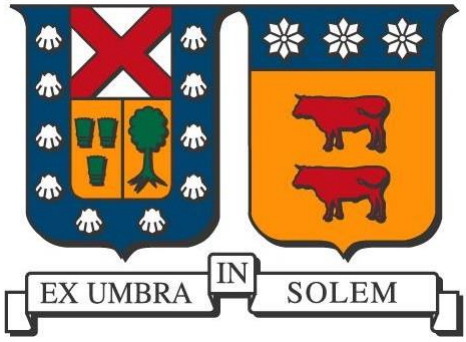
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



PROPUESTA DE UN UCS DINÁMICO BASADO EN LA MODELACIÓN DE ENSAYOS SPLIT-HOPKINSON PRESSURE BAR (SHPB)

JAVIER IGNACIO SALAZAR NÚÑEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

PROFESOR GUÍA: DRA. ADELINE DELONCA

PROFESOR CO-GUÍA: DR. LUIS FELIPE ORELLANA

Junio, 2024

How I wish you were here,
We're just two lost souls swimming in a fish bowl
Year after year
Running over the same old ground, what have we found?
The same old fears, wish you were here.

- Pink Floyd -

A mi abuelo Jorge Osvaldo.

AGRADECIMIENTOS

Cuando ingresé a la universidad, aún no me sentía del todo preparado para lo que significa el proceso, no tenía un hábito de estudio debido a que en la etapa escolar nunca aprendí a tenerlo, no asimilaba realmente todo el peso y toda la responsabilidad que ameritaba el estar en una de las universidades más prestigiosas del país y todo el esfuerzo que se necesitaba para poder sacar adelante cada certamen, cada ramo y cada año.

Ahora que me presento en esta etapa final y, aunque el llegar hasta aquí fue por mérito y esfuerzo propio, donde existieron días en los que no dormí por obtener una buena calificación, desveladas en el CIAC junto con mi grupo de estudio, un proceso académico donde hubo momentos increíblemente buenos y otros en los que tuve el ánimo y las ganas por el suelo, creo totalmente que fue, es y será necesario siempre el apoyo de las personas que en esas instancias te acompañan. Por eso, me gustaría, en primer lugar, agradecer a todos los que estuvieron y los que aún están, considero que fueron parte de algo tan importante para mi vida como lo es esta etapa universitaria y realmente valoro de corazón el que hayan estado presentes.

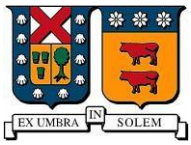
Quiero agradecer profundamente a mi grupo de amigos de la universidad, los VIP OKPA, sin duda no podría haber llegado hasta aquí sin ellos, hicieron del proceso universitario algo mucho más agradable y ameno, gracias por siempre estar ahí cuando lo necesitaba, y quiero que sepan que cada uno de ustedes siempre tendrá un pedacito de mi corazón, no tienen idea de lo importantes que fueron y son para mi, los quiero mucho.

Además, me gustaría agradecer a mi profesora guía, la Dra. Adeline Delonca, quien siempre estuvo para apoyarme en esta instancia final. Muchas gracias por su buena onda y por aceptarme para ser parte de esta investigación. También me gustaría agradecer de todo corazón a Lucy Bravo y a Cristian Segura, quienes siempre tuvieron una completa disposición para ayudarme en el entendimiento y uso del software. Fueron personas imprescindibles para cumplir con los objetivos que se me planteaban.

Quiero darle las gracias infinitas a mi Catita. Desde que te conocí has sido un pilar fundamental en todo ámbito, gracias por tu paciencia, por tu amor incondicional, por entenderme y motivarme siempre a darlo todo hasta el final y, sobretodo, por estar para mi cada vez que lo necesito. La vida contigo es mucho más linda, tu y el Samito me hacen inmensamente feliz, los amo demasiado.

También, quiero agradecer a mi familia, a mi padre Jaime, quien nunca dudó de mis capacidades y puso toda su confianza en mi para lograr todo lo que alguna vez me propuse, a mi madre Janitza, quien siempre me instó a ser alguien perseverante y se preocuparon de que nunca me faltara nada, y a mi hermano Nicolás, quien siempre estuvo para cuando lo necesitaba y fue un apoyo moral durante toda la carrera. Creo que una persona se hace y se educa en casa con su familia, y sin duda me siento un afortunado por haber sido criado en esta. Estoy feliz de tenerlos a ustedes como padres y hermano, quiero decirles que no sería nadie sin ustedes, son mi razón de ser y nuevamente gracias por motivarme a nunca bajar los brazos cuando las cosas se ponían difíciles. Los amo con mi vida, este logro también es suyo.

Finalmente, agradezco a ITASCA por su convenio con la universidad y permitir el uso de su software para el desarrollo del presente trabajo de título.



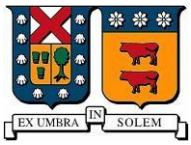
RESUMEN

Las cargas dinámicas refieren a las cargas que se aplican en un lapso corto de tiempo. Dentro de ellas están las explosiones o los terremotos. Un ejemplo es la carga por impacto, la cual considerada como la carga dinámica más común, y corresponde a la carga que se produce cuando un objeto golpea a otro en un período pequeño de tiempo, transmitiendo energía en el proceso. En términos generales, la dinámica de rocas se ocupa de cómo estas responden ante cargas dinámicas, deformaciones y fallas con respecto al tiempo, donde un aumento en las tasas de carga pueden provocar un cambio abrupto en el comportamiento mecánico de las rocas y de los macizos rocosos. En los últimos años, el estudio de las propiedades mecánicas dinámicas de las rocas ha cobrado mayor importancia, ya que en muchos problemas de ingeniería civil y minería, como los estallidos de rocas y los eventos sísmicos, las rocas están sujetas a cargas dinámicas.

La presente memoria de título se desarrolla con el objetivo de definir una expresión que permita entender y estimar de mejor manera el comportamiento de las propiedades de las rocas bajo cargas dinámicas, utilizando un modelo numérico del ensayo dinámico Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) y regresiones múltiples, para luego analizar la posibilidad de replicar los resultados a una escala de macizo rocoso. Las simulaciones se llevan a cabo mediante el software FLAC3D de Itasca. Se estudiará la influencia de distintas litologías, tales como CMET, caliza, dolomita, andesita y granodiorita, en el comportamiento mecánico bajo diferentes velocidades de impacto. Los principales resultados analizados corresponden a parámetros dinámicos y propiedades de las rocas y permiten la identificación del peso de cada uno en la expresión. Los resultados obtenidos reflejan principalmente una ecuación para un parámetro de resistencia dinámico que depende en mayor grado de la velocidad de impacto y también de propiedades como la cohesión, el ángulo de fricción, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y la densidad de la litología.

Además, se analizó la influencia del UCS dinámico y la energía cinética propagada en un macizo rocoso con una discontinuidad mediante la creación de un modelo numérico, el cual fue sometido a perturbaciones dinámicas para simular eventos sísmicos, obteniendo que la energía cinética se concentra alrededor de la discontinuidad, propagándose con mayor alcance a medida que aumenta la velocidad de impacto, similar al comportamiento del UCS dinámico, el cual muestra un incremento significativo cerca de la discontinuidad, extendiéndose hasta 25 metros desde esta.

Con esto es posible evidenciar la influencia significativa de diversos factores en el comportamiento de la resistencia dinámica en las litologías estudiadas, lo que constituye una herramienta de utilidad para la ingeniería geotécnica y proyectos que involucren materiales rocosos sujetos a cargas dinámicas. Junto con lo anterior, esta investigación mejora la comprensión del comportamiento de los macizos rocosos bajo cargas dinámicas y ayuda a predecir su respuesta ante eventos sísmicos, permitiendo así la identificación de áreas con un riesgo mayor de estallidos de rocas y lograr la mitigación de dichos riesgos.



ABSTRACT

Dynamic loads refer to loads that are applied in a short period of time. These include explosions, impacts and earthquakes. An example is impact loading, which is perhaps the most common dynamic loading, and corresponds to the loading that occurs when one object strikes another in a small period of time, transmitting energy in the process. Generally, rock dynamics is concerned with how rocks respond to dynamic loading, deformation and failure according to time, where an increase in loading rates can cause an abrupt change in the mechanical behavior of rocks and rock masses. In recent years, the study of the dynamic mechanical properties of rocks has become more important, since in many civil engineering an mining problems, such as rock bursts and seismic events, rocks are subjected to dynamic loads.

