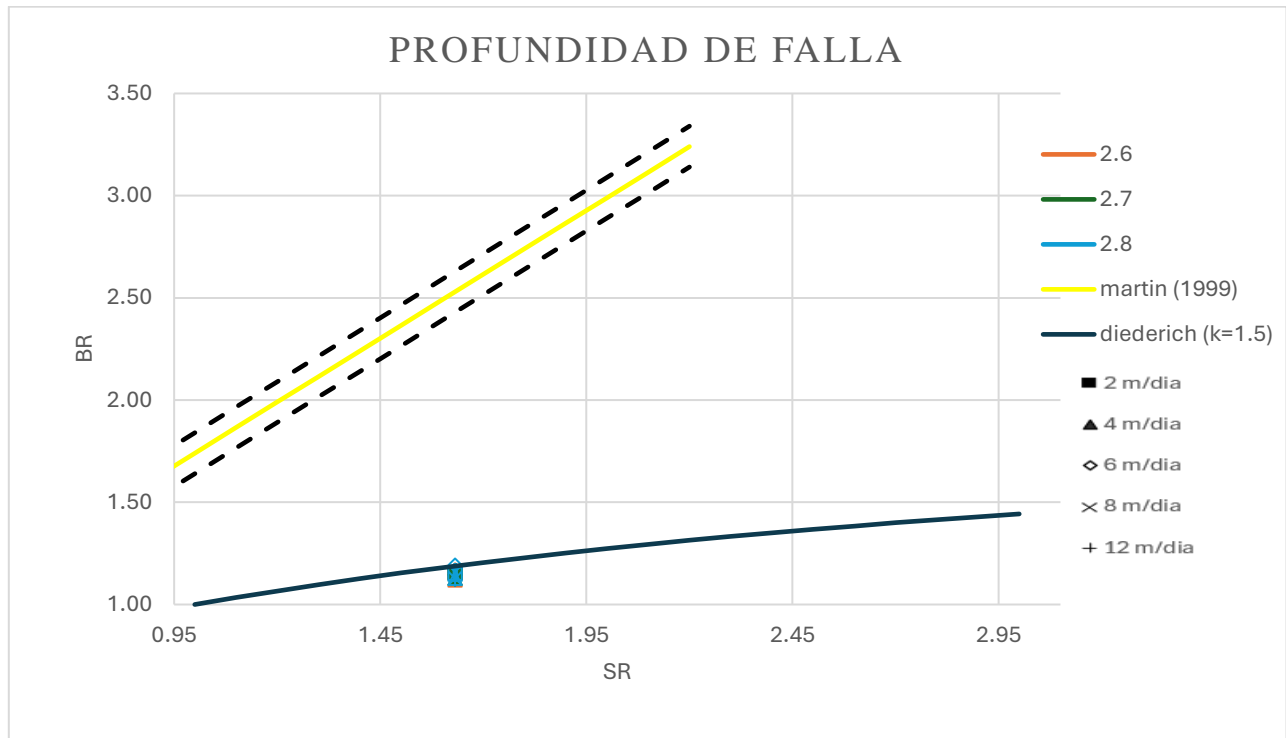


Figura 21: validación de valores obtenidos al variar la densidad de cada simulación con el enfoque DISL de Diederichs (2007).

En la Figura 22 se observa el comportamiento de la falla frágil en la primera etapa de excavación en cada simulación con los parámetros bases, solo variando la densidad. Aquí se observa que lo mencionado anteriormente sobre la poca o nula influencia de la densidad (con valores del rango de este estudio) en la ocurrencia de falla frágil. Los valores obtenidos en cada escenario simulado son prácticamente los mismos, esto es un claro indicador que la influencia de la densidad es un parámetro nulo en el proceso de ocurrencia de falla frágil y que la influencia de la tasa de excavación es un parámetro mucho más desencadenante de este proceso. Un resumen de los datos mencionados anteriormente se puede visualizar en la Tabla 15.

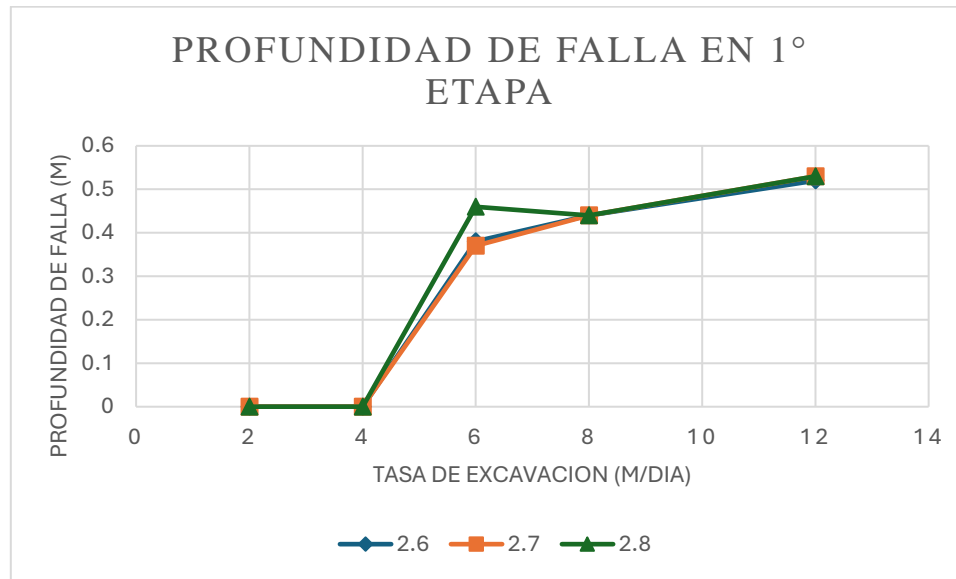


Figura 22: valores de la profundidad de falla frágil en la 1º etapa obtenidos al variar la densidad y la tasa de excavación.

Tabla 15: resumen de valores obtenidos en la 1º etapa de cada excavación.

Profundidad de falla en 1º etapa					
Densidad (ton/m ³)	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
2.6	0	0	0.38	0.44	0.52
2.7	0	0	0.37	0.44	0.53
2.8	0	0	0.46	0.44	0.53

En la Figura 23 podemos observar la profundidad de falla máxima en todas las simulaciones y con todas las variaciones de la densidad, aquí es posible observar que la densidad no afecta directamente los resultados, ya que en cada tasa de excavación los valores obtenidos son similares. Se observa que en el avance de 6 m/día ocurre un aumento en la profundidad de falla, este valor principalmente puede ser a consecuencia del gran avance por etapa y la gran cantidad de repetitividad para completar el túnel. En la Figura 24 podemos observar el volumen inestable en 1 metro lineal, este valor permite poder observar de mejor manera el comportamiento que produce la densidad y la tasa de avance en la falla frágil, el valor más alto ocurre en la tasa de excavación de 6 m/día y al igual que lo mencionado anteriormente los valores no muestran una relación directa sobre la influencia de la densidad en el aumento del volumen inestable. El ancho de falla en cada caso se puede visualizar en la Tabla anexo 2.

Al realizar un análisis sobre la falla frágil en la frente del túnel en la primera etapa de la excavación, se observa que no hay ocurrencia de ella, esto indica que con los valores bases y el rango de densidad variado no influyen en la ocurrencia de falla en este sector del túnel.

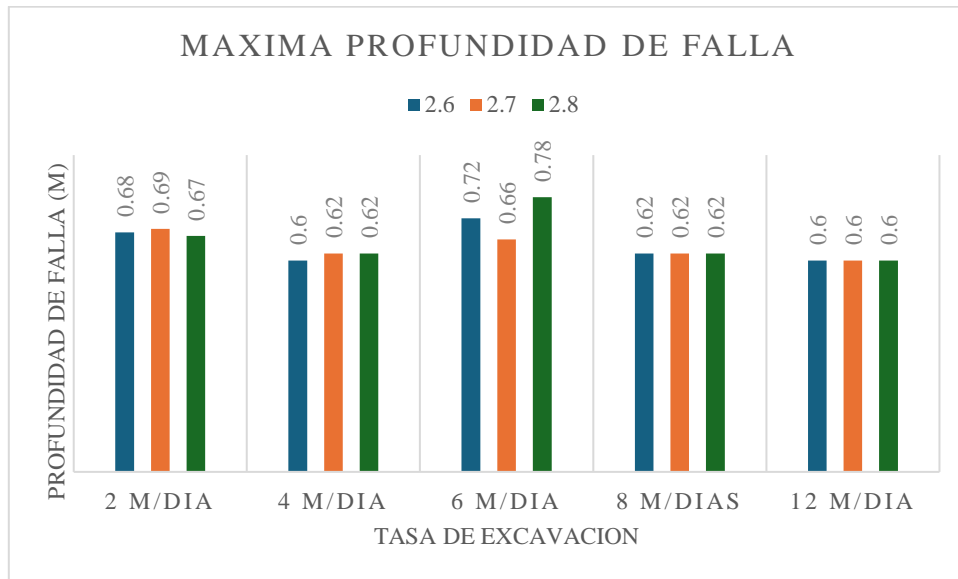


Figura 23: profundidad de falla máxima en todo el recorrido del túnel, con variaciones en la densidad y tasa de excavación.

