



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

ESTIMACIÓN DE LA ZONA PERTURBADA EN EL MACIZO ROCOSO EN CIELO ABIERTO INDUCIDA POR LA RELAJACIÓN DE ESFUERZOS

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN MINERÍA

JUAN PABLO MULET VALENZUELA

**PROGESOR GUIA:
JAVIER VALLEJOS MASSA**

**PROGESOR CO-GUIA:
RIGOBERTO RIMMELIN GONZALEZ**

**MIEMBROS DE COMISION:
MILKA CASANEGRA MORELLI
JUAN LUIS YARMUCH GUZMAN**

**SANTIAGO DE CHILE
2021**

RESUMEN

Se utilizan muchos parámetros para calcular la estabilidad de taludes en una mina a cielo abierto. Un parámetro importante es el Factor D, que se utiliza para representar la zona de perturbación de un talud como resultado de la relajación de esfuerzos y la tronadura resultante de la excavación. Este parámetro puede ser una variable decisiva en el cálculo de la estabilidad. Actualmente, no existe consenso sobre cómo incorporar la zona de perturbación en un modelo de estabilidad de taludes, aunque algunos autores han propuesto diferentes geometrías para este propósito. Este trabajo propone un método para incorporar la zona de perturbación producto de la relajación de esfuerzos mediante el Factor D, proponiendo una geometría en la que se ven afectadas las propiedades de resistencia del macizo rocoso, lo que podría determinar una condición de talud estable o inestable.

Se creó un modelo de elementos finitos para representar el efecto de relajación de esfuerzos para diferentes calidades de macizo rocoso - bueno, regular y malo - excavando el cielo abierto en etapas para reproducir las deformaciones naturales al reducir el módulo del macizo rocoso. Luego se llevó a cabo un proceso iterativo para identificar los límites de la zona perturbada con el fin de obtener las propiedades de resistencia del macizo rocoso, envolvente de Hoek & Brown y geometría de la zona de perturbada para las diferentes calidades de macizo rocoso evaluados. Los resultados mostraron una zona de perturbación triangular con respecto a la superficie para macizos rocosos de buena y regular calidad; sin embargo, para macizo rocoso de mala calidad, se observó que la zona de perturbación es rectangular. También se obtuvo el comportamiento de las propiedades de resistencia y la envolvente variable de Hoek & Brown en la zona de perturbación para cada calidad de macizo rocoso evaluado. En la zona de perturbación, se observa que las deformaciones plásticas del macizo rocoso disminuyen con respecto a la superficie, presentando las mayores deformaciones plásticas en los primeros metros de la superficie, junto con los valores más bajos de cohesión, lo que conduce a una perturbación considerable en la superficie en el macizo rocoso, favoreciendo condiciones inestables. La zona de perturbación más considerable está cercana al 25% a 15% y 3% de la altura total del talud, para macizos rocosos de calidad geomecánica mala, regular y buena, respectivamente.

ABSTRACT

Many parameters are used to calculate the stability of slopes in an open pit mine. An important parameter is Factor D, which is used to represent the disturbance zone of a slope as a result of the stress relaxation and blasting resulting from the excavation. This parameter can be a decisive variable in the calculation of stability. Currently, there is no consensus on how to incorporate the disturbance zone into a slope stability model though different authors have proposed different geometries for this purpose. This work proposes a method to incorporate the disturbance zone to stress relaxation by means of Factor D, proposing a geometry in which the strength properties of the rock mass are seen to be affected, which could determine a stable or unstable condition of slope.

A finite element model was created to represent the stress relaxation effect for different qualities of rock mass – good, regular and poor – excavating the open pit in stages to reproduce the natural deformations by reducing the rock mass module. Then an iterative process was carried out to delimit the disturbance zone, obtain the strength properties c and ϕ the rock mass, Hoek & Brown envelope and geometry of the disturbance zone for different qualities of rock mass evaluated. The results showed a triangular disturbance zone with respect to the surface for good and regular quality rock masses; however, for poor rock mass quality the disturbance zone was observed to be rectangular. The behavior of the strength properties and the Hoek & Brown envelope variable in the disturbance zone were also obtained for each quality of rock mass evaluated. In the disturbance zone, it is observed that the plastic deformations of the rock mass decrease with respect to the surface, presenting the greatest plastic deformations in the first meters of the surface, together with the lowest cohesion values, which leads to considerable disturbance in the rock mass, favoring unstable conditions. The most considerable disturbance zone varies from close to 25% to 15% and 3% of the overall height of the slope, for rock mass of poor, regular and good geomechanical quality, respectively.

DEDICATORIA

A mi cónyuge Consuelo, mi hijo Tomás, mi hermano Juancarlin, mis padres Zunilda y Juan Carlos por comprenderme en mis malos momentos, apoyarme incondicionalmente y entender mis locuras.

AGRADECIMIENTOS

A Rodolfo Cabezas por apoyarme en este largo proceso, a las empresas Collahuasi y BHP por entregarme el apoyo económico para continuar mis estudios.

TABLA DE CONTENIDO

1	CAPITULO 1: INTRODUCCION	1
1.1	MOTIVACION.....	2
1.1	OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	2
1.1.1	OBJETIVO GENERAL	2
1.1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
1.2	ALCANCES DE LA INVESTIGACION	3
1.3	REVISION BIBLIOGRAFICA.....	3
2	CAPITULO 2: MARCO TEORICO	10
2.1	Base teórica.....	10
2.1.1	Fundamento de modelo constitutivo.....	10
2.1.2	Fundamentos de plasticidad de Mohr-Coulomb.....	12
2.1.3	Fundamentos de método de elementos finitos.....	14
2.1.4	Fundamentos de elementos 3D (o tetraedros).....	17
3	CAPITULO 3: METODOLOGÍA	18
3.1	Relajación de esfuerzos en taludes de cielo abierto	18
3.2	Cálculo de envolvente en zona de daño.....	20
3.3	Caso de estudio.....	20
4	CAPITULO 4: RESULTADOS.....	21
4.1	Propiedades de resistencia y envolventes de Hoek & Brown en la zona perturbada para las diferentes calidades de macizo rocoso.....	21
4.2	Deformaciones plásticas en la zona perturbada	22
5	CAPITULO 5: DISCUSIÓN	24
6	CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	26
7	BIBLIOGRAFIA	27
8	ANEXOS.....	29
8.1	ANEXO A: Etapas de excavación para macizo rocoso de buena, regular y mala calidad.....	29
8.2	ANEXO B: Tablas de propiedades del macizo rocoso bueno, regular y malo en la zona perturbada.	32
8.3	ANEXO C: Deformaciones plásticas obtenidas para macizo rocoso bueno, regular y malo en la zona perturbada.	35

8.4	ANEXO D: Envolventes para $D=0$, $D=0,7$ y variable en zona de perturbación para macizo rocoso de buena, regular y mala calidad geomecánica.	37
8.5	ANEXO E: Valores de propiedades obtenidos con software Roclab.	40

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Línea de tiempo de trabajos relacionados al Factor D.	3
Figura 2. Esquema de la zona dañada por tronadura (Hoek & Karzulovic, 2000).	4
Figura 3. Guía para estimar el factor de alteración D (Hoek et al, 2002).	5
Figura 4. Representación gráfica de Microfracturas y quiebre por esfuerzo de corte (Silva & Gómez, 2015).	5
Figura 5. Microfracturas encontradas y comparación del UCS del sector después de tronar y desconfinar (Silva & Gómez, 2015).	6
Figura 6. Variación del RQD en función a la profundidad (Silva & Gómez, 2015).	6
Figura 7. Diagrama que representa zona de daño en un talud (Silva & Gómez, 2015).	7
Figura 8. Comportamiento de E_{rm} para distintos GSI, ligado al Factor D (Hoek & Brown, 2019).	7
Figura 9. Calibración realizada con prismas y UDEC para determinar la zona de transición del Factor D (Rose et al., 2018).	8
Figura 10. Ejemplos que ilustra a) la función de perturbación, b) la función de resistencia en un diagrama de esfuerzos principales, c) la función de resistencia en un diagrama de corte normal (Gonzalez & Stilwell, 2015).	9
Figura 11. Criterio de falla de Mohr-Coulomb.	13
Figura 12. Modelo de Mohr-Coulomb en el plano desviador.	14
Figura 13. (A) Dimensiones del modelo 2D con el software Abaqus, (B) esfuerzo principal menor por profundidad y (C) esfuerzo principal mayor por profundidad.	18
Figura 14. Diagrama de proceso iterativo realizado.	19
Figura 15. Comportamiento de las propiedades de resistencia de c y ϕ en la zona de perturbación por relajación de esfuerzos para un macizo rocoso de (A) buena, (B) regular y (C) de mala calidad. El límite de la zona de perturbación está en $\sigma_3 = 1.3\text{Mpa}$, $\sigma_3 = 1.9\text{Mpa}$ y $\sigma_3 = 2.4\text{Mpa}$ respectivamente.	21
Figura 16. Comparación de envolventes H&B para $D = 0$, $D = 0.7$ y Factor D variable obtenida para la zona de perturbación para un macizo rocoso de (A) buena, (B) regular y (C) mala calidad geomecánica. El límite de la zona de perturbación se muestra hasta $\sigma_3 = 1.3\text{Mpa}$, $\sigma_3 = 1.9\text{Mpa}$ y $\sigma_3 = 2.4\text{Mpa}$ respectivamente.	22
Figura 17. Deformaciones plásticas obtenidas en profundidad para un macizo rocoso (A) bueno, (B) regular y (C) mala calidad.	23
Figura 18. Geometrías sugeridas de la zona perturbada para macizos rocosos de (A) buena, (B) regular y (C) mala calidad geomecánica.	25

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación entre el Factor D, la altura y los controles realizados por tronadura (Hoek & Karzulovic, 2000).....	4
Tabla 2. Propiedades de roca intacta para diferentes calidades.....	20
Tabla 3. Propiedades de macizo rocoso para diferentes calidades.....	20

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Criterio Mohr-Coulomb	12
Ecuación 2. Cálculo de deformaciones.....	17
Ecuación 3. Modulo macizo rocoso.	19
Ecuación 4. Criterio de Mohr-Coulomb para calcular el esfuerzo principal mayor.	20

1 CAPITULO 1: INTRODUCCION

La determinación del efecto de relajación de esfuerzos en el macizo rocoso de una mina a cielo abierto en términos de resistencia, deformaciones plásticas y el impacto que tiene sobre la estabilidad de los taludes sigue siendo un desafío. Se han realizado varios estudios para determinar la zona de perturbación de un talud resultante de la extracción de material en minas a cielo abierto. Un hallazgo importante estableció que la zona de perturbación (Factor D) disminuye en función del mayor control durante el proceso de tronadura (Hoek y Karzulovic, 2000). Sin embargo, aquellos con experiencia en grandes minas a cielo abierto pueden observar que el criterio de Hoek & Brown para la masa rocosa in situ sin perturbación ($D = 0$) proporciona propiedades de resistencia demasiado optimistas; en cambio, los efectos de la intensa perturbación de las tronaduras y la relajación de esfuerzos producidas por la excavación generan una disminución en las propiedades de resistencia del macizo rocoso. Por lo tanto, siendo más conservador, es más apropiado considerar propiedades "alteradas", o $D = 1$ (Hoek et al., 2002).

De acuerdo con el criterio de Hoek & Brown, el Factor D corresponde a la zona de perturbación del macizo rocoso por efecto de tronaduras y relajación de esfuerzo. Luego, para poder crear modelos confiables de estabilidad para la extracción de minas a cielo abierto, es necesario calcular el efecto de la extracción sobre las propiedades de resistencia de la roca, el nivel de deformaciones plásticas y también la zona del macizo rocoso que puede verse afectada. Si se sobrestiman las propiedades del macizo rocoso, la estimación del modelo sería conservadora, mientras que, si se subestiman las propiedades de resistencia del macizo rocoso, la estabilidad del talud podría verse comprometida.

Se han realizado varios estudios para comprender mejor las variables involucradas en la estimación del Factor D. Los autores han estudiado las microfracturas que ocurren en el macizo rocoso después de relajarse un talud y se han realizado ensayos UCS para mostrar una clara disminución en la competencia del macizo rocoso, estableciendo el comportamiento del RQD y la geometría de la perturbación en función de la altura del talud asociada al Factor D (Silva & Gomez, 2015). Hoek & Brown mostraron una relación entre GSI y E_{rm} considerando diferentes niveles de Factor D (Hoek & Brown, 2018). Algunos modelos se han calibrado utilizando información de sistemas de monitoreo basados en prismas (Rose et al., 2018), y uno de los últimos estudios ha descrito el comportamiento del Factor D asociado al confinamiento, determinando σ_{3max} como límite de la zona de perturbación al realizar una linealización de la zona de perturbación en profundidad. La industria aplica principalmente el Factor D asignando un valor para D de tres formas diferentes: para todo el macizo rocoso, para un rango de confinamiento (σ_3) entre 0 y 0,75 MPa o para un rango de confinamiento (σ_3) entre 0 y 1 MPa (Stilwell y González, 2019).

En este estudio se implementó un modelo con etapas para reproducir la deformación gradual que se produce durante la excavación a cielo abierto. Este modelo se utilizó luego para evaluar la variación en las propiedades de resistencia de c y ϕ en la zona de

perturbación, la geometría de la zona perturbada y la magnitud de las deformaciones plásticas en el macizo rocoso para tres calidades geomecánicas del macizo rocoso: buena, regular y mala.

Actualmente, la envolvente de Hoek & Brown define la resistencia del macizo rocoso con un factor constante D. Este trabajo, sin embargo, lo considera variable, estableciendo el valor $D = 0,7$ en superficie y $D = 0$ a una profundidad determinada por el fin de las deformaciones plásticas después de un proceso iterativo, considerando una dependencia lineal entre el Factor D, confinamiento y deformaciones plásticas.

1.1 MOTIVACION

Actualmente existen pocos trabajos que buscan respuestas del cómo se comporta el macizo rocoso al desconfinamiento de una mina cielo abierto, en términos de resistencia, deformación de sus taludes y cómo esto afecta en la estabilidad de una mina cielo abierto. Según H&B el Factor D corresponde al daño que recibe el macizo rocoso por efecto de la tronadura y el desconfinamiento, por ello es interesante poder apreciar el efecto que genera la extracción de una mina cielo abierto y conocer hasta que profundidad se puede ver afectado el macizo rocoso. Los modelos geomecánicos que buscan representar la estabilidad real de un talud, necesitan de una estimación fidedigna de las propiedades del macizo rocoso luego de desconfinarse, considerando que, si se sobreestiman las propiedades, la estabilidad de la mina puede verse afectada gravemente. Por ello, la importancia de aumentar nuestro conocimiento en este tema, ya que, si conocemos la disminución de las propiedades del macizo rocoso producto de la minería, estaremos en el camino de realizar modelos que representen de mejor forma la realidad y poder anticipar los problemas de estabilidad que pudieran ocasionarse.

1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar la zona perturbada como consecuencia de la relajación de esfuerzos producto de la extracción minera.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Identificar el comportamiento de las propiedades de resistencia c y ϕ en la zona perturbada.
2. Determinar la envolvente de H&B en la zona perturbada para las distintas calidades de macizo rocoso evaluadas.
3. Definir hasta que profundidad se aprecia el daño inducido y que geometría tiene la zona perturbada para las distintas calidades de macizo rocoso evaluadas.

1.2 ALCANCES DE LA INVESTIGACION

Los alcances considerados son los siguientes:

1. Se consideró un macizo rocoso homogéneo que no considera las condiciones estructurales, con un comportamiento elastoplástico.
2. Este modelo considera macizo rocoso seco.
3. El estudio busca analizar el efecto por desconfinamiento que genera la minería en el macizo rocoso de una mina a cielo abierto y no el daño por tronadura.
4. El modelamiento se realizó utilizando el software Abaqus de elementos finitos.
5. Se realizó un modelo explícito con subrutina VUSDFLD en lenguaje FORTRAN que primero proporciona propiedades de c y ϕ para cada nivel de confinamiento presente en el modelo y luego excava progresivamente el macizo rocoso.

1.3 REVISION BIBLIOGRAFICA

A continuación, se presentan los documentos que se han generado a lo largo de la historia relacionados al Factor D, en la Figura 1 se puede apreciar la línea de tiempo de los documentos existentes a la fecha.