This thesis aims to define an expression to better understand and predict the behavior of rock properties under dynamic loads, using a numerical model of the Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) test and multiple regressions, to then analyze the possibility of replicating the results on a rock mass scale. Simulations are carried out using the FLAC3D software from Itasca. The influence of different lithologies, such as CMET, limestone, dolomite, andesite and granodiorite, on the mechanical behavior under different impact velocities will be studied. The main results analyzed correspond to dynamic parameters and rock properties and allow the identification of the weight of each one in the expression. The results obtained mainly reflect an equation for a dynamic strength parameter that depends mostly on the impact velocity and also on properties such as cohesion, friction angle, Young's modulus, Poisson's ratio and lithology density.

Additionally, the influence of dynamic UCS and kinetic energy propagation in a rock mass with a discontinuity was analyzed through the creation of a numerical model. This model was subjected to dynamic perturbations to simulate seismic events, revealing that kinetic energy concentrates around the discontinuity and propagates further as the impact velocity increases. Similarly, the dynamic UCS shows a significant increase near the discontinuity, extending up to 25 meters from it.

This demonstrates the significant influence of various factors on the dynamic strength behavior of the studied lithologies, providing a useful tool for geotechnical engineering and projects involving rock materials subjected to dynamic loads. Additionally, this research enhances the understanding of rock mass behavior under dynamic loads and helps to predict their response to seismic events, thus allowing the identification of areas with a higher risk of rockbursts and achieving the mitigation of such risks.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN *11*

1.1. ANTECEDENTES GENERALES Y MOTIVACIÓN **11**

1.2 OBJETIVOS **12**

2. MARCO TEÓRICO *13*

2.1 ENSAYOS DINÁMICOS EN ROCAS **13**

2.1.1 ENSAYO DE SPLIT-HOPKINSON 13

2.1.2 BRAZILIAN TEST 16

2.1.3 IMPORTANCIA DE LOS ENSAYOS DINÁMICOS 17

2.2 ESTALLIDOS DE ROCAS **19**

2.2.1 CONDICIONES QUE FAVORECEN LA OCURRENCIA DE UN ESTALLIDO DE ROCAS 22

2.2.2 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE ESTALLIDOS DE ROCAS 22

2.2.2.1 MÉTODOS EMPÍRICOS 23

2.2.2.2 MÉTODOS NUMÉRICOS 24

2.2.2.3 MÉTODOS MATEMÁTICOS 26

2.3 MODELAMIENTO DINÁMICO **27**

2.3.1 FLAC3D 27

2.3.2 RHINOCEROS Y GRIDDLE 30

3 METODOLOGÍA *32*

3.1 DEFINICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CONDICIONES DE MODELAMIENTO **33**

3.2 ENSAYOS UNIAXIALES **34**

3.3 ENSAYOS SPLIT-HOPKINSON PRESSURE BAR **37**

3.4 ECUACIÓN GENERAL **40**

4 DESARROLLO *41*

4.1 VALIDACIÓN DE ENSAYOS UNIAXIALES **41**

4.2 VALIDACIÓN DE ENSAYOS SPLIT-HOPKINSON PRESSURE BAR **42**

5 RESULTADOS *45*

5.1 ENSAYOS ESFUERZO-DEFORMACIÓN **45**

5.2 EFECTO DE PARÁMETROS EN EL ESFUERZO DINÁMICO **48**

5.3 ECUACIÓN GENERAL **51**

6 ANÁLISIS Y DISCUSIONES *62*

6.1 ENSAYOS ESFUERZO-DEFORMACIÓN **62**

6.2 EFECTOS DE PARÁMETROS EN EL ESFUERZO DINÁMICO **62**

6.3 ECUACIÓN GENERAL **63**

7 APLICACIÓN EN UN MACIZO ROCOSO *64*

7.1 MODELO DEL MACIZO ROCOSO **64**

7.2 METODOLOGÍA DEL MODELO 66
7.3 RESULTADOS DEL MODELO 68
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 71
9 REFERENCIAS 73
10 ANEXOS 75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del funcionamiento del ensayo Split-Hopkinson (Modificado de Yuan et al., 2011).. 14
Figura 2: Esquema del Brazilian test en un sistema SHPB (Modificado de Zhou et al., 2012). 16
Figura 3: Varios tipos de cargas dinámicas y sus ondas (Modificado de Zhao, 2011)..... 18
Figura 4: Clasificación de estallidos de rocas (Zhou, 2018). 19
Figura 5: Estallido por deformación en el macizo rocoso (Modificado de Ortlepp & Stacey, 1994)..... 20
Figura 6: Estallido por deslizamiento de falla provocado por un evento sísmico remoto y un desplazamiento cortante de discontinuidades (Modificado de Ortlepp & Stacey, 1994). 21
Figura 7: Taxonomía de los diferentes enfoques de la evaluación del potencial de estallido de rocas (Zhou, 2018). 23
Figura 8: Clasificación de métodos empíricos. 24
Figura 9: Representación de un macizo rocoso fracturado en (a), por método de diferencias finitas o método de elementos finitos en (b), por método de elementos de frontera en (c), por método de elementos discretos en (d) (Modificado de Jing, 2003). 26
Figura 10: Visión general de los métodos de algoritmos matemáticos (Zhou et al., 2018). 27
Figura 11: Definiciones básicas de FLAC3D (Itasca Consulting Group, 2009). 28
Figura 12: Superficie creada en Rhino que representa una central eléctrica subterránea (Itasca Consulting Group, 2009). 30
Figura 13: Malla de volumen FLAC3D final construida con Rhino y Griddle para una central eléctrica subterránea (Itasca Consulting Group, 2009). 31
Figura 14: Esquema de metodología a implementar. 33
Figura 15: Ensayo de compresión uniaxial (Extraída de Prodyogi). 34
Figura 16: Curvas esfuerzo-deformación obtenidas de un ensayo de compresión simple (González de Vallejo, 2002). 35
Figura 17: Probeta utilizada en FLAC3D para ensayos uniaxiales. 36
Figura 18: Esquema de los componentes del SHPB (Gonzalez de Vallejo, 2002) 37
Figura 19: Modelo numérico tipo Hopkinson en FLAC3D. 38
Figura 20: Validación de ensayo Split-Hopkinson mediante balance de esfuerzos dinámicos para las ondas incidente, transmitida y reflejada (Robbiano et al., 2022). 39
Figura 21: Curvas esfuerzo-deformación para muestras de CMET (Robbiano et al., 2022). 40
Figura 22: Curvas esfuerzo-deformación para una muestra de CMET a distintas velocidades de impacto. 43
Figura 23: Balance de esfuerzos obtenido para el ensayo dinámico. 44
Figura 24: Ensayo dinámico tipo Hopkinson para las litologías consideradas en el estudio a una velocidad de impacto de 10 m/s..... 46
Figura 25: Ensayo dinámico tipo Hopkinson para las litologías consideradas en el estudio a una velocidad de impacto de 14 m/s..... 47
Figura 26: Ensayo dinámico tipo Hopkinson para las litologías consideradas en este estudio a una velocidad de impacto de 18 m/s. 48
Figura 27: Esfuerzo dinámico obtenido con respecto a la velocidad de impacto para cada litología. 49
Figura 28: Esfuerzo dinámico obtenido con respecto a la cohesión para cada litología. 50
Figura 29: Esfuerzo dinámico obtenido con respecto al ángulo de fricción para cada litología. 51