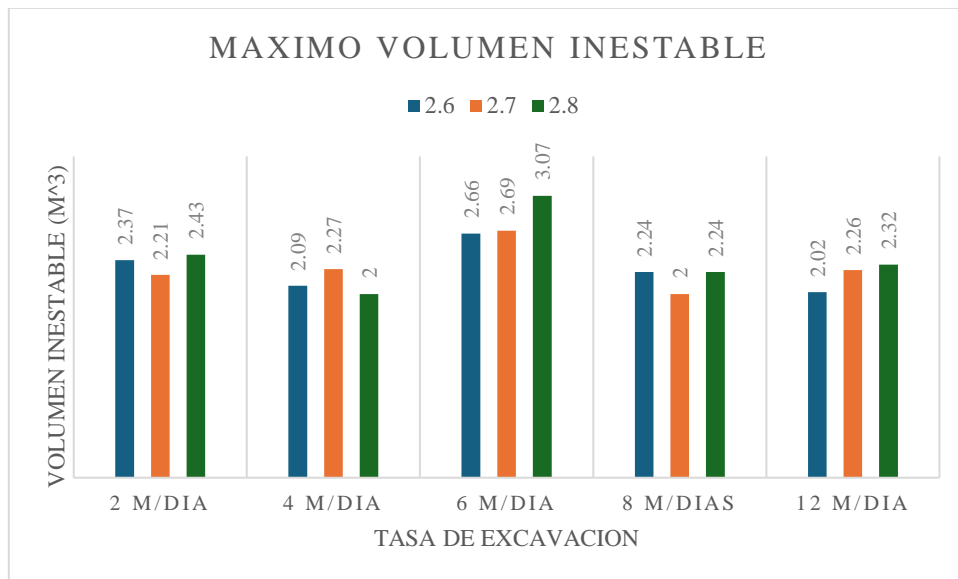


Figura 24: volumen inestable máximo en todo el túnel con variaciones en la densidad y tasa de excavación.

6.4 Influencia de la razón de esfuerzos (k)



Al validar los resultados obtenidos de la razón de esfuerzos con los valores propuestos por Diederichs (2007) y Martin et al. (1999), se graficó la tendencia del potencial de Diederichs (2007) con un valor de k igual a 2. Esta representación busca validar de manera más precisa los distintos resultados obtenidos en este caso específico, como se puede observar en la Figura 25. Se puede notar que los valores de k iguales a 1.5 se alinean adecuadamente con el potencial correspondiente. Además, se confirma que los resultados con k igual a 1.8 y 2.1 muestran un aumento en la profundidad de falla, lo que sugiere una mejor concordancia con el potencial de Diederichs para k igual a 2. En ambos casos los valores se validan dada la cercanía con el potencial de falla.

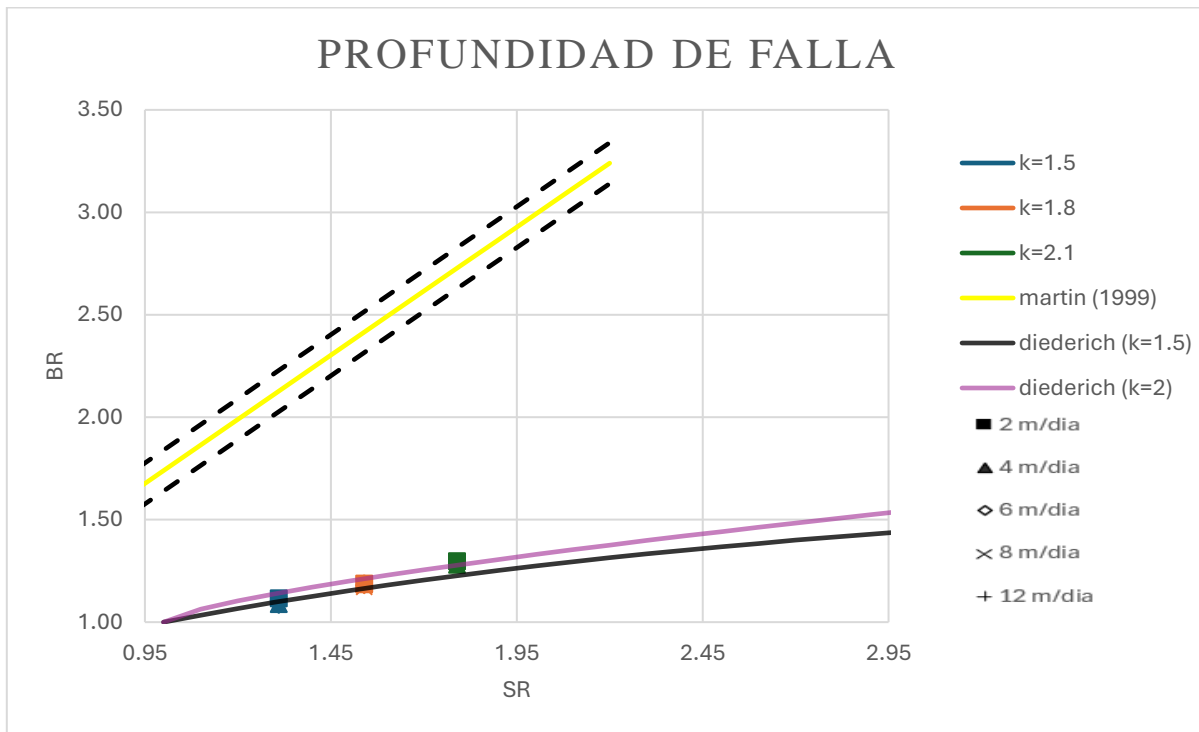


Figura 25: validación de valores obtenidos al variar la razón de esfuerzos en cada simulación con el enfoque DISL de Diederichs (2007).

En la Figura 26 se observa el comportamiento de la falla frágil durante la primera etapa de excavación en función de las distintas razones de esfuerzo. Se evidencia que, para razones de esfuerzo de 1.5, la falla frágil se presenta desde tasas de avance de 6 m/día en adelante. Con un k igual a 1.8, la falla aparece a partir de tasas de 4 m/día y con un k de 2.1, la falla frágil se manifiesta independientemente de la tasa de avance.

Al analizar las profundidades de falla con las diferentes razones de esfuerzo, se establece que el aumento de la profundidad de falla está directamente relacionado con la razón de esfuerzo. Además, todas estas fallas presentan un comportamiento similar en cada caso, ya que un incremento en la tasa de excavación también conlleva un aumento en la profundidad de falla. Un resumen de los valores utilizados se presenta en la Tabla 16.

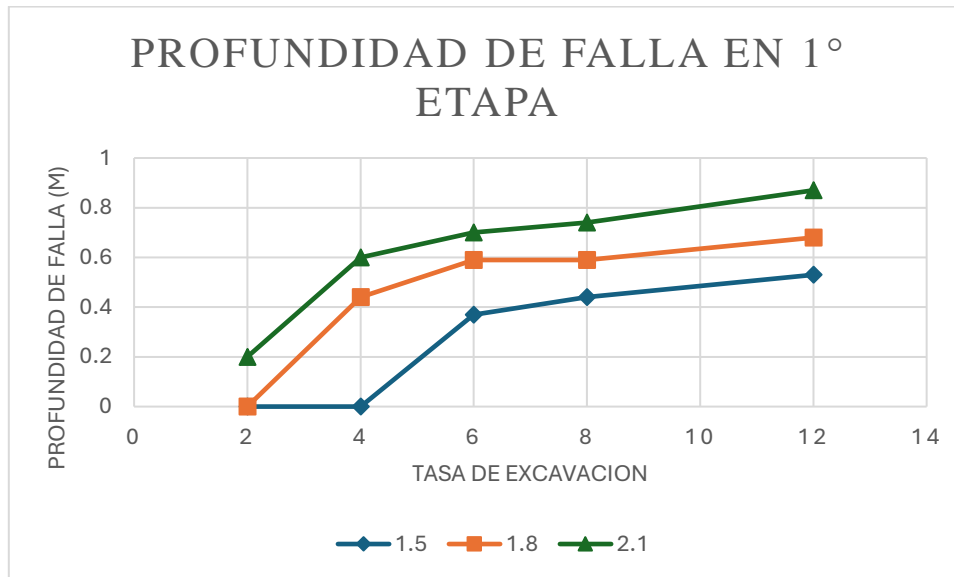


Figura 26: resultados obtenidos de la falla frágil en la 1º etapa de excavación al variar las distintas razones de esfuerzo.

Tabla 16: resumen de valores de falla frágil obtenidos en la 1º etapa de cada excavación.

Profundidad de falla en la 1º etapa					
K	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
1.5	0	0	0.37	0.44	0.53
1.8	0	0.44	0.59	0.59	0.68
2.1	0.2	0.6	0.7	0.74	0.87

En la Figura 27 se puede observar el comportamiento de la profundidad máxima de la falla frágil en cada una de las simulaciones realizadas en este trabajo, considerando las distintas variaciones en las tasas de excavación y la proporción de esfuerzos. A partir de los resultados, se concluye que las tasas de excavación presentan valores similares con parámetros comparables. Esto se debe a que el factor de la tasa de avance, al buscar la máxima falla a lo largo de todo el túnel, no genera una diferencia significativa en los resultados. En cambio, si nos enfocamos en la variación de la razón de esfuerzos, los resultados obtenidos sí presentan grandes variaciones, esto propone que en esta sección el factor dominante para la provocación de falla frágil sigue siendo el esfuerzo, que en este caso es el esfuerzo principal mayor.

En la Figura 28 se presentan los resultados del volumen inestable máximo dentro del túnel. Esta evidencia refuerza la idea de que el esfuerzo es un factor dominante en este estudio. Además, se observa un leve aumento en la profundidad de falla para la tasa de avance de 6 m/día. Este aumento puede atribuirse a varios factores, pero en este caso particular, la variación del valor se relaciona con el ancho de falla. Dado que este ancho depende de la ubicación de la máxima profundidad de falla, puede generar pequeñas



diferencias en los valores, las cuales no son relevantes en el contexto de la escala del estudio. Los valores utilizados en esta sección se pueden ver en la Tabla anexo 3.