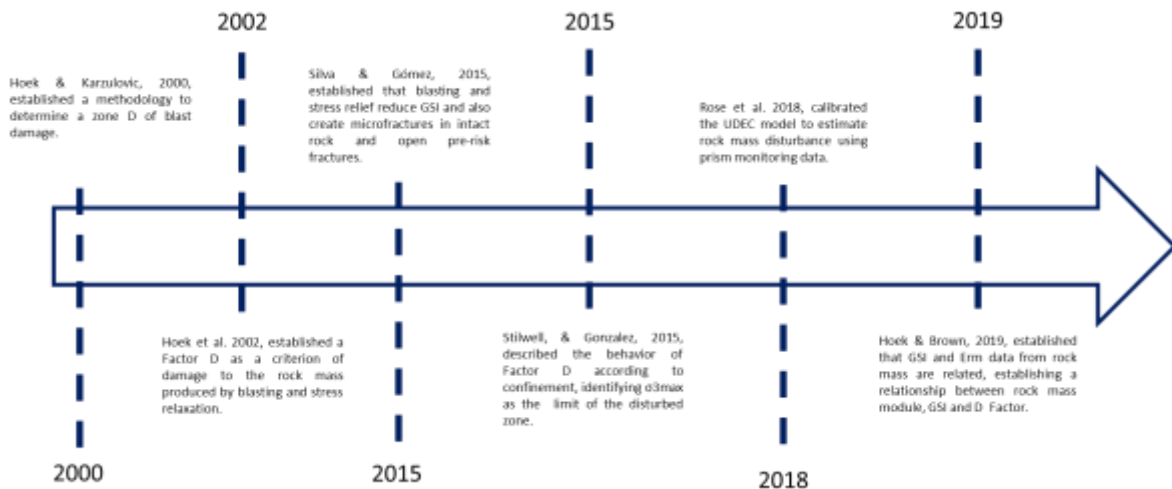


Figura 1. Línea de tiempo de trabajos relacionados al Factor D.

En el año 2000 se realiza el primer acercamiento al Factor D “Propiedades de macizo rocoso en minas de superficie” (Hoek & Karzulovic, 2000) muestran una metodología para determinar una zona D de daño por tronadura, indicando con la Figura 2 lo siguiente: “Se resumen las condiciones para una pila (de material tronado) que puede ser extraído eficientemente y el macizo rocoso dañado que se encuentra entre el límite de extracción y la roca in situ. Las propiedades del macizo rocoso dañado por la tronadura controlaran la pendiente que permanece después de que la excavación de la pila se ha completado. El espesor D de la zona dañada por la tronadura dependerá del diseño de tronadura.” (Hoek & Karzulovic, 2000).

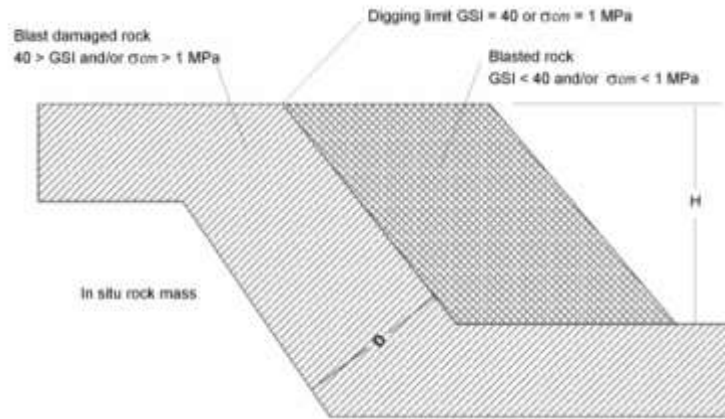


Figura 2. Esquema de la zona dañada por tronadura (Hoek & Karzulovic, 2000).

Estos autores establecieron una relación para el Factor D en función a la altura del talud y a los controles establecidos en el proceso de tronadura, ver Tabla 1.

Tabla 1. Relación entre el Factor D, la altura y los controles realizados por tronadura (Hoek & Karzulovic, 2000).

Gran tronadura de producción, confinada y con poco o nada de control.	D= 2 a 2.5 H
Tronadura de producción con nada de control, pero con cara libre.	D= 1 a 1.5 H
Tronadura de producción, confinada, pero con algo de control (Ej. Una o más filas buffer)	D= 1 a 1.2 H
Tronadura de producción con algo de control (Ej. Una o más filas buffer y tronadura con cara libre)	D= 0.5 a 1 H
Tronadura de producción cuidadosamente controlada con cara libre	D= 0.3 a 0.5 H

El año 2002 se estableció un Factor D como criterio de daño al macizo rocoso producto de las tronaduras y desconfinamiento realizado (Hoek et al, 2002). Estos autores propusieron lo siguiente: *“La experiencia en el diseño de taludes en grandes rajas a cielo abierto ha mostrado que el criterio de Hoek-Brown para macizos rocosos in situ no alterados (D = 0) da lugar a parámetros de resistencia del macizo rocoso consideradas optimistas. Los efectos de los intensos daños de las voladuras, así como de la relación de esfuerzos debido a la retirada del estéril de recubrimiento, provocan una alteración del macizo rocoso. Para estos macizos rocosos es más apropiado considerar propiedades “alteradas” del macizo, es decir D = 1 en las ecuaciones. Existen diversos artículos mencionados en este documento que hacen mención de distintos autores que han buscado estimar el factor D, los cuales son resumidas en la Figura 3”*.


Apariencia del macizo rocoso	Descripción del macizo rocoso	Valor D sugerido
	Excelente calidad de voladura controlada o excavación con taneladota, TBM, con resultados de alteración mínima del macizo rocoso confinado circundante al túnel.	$D = 0$
	Excavación mecánica o manual en macizos rocosos de mala calidad (sin voladuras) con una alteración mínima en el macizo rocoso circundante. Cuando aparezcan problemas de deformación en el piso durante el avance, la alteración puede ser severa a menos que se coloque una contrabóveda temporal, tal como se muestra en la fotografía.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Voladura de muy mala calidad en un túnel en roca competente con daños locales severos, extendiéndose 2 o 3 m en el macizo rocoso circundante.	$D = 0.8$
	Pequeñas voladuras en taludes de ingeniería civil dan lugar a pequeños daños al macizo rocoso, particularmente si se usan voladuras de contorno como su muestra en el lado izquierdo de la fotografía. Sin embargo la liberación de tensiones resulta en alguna alteración.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Los taludes en las grandes minas a cielo abierto sufren alteraciones significativas debido a las grandes voladuras de producción y también debido a la relajación de tensiones al retirar el estéril de recubrimiento. En algunas rocas blandas la excavación puede llevarse a cabo mediante el ripado y empuje con tractores de orugas y el grado de afectación a los taludes será menor.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Figura 3. Guía para estimar el factor de alteración D (Hoek et al, 2002).

Uno de los documentos más recientes relacionados al Factor de perturbación (Factor D) busco determinar el grado de perturbación en un cielo abierto, indicando lo siguiente: “En la conceptualización de la perturbación está implícito el supuesto de que la tronadura y el alivio del estrés reducen el GSI y también crea microfracturas en la roca intacta y abre fracturas pre-existentes.” (Silva & Gómez, 2015), ver Figura 4.

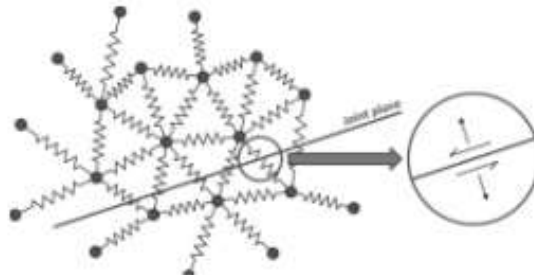


Figura 4. Representación gráfica de Microfracturas y quiebre por esfuerzo de corte (Silva & Gómez, 2015).

Estos autores lograron apreciar las microfisuras después de realizar la tronadura y desconfinar el banco, sumado a esto realizaron ensayos de UCS de este sector, apreciando una clara disminución de la competencia del bloque, ver Figura 5.

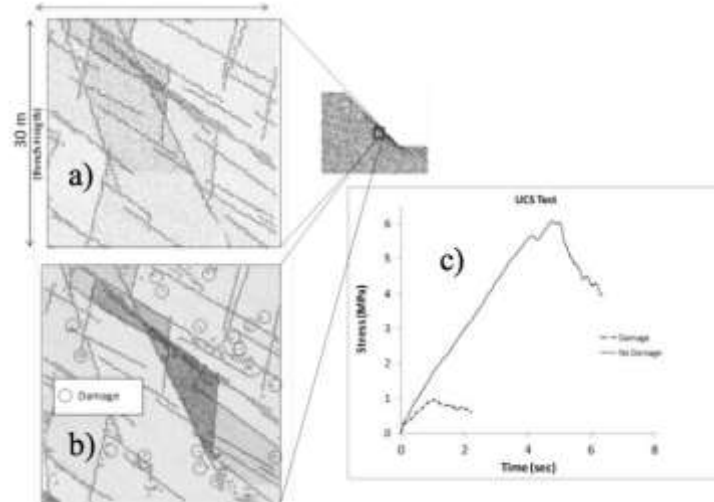


Figura 5. Microfisuras encontradas y comparación del UCS del sector después de tronar y desconfinar (Silva & Gómez, 2015).

También incorporan en su estudio un gráfico con mediciones de RQD en profundidad para un conjunto de pozos de perforación en una mina rajo abierto. Se aprecia claramente el aumento de RQD en profundidad, producto de la presencia del daño al macizo rocoso cercano a la superficie del rajo, debido al desconfinamiento y las tronaduras producidas, ver Figura 6.

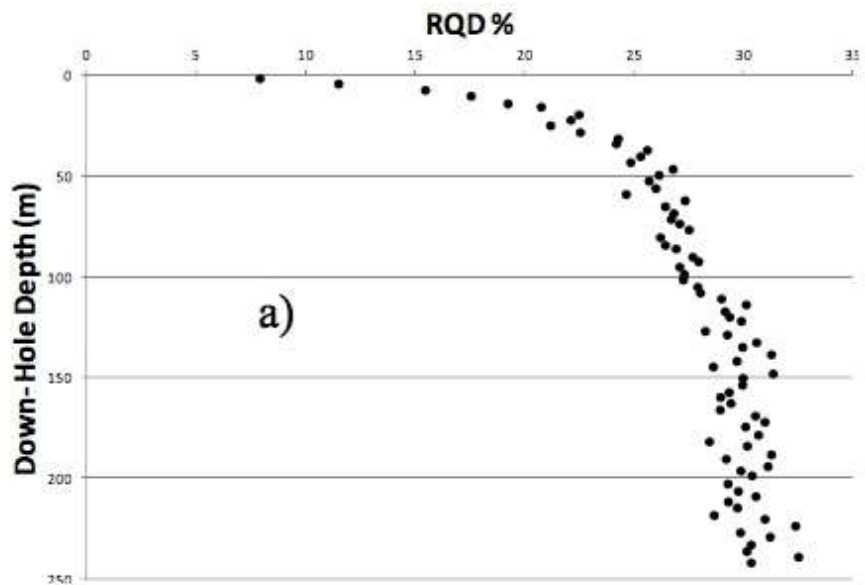


Figura 6. Variación del RQD en función a la profundidad (Silva & Gómez, 2015).

Además, estos autores sugieren una metodología para incorporar la zona de daño asociada al Factor D en un análisis de estabilidad, tal como se muestra a continuación en la Figura 7.

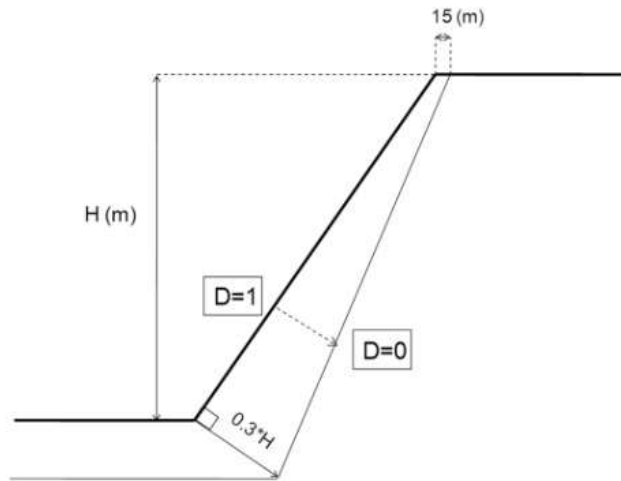


Figura 7. Diagrama que representa zona de daño en un talud (Silva & Gómez, 2015).

Otro documento reciente (Hoek & Brown, 2019) que relaciona al Factor de perturbación del macizo rocoso con el GSI y E_{rm} , estableciendo una interesante relación entre estos tres parámetros, ver Figura 8.

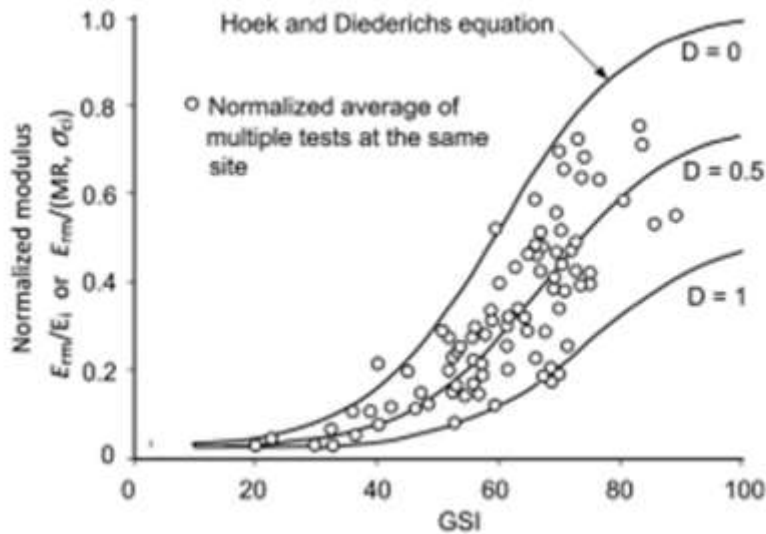


Figura 8. Comportamiento de E_{rm} para distintos GSI, ligado al Factor D (Hoek & Brown, 2019).

El año 2018 algunos autores buscaron por medio de calibración de prismas y análisis de diferencias finitas en UDEC, calibrar los desplazamientos e indicar la zona y el efecto del Factor D en profundidad (Rose et al., 2018).

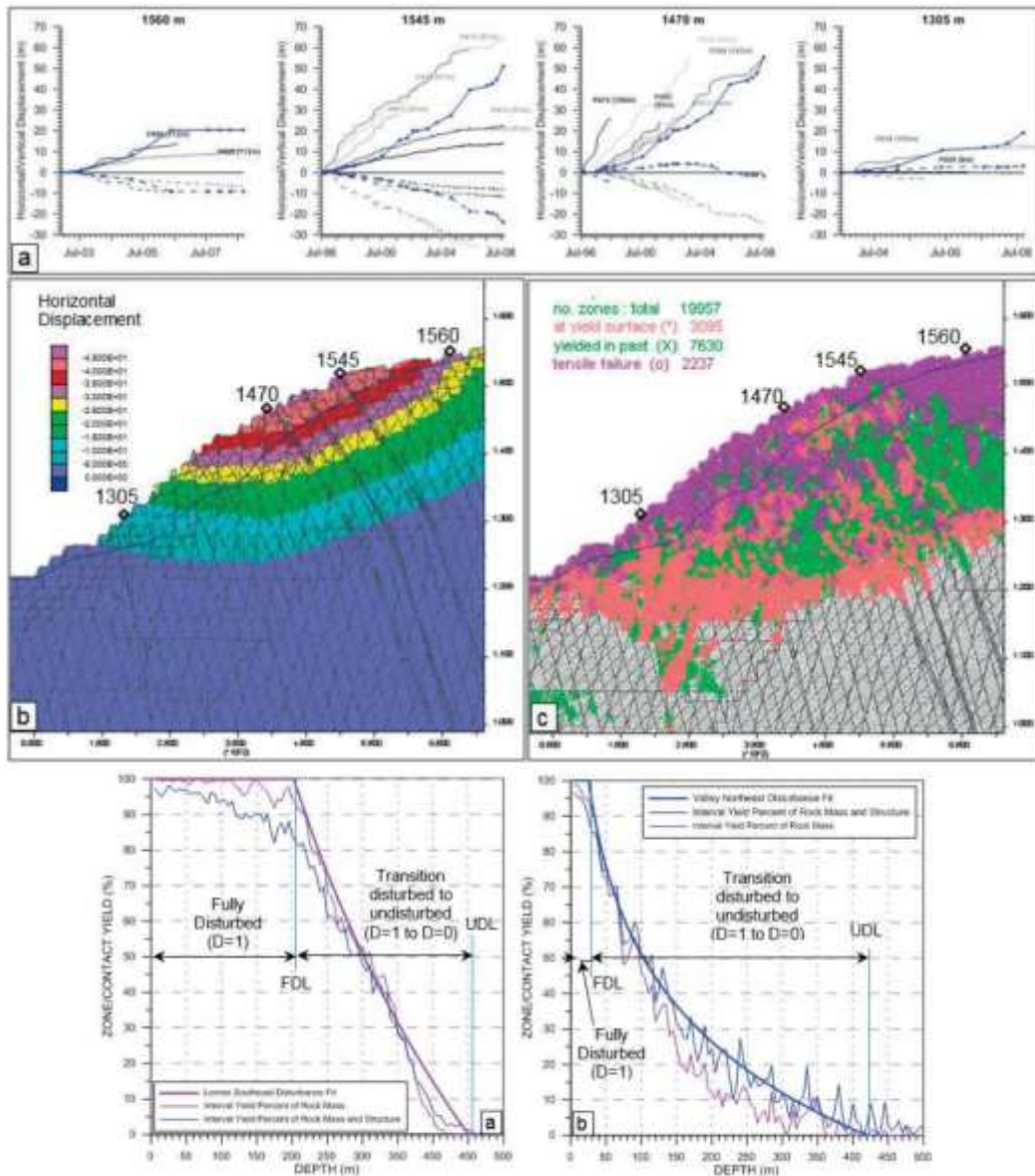


Figura 9. Calibración realizada con prismas y UDEC para determinar la zona de transición del Factor D (Rose et al., 2018).