Figura 30: Esfuerzo dinámico obtenido mediante ensayo dinámico en FLAC3D y la ecuación general para el CMET. 52
Figura 31: Esfuerzo dinámico obtenido para una muestra de caliza mediante un ensayo dinámico en FLAC3D y la ecuación general. 54
Figura 32: Esfuerzo dinámico obtenido para una muestra de dolomita mediante un ensayo dinámico en FLAC3D y la ecuación general. 56
Figura 33: Esfuerzo dinámico obtenido para una muestra de andesita mediante un ensayo dinámico en FLAC3D y la ecuación general. 58
Figura 34: Esfuerzo dinámico obtenido para una muestra de granodiorita mediante un ensayo dinámico en FLAC3D y la ecuación general. 60
Figura 35: Superficies creadas en Rhino que definen el macizo rocoso y el plano de discontinuidad utilizadas en el estudio. 64
Figura 36: Malla de volumen FLAC3D final construida con Rhino y Griddle. 65
Figura 37: Condiciones de borde aplicadas al modelo del macizo rocoso. 66
Figura 38: Distribución de la energía cinética en el macizo rocoso modelado a diferentes velocidades de impacto, a) 3 [m/s], b) 10 [m/s], c) 18 [m/s], d) 24 [m/s]. 68
Figura 39: UCS dinámico en el macizo rocoso modelado a diferentes velocidades de impacto, a) 3 [m/s], b) 10 [m/s], c) 18 [m/s], d) 24 [m/s]. 69
Figura 40: Gráfico esfuerzo-deformación de la litología CMET, obtenido a través de FLAC3D. 75
Figura 41: Gráfico esfuerzo-deformación de la litología caliza, obtenido a través de FLAC3D. 76
Figura 42: Gráfico esfuerzo-deformación de la litología dolomita, obtenido a través de FLAC3D. 76
Figura 43: Gráfico esfuerzo-deformación de la litología andesita, obtenido a través de FLAC3D. 77
Figura 44: Gráfico esfuerzo-deformación de la litología granodiorita, obtenido a través de FLAC3D. 77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades mecánicas de las litologías en estudio. 34
Tabla 2: Propiedades de las barras golpeadora, incidente y transmitida. 38
Tabla 3: Parámetros resistentes de roca intacta (González de Vallejo, 2002). 41
Tabla 4: Valores típicos de resistencia a la compresión uniaxial de varias rocas (Attewell & Farmer, 1976). 41
Tabla 5: Resultados de ensayos de compresión uniaxial. 42
Tabla 6: Errores relativos para esfuerzos dinámicos obtenidos mediante FLAC3D y la ecuación general para el CMET. 53
Tabla 7: Errores relativos para esfuerzos dinámicos obtenidos mediante FLAC3D y la ecuación general para la caliza. 55
Tabla 8: Errores relativos para esfuerzos dinámicos obtenidos mediante FLAC3D y la ecuación general para la dolomita. 57
Tabla 9: Errores relativos para esfuerzos dinámicos obtenidos mediante FLAC3D y la ecuación general para la andesita. 59
Tabla 10: Errores relativos para esfuerzos dinámicos obtenidos mediante FLAC3D y la ecuación general para la granodiorita. 61
Tabla 11: Propidedades de la discontinuidad. 65

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES GENERALES Y MOTIVACIÓN

Últimamente, el estudio de las propiedades mecánicas dinámicas de los materiales ha recibido una mayor atención, debido a que en varios problemas de ingeniería civil y minería, tales como explotación de canteras, perforación, la construcción de túneles, los estallidos de rocas y los eventos sísmicos, las rocas se pueden encontrar cargadas dinámicamente. La dinámica de rocas trata con la respuesta de ellas ante cargas dinámicas, deformaciones y fallas con respecto al tiempo, donde un incremento de las tasas de carga provocan un cambio en el comportamiento mecánico de las rocas y los macizos rocosos (Zhao et al., 2011). En particular, los estallidos de roca son un fenómeno causado por liberaciones súbitas de energía acumulada en el macizo rocoso, y comprender cómo las rocas responden a las cargas dinámicas es esencial para evaluar medidas de prevención ante estos riesgos. Por lo anterior es que se requiere un buen entendimiento del comportamiento de las rocas bajo cargas dinámicas.

Las cargas dinámicas generalmente se presentan en forma de un historial de aceleración, velocidad o desplazamiento de partículas y, en el campo, se pueden ver como ondas de esfuerzo que se van propagando en el medio. Estas ondas se atenúan mientras se propagan, y en gran parte lo hacen a través de las discontinuidades que se encuentran presentes en los macizos rocosos, lo cual constituye uno de los principales temas de la mecánica de rocas (Zhao et al., 2011). La respuesta de los materiales que componen la roca y los macizos rocosos a las cargas dinámicas se pueden presentar a diferentes escalas, las que incluyen el fracturamiento del material, el deslizamiento a lo largo de las discontinuidades de la roca o movimiento de bloques, entre otros.

En complemento a lo anterior, la dinámica de rocas abarca distintos temas, partiendo desde cómo inician las cargas dinámicas, los tipos de cargas dinámicas, la transmisión de estas, el daño que existe en un macizo rocoso bajo cargas dinámicas, entre otros (Zhao, 2011).

Una de las maneras de analizar la dinámica de rocas es mediante el ensayo Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB), el cual es un método que se utiliza principalmente en el estudio del comportamiento dinámico de los materiales y sus relaciones constitutivas dinámicas. Fue desarrollado por Kolsky en 1949 (Yang et al., 2023) e inicialmente se usó para investigar el comportamiento dinámico de los materiales metálicos. Luego, se usó para estudiar materiales frágiles como rocas, cerámicas y concreto (Li et al., 2014), donde las curvas obtenidas por el ensayo dinámico lograban una tendencia similar a las observadas en ensayos cuasi-estáticos de los mismos materiales. Además del ensayo de compresión dinámica convencional, las propiedades de tracción dinámica y las leyes de propagación de grietas de los materiales también pueden ser estudiados a través del ensayo de tracción dinámica de disco brasileño, que tiene un método ligeramente distinto al anterior (Yang et al., 2023). Así, desde el desarrollo de la técnica de ensayo SHPB, es que esta ha desempeñado un papel importante en el estudio de la respuesta mecánica de los materiales en condiciones de carga media y alta.

Para simular este tipo de ensayos, se usa un método denominado modelación numérica, la cual se ha convertido en una técnica efectiva para investigar el comportamiento mecánico dinámico de las rocas en

los últimos años. Estos métodos numéricos integran herramientas matemáticas y computacionales que permiten predecir el comportamiento de algún proceso, realizando variaciones en los inputs o parámetros de mayor importancia con respecto al caso de estudio, como lo pueden ser las propiedades del macizo rocoso, el grado de profundidad del lugar, la presencia de fallas, entre otros (Zhou et al., 2018).

Conforme a ello, está comprobado que la roca se comporta de forma diferente bajo cargas estáticas y dinámicas (Zhu et al., 2012). Es por esto que se busca definir una expresión que logre hacer un vínculo entre las cargas dinámicas y el comportamiento mecánico de las rocas, basándose en la modelación de ensayos dinámicos, que permita identificar los parámetros que tienen mayor importancia en la definición de un parámetro de resistencia de la roca dinámico a través de una regresión múltiple, para así lograr un análisis cualitativo del efecto de los parámetros considerados en la modelación del comportamiento de una roca bajo cargas dinámicas.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar la resistencia a la compresion uniaxial (UCS) dinámico de diferentes litologías mediante ensayos Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB), estableciendo una relación entre la resistencia estática y dinámica que incorpore parámetros dinámicos.

Objetivos Específicos.

- Estudiar el comportamiento de la resistencia de la roca mediante ensayos uniaxiales estáticos y dinámicos usando modelación numérica.
- Identificar la influencia de cada litología en el estudio de un parámetro de resistencia dinámico.
- Realizar variaciones de valores en parámetros dinámicos para analizar la influencia de estos en el estudio y su aplicación en estallidos de rocas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ENSAYOS DINÁMICOS EN ROCAS

Las propiedades de las rocas bajo cargas dinámicas son relevantes para el estudio de los problemas de mecánica de rocas, dentro de los cuales se podría considerar voladuras, diseño de protección, estallidos de rocas y eventos sísmicos. La propagación de ondas dinámicas requiere de un buen entendimiento del mecanismo y del comportamiento de las rocas bajo cargas dinámicas, debido a que este tipo de ensayos son muy diferentes a los ensayos estáticos, por la naturaleza de las cargas dinámicas (Zhou et al., 2012). Estas suelen presentarse en forma de historias temporales de aceleración, velocidad o desplazamiento de partículas.

Con respecto a lo anterior, uno de los temas importantes es la propagación de las ondas en las masas rocosas, las cuales se distribuyen y generan un campo de tensión dinámica, además de ser regidas por la transmisión y transformación de las ondas a través de las discontinuidades del macizo rocoso. La respuesta de este material rocoso sometida a esfuerzos dinámicos se produce a distintas magnitudes, incluyendo la fractura del material rocoso, el deslizamiento a lo largo de las discontinuidades y los movimientos de los bloques rocosos. La fracturación del material rocoso, por ejemplo, es un proceso dinámico asociado a la liberación repentina de energía que forma ondas de tensión dinámicas, que, a microescala, conducen a la deformación y el fallo a macroescala (Zhao et al., 2011).