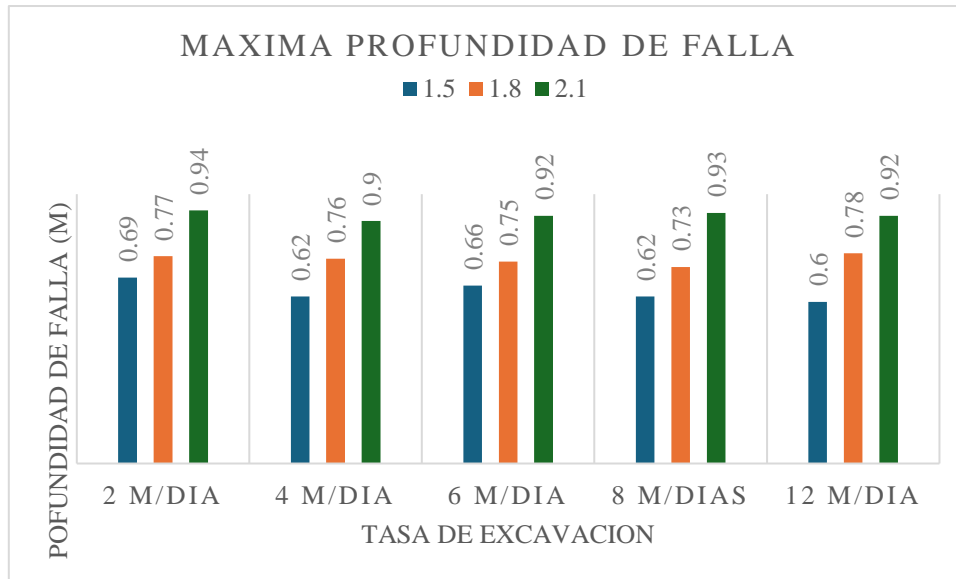


Figura 27: resultados de la profundidad de falla frágil máxima de todos los modelos al variar la razón de esfuerzos y tasa de excavación.

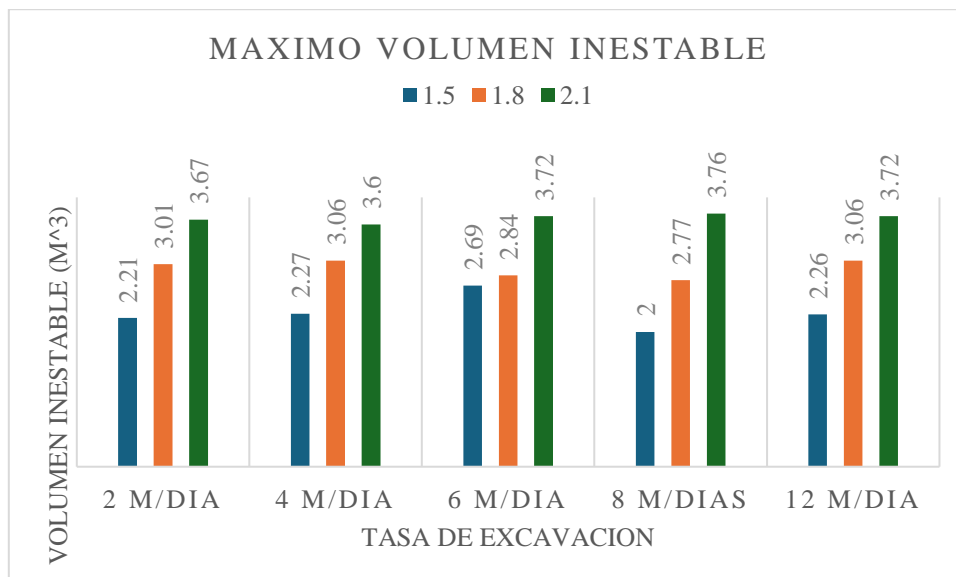


Figura 28: resultados del volumen inestable máximo en todo el túnel con las variaciones de razón de esfuerzo y tasa de excavación.



En la Figura 29 se presenta el análisis del comportamiento de la falla frágil en la frente del túnel durante la primera etapa de excavación. Las profundidades en la frente se mantienen relativamente constantes, alcanzando aproximadamente 1.2 metros. Esto indica que, bajo estas condiciones, el modelo utilizado no predice profundidades superiores al valor mencionado.

Se identificó que la tasa de excavación solo influye en escenarios con una razón de esfuerzo de 1.8, donde la falla aparece a partir de una tasa de avance de 4 m/día. En cambio, en otros casos, el esfuerzo es el factor predominante. Para una razón de 2.1, la falla frágil está presente en todas las tasas de excavación, mientras que con una razón de 1.5 no se detecta falla en la frente bajo ninguna condición evaluada.

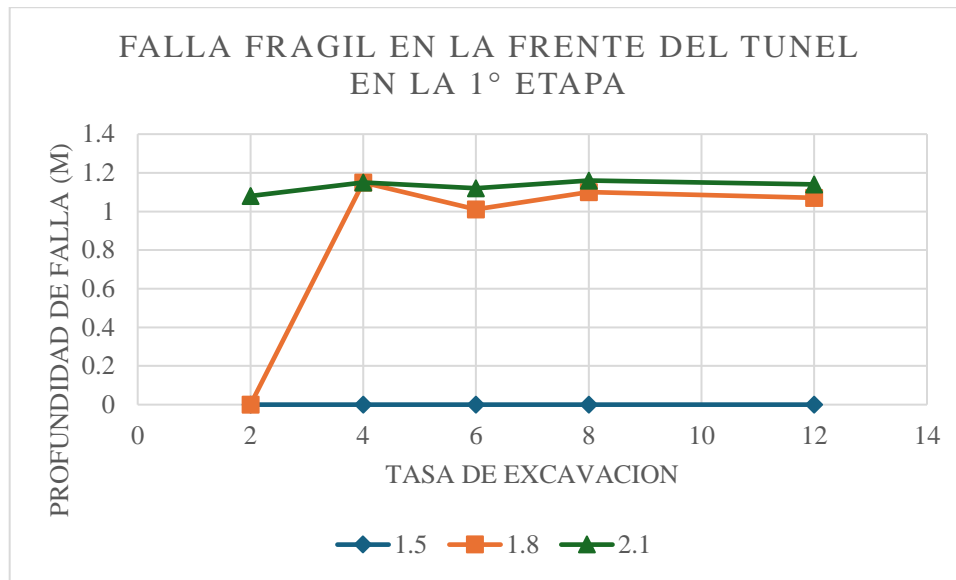


Figura 29: resultados de la falla frágil en la frente del túnel en la 1° etapa de excavación con variaciones en la razón de esfuerzo y la tasa de excavación.

6.5 Influencia de los esfuerzos

Al validar los resultados sobre la profundidad de falla tras modificar los esfuerzos primarios y terciarios, se observa que los valores obtenidos coinciden con el potencial establecido por Diederichs (2007), como se muestra en la Figura 30. Al ajustar los esfuerzos utilizando el enfoque DISL y las indicaciones de Diederichs (2007), se espera que un aumento en los esfuerzos se traduzca en mayores profundidades de falla, lo cual se confirma en los valores de BR. Asimismo, al modificar este parámetro, el valor del SR también se ve afectado, lo que debería desplazar los valores hacia la derecha del gráfico, como efectivamente ocurre en todos los casos. Los valores asociados a menores esfuerzos se sitúan en áreas con BR y SR bajos, mientras que aquellos con mayores esfuerzos se encuentran en zonas con BR y SR elevados.

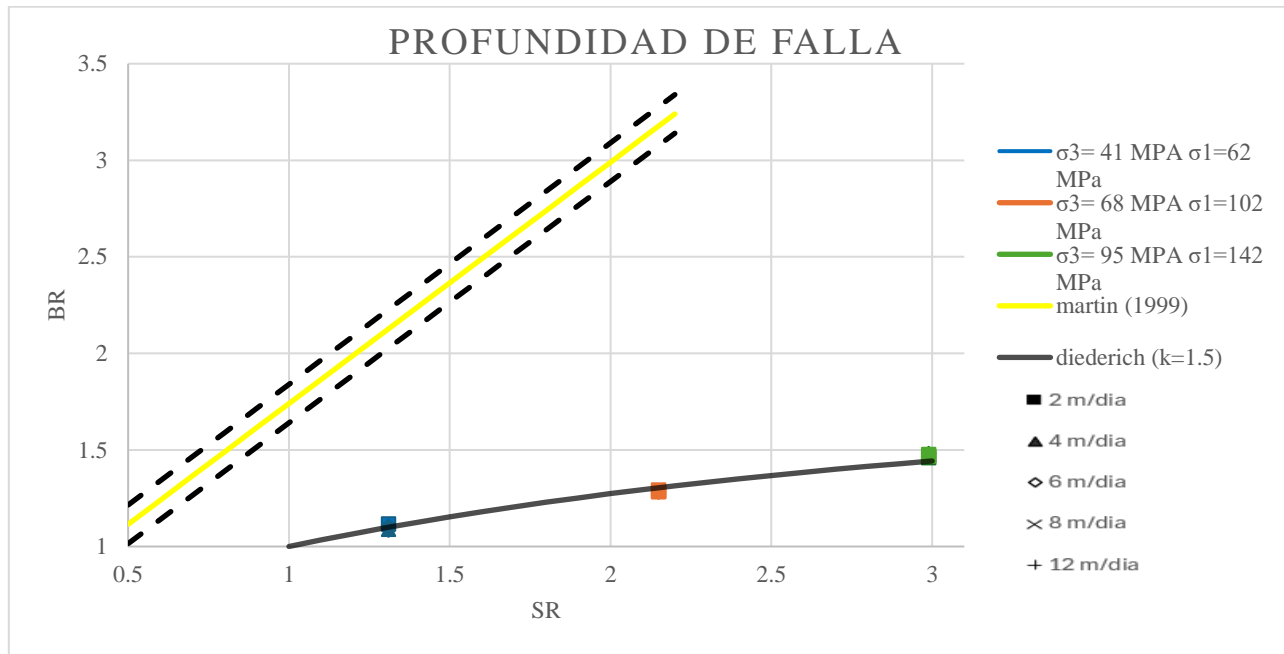


Figura 30: validación de valores obtenidos al variar los esfuerzos en cada simulación con el enfoque DISL de Diederichs (2007).