El documento más reciente realizó una propuesta al indicar el comportamiento del Factor D según el confinamiento, determinando un límite máximo σ_{3max} para identificar como límite de la zona perturbada según las siguientes ecuaciones (Gonzalez & Stilwell, 2015), ver Figura 10.

$$D = 1 - \frac{\sigma'_3}{\sigma'_{3max}} \quad \sigma'_3 < \sigma'_{3max} \quad (3)$$

$$D = 0 \quad \sigma'_3 \geq \sigma'_{3max} \quad (4)$$

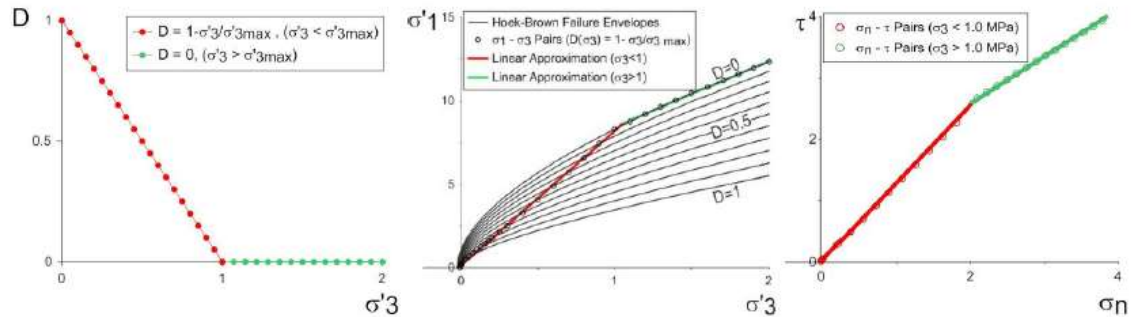


Figura 10. Ejemplos que ilustra a) la función de perturbación, b) la función de resistencia en un diagrama de esfuerzos principales, c) la función de resistencia en un diagrama de corte normal (Gonzalez & Stilwell, 2015).

Actualmente la consultoría aplica principalmente el Factor D de 3 formas distintas:

- Asignar un valor para D para todo el macizo rocoso.
- Asignar un valor para D para un rango de confinamiento (σ_3) entre 0 y 0.75 MPa
- Asignar un valor para D para un rango de confinamiento (σ_3) entre 0 y 1.00 MPa

2 CAPITULO 2: MARCO TEORICO

Se realizó un modelo numérico para representar un talud minero de una mina cielo abierto con el fin de establecer el efecto por desconfinamiento que se produce en el macizo rocoso producto de la extracción minera. Se utilizó el software Abaqus que aplica el método de los elementos finitos para realizar modelos mecánicos, por ejemplo: estáticos lineales, no lineales y dinámicos incluyendo simulación de impactos, problemas de contacto de sólidos, térmicos, acoplamientos acústico-estructurales, mecánica de fluidos, piezoeléctricos, entre otros.

2.1 Base teórica

Esta sección proporciona una descripción general de los aspectos teóricos de los modelos de materiales que se proporcionan en Abaqus, también menciona el modelo de plasticidad de tipo Mohr-Coulomb utilizado para este estudio, junto con el uso de elementos finitos y los distintos elementos 3D que se pueden utilizar en este software.

2.1.1 Fundamento de modelo constitutivo

Se encuentra una amplia variedad de materiales en los problemas de análisis de tensiones, y para cualquiera de estos materiales se encuentra disponible una gama de modelos constitutivos para describir el comportamiento del material. Por ejemplo, un componente hecho de un acero estructural estándar puede modelarse como un material elástico lineal isótropo sin dependencia de la temperatura. Este modelo simple probablemente sería suficiente para el diseño de rutina, siempre que el componente no se encuentre en una situación crítica. Sin embargo, si el componente pudiera estar sujeto a una sobrecarga severa, es importante determinar cómo podría deformarse bajo esa carga y si tiene suficiente ductilidad para soportar la sobrecarga sin fallas catastróficas. La primera de estas preguntas podría responderse modelando el material como un material perfectamente plástico, elástico independiente de la velocidad o, si el esfuerzo final en una prueba de tensión de una muestra del material está muy por encima del límite elástico inicial, trabajo isotrópico el endurecimiento podría incluirse en el modelo de plasticidad. Luego, se realiza un análisis no lineal (con o sin consideración de la no linealidad geométrica, dependiendo de si el analista juzga que la estructura podría deformarse o sufrir grandes cambios de geometría durante el evento) para determinar la respuesta. Pero la sobrecarga severa podría aplicarse repentinamente, causando un rápido esfuerzo del material. En tales circunstancias, la respuesta inelástica de los metales suele presentar dependencia de la velocidad: la tensión de flujo aumenta a medida que aumenta la velocidad de deformación. Por lo tanto, podría ser necesario un modelo de material "viscoplástico" (dependiente de la velocidad). (Argumentar que es conservador ignorar este efecto porque es un efecto de fortalecimiento no es necesariamente aceptable; el fortalecimiento de una parte de una estructura podría hacer que la carga se desprenda a otra parte, lo que resulta ser más débil en el evento). Hasta donde el analista puede manejar con modelos constitutivos relativamente simples (pero no lineales). Pero si la falla está asociada con la localización (desgarro de una hoja de material o pandeo de plástico) podría ser necesario un modelo de

material más sofisticado porque tales localizaciones dependen de detalles del comportamiento constitutivo que generalmente se ignoran debido a su complejidad. O si la preocupación no es una sobrecarga grave, sino una falla gradual del componente debido a la fluencia a alta temperatura o debido a la fatiga de ciclo bajo, o quizás una combinación de estos efectos, entonces la respuesta del material durante varios ciclos de carga, en cada uno de los cuales podría producirse una pequeña cantidad de deformación inelástica, debe predecirse: una circunstancia en la que necesitamos modelar mucho más el detalle de la respuesta del material.

Hasta ahora, la discusión ha considerado un material estructural convencional. En términos generales, podemos clasificar los materiales de interés como aquellos que exhiben una respuesta casi puramente elástica, posiblemente con cierta disipación de energía durante la carga rápida por respuesta viscoelástica (los elastómeros, como el caucho o el propulsor sólido); materiales que ceden y exhiben una ductilidad considerable más allá del rendimiento (como acero dulce y otros metales de uso común, hielo a bajas tasas de deformación y arcilla); materiales que fluyen por reordenamiento de partículas que interactúan generalmente a través de algún mecanismo predominantemente de fricción (como arena); y materiales quebradizos (rocas, hormigón, cerámica). La biblioteca constitutiva proporcionada en Abaqus contiene una variedad de modelos de materiales lineales y no lineales para todas estas categorías de materiales. En general, la biblioteca se ha desarrollado para proporcionar aquellos modelos que se requieren con mayor frecuencia para aplicaciones prácticas. Hay varios modelos distintos en la biblioteca; y para los materiales más comunes (metales, en particular), se proporcionan varias formas de modelar el material, cada una adecuada para un tipo particular de aplicación de análisis. Pero la biblioteca está lejos de ser exhaustiva: la gama de comportamiento del material físico es demasiado amplia para que esto sea posible. El analista debe revisar las definiciones materiales proporcionadas en Abaqus en el contexto de cada aplicación en particular. Si no hay ningún modelo en la biblioteca que sea útil para un caso particular, Abaqus / Standard contiene una subrutina de usuario — UMAT — y, de manera similar, Abaqus / Explicit contiene una subrutina de usuario — VUMAT. En estas rutinas, el usuario puede codificar un modelo de material (o llamar a otras rutinas que realizan esa tarea). Esta capacidad de “subrutina de usuario” es un recurso poderoso para el analista sofisticado que es capaz de hacer frente a las demandas de programar un modelo de material complejo.

Desde un punto de vista numérico, la implementación de un modelo constitutivo implica la integración del estado del material en un punto de integración durante un incremento de tiempo durante un análisis no lineal. La implementación de modelos constitutivos en Abaqus asume que el comportamiento del material está completamente definido por efectos locales, por lo que cada punto de integración espacial se puede tratar de forma independiente. Dado que Abaqus / Standard se usa más comúnmente con integración de tiempo implícita, la implementación también debe proporcionar una "matriz de rigidez del material" precisa para usar en la formación del jacobiano de las ecuaciones de equilibrio no lineal; esto no es necesario para Abaqus / Explicit.

Los modelos constitutivos mecánicos que se proporcionan en Abaqus a menudo consideran una respuesta elástica e inelástica. La respuesta inelástica se modela más comúnmente con modelos de plasticidad. En este capítulo se describen varios modelos de plasticidad. Algunos de los modelos constitutivos de Abaqus también utilizan conceptos de mecánica de daños, con la distinción de que en la teoría de la plasticidad la elasticidad no se ve afectada por la deformación inelástica (el módulo de Young de una muestra de metal no cambia al cargarla más allá del límite de rendimiento, hasta que la muestra es muy cerca de la falla), mientras que los modelos de daño incluyen la degradación de la elasticidad causada por cargas severas (como la pérdida de rigidez elástica que sufre una probeta de concreto después de haber sido sometida a una gran carga de compresión uniaxial).

En los modelos de respuesta inelástica que se proporcionan en Abaqus, las respuestas elásticas e inelásticas se distinguen al separar la deformación en partes recuperables (elásticas) y no recuperables (inelásticas) (*Abaqus Theory Guide, 2016*).

2.1.2 Fundamentos de plasticidad de Mohr-Coulomb

El modelo de plasticidad de Abaqus Mohr-Coulomb utiliza la función de rendimiento clásica de Mohr-Coulomb, que incluye el endurecimiento y ablandamiento de la cohesión isotrópica. También utiliza un potencial de flujo suave que tiene una forma hiperbólica en el plano de tensión meridional y una forma elíptica a trozos en el plano de tensión desviador.

El criterio de resistencia o falla de Mohr-Coulomb se ha utilizado ampliamente para aplicaciones geotécnicas. De hecho, una gran cantidad de los cálculos de diseño de rutina en el área geotécnica todavía se realizan utilizando el criterio de Mohr-Coulomb.

El criterio de Mohr-Coulomb asume que la falla está controlada por el esfuerzo cortante máximo y que este esfuerzo cortante de falla depende del esfuerzo normal. Esto se puede representar trazando el círculo de Mohr para los estados de tensión en la falla en términos de las tensiones principales máxima y mínima. La línea de falla de Mohr-Coulomb es la mejor línea recta que toca estos círculos de Mohr (Figura 11). Por tanto, el criterio de Mohr-Coulomb se puede escribir como

$$\tau = c - \sigma \tan\phi$$

Ecuación 1. Criterio Mohr-Coulomb

Donde el esfuerzo de corte es el esfuerzo normal (negativo en compresión), c es la cohesión del material y ϕ es el ángulo de fricción del material. Ver Figura 11.

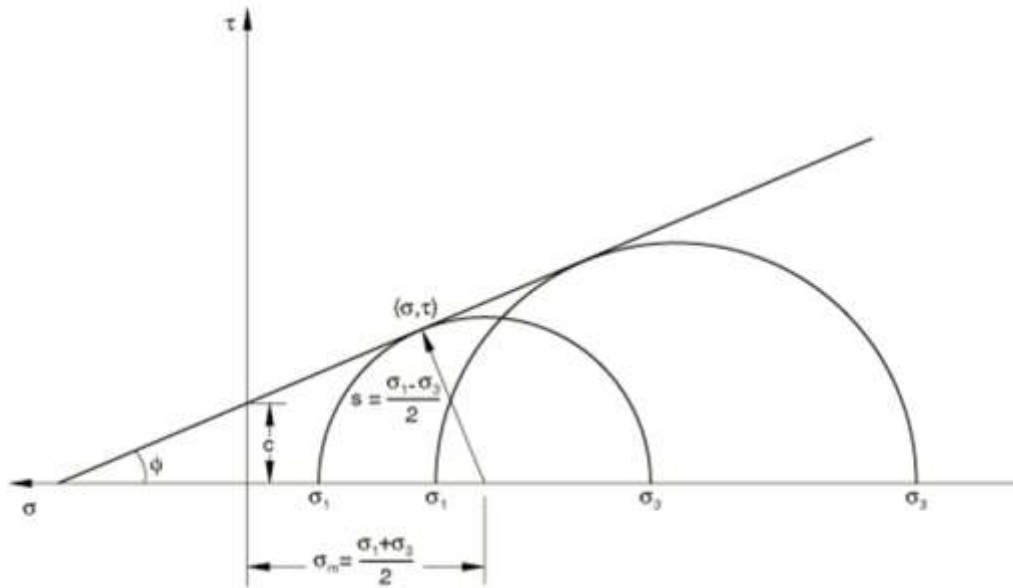


Figura 11. Criterio de falla de Mohr-Coulomb.

Desde el círculo de Mohr,

$$\tau = s \cos\phi$$

$$\sigma = \sigma_m + s \sen\phi$$

Sustituyendo, el criterio de Mohr-Coulomb se puede reescribir como

$$s + \sigma_m \sen\phi - c \cos\phi = 0$$

Donde,

$$s = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$$

Es la mitad de la diferencia entre los esfuerzos principales máximo y mínimo (y es, por lo tanto, el esfuerzo cortante máximo) y

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$$

Es el promedio de las tensiones principales máxima y mínima (la tensión normal). Por tanto, a diferencia del criterio de Drucker-Prager, el criterio de Mohr-Coulomb supone que la falla es independiente del valor de la tensión principal intermedia. La falla de los materiales geotécnicos típicos generalmente incluye una pequeña dependencia de la tensión principal intermedia, pero el modelo de Mohr-Coulomb generalmente se considera lo

suficientemente preciso para la mayoría de las aplicaciones. Este modelo de falla tiene vértices en el plano de tensión desviador (*Abaqus Theory Guide, 2016*).

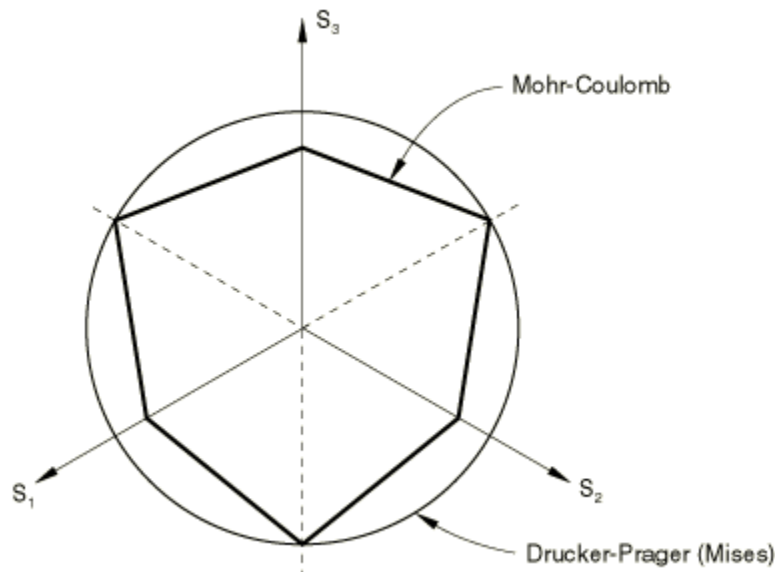


Figura 12. Modelo de Mohr-Coulomb en el plano desviador.

2.1.3 Fundamentos de método de elementos finitos

Abaqus contiene un conjunto completo de elementos sólidos para análisis simétricos, bidimensionales y tridimensionales.

La biblioteca de elementos sólidos incluye elementos isoparamétricos: cuadriláteros en dos dimensiones y "ladrillos" (hexaedros) en tres dimensiones. Estos elementos isoparamétricos se prefieren generalmente en la mayoría de los casos porque suelen ser los más rentables de los elementos que se proporcionan en Abaqus. Se ofrecen con interpolación de primer y segundo orden y se describen en detalle en "Cuadriláteros isoparamétricos sólidos y hexaedros". Por razones prácticas, a veces no es posible utilizar elementos isoparamétricos en un modelo; por ejemplo, algunos generadores de mallas comerciales utilizan técnicas de mallado automático que se basan en la triangulación para rellenar regiones de forma arbitraria. Debido a estas necesidades, Abaqus incluye elementos triangulares, tetraedros y en forma de cuña. En la mayoría de los casos, se recomienda que estos elementos solo se utilicen para rellenar las partes incómodas de la malla y, en particular, que se usen elementos isoparamétricos bien formados en cualquier región crítica (como un área donde la deformación debe predecirse con precisión). Los elementos isoparamétricos también se pueden degenerar para hacer formas más simples. Generalmente, los elementos escritos para esas geometrías particulares se prefieren a este método. La excepción a esta regla ocurre en los casos en los que se deben modelar singularidades (como en aplicaciones de mecánica de fracturas), ya que los elementos

isoparamétricos de segundo orden degenerados pueden proporcionar una singularidad mediante el uso de la técnica de "cuarto de punto" (colocando los nodos del lado medio $1/4$ de la distancia a lo largo del lado desde el nodo en la singularidad en lugar de en el punto medio del lado).