La dinámica de las rocas tiene aplicaciones en ingeniería civil, minera, energética y medioambiental, donde se producen cargas y comportamientos dinámicos, por ejemplo, en la excavación y fragmentación de rocas por voladuras, la construcción de túneles y la estabilidad y sostenimiento de taludes en caso de terremoto, la protección contra el desprendimiento de rocas, la rotura de rocas en minas profundas y el control de riesgos debido a explosiones.

2.1.1 ENSAYO DE SPLIT-HOPKINSON

Para estudiar el comportamiento dinámico del macizo rocoso, se usan técnicas dinámicas tales como el Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB), dispositivo inventado en 1949 y modificado en 1953 por Herbert Kolsky para testear las propiedades dinámicas de los metales. Es más, existen estudios dinámicos sobre propiedades dinámicas de rocas usando esta técnica, los cuales sugieren que el comportamiento mecánico bajo condiciones dinámicas son intrínsecamente diferentes cuando se comparan con la misma roca en condiciones de carga estáticas (Robbiano et al., 2022).

Se ha usado este método en los ensayos dinámicos compresivos de rocas y en la resistencia dinámica a la tracción usando el Brazilian Test.

Este método de ensayo se usa principalmente para clasificar y caracterizar la resistencia dinámica de las rocas intactas, midiendo la resistencia a la compresión uniaxial de una probeta de roca en forma cilíndrica.

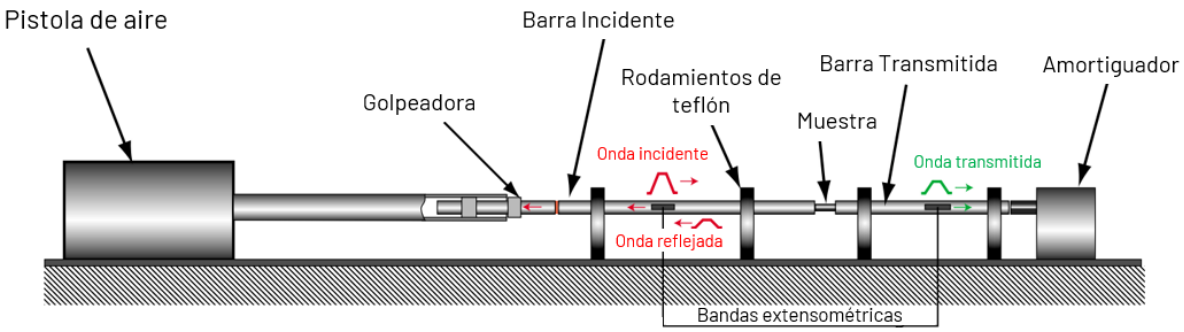


Figura 1: Esquema del funcionamiento del ensayo Split-Hopkinson (Modificado de Yuan et al., 2011).

En la Figura 1 se observa el funcionamiento del ensayo. La muestra consta de una probeta cilíndrica del material a ensayar, que se coloca entre los dos segmentos de la barra de Hopkinson: la barra incidente y la barra de transmisión. Las barras se fabrican con aceros de alta resistencia. Una barra golpeadora percute el extremo libre de la barra incidente, originando así un impulso de impacto, el cual atraviesa rápidamente la primera barra. Una parte de este impulso se refleja en el extremo de la barra incidente y otra parte atraviesa la muestra del material hasta alcanzar la barra de transmisión.

El diámetro de las barras debe ser ligeramente superior al diámetro de la muestra de roca. La longitud de la barra debe ser al menos 30 veces el diámetro de la barra para satisfacer la teoría unidimensional de propagación de ondas de tensión. El diámetro de la muestra debe ser cercano a 50 mm o al menos 10 veces el promedio del tamaño de grano en la roca. Además, se recomienda una relación largo-diámetro 1:1 y 0.5:1 para muestras pequeñas y grandes, respectivamente (Dai et al., 2010).

Para lograr el registro de las ondas tanto incidente como reflejada y transmitida, se utilizan unas bandas extensométricas, que se colocan en las barras incidente y transmisora. A partir de estas ondas, se puede obtener la curva esfuerzo-deformación del material de la probeta.

Según el ensayo Split-Hopkinson y la teoría unidimensional de propagación de ondas de tensión, el esfuerzo dinámico, la deformación de la muestra y la tasa de carga se pueden analizar y calcular a través de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma(t) = \frac{AE}{2A_S}[\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \tag{1}$$

$$\varepsilon(t) = \frac{-C}{L_S}\int_{t_0}^{t}[\varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t) - \varepsilon_i(t)]\,dt \tag{2}$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C}{L_s}[\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \quad (3)$$

Donde:

σ(t) : Esfuerzo de compresión uniaxial de la muestra [MPa]
ε(t): Deformación de la muestra.
A : Sección transversal de la barra [m^2]
E : Módulo de Young de las barras [N/m^2]
C : Velocidad de propagación de las ondas [m/s]
A_s : Sección transversal de la muestra [m^2]
L_s : Longitud de la muestra [m]

Además, las fuerzas dinámicas sobre la interfaz barra incidente-muestra (P_1) y la interfaz muestra-barra transmitida (P_2) son:

$$P_1 = AE(\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (4)$$

$$P_2 = AE\varepsilon_t \quad (5)$$

La Ecuación 1 y la Ecuación 3, de esfuerzo dinámico y tasa de carga respectivamente, se basan en las suposiciones de que la propagación de las ondas elásticas a través del medio cumplen con la teoría unidimensional de propagación de ondas de tensión, de que la muestra alcanza el equilibrio de esfuerzos antes del fallo (lo que se puede verificar comparando el historial de esfuerzos en los dos extremos de la probeta, usando la Ecuación 4) y de que el efecto de la fricción y la inercia axial en la muestra puede ser ignorado.

Este tipo de ensayos dinámicos se caracterizan por la tasa de carga y tasa de deformación. Esta última se calcula utilizando la Ecuación 3, considerando que existe un tiempo t_0 que representa un estado de equilibrio de tensión de la muestra, y un tiempo t_1 que representa su fallo. Por lo tanto, la tasa de deformación para el ensayo es el nivel medio de velocidad de deformación entre t_0 y t_1. Además, la carga dinámica puede caracterizarse utilizando la tasa de carga, la cual corresponde a la pendiente de la curva antes del punto de fallo en un gráfico de esfuerzo versus tiempo, y el historial de carga se calcula utilizando la Ecuación 1 (Zhou et al., 2012).

Teóricamente, la relación entre la tasa de carga y la tasa de deformación es el módulo de Young, por lo tanto, ambas representaciones de la carga dinámica son equivalentes y se pueden calcular ambos parámetros en el mismo intervalo de tiempo. Junto con esto, el valor máximo de la Ecuación 1 es la resistencia a la compresión dinámica uniaxial de la muestra a una tasa de deformación promedio o tasa de carga determinada anteriormente (Zhou et al., 2012)

2.1.2 BRAZILIAN TEST

Este método tiene como objetivo medir la resistencia a la tracción dinámica de las muestras de roca preparadas indirectamente mediante el Brazilian Test. En este caso, la carga dinámica es inducida por la SHPB, para así lograr clasificar y caracterizar la resistencia dinámica de rocas intactas.

Para esto, se usa un sistema de ensayo SHPB, el cual aplica la carga dinámica a la muestra en forma de disco, como se observa en la Figura 2. El largo de la barra golpeadora se elige dependiendo de la duración del pulso que se le desee aplicar. Según la teoría unidimensional de la propagación de ondas de tensión, las fuerzas dinámicas en la unión barra incidente-muestra y la unión muestra-barra transmitida se pueden calcular según la ecuación anterior.

En este caso, es necesario garantizar el equilibrio de fuerzas durante el ensayo dinámico, ya que esto valida el análisis de esfuerzos estáticos en la muestra.