En la Figura 31 se muestra el comportamiento de la falla frágil en la primera etapa de excavación bajo distintas simulaciones y rangos de esfuerzos, además en la Tabla 17 se ve un resumen de los datos utilizados. Se observa que, con un esfuerzo principal de 62 MPa, la falla frágil comienza a aparecer a partir de una tasa de avance de 6 m/día; además, al incrementar esta tasa hasta un límite de 12 m/día, la profundidad de falla aumenta de manera proporcional en cada etapa. Cuando el esfuerzo principal es de 102 MPa, la falla frágil se presenta en todas las tasas de excavación evaluadas en este estudio, y al igual que en el caso anterior, la profundidad de la falla aumenta conforme se incrementa la tasa de excavación. En el tercer caso, donde el esfuerzo principal alcanza los 142 MPa, se observa el mismo comportamiento, aunque la profundidad de la falla es mayor debido a los esfuerzos más altos.

Comparando los tres modelos, se concluye que la aparición de la falla frágil en la primera etapa de excavación depende de ambos factores: el esfuerzo y la tasa de avance. Además, se observa que la profundidad de la falla frágil está directamente relacionada con los metros excavados, mostrando un aumento progresivo y similar en cada caso conforme se incrementa la tasa de avance.

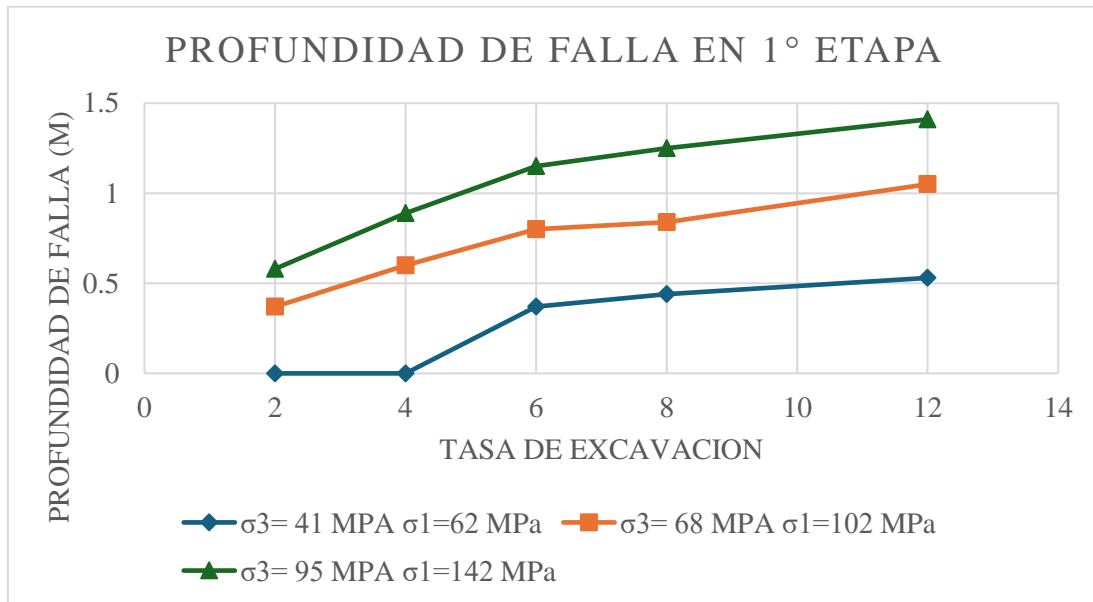


Figura 31: resultado de la profundidad de falla en la 1º etapa de excavación con variaciones en los esfuerzos y tasa de excavación.

Tabla 17: resumen de datos de la profundidad de falla en la 1º etapa de excavación.

Profundidad de falla en la 1º etapa					
esfuerzo (σ)	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
$\sigma_3=41$ MPa $\sigma_1=62$ MPa	0	0	0.37	0.44	0.53
$\sigma_3=68$ MPa $\sigma_1=102$ MPa	0.37	0.6	0.8	0.84	1.05
$\sigma_3=95$ MPa $\sigma_1=142$ MPa	0.58	0.89	1.15	1.25	1.41

Al conocer los valores sobre la profundidad de falla frágil máxima en todo el recorrido del túnel con diferentes esfuerzos y tasas de excavación, se observa que existe una gran diferencia entre los resultados con diferentes esfuerzos, esto es un indicador claro sobre la importancia de los esfuerzos en la ocurrencia de estallidos de roca y falla frágil. La sensibilidad de los esfuerzos en la profundidad de la falla es tan importante que la diferencia entre profundidades en las distintas simulaciones llega a ser cercana a 1 metro, además al comparar los resultados sobre la profundidad de falla en la 1º etapa de la sección anterior se observa que la tasa de excavación no es un factor importante a la hora de la ocurrencia de falla y su profundidad, es decir, la tasa de avance es un factor predominante solo en la primera etapa de excavación, en las siguientes etapas el esfuerzo es quien domina la ocurrencia de falla y su profundidad. La comparación de resultados se puede observar en la Figura 32.

Al observar el volumen inestable máximo en la Figura 33 se ratifica lo mencionado sobre el aumento de falla al aumentar el esfuerzo y que la tasa de excavación realmente no es un factor predominante al tener



el túnel completo. La diferencia del volumen inestable con mayores esfuerzos logra ser hasta aproximadamente 4 veces mayor que el con esfuerzos más bajos, esto es un indicador importante a la hora de realizar un posterior análisis de peligro dada la gran cantidad de material cedido. Los valores utilizados en esta sección se pueden observar en la Tabla anexo 4.

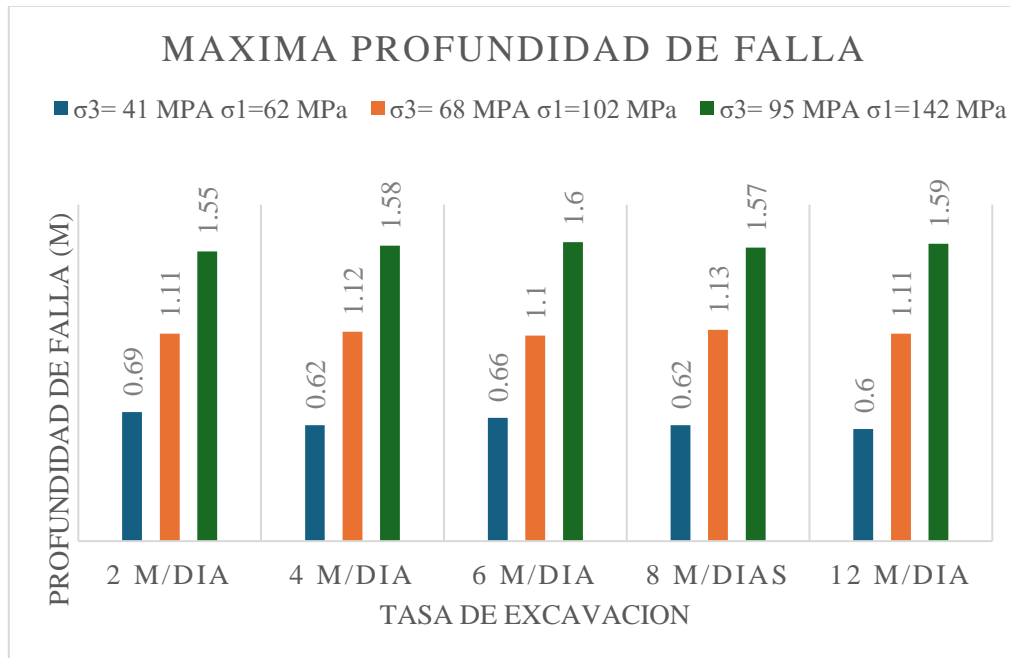


Figura 32: resultados de la profundidad de falla frágil máxima de todos los modelos al variar los esfuerzos y tasa de excavación.

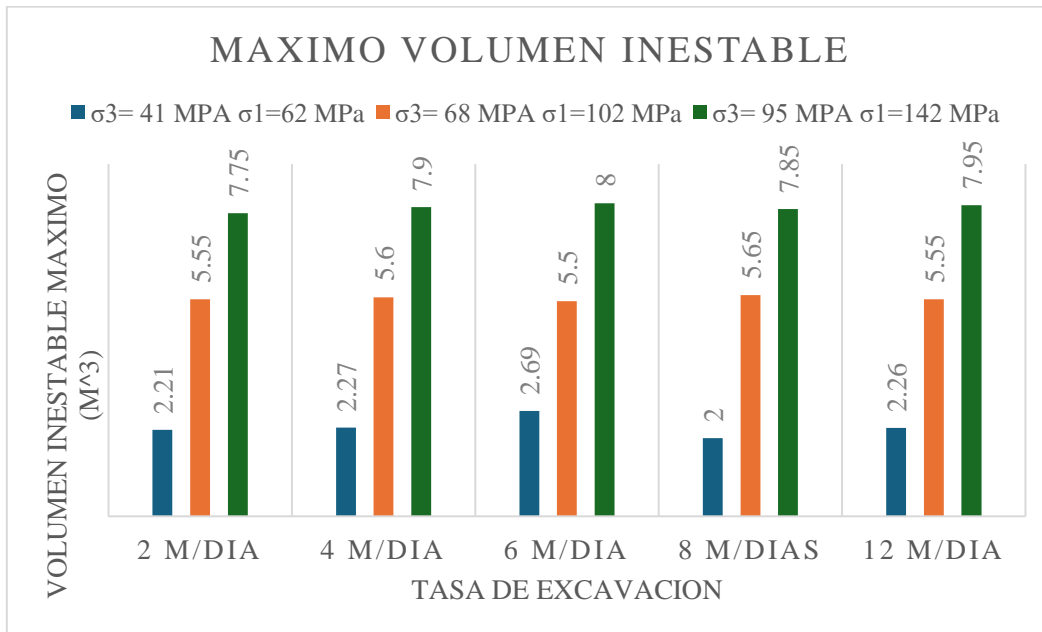


Figura 33: resultados del volumen inestable máximo en todo el túnel con la variación del esfuerzo y tasa de excavación.