Los elementos sólidos se proporcionan con interpolación de primer orden (lineal) y de segundo orden (cuadrática), y el usuario debe decidir qué enfoque es más apropiado para la aplicación. Algunas pautas son las siguientes. Los elementos estándar de primer orden son esencialmente elementos de deformación constante: las formas isoparamétricas pueden proporcionar más que una respuesta de deformación constante, pero el contenido de orden superior de las soluciones que dan generalmente no es exacto y, por lo tanto, de poco valor. Los elementos de "modo incompatible", descritos en "Elementos continuos con modos incompatibles", son desde la perspectiva del usuario elementos de orden inferior, pero tienen grados internos de libertad que permiten al elemento representar casi todos los patrones de deformación lineal. Estos elementos pueden representar exactamente ciertos campos importantes de deformación lineal: el campo más importante es el debido a la flexión. Los elementos de segundo orden son capaces de representar todos los posibles campos de deformación lineal. Por lo tanto, en el caso de problemas elípticos, problemas para los que las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan son de carácter elíptico, como la elasticidad, la conducción de calor, la acústica, en los que la suavidad de la solución está asegurada, suele ser una precisión de solución mucho mayor por grado de libertad disponible con los elementos de orden superior. Por lo tanto, generalmente se recomienda que se utilicen los elementos de orden más alto disponibles para tales casos: en Abaqus esto significa elementos de segundo orden. Esta observación conduce lógicamente al uso de la técnica de elementos finitos "jerárquica" o método "p", refinando el modelo aumentando el orden de interpolación en los elementos en regiones críticas: este enfoque aún no está disponible en Abaqus.

Un caso en el que tanto los elementos de modo incompatible como los elementos de segundo orden se pueden utilizar eficazmente es el análisis de tensión de elementos relativamente delgados sujetos a flexión: estos problemas se encuentran a menudo en aplicaciones prácticas. En tales casos, la variación de la deformación a través del espesor debe ser al menos lineal, y los elementos de deformación constante (de primer orden) no representan correctamente esta variación. Los elementos isoparamétricos de primer orden totalmente integrados también sufren de "bloqueo de corte" en estas geometrías: no pueden proporcionar la solución de flexión pura porque deben cortarse en los puntos de integración numérica para responder con un comportamiento cinemático apropiado correspondiente a la flexión. Este corte bloquea el elemento, la respuesta es demasiado rígida. Para los elementos isoparamétricos, la integración reducida proporciona una cura para estos problemas, pero a costa de permitir modos singulares espurios ("reloj de arena"). El uso de elementos de segundo orden es una alternativa más confiable, porque la interpolación de segundo orden contiene naturalmente el campo de deformación lineal; un elemento a través del espesor es suficiente para representar el comportamiento de un componente delgado sometido a cargas de flexión con bastante precisión. Otra alternativa

está formada por los elementos de modo incompatibles: el campo de deformación lineal en estos elementos contiene los modos necesarios para resolver el problema de flexión exactamente si los elementos son de forma rectangular. Para una discusión detallada del desempeño de los elementos continuos de Abaqus en problemas de flexión, consulte “Desempeño de elementos continuos y de capa para el análisis lineal de problemas de flexión”, de la Guía de Benchmarks de Abaqus. Debe recordarse, sin embargo, que Abaqus ofrece elementos de caparazón y viga que están escritos específicamente para geometrías delgadas: el uso de elementos sólidos para tales casos solo debe considerarse cuando los elementos de viga o caparazón no son prácticos.

Por todas estas razones, los elementos de segundo orden se prefieren en aplicaciones elípticas. El argumento se extiende fácilmente a la interpolación de orden superior (cúbica, cuártica, etc.), pero el rápido aumento en el costo por elemento para formas de orden superior significa que, aunque la precisión por grado de libertad es mayor, la precisión por costo computacional puede que no esté aumentando. La experiencia práctica sugiere que, excepto en casos especiales, se gana poco yendo más allá de los elementos de segundo orden, por lo que Abaqus no ofrece formas de orden superior.

Muchos problemas de interés práctico no son elípticos: las localizaciones surgen de una forma u otra. Las aplicaciones de plasticidad son un ejemplo: a medida que la solución se acerca a la carga límite, la mayoría de los modelos de plasticidad tienden hacia un comportamiento hiperbólico. Esto permite que ocurran discontinuidades en la solución; las soluciones de la línea de deslizamiento de la teoría clásica de la plasticidad perfecta son gráficos de las líneas características de discontinuidades de velocidad en las ecuaciones hiperbólicas del problema. Si la solución de elementos finitos debe exhibir precisión, estas discontinuidades en el campo de gradiente de la solución deben modelarse razonablemente bien. Con una malla fija que no utiliza elementos especiales que admiten discontinuidades en su formulación, esto sugiere que los elementos de orden más bajo, los elementos de primer orden probablemente sean los más exitosos, porque, para un número dado de nodos, proporcionar la mayoría de las ubicaciones en las que algún componente del gradiente de la solución puede ser discontinuo (los bordes del elemento). Este argumento es poco riguroso, pero es cierto, no obstante, que los elementos de primer orden tienden a ser preferidos para tales casos. Los elementos de modo incompatibles pueden representar discontinuidades particularmente bien. También pueden representar la localización de deformaciones como ocurre en las bandas de cizallamiento. Sin embargo, uno debe darse cuenta de que una localización de cizalla mejor definida aumenta la magnitud de la deformación y, por lo tanto, tiende a aumentar el número de incrementos e iteraciones requeridos para el análisis.

Todos los elementos sólidos en Abaqus, excepto los elementos infinitos, están escritos para incluir efectos de deformación finita. Cuando estos elementos se utilizan con una definición de material hiperelástico (elastomérico), el comportamiento constitutivo se calcula directamente a partir de la matriz de gradiente de deformación, Cuando los elementos se utilizan para análisis geoméricamente no lineales con cualquier otra definición de material

(en deformación finita, esto significa que el material tiene algún comportamiento inelástico, ya que todas las definiciones de elasticidad en Abaqus excepto los modelos de hiperelasticidad asumen que las deformaciones elásticas son pequeñas), las deformaciones se calculan como la integral de la tasa de deformación,

$$D = \text{sym} \frac{\partial v}{\partial x}$$

Ecuación 2. Cálculo de deformaciones.

Teniendo en cuenta los efectos de la rotación del material con respecto al sistema de coordenadas. En todos los casos, los elementos sólidos informan la tensión como la tensión "verdadera" (Cauchy). A menos que se especifique una orientación local para un elemento, los componentes de tensión y deformación se dan como componentes físicos referidos a las direcciones espaciales globales. Cuando se define una orientación local para un elemento sólido, los componentes de tensión y deformación se dan en el sistema local definido por el usuario: este sistema gira con la rotación media del material calculada en cada punto del material (*Abaqus Theory Guide, 2016*).

2.1.4 Fundamentos de elementos 3D (o tetraedros)

La biblioteca de elementos sólidos en Abaqus incluye triángulos de primer y segundo orden, tetraedros y elementos en forma de cuña para análisis planos, simétricos y tridimensionales.

Se proporcionan versiones híbridas de estos elementos para su uso con modelos constitutivos incompresibles y casi incompresibles (consulte "Formulación híbrida de elementos sólidos incompresibles", para una discusión detallada de la formulación utilizada). Sin embargo, estas formas híbridas deben usarse solo para rellenar regiones en mallas hechas de elementos de ladrillo; de lo contrario, se pueden introducir demasiadas variables de restricción.

Los tetraedros de segundo orden no son adecuados para el análisis de problemas de contacto: una presión constante en la cara de un elemento produce cargas equivalentes cero en los nodos de las esquinas. En los problemas de contacto, esto hace que la condición de contacto en las esquinas sea indeterminada, y es probable que la solución falle debido a una vibración excesiva del espacio. El mismo argumento es válido para el contacto en caras triangulares de un elemento de cuña (*Abaqus Theory Guide, 2016*).

3 CAPITULO 3: METODOLOGÍA

Para este estudio, se creó un modelo que excava el macizo rocoso para reproducir las deformaciones plásticas naturales que ocurren en un proceso de excavación en una mina a cielo abierto (Anexo A). Luego, asumiendo un comportamiento lineal del Factor D, confinamiento y deformaciones plásticas, se obtuvo el comportamiento de las propiedades de resistencia del macizo rocoso (c y ϕ), la envolvente de Hoek & Brown en la zona de perturbación y la geometría de la zona perturbada para cada calidad de macizo rocoso evaluado: buena, regular y mala.

3.1 Relajación de esfuerzos en taludes de cielo abierto

La metodología se basa en la creación de un modelo en Abaqus 6.14-1, ya que este software permite realizar modelos elastoplásticos e incorporar subrutinas que facilitan representar el desconfinamiento de un talud minero. El modelo permite excavar gradualmente el talud para representar el desarrollo de una mina cielo abierto y luego obtener las deformaciones plásticas que ocurren en el macizo rocoso debido a la relajación de esfuerzos.

Este modelo considera un macizo rocoso seco, totalmente homogéneo con comportamiento elastoplástico típico y sin discontinuidades. Se realizó un modelo explícito con subrutinas que primero proporciona propiedades de c y ϕ para cada nivel de confinamiento presente en el modelo y luego excava progresivamente el cielo abierto. La excavación se completó en 22 pasos, 21 pasos con excavaciones de 20 m (2 bancos) y la excavación final de 30 m (3 bancos). El talud tiene una altura de 450 m con un ángulo global de 45° y bancos con una altura de 10 m. El eje Z es el eje vertical del modelo y los ejes X, Y son los ejes horizontales. La condición geoestática se incorporó al modelo con $K=1$, es decir, se consideró $\sigma_h = \sigma_v$. Las propiedades de c y ϕ se obtuvieron del software Roclab para cada nivel de confinamiento (Anexo E). Se utilizaron condiciones de borde típicas con roller deslizante, permitiendo el movimiento en los ejes opuestos e impidiendo el desplazamiento sobre el mismo eje en las caras del modelo. El modelo posee una altura y largo de 1 km. El modelo se muestra en la Figura 13.

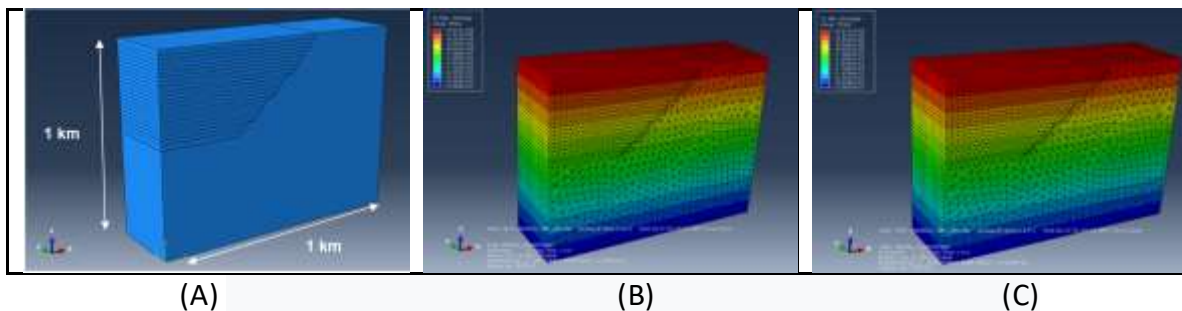


Figura 13. (A) Dimensiones del modelo 2D con el software Abaqus, (B) esfuerzo principal menor por profundidad y (C) esfuerzo principal mayor por profundidad.

A partir de un modelo con $D = 0$ y E_{rm} constante, se logró reducir el módulo del macizo rocoso como resultado de las deformaciones plásticas en un proceso producido durante la excavación natural del talud minero. En este estudio, los límites para la zona de perturbación se definieron entre $D = 0$ y $D = 0,7$ (Hoek et al, 2002), considerando una regresión lineal entre el Factor D en función del confinamiento y las deformaciones plásticas (ϵ_p) obtenidas. Luego, se estimó el valor del módulo de macizo rocoso (E_{rm}) para cada profundidad, de acuerdo con la Ecuación 3 (Hoek & Diederichs, 2006) y se volvió a iterar.

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D - GSI)/11)}} \right)$$

Ecuación 3. Modulo macizo rocoso.

Donde,

E_i = Modulo roca intacta

D = Factor de daño

GSI = Índice de resistencia geológica

Este proceso iterativo se llevó a cabo hasta que las magnitudes de las deformaciones plásticas no variaron en más de un 10% al ir acotando la zona de perturbación. Tan pronto como el modelo convergió, se obtuvieron las propiedades de resistencia finales de c , ϕ y la envolvente de Hoek & Brown considerando el Factor D variable en la zona de perturbación. A continuación, en la Figura 14, se muestra un diagrama del proceso iterativo realizado.



Figura 14. Diagrama de proceso iterativo realizado.

3.2 Cálculo de envolvente en zona de daño

Por medio del proceso iterativo se obtuvieron las propiedades de resistencia c y ϕ para la zona perturbada utilizando el software Roclab para los distintos niveles de confinamiento, considerando un comportamiento lineal entre el Factor D, las deformaciones plásticas y el confinamiento (Anexo B). Finalmente se utilizó el criterio de Mohr-Coulomb por tramo para el cálculo del esfuerzo principal mayor con el fin de obtener las envolventes de H&B para las calidades de macizo rocoso evaluadas: buena, regular y mala (Anexo D), ver Ecuación 4.

$$\sigma_1 = \sigma_3 \left(\frac{1 + \text{sen}\phi(\sigma_3)}{1 - \text{sen}\phi(\sigma_3)} \right) + 2c(\sigma_3) \left(\frac{\text{cos}\phi(\sigma_3)}{1 - \text{sen}\phi(\sigma_3)} \right)$$

Ecuación 4. Criterio de Mohr-Coulomb para calcular el esfuerzo principal mayor.

3.3 Caso de estudio

Este estudio consideró macizos rocosos presentes en depósitos de pórfido cuprífero en el norte de Chile, utilizando valores promedio de parámetros de resistencia para representar calidades geomecánicas buenas, regulares y malas de acuerdo con la Tabla 2 y la Tabla 3, para roca intacta y macizo rocoso respectivamente.

Tabla 2. Propiedades de roca intacta para diferentes calidades.

Calidad	Densidad (Kg/m ³)	UCS (Mpa)	E_i (Gpa)	m_i	Tracción (kpa)
Bueno	2500	113	70	17	129
Regular	2500	59	48	14	69
Malo	2500	30	30	12	40

Tabla 3. Propiedades de macizo rocoso para diferentes calidades.

Calidad	E_{rm} (Gpa)	GSI
Bueno	44.2	65
Regular	10.4	45
Malo	3.4	35

4 CAPITULO 4: RESULTADOS

Como resultado del proceso iterativo, las propiedades de resistencia c , ϕ del macizo rocoso y las envolventes de Hoek & Brown se obtuvieron en la zona de perturbación para las tres calidades consideradas: buena, regular y mala.

4.1 Propiedades de resistencia y envolventes de Hoek & Brown en la zona perturbada para las diferentes calidades de macizo rocoso

El comportamiento de las propiedades de c y ϕ se obtuvieron en la zona de perturbación (Hoek et al, 2002) asumiendo un comportamiento lineal entre el Factor D, confinamiento y las deformaciones plásticas obtenidas. El comportamiento de las propiedades de resistencia para un macizo rocoso de buena, regular y mala calidad se presentan a continuación, donde el límite de la zona de perturbación está en $\sigma_3 = 1.3\text{Mpa}$, $\sigma_3 = 1.9\text{Mpa}$ y $\sigma_3 = 2.4\text{Mpa}$ respectivamente (Anexo B), como se muestra en la Figura 15.