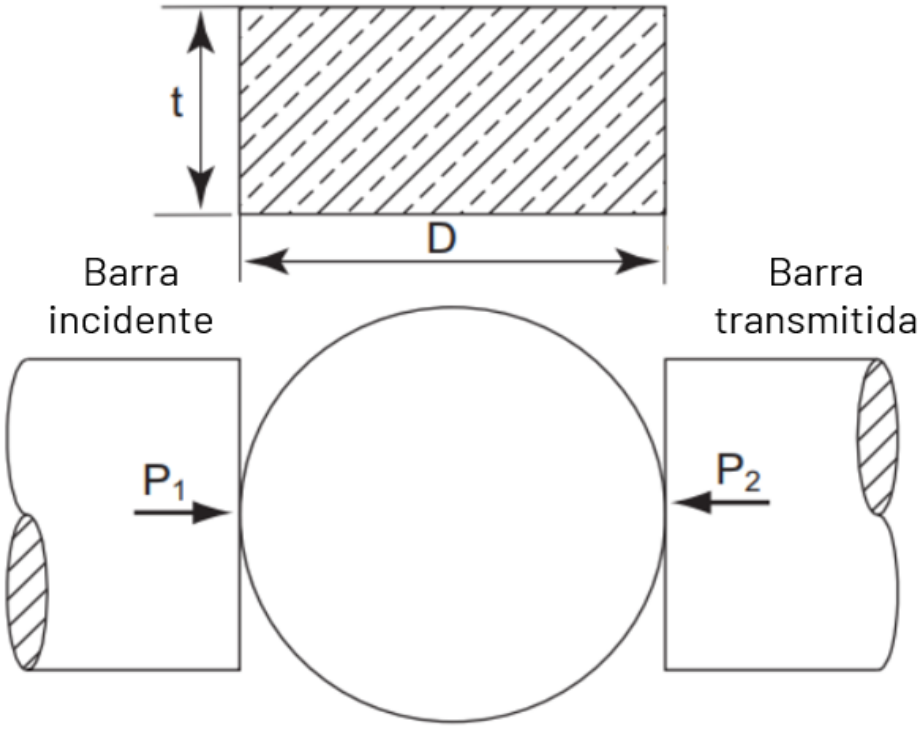


Figura 2: Esquema del Brazilian test en un sistema SHPB (Modificado de Zhou et al., 2012).

Para este ensayo, el diámetro de la muestra debe ser cercano a 50 mm y su espesor debe ser aproximadamente el mismo que su radio.

El procedimiento para realizar este ensayo empieza al momento de cortar y preparar la muestra usando agua y asegurando de que no haya alguna irregularidad en la superficie de esta. La carga es aplicada a la muestra a través del sistema Split-Hopkinson Pressure Bar, donde también se debe asegurar el equilibrio de fuerzas dinámicas. La tasa de carga se controla a través de la variación de la velocidad de impacto de la barra golpeadora.

De lo anterior, se obtiene el historial de esfuerzos de tracción en el centro de la muestra, el historial de resistencia a la tracción, el cual se determina en el valor peak del esfuerzo de tracción y, junto con lo anterior, la tasa de carga del test, la cual se obtiene al obtener la pendiente de la curva antes de la falla, al graficar el esfuerzo de tracción versus el tiempo.

2.1.3 IMPORTANCIA DE LOS ENSAYOS DINÁMICOS

Debido a la implicación de las cargas dinámicas externas que se propagan en forma de ondas de tensión y la alta densidad de las explotaciones mineras, es que se gatillan fenómenos tales como estallidos de rocas, los cuales se producen frecuentemente a gran escala, induciendo a un cambio en las propiedades mecánicas de los materiales y los macizos rocosos, por lo que es imprescindible el buen entendimiento del comportamiento de las rocas bajo cargas dinámicas.

Las cargas dinámicas se presentan generalmente en forma de ondas de tensión y se presentan en forma de historiales de aceleración, como se puede ver en la Figura 3. Las ondas de tensión, similares a otras ondas físicas, se atenúan durante la propagación, especialmente en las discontinuidades. Estas cargas son generalmente las cargas aplicadas de corta duración, incluyendo impactos, explosiones y terremotos. Por ejemplo, la carga de impacto, la cual es quizás la carga dinámica más común, es la carga generada por el golpe o choque de un objeto contra otro, con una duración de tiempo muy corta (Zhao, 2011).

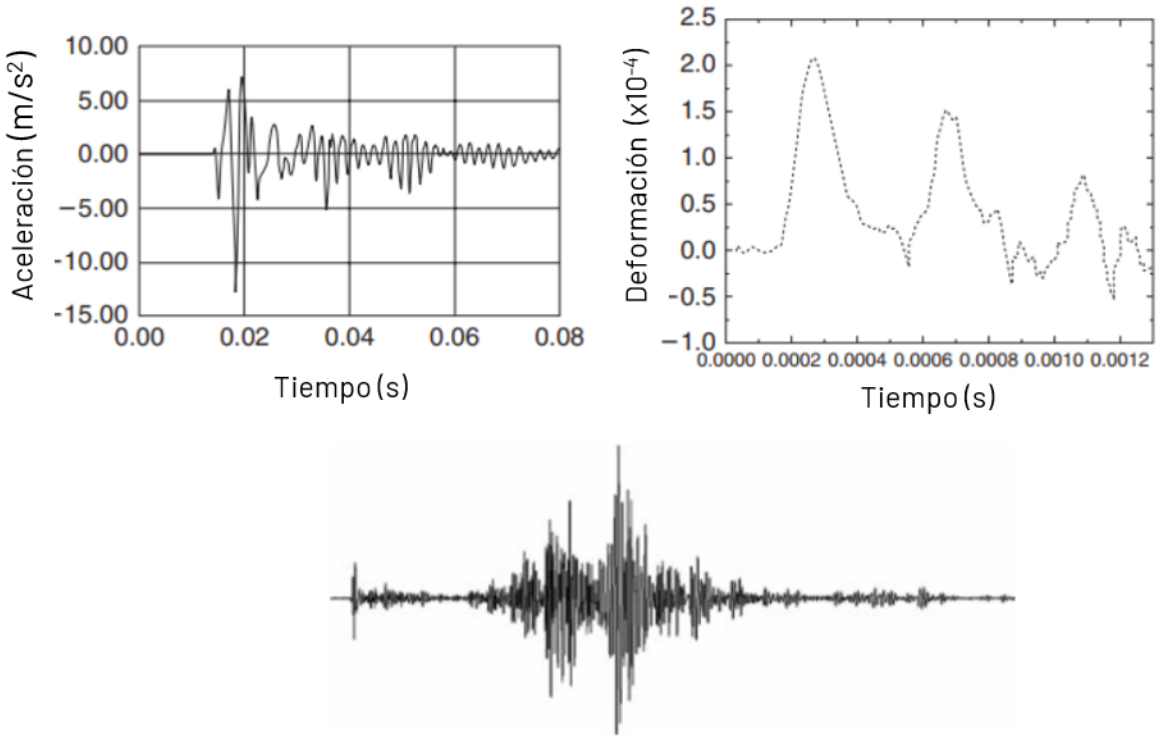


Figura 3: Varios tipos de cargas dinámicas y sus ondas (Modificado de Zhao, 2011)

A diferencia de las cargas estáticas, que suelen tratarse como constantes sin cambios en el tiempo, las cargas dinámicas cambian con el tiempo. Una carga de impacto suele aumentar rápidamente de cero a un valor máximo y luego termina en cero, en una duración de carga muy corta. Por lo tanto, se presentan en forma de ondas.

La carga dinámica se aplica en un punto o plano en forma de ondas de tensión, y la tensión se desplaza y se aplica en los siguientes puntos o planos. La onda se propaga a una velocidad que depende del medio en el que viaja la onda. Esta velocidad es mayormente conocida como velocidad sísmica, y es la velocidad de la onda que atraviesa el medio.

Cuando una onda de tensión viaja en un medio, se aplica tensión a las partículas del medio. Las partículas se aceleran hasta oscilar alrededor de sus posiciones originales. La velocidad del movimiento de las partículas se denomina velocidad de las partículas, y es la velocidad física de las partículas que se mueven de un lado a otro en la dirección en la que pasa la tensión. Una alta velocidad de las partículas se produce generalmente por una gran amplitud de la onda de tensión.

Cuando un macizo rocoso está sometido a grandes tensiones, un pequeño aumento de estas debido a una perturbación dinámica, tal como explosiones, vibraciones e impactos, pueden desencadenar un estallido de rocas y, por lo tanto, influye en los daños que este genera. Los estudios han demostrado que las perturbaciones externas durante la explotación minera subterránea pueden inducir estallidos de rocas (Manouchehrian, 2017).