En la Figura 34 podemos observar la ocurrencia de falla frágil en la frente del túnel en la primera etapa, aquí se nota que al tener un aumento de esfuerzos provoca que la profundidad de falla sea mayor. Se observa que con un esfuerzo principal mayor de 62 MPa no ocurre falla en la frente del túnel en ninguna tasa de avance, en cambio, en las demás simulaciones sí hay presencia de falla. Se verifica que el aumento de la profundidad de falla depende en este caso solo del esfuerzo presente y no de la tasa de avance, asimismo se puede entender que la presencia de la falla en la frente es de una profundidad similar y no presenta grandes variaciones en los casos del estudio.

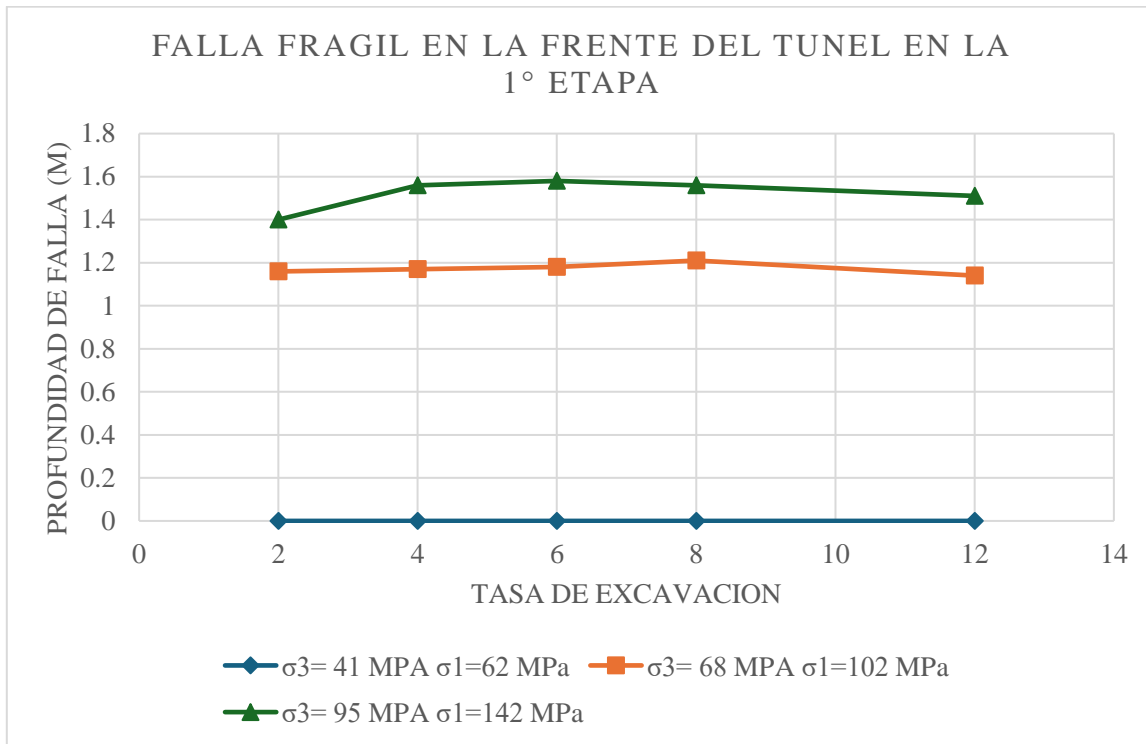


Figura 34: resultados de la falla frágil en la frente del túnel en la 1° etapa de excavación con variaciones en el esfuerzo y la tasa de excavación.

6.6 resultados planificación minera

Para analizar el impacto de la selección de distintas tasas de avance en una planificación minera, se plantea un ejercicio que permite evaluar los tiempos y beneficios asociados a dichas elecciones. Además, a partir de los resultados previamente mencionados, es posible determinar la probabilidad de falla y la profundidad de esta.

En este ejercicio se emplearon los valores recopilados en la Tabla 18, que presenta el total a construir para el desarrollo minero, junto con los tiempos estimados para completar la construcción, expresados en días y meses. Por otro lado, la Tabla 19 presenta los parámetros utilizados en las ecuaciones (11) y (12), aplicadas al cálculo del valor del recurso y su valor futuro considerando una tasa de descuento específica. Asimismo, se muestran los resultados derivados de distintas tasas de avance en las excavaciones y la correspondiente variación económica observada.

Tabla 18: tiempos en días y meses para la construcción de un desarrollo minero de 1000 metros, con sus variaciones en las tasas de excavación.

Días y meses de excavación con la construcción total de 1000 metros de túneles



tasas de avance (m/día)				
2	4	6	8	12
días	días	días	días	días
500	250	167	125	83
meses	meses	meses	meses	meses
16.7	8.3	5.6	4.2	2.8

Tabla 19: parámetros y valores utilizados para calcular el beneficio actual y beneficio futuro dependiendo del tiempo que dure el desarrollo minero.

Parámetros y valores proyectados para la planificación minera					
p (USD/ton)	9050	9050	9050	9050	9050
Cu (%)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
L (ton)	100000	100000	100000	100000	100000
R (%)	90	90	90	90	90
Cm (USD/ton)	2700000	2700000	2700000	2700000	2700000
Cp (USD/ton)	3150000	3150000	3150000	3150000	3150000
v (USD)	\$4,738,500	\$4,738,500	\$4,738,500	\$4,738,500	\$4,738,500
r (% mensual)	1	1	1	1	1
t (meses)	16.7	8.3	5.6	4.2	2.8
vp (USD)	\$4,014,375	\$4,361,435	\$4,483,666	\$4,546,060	\$4,609,322
perdida (USD)	\$724,125	\$377,065	\$254,834	\$192,440	\$129,178

Se observa que, al incrementar las tasas de avance, la pérdida económica disminuye, lo que se traduce en un beneficio superior del yacimiento en comparación con los escenarios de excavación más lenta. Sin embargo, al analizar las variaciones del beneficio en cada escenario en relación con el incremento en la probabilidad de falla, es necesario considerar un aumento en la inversión destinada a la fortificación adecuada para garantizar la estabilidad y seguridad del proyecto.

7. Resumen resultados

En la sección anterior se presentaron los resultados de la profundidad de falla, volumen inestable, falla en la primera etapa y falla en la 1° etapa en la frente. Todos estos valores se compararon con simulaciones bajo las mismas condiciones y solo con dos variaciones, las cuales eran la tasa de avance y una propia variación de la sección del estudio. En este apartado se comprenderá cuál de todas las variables produce una mayor o menor ocurrencia de falla frágil en todas las simulaciones realizadas.

En Tabla 18 podemos observar que la ocurrencia de falla frágil ocurrió en todas las simulaciones de este estudio, además se visualiza que parámetros fueron los más influyentes en la profundidad de la falla frágil al borde del túnel. Los valores más altos se encuentran al aumentar los esfuerzos in-situ de cada simulación, específicamente cuanto el esfuerzo primario es de 142 MPa y el terciario de 95 MPa aquí se



encuentran profundidades de falla que llegan a ser entre 1.55 y 1.6 metros, además se observa que la tasa de excavación no provoca un real cambio en estos resultados. El parámetro que provoca una menor profundidad de falla es el UCS específicamente cuando este es de 250 MPa, aquí se logran encontrar profundidades de falla entre los 0.35 y 0.45 metros.

Tabla 20: resumen de resultados sobre la profundidad de falla frágil obtenido en todas las simulaciones del estudio con su respectiva tasa de avance, con escala de colores entre rojo y verde (color rojo mayor profundidad de falla y color verde menor profundidad de falla).

Parámetro	Valor	Profundidad de falla (m)					Promedio
		2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día	
Esfuerzo (MPa)	$\sigma_3= 41 \sigma_1=62$	0.69	0.62	0.66	0.62	0.6	0.64
	$\sigma_3= 68 \sigma_1=102$	1.11	1.12	1.1	1.13	1.11	1.11
	$\sigma_3= 95 \sigma_1=142$	1.55	1.58	1.6	1.57	1.59	1.58
K	1.5	0.69	0.62	0.66	0.62	0.6	0.64
	1.8	0.77	0.76	0.75	0.73	0.78	0.76
	2.1	0.94	0.9	0.92	0.93	0.92	0.92
Densidad (ton/m ³)	2.6	0.68	0.6	0.72	0.62	0.6	0.64
	2.7	0.69	0.62	0.66	0.62	0.6	0.64
	2.8	0.67	0.62	0.78	0.62	0.6	0.66
UCS (MPa)	120	1.03	1.04	1.05	1.06	1.05	1.05
	160	0.73	0.75	0.72	0.72	0.76	0.74
	190	0.69	0.62	0.66	0.62	0.6	0.64
	220	0.6	0.54	0.51	0.51	0.52	0.54
	250	0.45	0.43	0.36	0.38	0.35	0.39

En la Tabla 19 se observan los valores obtenidos del volumen inestable máximo en todo el túnel. Los valores más altos se presentan en la sección del aumento de esfuerzo, similar a lo ocurrido en los resultados anteriores. La gran diferencia entre los valores es un claro indicador sobre cuales condiciones son más propensas a un aumento del volumen cedido, cuando el UCS es superior a 220 MPa se producen excavaciones más estables, en cambio, cuando el esfuerzo principal menor es de 68 MPa en adelante se produce la zona con excavaciones más inestables. Al variar la tasa de excavación se presentan valores similares en la gran mayoría de los casos, indicando que esta variable no es una de las más influyentes en este apartado.



Tabla 21: resumen de resultados sobre el volumen inestable máximo obtenido en todas las simulaciones del estudio con su respectiva tasa de avance, con escala de colores entre rojo y verde (color rojo mayor volumen inestable y color verde menor volumen inestable).