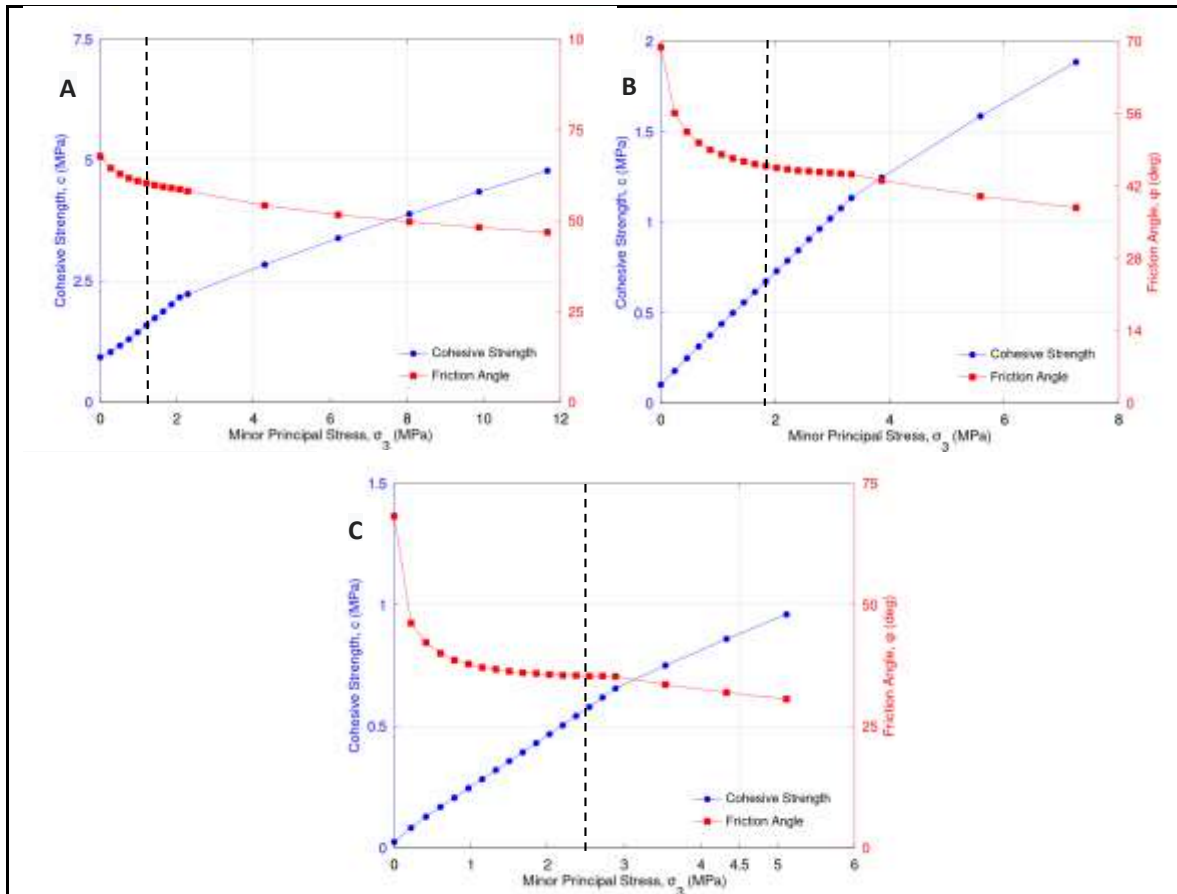


Figura 15. Comportamiento de las propiedades de resistencia de c y ϕ en la zona de perturbación por relajación de esfuerzos para un macizo rocoso de (A) buena, (B) regular y (C) de mala calidad. El límite de la zona de perturbación está en $\sigma_3 = 1.3\text{Mpa}$, $\sigma_3 = 1.9\text{Mpa}$ y $\sigma_3 = 2.4\text{Mpa}$ respectivamente.

Las propiedades de resistencia de c y ϕ en la zona de perturbación tienen un comportamiento inverso, es decir, mientras que la cohesión aumenta a medida que nos acercamos a la superficie desconfiada, el ángulo de fricción disminuye. Luego, con las

propiedades de resistencia de c y ϕ , se obtuvieron las envolventes de Hoek & Brown (Hoek et al., 2002) considerando variable el Factor D en la zona de perturbación para un macizo rocoso de buena, regular y mala calidad geomecánica. El límite de la zona de perturbación se muestra hasta $\sigma_3 = 1.3\text{Mpa}$, $\sigma_3 = 1.9\text{Mpa}$ y $\sigma_3 = 2.4\text{Mpa}$ respectivamente (Anexo B), ver la Figura 16.

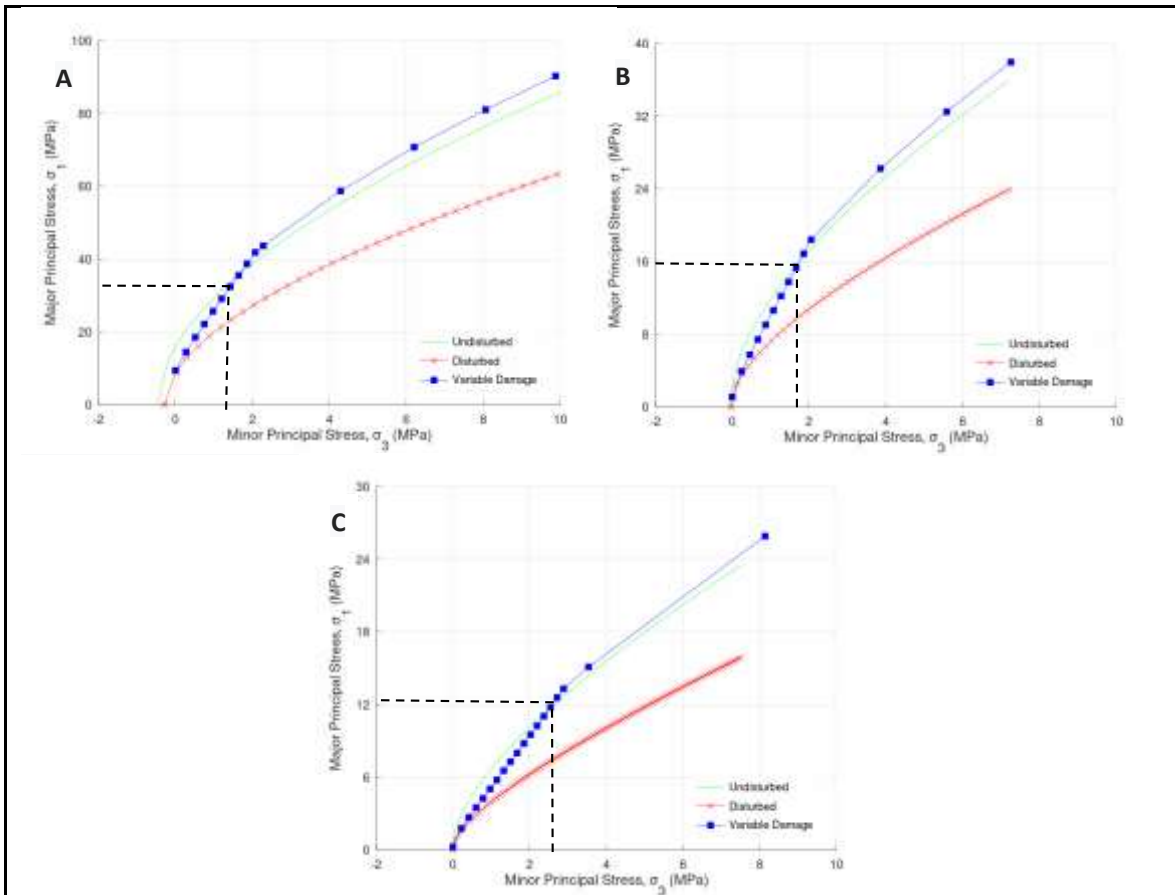


Figura 16. Comparación de envolventes H&B para $D = 0$, $D = 0.7$ y Factor D variable obtenida para la zona de perturbación para un macizo rocoso de (A) buena, (B) regular y (C) mala calidad geomecánica. El límite de la zona de perturbación se muestra hasta $\sigma_3 = 1.3\text{Mpa}$, $\sigma_3 = 1.9\text{Mpa}$ y $\sigma_3 = 2.4\text{Mpa}$ respectivamente.

4.2 Deformaciones plásticas en la zona perturbada

Se presentan a continuación las deformaciones plásticas en la zona de perturbación, apreciándose deformaciones plásticas para el macizo rocoso de buena calidad hasta aproximadamente 50 m, 90 m para macizo rocoso regular y 130 m para el macizo rocoso de mala calidad. Las deformaciones plásticas (Anexo C) se miden a través de cinco mediciones a distintos niveles del cielo abierto (Superficie, Perforación 1, 2, 3 y Fondo del pozo), como se muestra en la Figura 17.

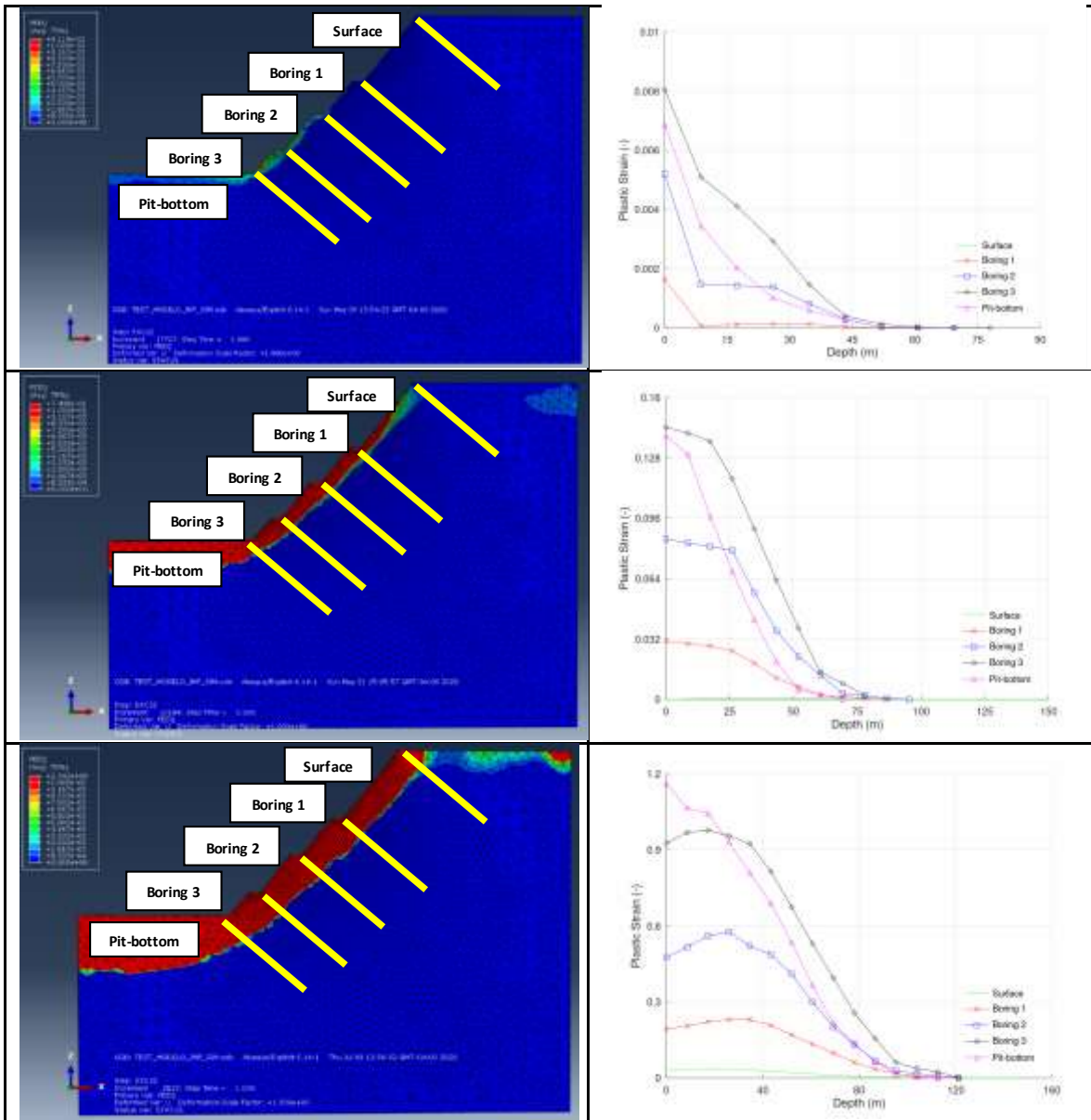


Figura 17. Deformaciones plásticas obtenidas en profundidad para un macizo rocoso (A) bueno, (B) regular y (C) mala calidad.

La zona de perturbación se muestra como una geometría triangular en el macizo rocoso bueno y regular, sin embargo, en un macizo rocoso de mala calidad la zona de perturbación se muestra como una zona rectangular. Por lo tanto, es importante asumir que la zona de perturbación diferirá según la calidad del macizo rocoso en una mina cielo abierto. La zona de perturbación tiene una extensión del 30%, 20% y 10% con respecto a la altura total del talud en su mayor extensión, para un macizo rocoso malo, regular y de buena calidad, respectivamente. La zona de perturbación para macizos rocosos de mala calidad geomecánica se manifiesta desde la cresta hasta el fondo del rajo, esto se produce debido a que las propiedades de resistencia a la tracción son inferiores, permitiendo que se extienda la zona perturbada hasta la superficie basal del rajo, generándose probablemente grietas de tracción.

5 CAPITULO 5: DISCUSIÓN

Este trabajo definió teóricamente la envolvente de Hoek & Brown en la zona de perturbación para la relajación de esfuerzos para tres calidades de macizo rocoso. El Factor D varió de $D=0,7$ en la superficie del talud a $D=0$ en el punto donde las deformaciones ya no se producen. Igualmente, este trabajo mostró el comportamiento de las propiedades de resistencia de c y ϕ en la zona de perturbación producto de la relajación de esfuerzos, estableciendo la profundidad a la que el macizo rocoso muestra deformaciones plásticas para cada calidad evaluada.

Las propiedades de roca intacta y macizo rocoso consideradas en este estudio se encuentran en los depósitos de pórfido cuprífero en el norte de Chile. Es importante señalar que el macizo rocoso utilizado en este modelo de mala calidad es de la peor calidad posible encontrada en el depósito estudiado.

Los resultados obtenidos para cada una de las calidades del macizo rocoso concuerdan con los criterios de deformaciones plásticas encontrados para la resistencia a la movilización de la roca (*Cabezas & Vallejos, 2018*), considerando que el modelo numérico realizado muestra niveles de deformaciones plásticas cercanas a 0.5%, 1.5% y 3% para macizos rocosos de buena, regular y mala calidad geomecánica respectivamente en la zona de perturbación más cercana a la superficie.

Este estudio llenó algunos vacíos dejados por estudios previos que fueron empíricos o por medio de modelamiento numérico, pero que no definieron una profundidad de perturbación ni el comportamiento de las propiedades de resistencia del macizo rocoso en la zona de perturbación, variables que son críticas para estimar la estabilidad del talud. Al utilizar aquí un modelo que extrae gradualmente los bancos de un cielo abierto, la relajación que ocurre en el proceso de minería se puede representar con mayor precisión para un macizo rocoso de buena, regular y mala calidad al reducir el módulo del macizo rocoso como resultado de la relajación de esfuerzos.

Este estudio encontró resultados similares a un estudio anterior asociado a la zona de perturbación (*Silva & Gomez, 2015*), en el que se demostró que la zona de perturbación tiene una geometría triangular para un macizo rocoso analizado (regular calidad). Este estudio además demostró que esto se produce en macizos de buena y regular calidad, sin embargo, en macizos rocosos de mala calidad geomecánica la geometría en la zona perturbada es mayor y se presenta de forma rectangular. Esto coincide con lo observado en las áreas altas de una mina a cielo abierto en depósitos de pórfido cuprífero, donde se puede observar mayor perturbación asociadas al proceso hidrotermal y se visualizar un aumento de calidad geomecánica a medida que aumenta la profundidad del rajo y se aproxima a la zona hipógena (*Sillitoe, 2010*).

Para todas las calidades de macizo rocoso estudiadas, se encontró que la zona de perturbación indica que las mayores deformaciones plásticas se producen en los niveles

más profundos de rajo, considerando que todas las mediciones tomadas llegaron a la misma profundidad (200m aproximadamente) (Superficie, Perforación 1, 2, 3 y Fondo del pozo). La zona de perturbación es más amplia o más extensa en macizos rocosos de mala calidad y menos extensa cuando la calidad de la roca es regular o buena. Es importante indicar que, en el macizo rocoso de mala calidad, la zona de perturbación se extendió uniformemente hacia la superficie, favoreciendo probablemente grietas de tracción. Las geometrías mencionadas en la zona perturbada para las distintas calidades geomecánicas evaluadas, se pueden apreciar en la Figura 18, representando las geometrías sugeridas de la zona de perturbación en un talud a cielo abierto para las distintas calidades geomecánicas evaluadas en este estudio.

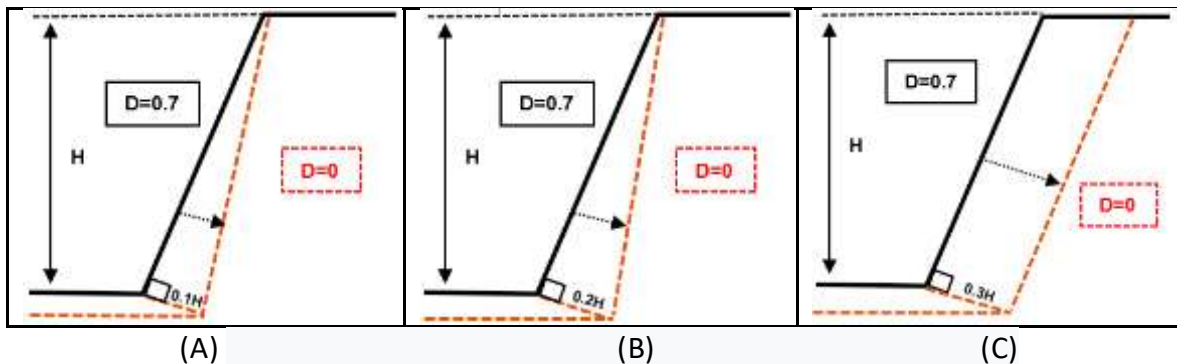


Figura 18. Geometrías sugeridas de la zona perturbada para macizos rocosos de (A) buena, (B) regular y (C) mala calidad geomecánica.