Muchos investigadores han estudiado la propagación de ondas de tensión, el mecanismo evolutivo de los estallidos de rocas y su interacción usando los experimentos de impacto SHPB, explorando también parámetros como la energía de propagación y la trayectoria de las ondas de tensión, las propiedades mecánicas bajo una carga dinámica y procesos de deformación y fractura de distintas litologías (Feng et al., 2022)

2.2 ESTALLIDOS DE ROCAS

Los estallidos de rocas son eventos dinámicos que son generados debido a una liberación espontánea de la energía de deformación y ocurren generalmente en presencia de ondas sísmicas, sean estas gatilladas por tronaduras, sismicidad inducida o movimientos de fallas. Estos significan un riesgo para los proyectos mineros en la ingeniería, tanto como para el personal que trabaja en la mina como para los equipos utilizados en ella, lo que ha motivado a investigadores a lo largo de todo el mundo a entender cuáles son las causas de este tipo de eventos, para así poder llegar a una evaluación del peligro que presentan (Wang et al., 2021).

En la Figura 4 se puede observar que los estallidos de roca pueden clasificarse en tres tipos distintos; estallidos por deformación (strainburst), estallidos por falla (fault-slip burst) y estallidos de pilares (pillar burst)

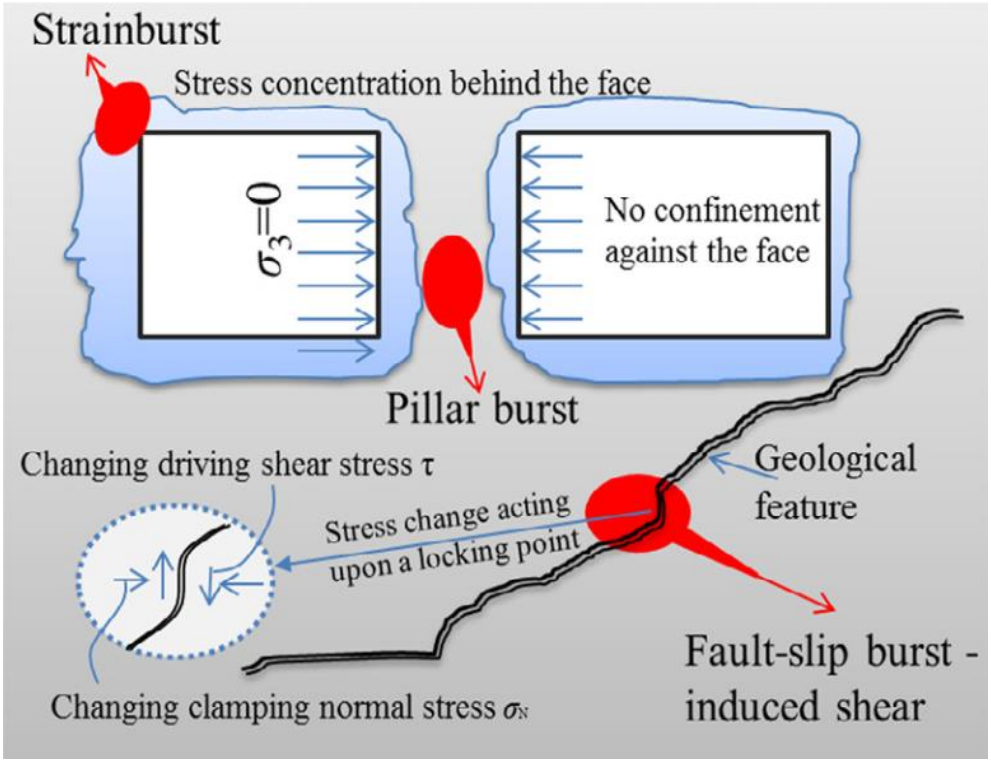


Figura 4: Clasificación de estallidos de rocas (Zhou, 2018).

Los estallidos por deformación o strainburst es el tipo más común de estallido de rocas y son una falla repentina y violenta de rocas cercano al borde de una excavación, cuando el esfuerzo cercano a esta

llega a su límite y la roca falla súbitamente por una combinación de extensiones y fracturas de corte (Cai & Kaiser, 2018).

En este caso, el fallo se desarrolla en el perímetro de la excavación y en condiciones de bajo confinamiento, donde las fracturas pretenden extenderse en la dirección de mayor tensión inducida y se desarrollan subparalelas al límite de la excavación, cuando la roca está expuesta a cargas de compresión (Askaripour et al., 2022). En este tipo de estallidos de roca no se produce ninguna vibración en los alrededores antes de la misma rotura de la roca, si no que se genera durante y después del estallido.

En términos dinámicos, un estallido por deformación se clasifica como cargado dinámicamente cuando un evento remoto provoca un incremento sustancial de la tensión dinámica cerca de la ubicación del daño y se puede observar gráficamente en la Figura 5. Este incremento de esfuerzos dinámicos puede aumentar la profundidad de la falla y los movimientos del suelo pueden agregar energía a la roca que falla. Además, parte del daño que causa el esfuerzo o la energía se derivará del evento sísmico remoto que causa el estallido cargado dinámicamente (Cai, 2013).

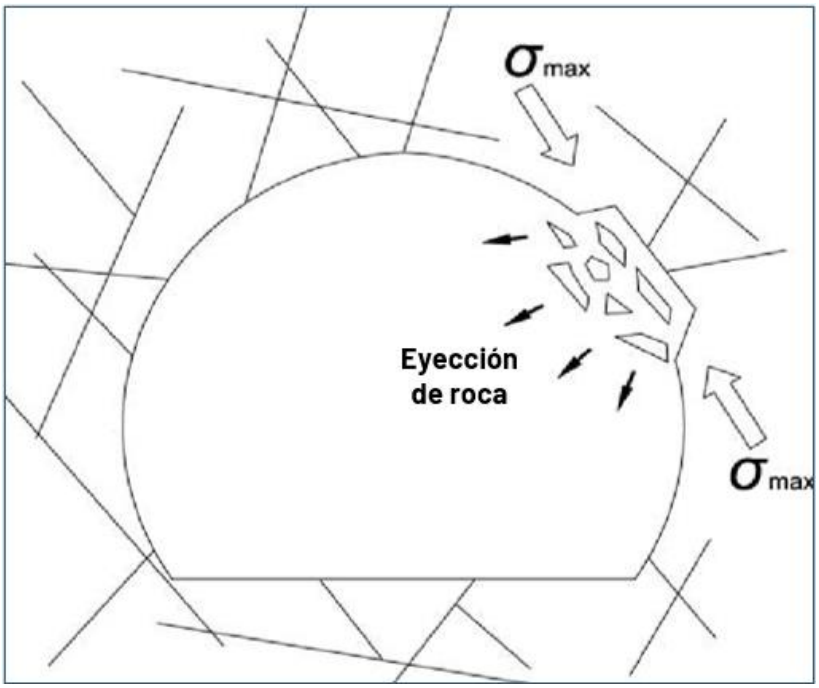


Figura 5: Estallido por deformación en el macizo rocoso (Modificado de Ortlepp & Stacey, 1994).

Por otra parte, los estallidos de pilares se definen como un colapso del pilar completo ya sea por una falla violenta del núcleo del pilar o un proceso de falla progresivo que se propaga a través del pilar. Este tipo de estallidos no son muy comunes (Cai & Kaiser, 2018).

En el caso de un estallido de pilares, generalmente se gatillan por eventos sísmicos remotos, aunque el daño está predominado por la energía liberada por la roca que falla en el núcleo del pilar y el macizo rocoso cercano. En casos de minería por caserones y pilares con una alta tasa de excavación, este tipo de

estallidos de roca se pueden convertir en un suceso extremadamente violento y puede llevar a que ocurra una secuencia de estallidos de pilares.

Finalmente, los estallidos por deslizamiento de fallas remotas ocurren debido a la energía que libera un deslizamiento dinámico, o bien, una falla cercana bajo condiciones de alto confinamiento y es gatillado principalmente por voladuras de producción que reactivan fallas preexistentes o forman zonas estructurales sísmicamente activas (Askaripour et al., 2021), como se logra observar en la Figura 6.

De cierta forma, se podría decir que un estallido por deformación cargado dinámicamente es en realidad un estallido por deslizamiento de falla que tiene alguna relación con un evento sísmico remoto. La diferencia entre ambos es que en un estallido por deformación dinámico, la mayor parte de la energía proviene del macizo rocoso que rodea el volumen estallado, mientras que la mayor parte de la energía que causa daños por un evento de deslizamiento por falla tiene su origen en el macizo rocoso presente en los alrededores de la falla o zona de ruptura.

Entonces, si el daño es principalmente causado por la energía que irradia un deslizamiento dinámico sobre una falla preexistente, una zona de falla o por una ruptura por cizalladura, se debe clasificar como un estallido por deslizamiento de falla. Por otro lado, si la energía irradiada se debe principalmente a un estallido por deformación, debe clasificarse como un estallido por deformación con carga dinámica.