Parámetro	Valor	Volumen inestable máximo					promedio
		2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día	
Esfuerzo (MPa)	$\sigma_3=41 \sigma_1=62$	2.21	2.27	2.69	2.00	2.26	2.29
	$\sigma_3=68 \sigma_1=102$	5.55	5.60	5.50	5.65	5.55	5.57
	$\sigma_3=95 \sigma_1=142$	7.75	7.90	8.00	7.85	7.95	7.89
K	1.5	2.21	2.27	2.69	2.00	2.26	2.29
	1.8	3.01	3.06	2.84	2.77	3.06	2.95
	2.1	3.67	3.60	3.72	3.76	3.72	3.69
Densidad (ton/m ³)	2.6	2.37	2.09	2.66	2.24	2.02	2.28
	2.7	2.21	2.27	2.69	2.00	2.26	2.29
	2.8	2.43	2.00	3.07	2.24	2.32	2.41
UCS (MPa)	120	5.01	5.05	5.15	5.16	5.13	5.10
	160	2.93	3.03	3.00	2.97	3.08	3.00
	190	2.21	2.27	2.69	2.00	2.26	2.28
	220	1.82	1.59	1.50	1.50	1.53	1.59
	250	0.92	0.66	0.56	0.85	0.63	0.72

La Tabla 20 presenta de forma resumida los resultados sobre la profundidad de falla en la primera etapa de cada simulación, donde se observan diferencias respecto a los obtenidos en secciones anteriores. La principal diferencia en estos resultados radica en la influencia de la tasa de excavación. En análisis previos, la profundidad de falla no mostró variaciones ante diferentes tasas de excavación; sin embargo, en los resultados actuales se observa un aumento claro en la profundidad de falla al incrementar la tasa de excavación.

La importancia de la tasa de avance en esta sección radica en que permite que excavaciones de menor longitud y bajo condiciones específicas no presenten fallas en la primera etapa. En este estudio, al analizar tasas de avance de 2 y 4 m/día, se deduce que, de un total de 28 casos, solo en 11 se observa la ocurrencia de falla frágil, mientras que en 17 casos no hay evidencia de falla. Así, se obtuvo que la probabilidad de falla para esta tasa de avance es del 39%. Para las tasas de avance mayores, es decir, de 6, 8 y 12 m/día, se analizaron un total de 42 casos simulados, de los cuales 38 presentaron falla frágil, mientras que solo en 4 no se observó falla. Esto indica que, en tasas de excavación entre 6 y 12 m/día (según los casos de este estudio), la probabilidad de falla es del 90.5%, siendo considerablemente superior a la del caso anteriormente mencionado.



Tabla 22: resumen de resultados sobre la profundidad de falla en la primera etapa obtenido en todas las simulaciones del estudio con su respectiva tasa de avance, con escala de colores entre rojo y verde (color rojo mayor profundidad de falla en la 1° etapa y color verde menor profundidad de falla en la 1° etapa).

Parámetro	Valor	Profundidad de falla en la 1° etapa					Promedio
		2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día	
esfuerzo (MPa)	$\sigma_3= 41 \sigma_1=62$	0	0	0.37	0.44	0.53	0.27
	$\sigma_3= 68 \sigma_1=102$	0.37	0.6	0.8	0.84	1.05	0.73
	$\sigma_3= 95 \sigma_1=142$	0.58	0.89	1.15	1.25	1.41	1.06
K	1.5	0	0	0.37	0.44	0.53	0.27
	1.8	0	0.44	0.59	0.59	0.68	0.46
	2.1	0.2	0.6	0.7	0.74	0.87	0.62
Densidad (ton/m ³)	2.6	0	0	0.38	0.44	0.52	0.27
	2.7	0	0	0.37	0.44	0.53	0.27
	2.8	0	0	0.46	0.44	0.53	0.29
UCS (MPa)	120	0.37	0.6	0.8	0.84	0.92	0.71
	160	0.13	0.4	0.55	0.59	0.67	0.47
	190	0	0	0.37	0.44	0.53	0.27
	220	0	0	0	0.37	0.5	0.17
	250	0	0	0	0	0	0.00
	Promedio	0.12	0.25	0.49	0.56	0.66	

En la Tabla 21 se presentan los resultados de la falla frágil en la frente del túnel durante la primera etapa de avance, mostrando una gran cantidad de casos sin evidencia de falla. Según los valores registrados, la tasa de excavación no resulta un parámetro influyente en la ocurrencia de falla en esta sección del túnel, ya que los resultados obtenidos son similares para todas las tasas de excavación. Además, al analizar el promedio de cada parámetro, se verifica que los valores tienden hacia un promedio simple. El único caso donde no se obtienen resultados similares en todas las tasas de avance es cuando el k es 1.8, ya que en la tasa de excavación de 2 m/día no se produce falla, en cambio, en las otras tasas si se producen, esto puede ser causado debido a encontrarse en una zona de límite de falla.



Tabla 23: resumen de resultados sobre la profundidad de falla en la frente en 1° etapa obtenido en todas las simulaciones del estudio con su respectiva tasa de avance, con escala de colores entre rojo y verde (color rojo mayor profundidad de falla en la frente 1° etapa y color verde menor profundidad de falla en la frente 1° etapa).

Parámetro	Valor	Profundidad de falla en la frente 1° etapa					Promedio
		2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día	
esfuerzo (MPa)	$\sigma_3= 41 \sigma_1=62$	0	0	0	0	0	0
	$\sigma_3= 68 \sigma_1=102$	1.16	1.17	1.18	1.21	1.14	1.17
	$\sigma_3= 95 \sigma_1=142$	1.40	1.56	1.58	1.56	1.51	1.52
K	1.5	0	0	0	0	0	0
	1.8	0	1.15	1.01	1.10	1.07	0.87
	2.1	1.08	1.15	1.12	1.16	1.14	1.13
Densidad (ton/m ³)	2.6	0	0	0	0	0	0
	2.7	0	0	0	0	0	0
	2.8	0	0	0	0	0	0
UCS (MPa)	120	1.16	1.15	1.19	1.07	1.14	1.14
	160	0.76	0.40	1.01	0.98	1.07	0.84
	190	0	0	0	0	0	0
	220	0	0	0	0	0	0
	250	0	0	0	0	0	0

8. Discusión

En este estudio se obtuvieron distintos resultados, como la profundidad de falla máxima en el borde del túnel, la profundidad de falla en la primera etapa de excavación, la falla en la frente en la primera etapa de excavación, el ancho de falla y el volumen inestable. Todos estos valores fueron obtenidos en las simulaciones realizadas en RS3 de RocScience, la diferencia en los resultados se atribuye a la variación de los parámetros geomecánicos, la planificación y los esfuerzos. Los resultados permiten comprender el contexto de la falla frágil en una excavación profunda; por ello, para analizar de forma adecuada la ocurrencia de este evento, se utilizan criterios de falla que relacionan la profundidad de falla con el estallido de roca. Los criterios aplicados son los de Martin et al. (1999) y Diederichs (2007, 2018), empleando siempre el enfoque DISL. Una limitante al utilizar RS3 es que solo se visualizan los elementos que sufren 100 % de plastificación, por ende, no se logra distinguir si estos resultados son debido al “límite de Spalling” y/o el “límite de perturbación” el cual indica un reordenamiento de los esfuerzos los cuales pueden provocar microgrietas, lo que podría generar un peligro de cedencia que no se logran visualizar en los modelos de este estudio.

Para justificar la decisión de emplear exclusivamente la metodología del enfoque DISL en todos los resultados, se realizó una breve comparación de los valores obtenidos con el criterio de falla generalizado de Hoek & Brown, mediante simulaciones con valores y parámetros idénticos. Los resultados se



presentan en la Tabla 22, donde se observa una clara diferencia entre los valores. Surge entonces la interrogante de cuál de los dos métodos es más cercano a la realidad; por ello, según la validación de los datos en la Figura 13 en comparación con lo propuesto por Diederichs (2007, 2018), se determina que el enfoque DISL es el más adecuado para estos resultados, ya que sus valores se ajustan mejor al potencial de Diederichs. En cambio, los valores de Hoek & Brown no presentan un ajuste satisfactorio respecto a dicho potencial. Se debe considerar que ambas metodologías pueden complementarse, dado que el enfoque DISL se basa en el criterio de falla de Hoek-Brown, el cual permite realizar un análisis general en zonas con distintos niveles de confinamiento y diversas calidades de roca. Cuando el análisis se centra en áreas de falla frágil, el enfoque DISL aplica una metodología similar, pero con parámetros de entrada específicos para obtener resultados más precisos y adecuados.

Tabla 24: comparativa de resultados obtenidos con el enfoque DISL y criterio de falla de Hoek & Brown

	DISL	Hoek & Brown		DISL	Hoek & Brown
falla en la 1° etapa (m)	0	0.20	falla en la frente 1° etapa (m)	0	0.58
	0	0.21		0	0.56
	0.37	0.21		0	0.57
	0.44	0.25		0	0.60
	0.53	0.32		0	0.67
máxima profundidad de falla (m)	0.69	0.31	volumen inestable (m^3)	2.21	1.29
	0.62	0.29		2.27	1.19
	0.66	0.34		2.69	1.34
	0.62	0.32		2.00	1.25
	0.60	0.38		2.26	1.34

Para obtener los resultados sobre la influencia de distintas tasas de excavación en la ocurrencia de falla frágil, se generaron modelos con varias tasas de avance, las cuales han sido mencionadas anteriormente. Aunque en la actualidad es poco común contar con tasas de excavación superiores a 4 m/día, se crearon modelos con tasas de hasta 12 m/día para analizar la posible influencia y/o patrones al aumentar esta tasa. Comprender la influencia de la tasa de excavación resulta complejo debido a las diversas variables que afectan el contexto de la construcción; por lo tanto, el análisis de este factor acompañará a todas las demás variables de este estudio, esto con el fin de poder conocer como la influencia de aumentar o disminuir la tasa en un determinado contexto influye en la ocurrencia de falla frágil.