Otros estudios buscaron calibrar las deformaciones plásticas en la superficie sin tener en cuenta lo que sucede con las variaciones en profundidad (Rose et al., 2018), por tanto, no logran identificar las deformaciones plásticas profunda. En un trabajo reciente, se definió arbitrariamente un límite de perturbación y luego se estableció el Factor D en función del confinamiento (González & Stilwell, 2019), esto también puede resultar inexacto porque las deformaciones y perturbaciones del macizo rocoso ocurren de forma natural al desarrollar una mina a cielo abierto y no se pueden asignar arbitrariamente.

Desafortunadamente, los datos reales en la superficie o en profundidad no están disponibles para compararlos con los datos teóricos con el fin de calibrar el modelo desarrollado aquí. Además, no se evaluó la perturbación del macizo rocoso por tronaduras, ya que no se disponía de los datos necesarios para realizarlo, pero esto sin duda sugiere temas para estudios posteriores. Finalmente, es pertinente considerar que la perturbación causada por tronaduras es considerada superficial por algunos autores y puede controlarse minimizando las vibraciones y utilizando secuencias que eviten la activación de estructuras, lo que le entrega más relevancia a este tipo de estudios (Adamson et al., 2011).

6 CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo muestra la geometría de la zona de perturbación para tres calidades de macizos rocosos, buena, regular y mala, en una mina a cielo abierto como resultado de la relajación de esfuerzos producida por la excavación gradual. Se determinaron las propiedades de resistencia c y ϕ , junto con las envolventes de Hoek & Brown en la zona de perturbación, estableciendo el valor del Factor D como variable en lugar de constante.

Utilizando valores variables en lugar de constantes del Factor D, el estudio mostró que la zona de perturbación en la excavación a cielo abierto difiere según la calidad del macizo rocoso. En la masa rocosa de mala calidad asociada a la zona hidrotermal, como sucede en los actuales depósitos de pórfido de cobre de Chile, la franja de perturbación es más extensa mostrándose relativamente uniforme alrededor de la superficie, pero disminuye a medida que el cielo abierto se profundiza, debido al mejoramiento en la calidad del macizo rocoso.

Este estudio permitió determinar los límites de la zona de perturbación, apreciándose una diferencia considerable para los tres tipos de calidades evaluados, buena, regular y mala calidad apreciándose valores de confinamiento cercanos a $\sigma_3 = 1.3\text{Mpa}$, $\sigma_3 = 1.9\text{Mpa}$ y $\sigma_3 = 2.4\text{Mpa}$ respectivamente.

Considerando que las deformaciones plásticas superiores a 0,5%, 1.5% y 3% para macizos rocosos de mala, regular y buena calidad geomecánica representa una perturbación considerable debido a la relajación de esfuerzos, la zona de mayor perturbación se encuentra cercana al 25%, 15% y 3% de la altura total del talud, respectivamente.

Lo mostrado en este estudio incrementa la necesidad de considerar que el Factor D es variable. Se sugiere que se debe considerar la calidad del macizo rocoso al determinar la zona de perturbación en un talud minero. Se recomienda realizar estudios futuros asociados a este tema, que puedan obtener datos in-situ durante el proceso de excavación de la zona perturbada, con el fin de calibrar los resultados de este estudio.

7 CAPITULO 7: BIBLIOGRAFIA

- Abaqus Theory Guide*. (2016). Obtenido de <http://130.149.89.49:2080/v2016/books/stm/default.htm?startat=ch03s02ath64.html>
- Adamson, W., Muñoz, V., & G, S. (2011). Application of Technology for Final Wall Damage Control at Cerro Vanguardia, Argentina. *EXPLO*. Melbourne.
- Cabezas, C., & Vallejos, J. (2018). Brittle Behavior and Brittleness Indicators Around Hard Rock Mass Excavations. *American Rock Mechanics Association*. Washington.
- Cheon, D.S.; Jung, Y.B.; Choi, B.H; S.K, Cho. (2014). Estimation of input for CWFS model using RSM. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, (págs. 147-152). London.
- Edelbro, Catrin. (2009). Numerical modelling of observed fallouts in hard rock masses using an instantaneous cohesion-softening friction-hardening model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 398-409.
- Edelbro, Catrin. (2010). Different Approaches for Simulating Brittle Failure in Two Hard Rock Mass Cases: A Parametric Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 151-165.
- González del Solar, G.; Martín, P.; Maldonado, N. (2018). N. Maldonado *, Formulation, implementation and validation of a scalar damage model for brittle materials applied to three- dimensional solid elements.
- Gonzalez, G., & Stilwell, I. (2015). A Continuum Approach for Application of the 2002 Hoek-Brown Disturbance Factor (D) in Slopes. *ISRM Regional Symposium*. Buenos Aires.
- Hajiabdolmajid*, V.; Kaiser, Peter. (2002). Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 731-741.
- Hajiabdolmajid, V.; P.Kaiser; Martin, C.D. (2003). Mobilised strength components in brittle failure of rock. *Géotechnique*, 327-336.
- Hoek E. & A. Karzulovic. (2000). Rock Mass properties for Surface Mines, Published in Slope Stability in Surface Mining. *Society for Mining, Metallurgical (SME)*, (págs. 59-70). Littleton, Colorado.
- Hoek, & Brown. (2019). The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 445-463.
- Hoek, E., & Diederichs, M. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 203-215.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 Edition. *Proceedings of 5th North American Rock Mechanics Symposium*, (págs. 267–273). Toronto.
- Lee, Kang-Hyun; Lee, In-Mo; Shin, Young-Jin. (2011). Brittle Rock Property and Damage Index Assessment for Predicting Brittle Failure in Excavations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 251-257.

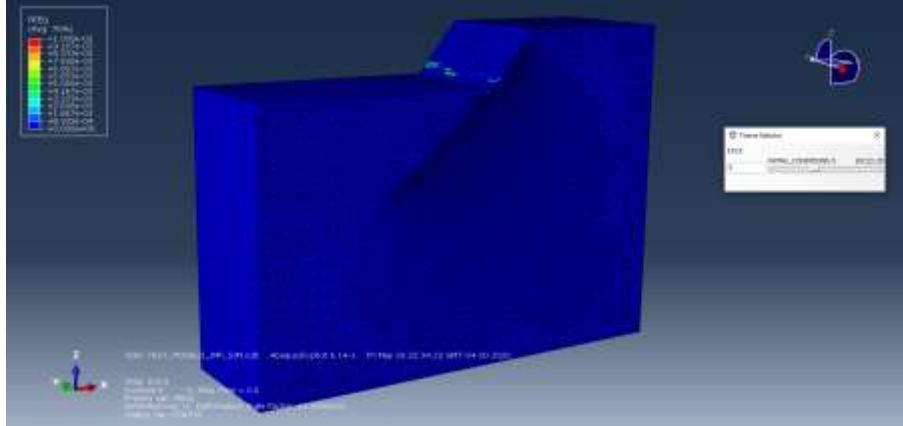
- Li, Hang-zhou. (2015). An elasto-plastic constitutive model for soft rock considering mobilization of strength. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* , 822-834.
- Oliveira, A.F David. (2012). Application of a transversely isotropic brittle rock mass model in roof support design. *International Journal of Mining Science and Technology* , 639-643.
- Renani, H Rafiei; Marin, C.D. (2015). Numerical analysis of hard rock pillars using the cohesion weakening friction strengthening model. *ISRM International Congress of Rock Mechanics*. Montreal.
- Renani, H.Rafiei; Martin, C.D. (2018). Cohesion degradation and friction mobilization in brittle failure of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.
- Rose, N.D.; Scholz, M.; Burden, J.; King, M.; Maggs, C.; Havaej, M. (2018). Quantifying Transitional Rock Mass Disturbance in Open Pit Slopes Related to Mining Excavation. *Slope Stability 2018*. Sevilla.
- Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 3-41.
- Silva, R. & Gomez, P. (2015). Towards a Mechanically Based Definition Of the Disturbance Factor Using The “Slope Model” Lattice Code. *ISRM Regional Symposium*. Buenos Aires: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Zhang, J.C.; Xu, W.Y.; Wang, H.L.; Wang, R.B.; Meng, Q.X.; Du, S.W. (2016). A coupled elastoplastic damage model for brittle rocks and its application in modelling underground excavation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* , 130-141.

8 CAPITULO 8: ANEXOS

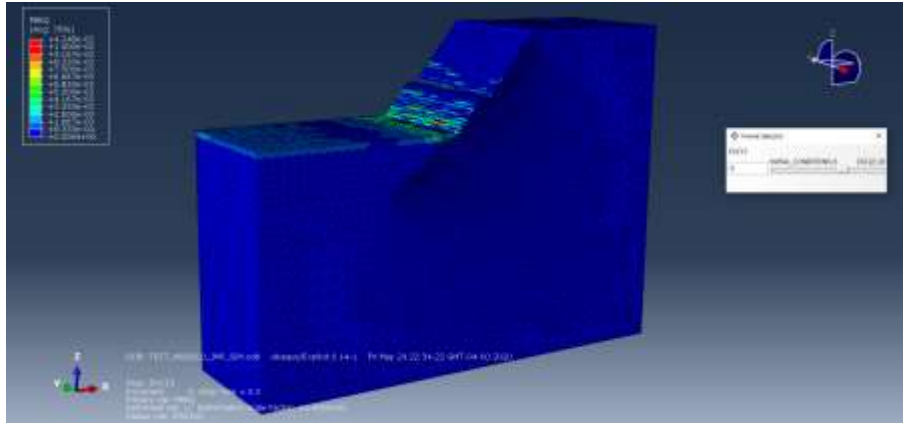
8.1 ANEXO A: Etapas de excavación para macizo rocoso de buena, regular y mala calidad.

A.1. Macizo rocoso de buena calidad

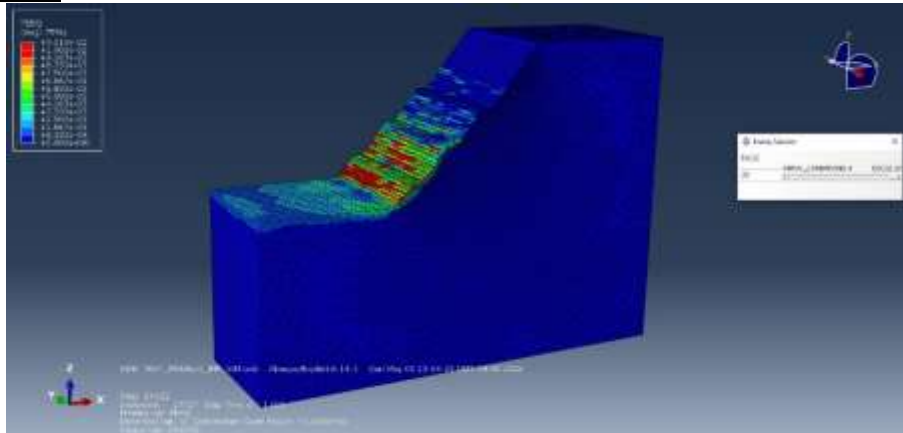
Step 9:



Step 15:

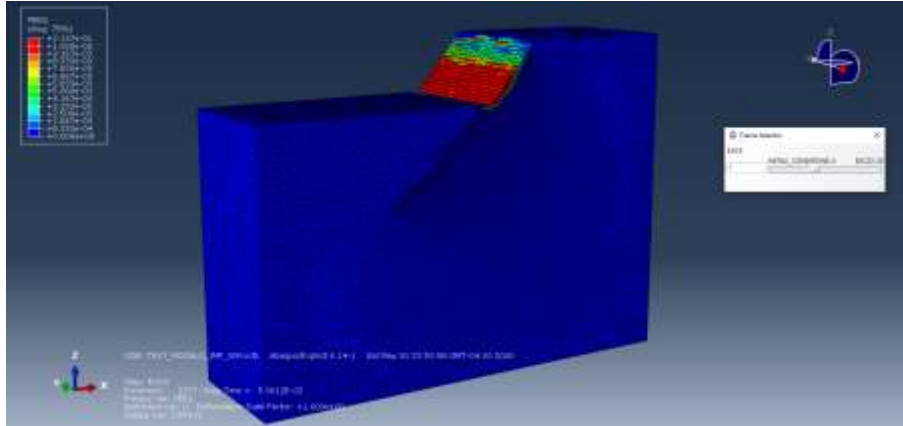


Step 23:

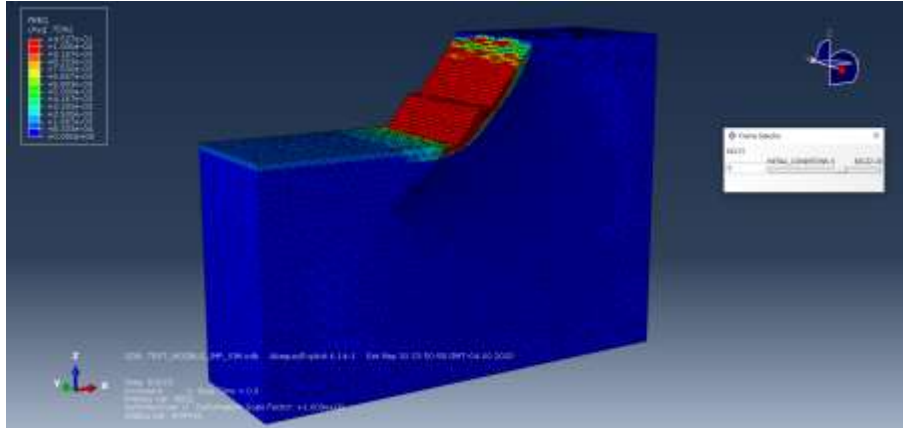


A.2. Macizo rocoso de regular calidad

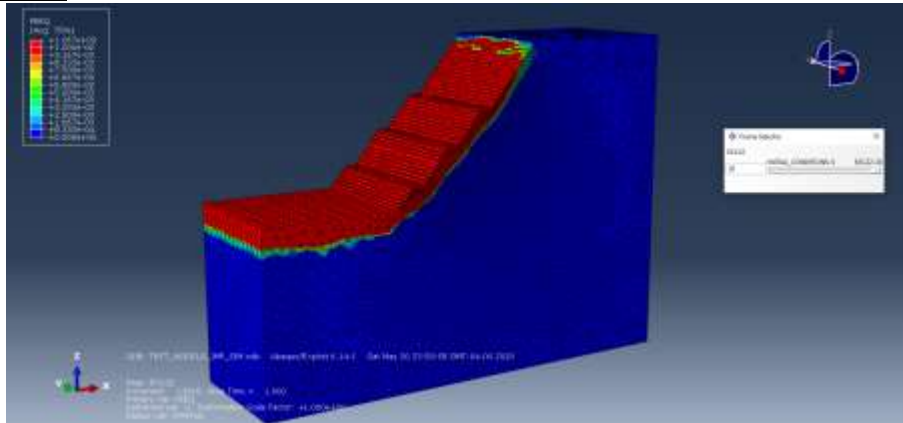
Step 9:



Step 15:

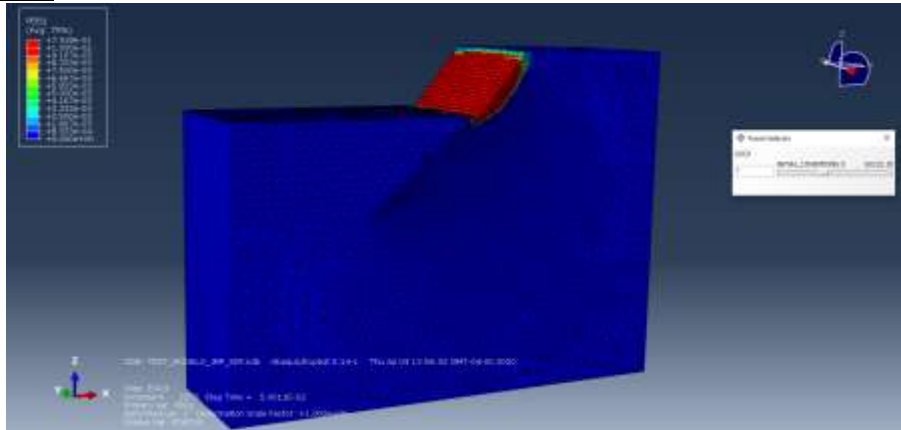


Step 23:

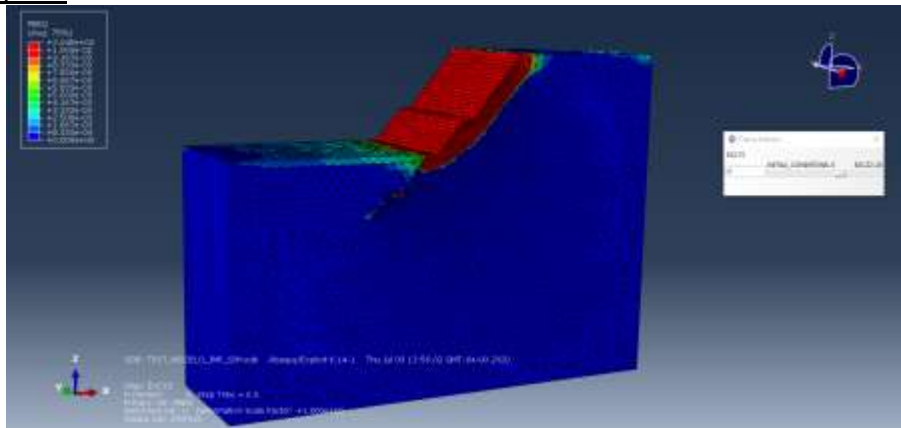


A.3. Macizo rocoso de mala calidad

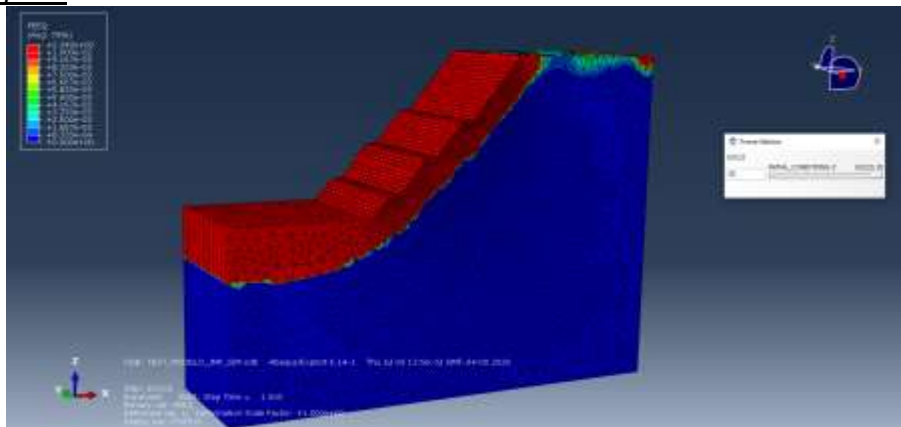
Step 9:



Step 15:



Step 23:



8.2 ANEXO B: Tablas de propiedades del macizo rocoso bueno, regular y malo en la zona perturbada.

B.1. Buena calidad

Macizo rocoso de buena calidad D=0

Erm (Gpa)	Profundidad(m)	σ_3 (Mpa)	c(Mpa)	ϕ (°)
44.22	0	0.00	1.62	68.63
44.22	45	1.10	1.86	61.83
44.22	90	2.07	2.17	58.68
44.22	135	3.00	2.46	56.51
44.22	180	3.90	2.73	54.84
44.22	225	4.77	2.99	53.47
44.22	270	5.64	3.23	52.31
44.22	315	6.48	3.47	51.30
44.22	360	7.32	3.69	50.41
44.22	405	8.15	3.91	49.61
44.22	450	8.97	4.12	48.88

Macizo rocoso de buena calidad D=0.7

Erm (Gpa)	Profundidad(m)	σ_3 (Mpa)	c(Mpa)	ϕ (°)
18.58	0	0.00	0.93	67.77
18.58	45	1.07	1.19	58.37
18.58	90	2.01	1.47	54.60
18.58	135	2.90	1.72	52.10
18.58	180	3.77	1.95	50.21
18.58	225	4.62	2.17	48.69
18.58	270	5.46	2.38	47.41
18.58	315	6.28	2.57	46.31
18.58	360	7.09	2.76	45.34
18.58	405	7.89	2.94	44.48
18.58	450	8.69	3.11	43.70

Macizo rocoso de buena calidad con D variable resultante

Erm (Gpa)	D	Profundidad(m)	σ_3 (Mpa)	c(Mpa)	ϕ (°)
18.58	0.70	0	0.00	0.93	67.77
22.74	0.56	10	0.27	1.09	64.81
27.42	0.42	20	0.52	1.28	63.44
32.59	0.28	30	0.76	1.48	62.55
38.22	0.14	40	0.99	1.69	61.91
44.22	0.00	50	1.21	1.90	61.40

B.2. Regular Calidad

Macizo rocoso de regular calidad D=0

Erm (Gpa)	Profundidad(m)	σ_3 (Mpa)	c(Mpa)	ϕ (°)
10.74	0	0.00	0.25	70.25
10.74	45	0.99	0.55	53.31
10.74	90	1.87	0.79	48.86
10.74	135	2.70	0.99	45.97
10.74	180	3.51	1.17	43.85
10.74	225	4.30	1.34	42.18
10.74	270	5.07	1.49	40.81
10.74	315	5.84	1.63	39.64
10.74	360	6.59	1.77	38.62
10.74	405	7.34	1.90	37.72
10.74	450	8.07	2.02	36.92

Macizo rocoso de regular calidad D=0.7

Erm (Gpa)	Profundidad(m)	σ_3 (Mpa)	c(Mpa)	ϕ (°)
3.76	0	0.00	0.10	68.86
3.76	45	0.95	0.35	45.56
3.76	90	1.78	0.52	40.41
3.76	135	2.57	0.66	37.33
3.76	180	3.34	0.79	35.14
3.76	225	4.09	0.90	33.45
3.76	270	4.83	1.00	32.08
3.76	315	5.56	1.10	30.93
3.76	360	6.27	1.19	29.94
3.76	405	6.98	1.28	29.08
3.76	450	7.69	1.36	28.32

Macizo rocoso de regular calidad con D variable resultante

Erm (Gpa)	D	Profundidad(m)	σ_3 (Mpa)	c(Mpa)	ϕ (°)
3.76	0.70	0	0	0.102	68.86
4.22	0.62	10	0.242	0.185	56.68
4.75	0.54	20	0.459	0.266	53.59
5.35	0.47	30	0.667	0.340	51.86
6.02	0.39	40	0.872	0.416	50.88
6.77	0.31	50	1.075	0.492	50.22
7.61	0.23	60	1.275	0.567	49.67
8.55	0.16	70	1.473	0.639	49.33
9.59	0.08	80	1.670	0.715	49.07
10.74	0.00	90	1.866	0.791	48.86

B.3. Mala calidad

Macizo rocoso de mala calidad D=0

Erm (Gpa)	Profundidad(m)	σ_3 (Mpa)	c(Mpa)	ϕ (°)
3.4	0	0.00	0.07	70.11
3.4	45	0.91	0.31	44.72
3.4	90	1.71	0.46	39.60
3.4	135	2.47	0.59	36.55
3.4	180	3.21	0.70	34.40
3.4	225	3.94	0.81	32.74
3.4	270	4.65	0.90	31.39
3.4	315	5.35	0.99	30.26
3.4	360	6.04	1.07	29.29
3.4	405	6.72	1.15	28.45
3.4	450	7.39	1.23	27.70

Macizo rocoso de mala calidad D=0.7

Erm (Gpa)	Profundidad(m)	σ_3 (Mpa)	c(Mpa)	ϕ (°)
2.15	0	0.00	0.04	69.81
2.15	45	0.92	0.26	40.66
2.15	90	1.73	0.40	35.46
2.15	135	2.50	0.51	32.44
2.15	180	3.24	0.60	30.32
2.15	225	3.97	0.69	28.71
2.15	270	4.69	0.77	27.42
2.15	315	5.40	0.84	26.34
2.15	360	6.09	0.91	25.42
2.15	405	6.78	0.98	24.62
2.15	450	7.46	1.04	23.92

Macizo rocoso de mala calidad con D variable resultante

Erm (Gpa)	D	Profundidad(m)	σ_3 (Mpa)	c(Mpa)	ϕ (°)
1.34	0.70	0	0.00	0.02	68.28
1.43	0.65	10	0.22	0.08	46.46
1.53	0.59	20	0.42	0.13	42.66
1.63	0.54	30	0.60	0.17	40.60
1.75	0.48	40	0.79	0.21	39.51
1.87	0.43	50	0.97	0.25	38.66
2.01	0.38	60	1.15	0.29	38.06
2.16	0.32	70	1.33	0.34	37.77
2.33	0.27	80	1.51	0.38	37.44
2.51	0.22	90	1.69	0.41	37.19
2.71	0.16	100	1.86	0.46	37.11
2.92	0.11	110	2.04	0.50	36.96
3.15	0.05	120	2.21	0.54	36.94
3.40	0.00	130	2.39	0.58	36.84

8.3 ANEXO C: Deformaciones plásticas obtenidas para macizo rocoso bueno, regular y malo en la zona perturbada.

C.1. Deformaciones plásticas para macizo rocoso de buena calidad.

PROFUNDIDAD (m)	SUPERFICIE	PERFORACION 1	PERFORACION 2	PERFORACION 3	FONDO PIT
0.00		0.0018808	0.0059182	0.0076998	0.0069204
8.66		0.0000170	0.0011277	0.0050074	0.0041934
17.32		0.0000308	0.0011093	0.0042822	0.0026236
25.98		0.0000419	0.0010909	0.0031918	0.0014713
34.64		0.0000421	0.0006622	0.0018112	0.0008719
43.31		0.0000152	0.0002503	0.0007476	0.0003782
51.96		0.0000014	0.0000348	0.0003178	
60.62		0.0000001	0.0000157	0.0000530	
69.28			0.0000010	0.0000103	
77.94			0.0000001	0.0000015	
86.60			0.0000001		
95.26					
103.92					

C.2. Deformaciones plásticas para macizo rocoso de regular calidad.

PROFUNDIDAD (m)	SUPERFICIE	PERFORACION 1	PERFORACION 2	PERFORACION 3	FONDO PIT
0.00	0.0001347	0.0297283	0.0837181	0.1340953	0.1611754
8.66	0.0002704	0.0282318	0.0816785	0.1350094	0.1396634
17.32	0.0004840	0.0270679	0.0798858	0.1343440	0.1114551
25.98	0.0006704	0.0242616	0.0776799	0.1184945	0.0823232
34.64	0.0007660	0.0175090	0.0556931	0.0972474	0.0537708
43.31	0.0008144	0.0092627	0.0355864	0.0725387	0.0288354
51.96	0.0006832	0.0053728	0.0224836	0.0464766	0.0115328
60.62	0.0006476	0.0015232	0.0133600	0.0213972	0.0059582
69.28	0.0005890	0.0009664	0.0044702	0.0130068	0.0004944
77.94	0.0005331	0.0003939	0.0027055	0.0027693	0.0001110
86.60	0.0004121	0.0000176	0.0008291		0.0000564
95.26	0.0003084	0.0000085			
103.92	0.0002320	0.0000050			
112.58	0.0001667	0.0000007			
121.24	0.0000958				
129.91	0.0000472				
138.57	0.0000313				
147.23	0.0000153				
155.89	0.0000058				
164.54	0.0000028				
173.20					

C.3. Deformaciones plásticas para macizo rocoso de mala calidad.

PROFUNDIDAD (m)	SUPERFICIE	PERFORACION 1	PERFORACION 2	PERFORACION 3	FONDO PIT
0.0	0.03288354	0.19238740	0.47590077	0.92592287	1.16014338
8.7	0.03440022	0.20569026	0.51676679	0.96826172	1.06462109
17.3	0.03597401	0.22234488	0.56083566	0.97703004	1.04331613
26.0	0.03568860	0.23020387	0.57648981	0.95476127	0.93042004
34.6	0.03155212	0.22972527	0.52033788	0.92378670	0.80876338
43.3	0.02663667	0.20736971	0.48719224	0.81489599	0.68899781
52.0	0.02048334	0.17034703	0.41023004	0.67360598	0.53438902
60.6	0.01561348	0.13361357	0.29934210	0.53011543	0.36604539
69.3	0.01071091	0.09815083	0.20123282	0.39488617	0.21576366
77.9	0.00698766	0.06169819	0.13277197	0.25660408	0.13579655
86.6	0.00401219	0.03436210	0.06677185	0.15560772	0.06280464
95.3	0.00221972	0.01826370	0.02902624	0.06124390	0.01587295
103.9	0.00117102	0.00205298	0.01655140	0.03723773	0.00709257
112.6	0.00056527	0.00087480	0.00884512	0.02428684	0.00095108
121.2	0.00021691	0.00021645	0.00001505	0.00027310	
129.9	0.00004729				
138.6	0.00002651				
147.2	0.00000573				
155.9					
164.5					
173.2					
181.9					
190.5					
199.2					
207.8					

8.4 ANEXO D: Envoltentes para D=0, D=0,7 y variable en zona de perturbación para macizo rocoso de buena, regular y mala calidad geomecánica.

D.1. Buena calidad

D=0.7		D=0	
σ_3 (Mpa)	σ_1 (Mpa)	σ_3 (Mpa)	σ_1 (Mpa)
-0.285	0.000	-0.475	0.000
-0.285	0.000	-0.475	0.000
0.006	8.958	-0.182	12.410
0.297	12.975	0.111	17.944
0.589	16.127	0.404	22.262
0.880	18.833	0.698	25.951
1.171	21.252	0.991	29.237
1.462	23.467	1.284	32.237
1.753	25.529	1.577	35.021
2.044	27.468	1.870	37.632
2.336	29.308	2.163	40.104
2.627	31.064	2.456	42.457
2.918	32.749	2.749	44.711
3.209	34.372	3.042	46.877
3.500	35.941	3.336	48.967
3.791	37.461	3.629	50.990
4.083	38.939	3.922	52.952
4.374	40.378	4.215	54.860
4.665	41.782	4.508	56.718
4.956	43.153	4.801	58.530
5.247	44.495	5.094	60.302
5.538	45.810	5.387	62.035
5.830	47.100	5.680	63.732
6.121	48.366	5.974	65.397
6.412	49.611	6.267	67.031
6.703	50.835	6.560	68.636
6.994	52.039	6.853	70.215
7.285	53.226	7.146	71.768
7.577	54.396	7.439	73.297
7.868	55.550	7.732	74.803
8.159	56.688	8.025	76.288
8.450	57.812	8.318	77.753
8.741	58.923	8.612	79.198
9.033	60.020	8.905	80.625
9.324	61.105	9.198	82.035
9.615	62.178	9.491	83.428
9.906	63.240	9.784	84.804
10.197	64.290	10.077	86.166
10.488	65.331	10.370	87.513
10.780	66.361	10.663	88.846
11.071	67.381	10.956	90.165
11.362	68.393	11.250	91.471
11.653	69.395	11.543	92.765
11.944	70.389	11.836	94.046
12.235	71.375	12.129	95.316
12.527	72.352	12.422	96.575
12.818	73.322	12.715	97.823
13.109	74.285	13.008	99.060
13.400	75.240	13.301	100.287
13.691	76.188	13.594	101.504

D Variable	
σ_3 (Mpa)	σ_1 (Mpa)
0.000	9.447
0.273	14.487
0.515	18.530
0.749	22.139
0.976	25.680
1.201	29.111
1.422	32.429
1.641	35.534
1.858	38.719
2.073	41.831
2.282	43.651
4.289	58.717
6.203	70.717
8.059	81.003
9.874	90.244

D.2. Regular calidad

D=0.7		D=0	
σ_3 (Mpa)	σ_1 (Mpa)	σ_3 (Mpa)	σ_1 (Mpa)
-0.030	0.000	-0.067	0.000
-0.030	0.000	-0.067	0.000
0.121	2.461	0.085	4.094
0.272	3.599	0.236	5.938
0.423	4.512	0.387	7.394
0.573	5.306	0.538	8.648
0.724	6.025	0.689	9.773
0.875	6.690	0.840	10.806
1.026	7.315	0.992	11.769
1.177	7.907	1.143	12.677
1.327	8.473	1.294	13.539
1.478	9.017	1.445	14.364
1.629	9.541	1.596	15.156
1.780	10.050	1.748	15.920
1.931	10.544	1.899	16.660
2.082	11.025	2.050	17.377
2.232	11.495	2.201	18.075
2.383	11.955	2.352	18.755
2.534	12.405	2.504	19.420
2.685	12.847	2.655	20.069
2.836	13.281	2.806	20.706
2.986	13.707	2.957	21.329
3.137	14.127	3.108	21.942
3.288	14.541	3.260	22.543
3.439	14.949	3.411	23.135
3.590	15.351	3.562	23.717
3.740	15.748	3.713	24.291
3.891	16.141	3.864	24.856
4.042	16.529	4.015	25.414
4.193	16.913	4.167	25.964
4.344	17.292	4.318	26.508
4.495	17.668	4.469	27.044
4.645	18.040	4.620	27.575
4.796	18.409	4.771	28.099
4.947	18.774	4.923	28.618
5.098	19.136	5.074	29.131
5.249	19.495	5.225	29.640
5.399	19.851	5.376	30.143
5.550	20.205	5.527	30.641
5.701	20.556	5.679	31.135
5.852	20.904	5.830	31.624
6.003	21.249	5.981	32.109
6.154	21.593	6.132	32.590
6.304	21.934	6.283	33.068
6.455	22.273	6.435	33.541
6.606	22.609	6.586	34.011
6.757	22.944	6.737	34.477
6.908	23.276	6.888	34.939
7.058	23.607	7.039	35.399
7.209	23.936	7.190	35.855

D Variable	
σ_3 (Mpa)	σ_1 (Mpa)
0.000	1.093
0.241	3.767
0.455	5.404
0.661	6.835
0.862	8.169
1.061	9.531
1.256	10.788
1.450	12.026
1.642	13.250
1.833	14.459
2.022	15.663
2.211	16.863
2.399	18.058
2.587	19.359
2.774	20.556
2.959	21.740
3.145	22.922
3.329	24.109
3.860	26.230
5.583	32.491
7.253	37.947