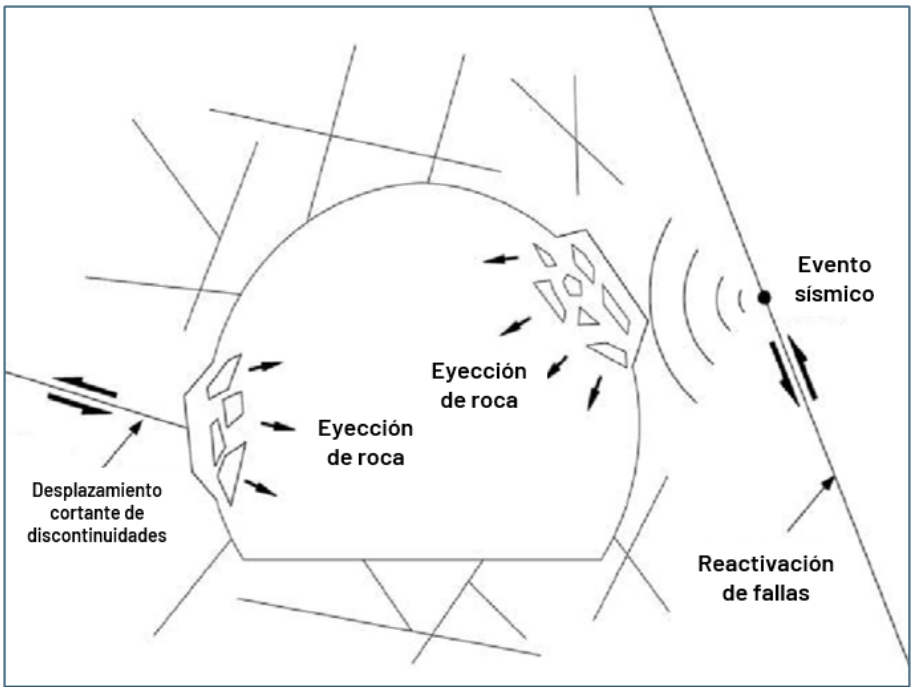


Figura 6: Estallido por deslizamiento de falla provocado por un evento sísmico remoto y un desplazamiento cortante de discontinuidades (Modificado de Ortlepp & Stacey, 1994).

2.2.1 CONDICIONES QUE FAVORECEN LA OCURRENCIA DE UN ESTALLIDO DE ROCAS

Los factores que favorecen a la ocurrencia de un estallido de rocas se pueden dividir en dos partes; los factores preexistentes al minado y los factores posteriores al minado (Medina, 2015).

A su vez, los factores relevantes preexistentes al minado comprenden:

- El medio geológico, donde la presencia de planos de estratificación, la presencia de plegamientos y fallas, zonas de corte y diques y la presencia de agua podrían favorecer la ocurrencia de un estallido de rocas.

- Las propiedades del comportamiento mecánico del medio geológico, donde las rocas de comportamiento elástico tienden a ser más propensas a estallidos de rocas que las rocas que presentan un comportamiento no elástico.

- El campo de esfuerzos original, donde es importante mencionar que, a mayor profundidad de túnel, mayor frecuencia y severidad de los estallidos de roca debido a que existitrá un mayor campo de esfuerzos alrededor de la excavación.

Por otro lado, los factores relevantes posteriores al minado corresponden a:

- Los esfuerzos inducidos, donde existen aspectos que generan altas zonas de concentración de esfuerzos como por ejemplo el tamaño de la excavación, que mientras mayor sea, mayor probabilidad de estallidos de rocas habrá. Otro factor es la construcción o forma inadecuada de las excavaciones o el mal dimensionamiento de pilares, los cuales favorecen la ocurrencia de estallidos de rocas.

- La energía de deformación, ya que en las zonas de altas concentraciones de esfuerzos inducidos por el minado, existe mayor almacenamiento de la energía de deformación, lo que representa una fuente de energía sísmica que puede gatillar un estallido de rocas.

2.2.2 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE ESTALLIDOS DE ROCAS

La evaluación de estallidos de rocas es algo difícil debido a la complejidad del origen de este fenómeno. No hay un método universalmente aceptado para predecir el momento de un estallido y lo mejor que se puede hacer hasta ahora es saber o identificar áreas donde podría llevarse a cabo un estallido de rocas. Para esto, se usan métodos empíricos, numéricos o matemáticos (Zhou, 2018).

La Figura 7 da a conocer los distintos enfoques conocidos para evaluar un potencial de estallido de rocas.

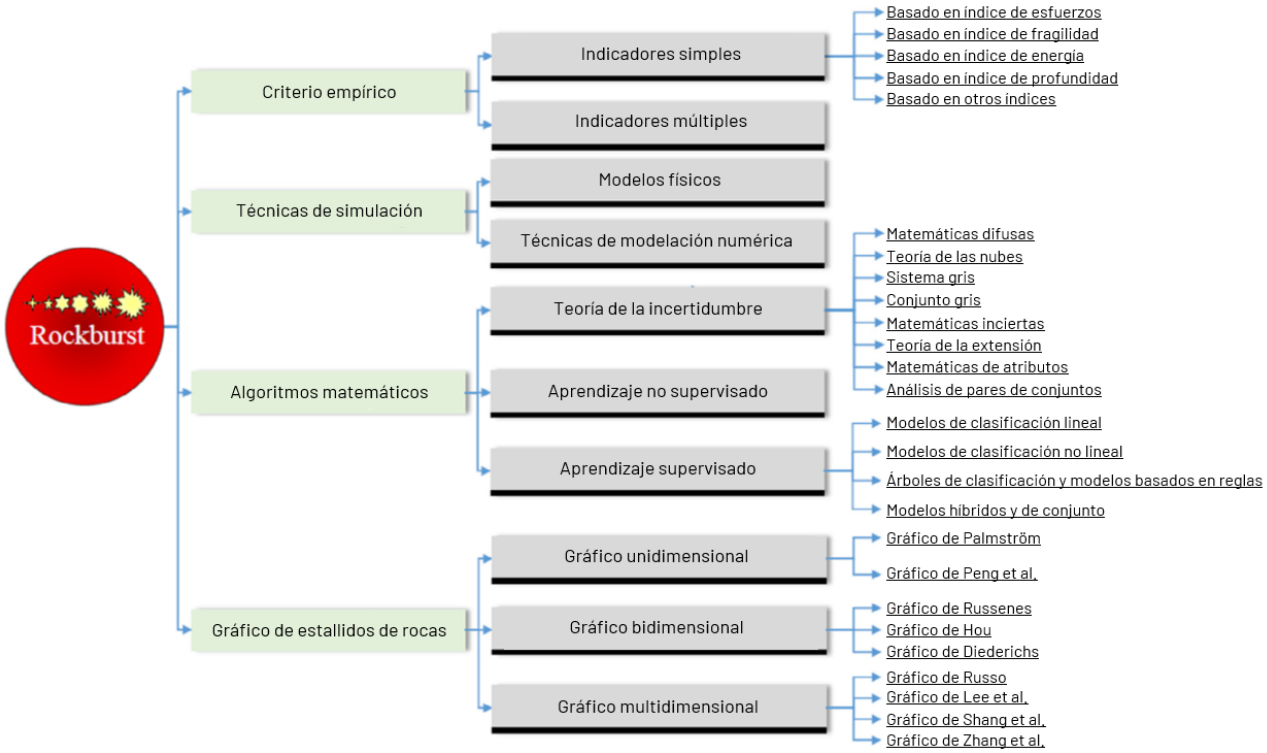


Figura 7: Taxonomía de los diferentes enfoques de la evaluación del potencial de estallido de rocas (Zhou, 2018).

2.2.2.1 MÉTODOS EMPÍRICOS

Los métodos empíricos de evaluación de potencial de estallido de rocas se usan mayoritariamente en las primeras etapas de un proyecto por propósitos de factibilidad y diseño preliminar para establecer la calidad y propiedades del macizo rocoso y para evaluar el desprendimiento de rocas en aberturas subterráneas.

En la Figura 8 se observa que dentro de los métodos empíricos existen dos tipos: con indicador único y con indicador múltiple.

Los métodos empíricos con indicador único han sido establecidos desde distintas perspectivas, basadas en esfuerzos, resistencia, energía y profundidad y contribuyen en la evaluación y análisis de la ocurrencia e intensidad de un estallido de rocas.