Al analizar los resultados de la falla en la primera etapa de excavación en todas las simulaciones, se obtienen varios resultados esperados. Por ejemplo, al aumentar el UCS, la profundidad de falla tiende a disminuir, llegando incluso a valores nulos bajo ciertas condiciones de tasa de avance, según el valor del UCS. Cuando el UCS es de 250 MPa, la tasa de avance no influye, ya que no se produce falla; en cambio, para un UCS de 220 MPa, la tasa de avance debe ser inferior a 6 m/día para que no haya falla. Con un UCS de 190 MPa, la tasa de avance debe ser menor a 4 m/día, mientras que, para valores menores o iguales a 160 MPa, la falla ocurre en todas las tasas de excavación.



Al realizar un análisis similar con el parámetro de densidad, se observa que, al variar este valor dentro del rango de este estudio, no se presentan diferencias claras en los valores de profundidad de falla en la primera etapa. Por lo tanto, para evitar la ocurrencia de este evento, es importante mantener tasas de avance iguales o menores a 4 m/día sin importar la variación de densidad.

En el caso de analizar el valor k , cuando este es de 1.5, para evitar la falla se deben utilizar tasas de avance menores o iguales a 4 m/día. En cambio, si el valor de k es de 1.8, solo se puede trabajar con tasas de avance de 2 m/día; para valores de k superiores, la presencia de falla es inevitable bajo las condiciones de este estudio. Finalmente, al analizar el aumento de los esfuerzos en el modelo, se concluye que solo se evita la presencia de falla cuando se utilizan valores de esfuerzo de $\sigma_3=41$ MPa y $\sigma_1=62$ MPa con tasas de avance iguales o menores a 4 m/día.

Al analizar el caso de la profundidad de falla máxima en todo el túnel, considerando todas las etapas, se observan grandes diferencias en comparación con el caso anterior. La principal diferencia es que las tasas de avance tienen poca o nula influencia en estos resultados. Se determina que el parámetro que más influye en la profundidad de falla es el aumento de los esfuerzos; posteriormente, se encuentra que un bajo valor de UCS también tiene un impacto significativo, mientras que un k elevado presenta la menor influencia. Además, se debe mencionar que la densidad no provoca cambios en la profundidad de falla, mostrando una influencia nula en los resultados. Al comprender que el cálculo del volumen inestable máximo depende de la profundidad de falla máxima, se infiere que el análisis de estos resultados es similar. Por lo tanto, no se profundizará en este valor.

Según los valores de la profundidad de falla en la frente en la primera etapa, los resultados se comportan de manera similar al caso anterior, indicando que la tasa de avance no afecta la profundidad de falla. Para que ocurra una falla en este caso particular, deben presentarse ciertos escenarios específicos: un UCS menor o igual a 160 MPa, esfuerzos iguales o superiores a $\sigma_3=68$ MPa $\sigma_1=102$ MPa y una razón de esfuerzos igual o mayor a 1.8. Todos los otros casos no mencionados anteriormente no producen falla frágil en la frente en la primera etapa. Los resultados mencionados varían según el estudio de Orellana (2022) esto se puede deber principalmente a la diferencia de los gálibos en su estudio.

Considerando los resultados de la parte de la planificación minera, es importante conocer que el beneficio económico aumenta mientras más rápido sea extraído el mineral del yacimiento, pero al realizar este proceso en menos tiempo la profundidad de falla aumenta, es por esto que el beneficio económico por el avance puede ser mitigado por los recursos que se tendrán que utilizar para eliminar la ocurrencia de falla.

Para finalizar, es importante mencionar que la ocurrencia de cada resultado está interrelacionada. Es decir, si se desea evitar una falla en la primera etapa de excavación, se debe observar los resultados sobre la profundidad de falla en todo el borde del túnel y la falla en la frente del túnel; se debe considerar que, a medida que se avanza, se producirán fallas frágiles inevitablemente. Por ello, es más importante poder controlar la ocurrencia de falla y conocer una profundidad aproximada de esta misma, para tomar las medidas de seguridad adecuadas. Es fundamental, además, comprender que la tasa de avance influye en



la ocurrencia de fallas, lo que hace necesario identificar las ubicaciones y profundidades donde estas puedan suceder. Las situaciones en las que la profundidad de falla es menor en todas las ubicaciones del túnel se presentan cuando la tasa de avance es menor o igual a 4 m/día. Si se requiere aumentar esta tasa, es importante considerar que el incremento en la ocurrencia de fallas no se podrá reducir. Finalmente, se debe mencionar que todos estos análisis no consideran la fortificación del túnel; por lo tanto, sería interesante verificar estos mismos resultados con una fortificación adecuada y revisar la ocurrencia de la falla frágil.

9. Conclusión y recomendaciones

Este estudio se propuso analizar la ocurrencia de la falla frágil en condiciones de excavación subterránea profunda utilizando el enfoque DISL de Diederichs (2007). Los resultados obtenidos permiten validar la robustez del modelo en la predicción de posibles fallas, destacando la influencia de los parámetros seleccionados en el comportamiento del macizo rocoso.

Se concluye que el software RS3 de RocScience resulta efectivo en la construcción de escenarios sobre la ocurrencia de la falla frágil, aunque presenta limitaciones para reflejar detalladamente el estado de una excavación. Una de las principales restricciones es la incapacidad para visualizar elementos con menos del 100% de "Spalling", lo cual podría ocultar microgrietas en el túnel. Asimismo, se destaca la ausencia de un informe automatizado y detallado, lo que obliga a realizar un registro manual de los datos sin el apoyo de una grilla de puntos, lo cual complica la precisión en la toma de datos. Como recomendación, se sugiere mejorar la funcionalidad de RS3 mediante la inclusión de opciones de visualización de microgrietas y la generación de reportes automatizados, para optimizar la eficiencia y precisión en el análisis.

En cuanto a la evaluación del parámetro UCS, se concluye que este valor tiene una implicancia significativa en todos los resultados obtenidos en este estudio. Este factor muestra un comportamiento inversamente proporcional a dichos resultados; es decir, al aumentar el UCS, disminuyen la profundidad máxima de falla en el túnel, la profundidad de falla en la primera etapa, el volumen inestable y la profundidad de falla en el frente en la primera etapa.

En el caso de la razón de esfuerzos k , se concluye que el aumento en el esfuerzo principal mayor es directamente proporcional al incremento en la profundidad máxima de falla en el túnel, la profundidad de falla en la primera etapa, el volumen inestable y la profundidad de falla en el frente en la primera etapa. Es recomendable poder realizar análisis con valores de k menores a 1.5, para observar el comportamiento que podría tener el macizo rocoso y la falla frágil.

Al observar el comportamiento de los resultados según el aumento de los esfuerzos principales mayores y menores se observa un comportamiento similar a el mencionado con el parámetro k , pero con profundidades de falla y volúmenes mayores, esto es un indicativo claro que el esfuerzo principal menor es un parámetro importante de analizar al momento de un análisis sobre la falla frágil.



En el caso de la densidad, se concluye que este parámetro, dentro del rango estudiado, no tiene incidencia alguna en ninguno de los resultados. Esto se debe a que la modificación de este valor no provoca aumentos, disminuciones u otros cambios en los resultados. Se realizaron numerosas simulaciones y se concluye que, en el contexto de este estudio y los parámetros de entrada utilizados, la densidad, al estar en el rango de 2.6-2.7 ton/m³, no influye en ninguno de los casos realizados.

La tasa de avance es uno de los parámetros centrales de este estudio y a partir de los resultados obtenidos, se concluye que este factor tiene una influencia directamente proporcional en la profundidad de falla en la primera etapa para todas las tasas de excavación. Además, se observa que tiene una influencia directamente proporcional en la profundidad de falla en el frente (1ª etapa) hasta una tasa de excavación de 6 m/día; posteriormente, al aumentar la tasa de avance, los valores resultantes se asemejan a los de la tasa de 6 m/día. En los demás resultados, la tasa de avance no provoca una influencia significativa.

Al comprender que los parámetros estudiados interactúan entre sí, se concluye que, en un análisis de sensibilidad, los parámetros que tienen mayor influencia en los distintos resultados son los siguientes, organizados de mayor a menor influencia para la profundidad de falla máxima y el volumen inestable: esfuerzos principales, UCS, razón de esfuerzos k, tasa de excavación y densidad, siendo esta última con una influencia nula. Para el caso de la profundidad de falla en la primera etapa, la influencia se ordena de la siguiente manera: esfuerzos principales, tasa de excavación, UCS, razón de esfuerzo k y densidad, esta última sin influencia. En cuanto a la profundidad de falla en el frente en la primera etapa, el orden de influencia es el siguiente: esfuerzos principales, UCS, razón de esfuerzos k, tasa de excavación y densidad, esta última sin influencia.

Para lograr un avance óptimo y minimizar la ocurrencia de fallas, se recomienda el uso de un modelo robusto y garantizar una adecuada interacción entre los parámetros. En general, los resultados más favorables para reducir la ocurrencia de fallas se observan a tasas de avance de 2 m/día y 4 m/día, dado que en estas condiciones la probabilidad de ocurrencia es de 39%. En cambio, cuando esta tasa aumenta, la probabilidad alcanza un 90.5%, aunque estos resultados pueden variar al modificar los parámetros de entrada. Es importante conocer si realmente el beneficio económico por un avance mayor sigue siendo positivo al tener un costo mayor en fortificación. Por lo tanto, es recomendable realizar un estudio exhaustivo de los distintos parámetros económicos y del macizo rocoso en especial de los esfuerzos. Además, resulta importante que futuros estudios analicen la implementación de sistemas de fortificación en los túneles y evalúen cómo estos podrían contribuir a disminuir la falla frágil, así como observar el comportamiento de la ocurrencia de fallas en un sistema de túneles.