D.3. Mala calidad

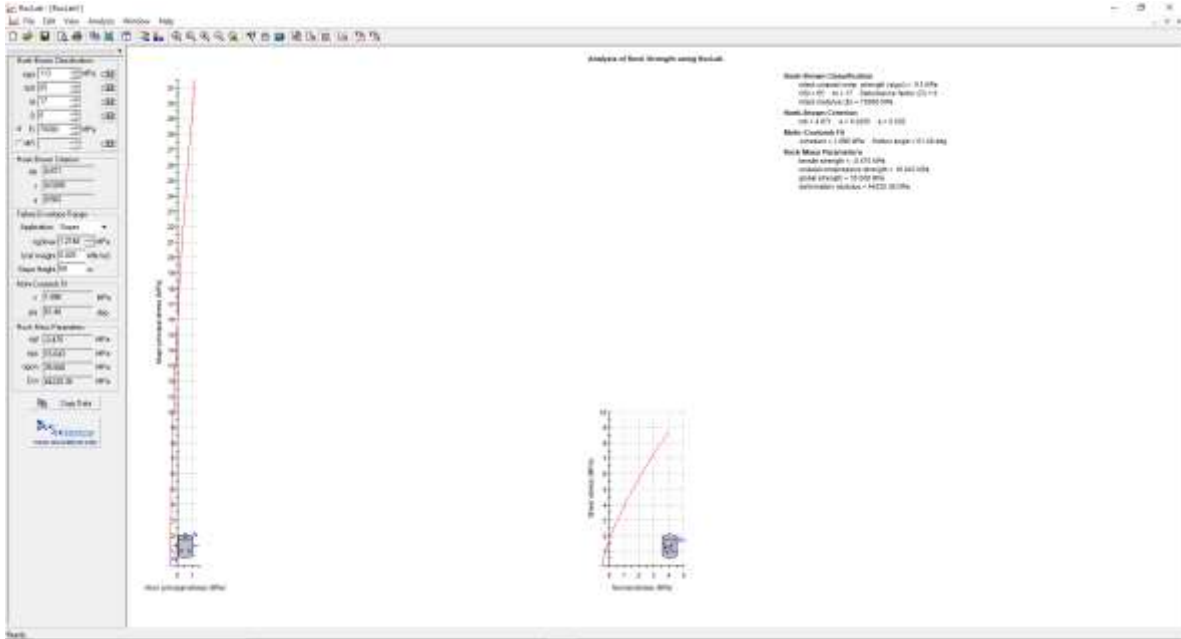
D=0.7		D=0	
$\sigma 3$ (Mpa)	$\sigma 1$ (Mpa)	$\sigma 3$ (Mpa)	$\sigma 1$ (Mpa)
-0.007	0.000	-0.019	0.000
-0.007	0.000	-0.019	0.000
0.069	0.856	0.058	1.559
0.146	1.271	0.135	2.281
0.223	1.609	0.212	2.857
0.299	1.908	0.288	3.357
0.376	2.181	0.365	3.808
0.452	2.436	0.442	4.224
0.529	2.676	0.518	4.614
0.606	2.906	0.595	4.983
0.682	3.127	0.672	5.335
0.759	3.340	0.749	5.672
0.835	3.547	0.825	5.997
0.912	3.748	0.902	6.311
0.989	3.944	0.979	6.616
1.065	4.136	1.055	6.912
1.142	4.324	1.132	7.201
1.218	4.508	1.209	7.483
1.295	4.689	1.286	7.759
1.372	4.867	1.362	8.030
1.448	5.043	1.439	8.295
1.525	5.216	1.516	8.556
1.601	5.386	1.593	8.812
1.678	5.555	1.669	9.064
1.755	5.722	1.746	9.312
1.831	5.886	1.823	9.557
1.908	6.049	1.899	9.798
1.985	6.210	1.976	10.037
2.061	6.370	2.053	10.272
2.138	6.528	2.130	10.504
2.214	6.685	2.206	10.734
2.291	6.841	2.283	10.961
2.368	6.995	2.360	11.186
2.444	7.148	2.436	11.408
2.521	7.300	2.513	11.629
2.597	7.451	2.590	11.847
2.674	7.600	2.667	12.063
2.751	7.749	2.743	12.277
2.827	7.897	2.820	12.490
2.904	8.044	2.897	12.700
2.980	8.190	2.973	12.909
3.057	8.335	3.050	13.117
3.134	8.479	3.127	13.323
3.210	8.623	3.204	13.527
3.287	8.765	3.280	13.730
3.363	8.907	3.357	13.931
3.440	9.048	3.434	14.131
3.517	9.189	3.511	14.330
3.593	9.329	3.587	14.527
3.670	9.468	3.664	14.724
3.746	9.607	3.741	14.919
3.823	9.745	3.817	15.112
3.900	9.882	3.894	15.305
3.976	10.019	3.971	15.497
4.053	10.155	4.048	15.687
4.129	10.291	4.124	15.877
4.206	10.426	4.201	16.065
4.283	10.561	4.278	16.253
4.359	10.695	4.354	16.439
4.436	10.829	4.431	16.625
4.512	10.962	4.508	16.810
4.589	11.095	4.585	16.994
4.666	11.227	4.661	17.177
4.742	11.359	4.738	17.359
4.819	11.491	4.815	17.540
4.895	11.622	4.892	17.721
4.972	11.752	4.968	17.900
5.049	11.882	5.045	18.079
5.125	12.012	5.122	18.258
5.202	12.142	5.198	18.435
5.278	12.271	5.275	18.612
5.355	12.400	5.352	18.788
5.432	12.528	5.429	18.964
5.508	12.656	5.505	19.138
5.585	12.784	5.582	19.312
5.662	12.911	5.659	19.486
5.738	13.038	5.735	19.659
5.815	13.164	5.812	19.831
5.891	13.291	5.889	20.002
5.968	13.417	5.966	20.173
6.045	13.543	6.042	20.344
6.121	13.668	6.119	20.514
6.198	13.793	6.196	20.683
6.274	13.918	6.272	20.852
6.351	14.043	6.349	21.020
6.428	14.167	6.426	21.188
6.504	14.291	6.503	21.355
6.581	14.415	6.579	21.521
6.657	14.538	6.656	21.687
6.734	14.661	6.733	21.853
6.811	14.784	6.810	22.018
6.887	14.907	6.886	22.183
6.964	15.029	6.963	22.347
7.040	15.152	7.040	22.511
7.117	15.274	7.116	22.674
7.194	15.395	7.193	22.837
7.270	15.517	7.270	22.999
7.347	15.638	7.347	23.161
7.423	15.759	7.423	23.323
7.500	15.880	7.500	23.484

D Variable	
$\sigma 3$ (Mpa)	$\sigma 1$ (Mpa)
0.000	0.250
0.219	1.768
0.414	2.694
0.602	3.495
0.785	4.252
0.967	5.037
1.146	5.771
1.324	6.545
1.500	7.275
1.675	8.001
1.851	8.784
2.024	9.514
2.197	10.244
2.370	11.035
2.542	11.771
2.715	12.575
2.885	13.310
3.535	15.102
8.138	25.899

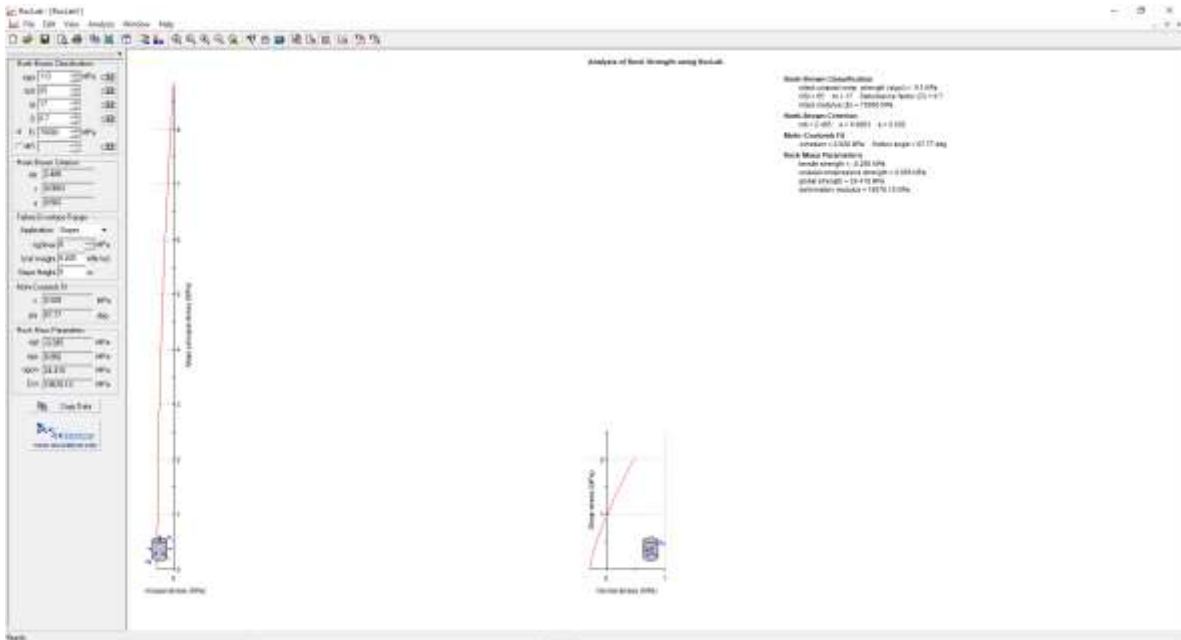
8.5 ANEXO E: Valores de propiedades obtenidos con software Roclab.

E.1. Buena calidad

Macizo rocoso de buena calidad D=0

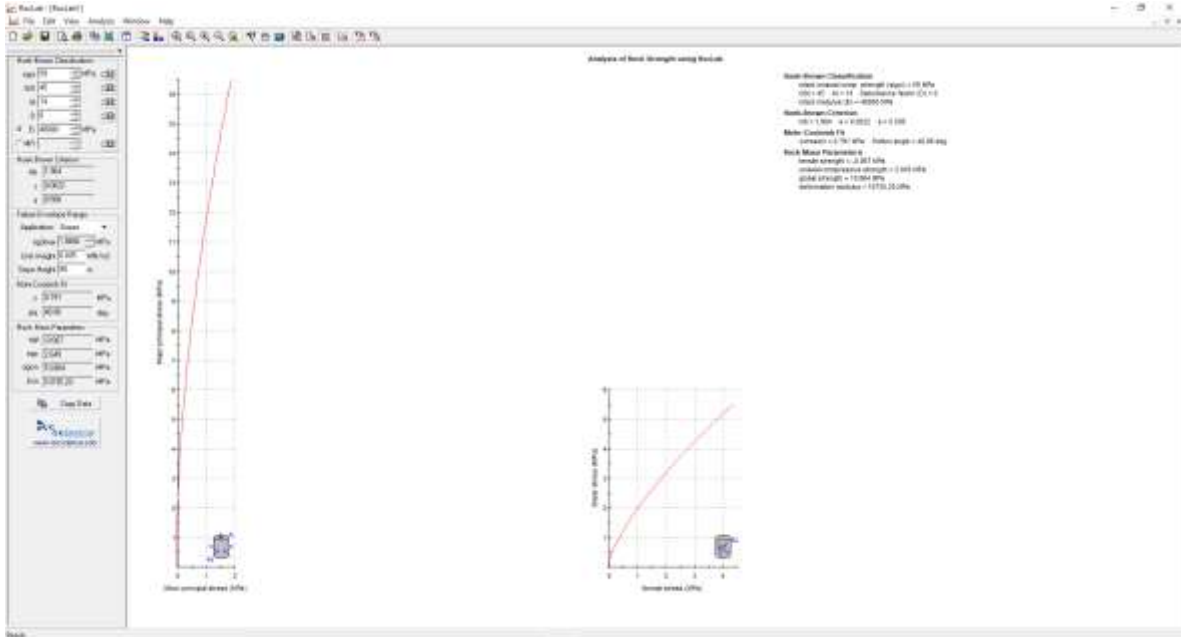


Macizo rocoso de buena calidad D=0.7

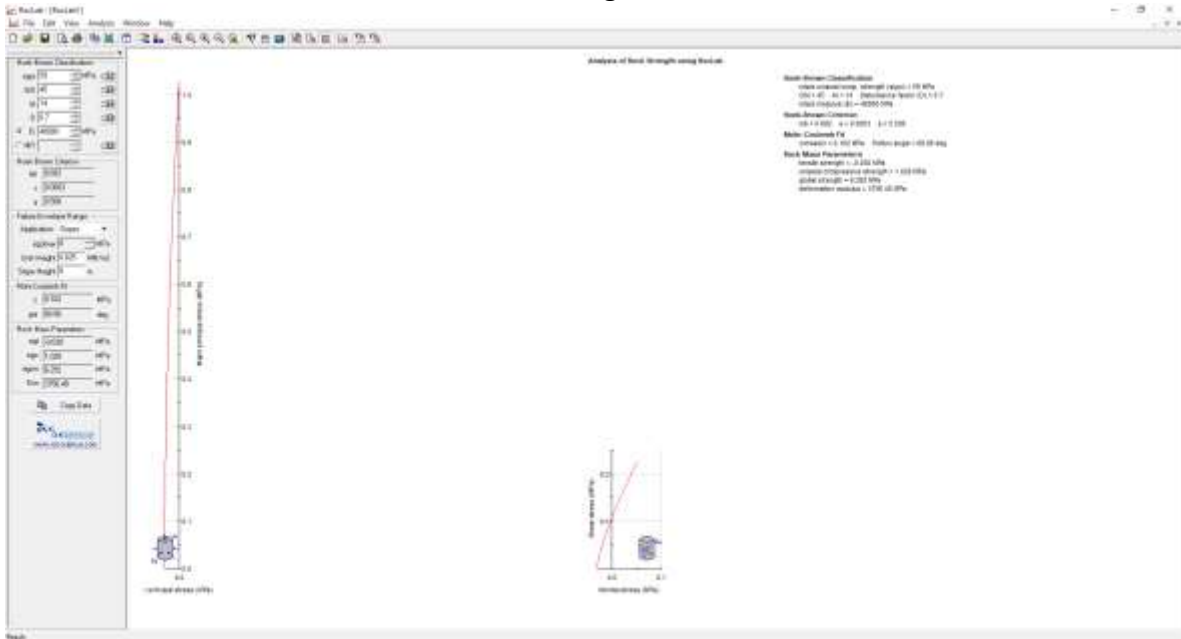


E.2. Regular calidad.

Macizo rocoso de buena calidad D=0

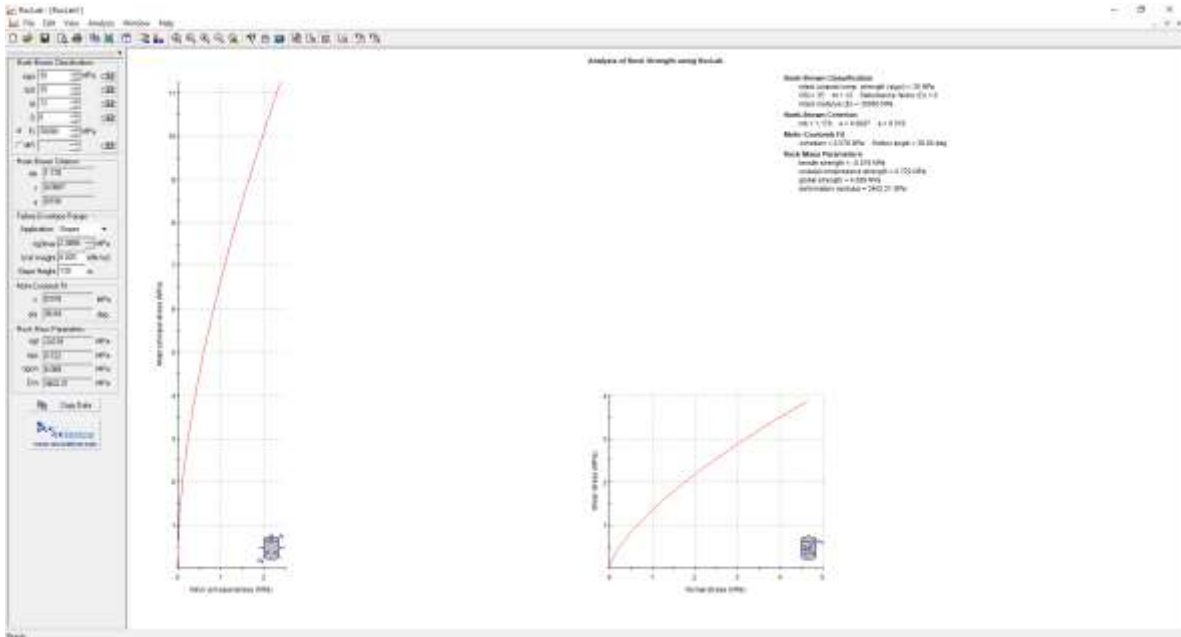


Macizo rocoso de regular calidad D=0.7



E.3. Mala Calidad.

Macizo rocoso de mala calidad D=0



Macizo rocoso de mala calidad D=0.7