10. Referencias

- Aguilera Tizado, L. E. (2018). Metodología para la evaluación del potencial de estallidos de roca y diseño de soporte dinámico en túneles mediante modelamiento numérico. <https://tesis.ucsc.cl/handle/25022009/3573>
- Araya, D. (2023). Evaluación de la fortificación de la excavación de los puntos de vaciado en mina El Teniente. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/194836>
- Askaripour, M., Saeidi, A., Rouleau, A., & Mercier-Langevin, P. (2022). Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods. *Underground Space*, 7(4), 577–607. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.11.008>
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2006). *Rock Mechanics: For underground mining*. Springer Science & Business Media.
- Brown, E. T., & Hoek, E. (1980). *Underground excavations in rock*. CRC Press. <https://api.taylorfrancis.com/content/books/mono/download?identifierName=doi&identifierValue=10.1201/9781482288926&type=googlepdf>
- Castrejon Chilon, L. (2024). Estallido de rocas del crucero El Ñato, nivel 2880 – Empresa Minera HNS Consorcio S.R.L. San Miguel de Algamarca – Cajabamba—Cajamarca. Universidad Nacional de Cajamarca. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/6433>
- Castro, D. R. (2012). análisis de sismicidad inducida en mina subterránea río blanco sector norte iii panel áreas 15, 16 y 17 nivel 16 hundimiento codelco división andina.
- Castro, R., Orellana, L., Suzuki, K., Vallejos, J., & Yarmuch, J. (2023). Diseño y Planificación Minera—Departamento de Ingeniería de Minas—FCFM - Universidad de Chile. <http://minas.uchile.cl/investigacion/lineas-de-investigacion/disen-y-planificacion-minera>



- CODELCO. (2023). Evento sísmico de alta potencia afectó sector más profundo del yacimiento.
- CODELCO. (2024). Bases técnicas diamante. Constructora Gardilcic (T20M400-70130-BASMD-00002).
- Diederichs, M. S. (2007). The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1082–1116. <https://doi.org/10.1139/T07-033>
- Diederichs, M. S. (2018). Early assessment of dynamic rupture hazard for rockburst risk management in deep tunnel projects. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(3), 193–204. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n3a1>
- Diederichs, M. S., & Kaiser, P. K. (1996). Rock instability and risk analyses in open stope mine design. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 431–439. <https://doi.org/10.1139/t96-064>
- Duarte, R. (1993). colección de terminos tecnicos y vocablos propios de los trabajadores que laboran en la mina el teniente.
- Gonzales de vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*: Pearson Educación.
- Heber, G. (2019). Valor de un bloque. NUBE MINERA. [https://nubeminera.cl/search/valor de un bloque/](https://nubeminera.cl/search/valor%20de%20un%20bloque/)
- Kwasniewski, M., & Takahashi, M. (2010). Strain-based Failure Criteria For Rocks: State of the Art And Recent Advances. <https://dx.doi.org/>
- Li, C. C., Mikula, P., Simser, B., Hebblewhite, B., Joughin, W., Feng, X., & Xu, N. (2019). Discussions on rockburst and dynamic ground support in deep mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(5), 1110–1118. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.06.001>
- Martin, C. D., Kaiser, P. K., & McCreath, D. R. (1999). Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/t98-072>



- Medina, V., Rojas, A., & Reyna, Ivan. (2015). Rock Bursting Estallido de Rocas.
- Nordlund, E., Potvin, Y., & Brady, B. (2013). Deep hard rock mining and rock mechanics challenges (pp. 39–56). Ground Support 2013: Seventh International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction, 2013 13-15 May, Perth. Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1304_02_Nordlund
- Orellana, B. (2022). análisis de sensibilidad de parámetros geométricos en la evaluación de estallidos de rocas en un túnel profundo por medio del software rs3 [UTFSM]. <https://hdl.handle.net/11673/55193>
- Ormeno Collao, F. Y. (2021). Sistema de gestión de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente, para controlar peligros y riesgos en las canteras de la Empresa Minera Volcán S.A.A. Junín – 2021. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/3186>
- Perras, M. A., & Diederichs, M. S. (2016). Predicting excavation damage zone depths in brittle rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8(1), 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.004>
- Ramírez, F. (2024). Fenomeno de estallido de roca en tuneles profundos. universidad nacional autonoma de Mexico.
- Ramírez, N. (2022). análisis 3d de la variabilidad de los parámetros geomecánicos para determinar su influencia en la generación de un estallido de rocas.
- Rojas Mayta, J. L. (2022). Estallido de rocas y sostenimiento de labores en la empresa minera los Quenuales—Unidad minera Yauliyacu. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/3863>
- Russo, A., Vela, I., & Hormazabal, E. (2020). Cuantificación del Índice de Resistencia Geológica Intacta.
- Tatiane Marín. (2024). Evaluación de yacimiento y planificación minera.



- Torrealba, N. (2008). Análisis numérico del comportamiento dinámico de túneles ante eventos sísmicos, caso de estallidos de roca en el Teniente. <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/1465>
- Vazaios, I., Vlachopoulos, N., & Diederichs, M. S. (2019). Assessing fracturing mechanisms and evolution of excavation damaged zone of tunnels in interlocked rock masses at high stresses using a finite-discrete element approach. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(4), 701–722. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.02.004>
- Vergara, M. (2006). Análisis de la Resistencia y la Estabilidad de Pilares de la Mina Diablo Regimiento, Yacimiento el Teniente. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102858>
- Hoek, E. (1994). Strength of rock and rock masse.



ANEXO

Tabla anexo 1: valores obtenidos y utilizados en la sección de comparación de profundidad de falla y volumen inestable del UCS.

profundidad de falla (m)					
UCS	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
UCS 120	1.03	1.04	1.05	1.06	1.05
UCS 160	0.73	0.75	0.72	0.72	0.76
UCS 190	0.69	0.62	0.66	0.62	0.6
UCS 220	0.6	0.54	0.51	0.51	0.52
UCS 250	0.45	0.43	0.36	0.38	0.35
ancho de falla (m)					
UCS	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
UCS 120	4.86	4.86	4.9	4.87	4.89
UCS 160	4.02	4.04	4.16	4.13	4.05
UCS 190	3.21	3.66	4.07	3.22	3.76
UCS 220	3.04	2.95	2.94	2.94	2.94
UCS 250	2.05	1.54	1.55	2.23	1.81
volumen inestable máximo					
UCS	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
UCS 120	5.01	5.0544	5.145	5.1622	5.1345
UCS 160	2.93	3.03	2.9952	2.9736	3.078
UCS 190	2.21	2.2692	2.6862	1.9964	2.256
UCS 220	1.82	1.593	1.4994	1.4994	1.5288
UCS 250	0.92	0.6622	0.558	0.8474	0.6335

Tabla anexo 2: valores obtenidos y utilizados en la sección de comparación de profundidad de falla y volumen inestable de la densidad.

profundidad de falla (m)					
densidad	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
2.6	0.68	0.6	0.72	0.62	0.6
2.7	0.69	0.62	0.66	0.62	0.6
2.8	0.67	0.62	0.78	0.62	0.6
ancho de falla (m)					
densidad	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
2.6	3.49	3.49	3.69	3.62	3.36
2.7	3.21	3.66	4.07	3.22	3.76
2.8	3.62	3.22	3.93	3.62	3.86
volumen inestable máximo					
densidad	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
2.6	2.37	2.09	2.66	2.24	2.02



2.7	2.21	2.27	2.69	2	2.26
2.8	2.43	2	3.07	2.24	2.32

Tabla anexo 3: valores obtenidos y utilizados en la sección de comparación de profundidad de falla y volumen inestable de la razón de esfuerzos k.

profundidad de falla (m)					
razón de esfuerzos k	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
1.5	0.69	0.62	0.66	0.62	0.6
1.8	0.77	0.76	0.75	0.73	0.78
2.1	0.94	0.9	0.92	0.93	0.92
ancho de falla (m)					
razón de esfuerzos k	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
1.5	3.21	3.66	4.07	3.22	3.76
1.8	3.91	4.03	3.79	3.8	3.92
2.1	3.9	4	4.04	4.04	4.04
volumen inestable máximo					
razón de esfuerzos k	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
1.5	2.21	2.27	2.69	2	2.26
1.8	3.01	3.06	2.84	2.77	3.06
2.1	3.67	3.6	3.72	3.76	3.72

Tabla anexo 4: valores obtenidos y utilizados en la sección de comparación de profundidad de falla y volumen inestable del esfuerzo.

profundidad de falla (m)					
esfuerzos	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
$\sigma_3= 41 \text{ MPA } \sigma_1=62 \text{ MPa}$	0.69	0.62	0.66	0.62	0.6
$\sigma_3= 68 \text{ MPA } \sigma_1=102 \text{ MPa}$	1.11	1.12	1.1	1.13	1.11
$\sigma_3= 95 \text{ MPA } \sigma_1=142 \text{ MPa}$	1.55	1.58	1.6	1.57	1.59
ancho de falla (m)					
esfuerzos	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
$\sigma_3= 41 \text{ MPA } \sigma_1=62 \text{ MPa}$	3.21	3.66	4.07	3.22	3.76
$\sigma_3= 68 \text{ MPA } \sigma_1=102 \text{ MPa}$	5	5	5	5	5
$\sigma_3= 95 \text{ MPA } \sigma_1=142 \text{ MPa}$	5	5	5	5	5
volumen inestable máximo					
esfuerzos	2 m/día	4 m/día	6 m/día	8 m/día	12 m/día
$\sigma_3= 41 \text{ MPA } \sigma_1=62 \text{ MPa}$	2.21	2.27	2.69	2	2.26
$\sigma_3= 68 \text{ MPA } \sigma_1=102 \text{ MPa}$	5.55	5.6	5.5	5.65	5.55
$\sigma_3= 95 \text{ MPA } \sigma_1=142 \text{ MPa}$	7.75	7.9	8	7.85	7.95