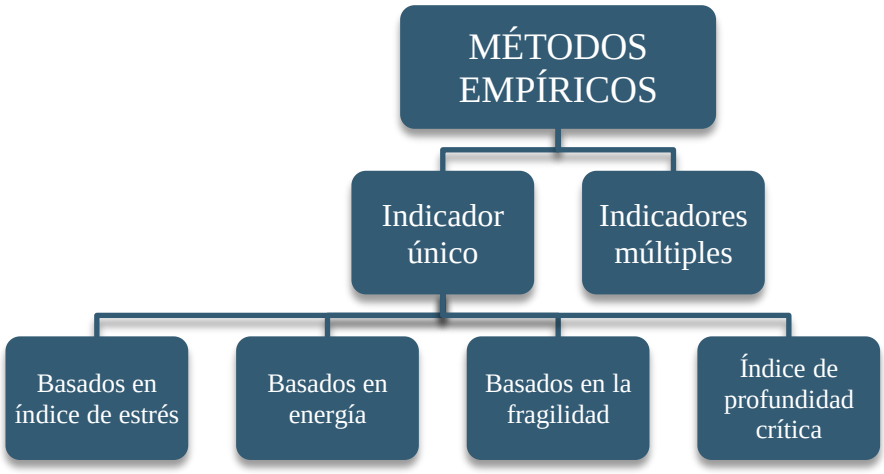


Figura 8: Clasificación de métodos empíricos.

Por otro lado, están los métodos empíricos con indicadores múltiples, los cuales son necesarios y más precisos que aquellos con indicador único para poder identificar o estimar de buena forma los estallidos de rocas, debido a que se pueden considerar más factores, tales como la calidad de la roca, su posibilidad de daño, su rigidez y su soporte.

2.2.2.2 MÉTODOS NUMÉRICOS

Los métodos numéricos de evaluación son un método que ha sido utilizado por científicos e ingenieros y ha abarcado una gran cantidad de proyectos de ingeniería además de los estallidos de rocas ya que permite entender y predecir problemas que no pudieron ser manejados anteriormente. Con el avance tecnológico y el desarrollo de las computadoras, la disponibilidad de equipos con mejores prestaciones y capacidades y una gran variedad de soluciones numéricas y programas, se han abierto grandes puertas en el ámbito del análisis y la evaluación de problemas complejos en ingeniería y mecánica de rocas (Wang et al., 2021).

En el caso de los estallidos de roca, este tipo de método ha sido utilizado para evaluar la respuesta mecánica de macizos rocosos complejos y para estudiar los mecanismos de falla y la deformación del macizo rocoso. Estos se enfocan en métodos estáticos de estimación de riesgos de estallidos de roca y análisis de los fallos del macizo rocoso, teniendo así la capacidad de modelar y predecir el comportamiento de algún proceso.

Existen dos métodos distintos de modelación numérica; los métodos continuos y discretos.

Los métodos numéricos continuos implican que en todos los puntos del dominio del problema, los materiales no tienden a romperse o quebrarse en pedazos. Todos los puntos del material que se sitúan originalmente en la vecindad de un determinado punto del dominio del problema, permanecen en la misma vecindad a lo largo de todo el modelamiento. Por otro lado, los métodos de modelación numérica

discontinua trata a los elementos separados como discretos que son individualmente continuos e interactúan entre si (Jing, 2003).

Los métodos continuos son más adecuados para calcular deformaciones de macizo rocoso, debido a que este es el principal caso de interés, mientras que los métodos discontinuos son los más adecuados para estudiar deslizamientos de bloques de rocas sobre discontinuidades, debido a que su principal caso de interés son el movimiento de cuerpos rígidos (Nikolić et al., 2016).

El método de diferencias finitas es uno de los más antiguos pertenecientes a la familia de los métodos numéricos, se aplica ampliamente y es la base principal de los métodos de elementos discretos. Este método tiene como principio reemplazar las derivadas parciales por diferencias definidas sobre intervalos espaciales determinados en las direcciones de las coordenadas Δx, Δy, Δz, dando lugar a un sistema de ecuaciones algebraicas en términos de incógnitas, en una malla de nodos sobre el dominio de interés. Este método utiliza una malla regular de nodos, como, por ejemplo, una malla rectangular.

La solución del sistema de ecuaciones se obtiene después de imponer las condiciones iniciales y de frontera necesarias, y producirá los valores que se requieren de la función objetivo en todos los nodos, que terminarán satisfaciendo las soluciones de las derivadas parciales gobernantes como las condiciones de frontera que fueron especificadas.

El sistema de mallas es una forma cómoda de generar valores para la función objetivo en puntos de muestreo con intervalos pequeños, de modo que los errores sean lo suficientemente pequeños como para ser aceptables, por lo que presentan ciertas deficiencias, sobretodo en su inflexibilidad a la hora de tratar fracturas, condiciones de contorno complejas e inhomogeneidad del material (Jing, 2003).

En la Figura 9 se observan las principales diferencias entre distintos métodos de representación de un macizo rocoso mediante modelación numérica.

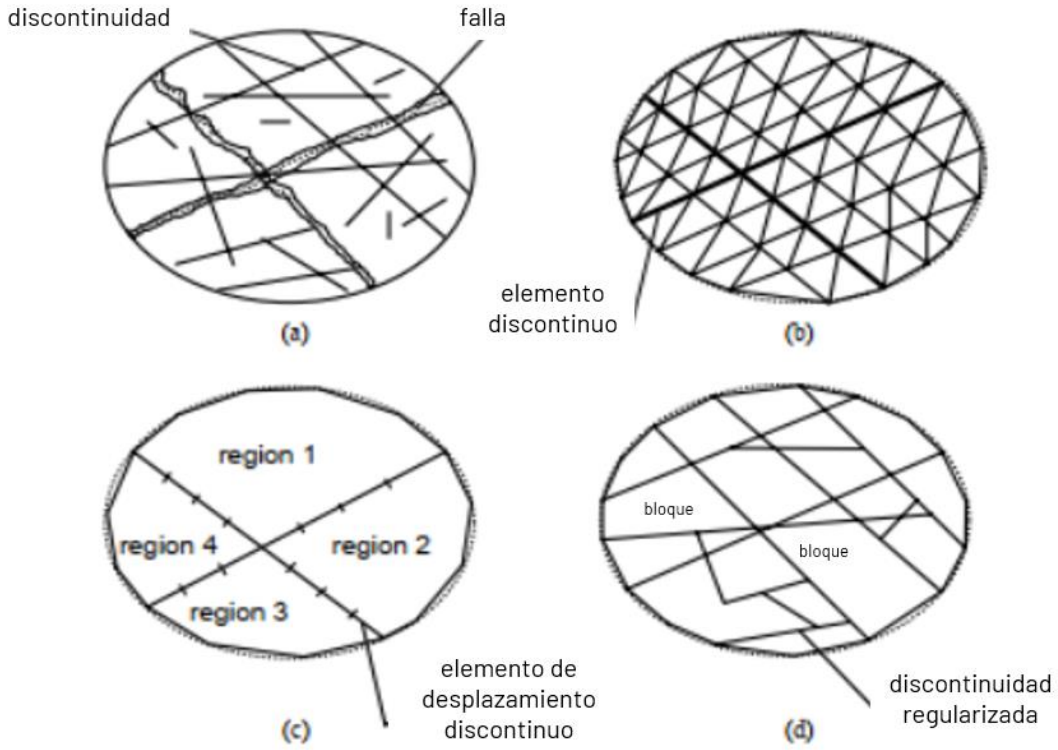


Figura 9: Representación de un macizo rocoso fracturado en (a), por método de diferencias finitas o método de elementos finitos en (b), por método de elementos de frontera en (c), por método de elementos discretos en (d) (Modificado de Jing, 2003).

Para efectos de esta memoria, se trabajó con el software Fast Lagrangian Analysis of Continua, en su versión de 3 dimensiones, abreviado como FLAC3D.

2.2.2.3 MÉTODOS MATEMÁTICOS

Los métodos matemáticos de evaluación son algoritmos que reciben una gran cantidad de inputs o datos, los cuales son procesados para encontrar patrones o relaciones entre estos. De aquí se podrá obtener una cierta precisión, debido a que en cuanto a estallidos de rocas, muchos de los datos están influenciados por distintos factores, algunos ciertos y cualitativos, mientras que otros aleatorios y difusos.

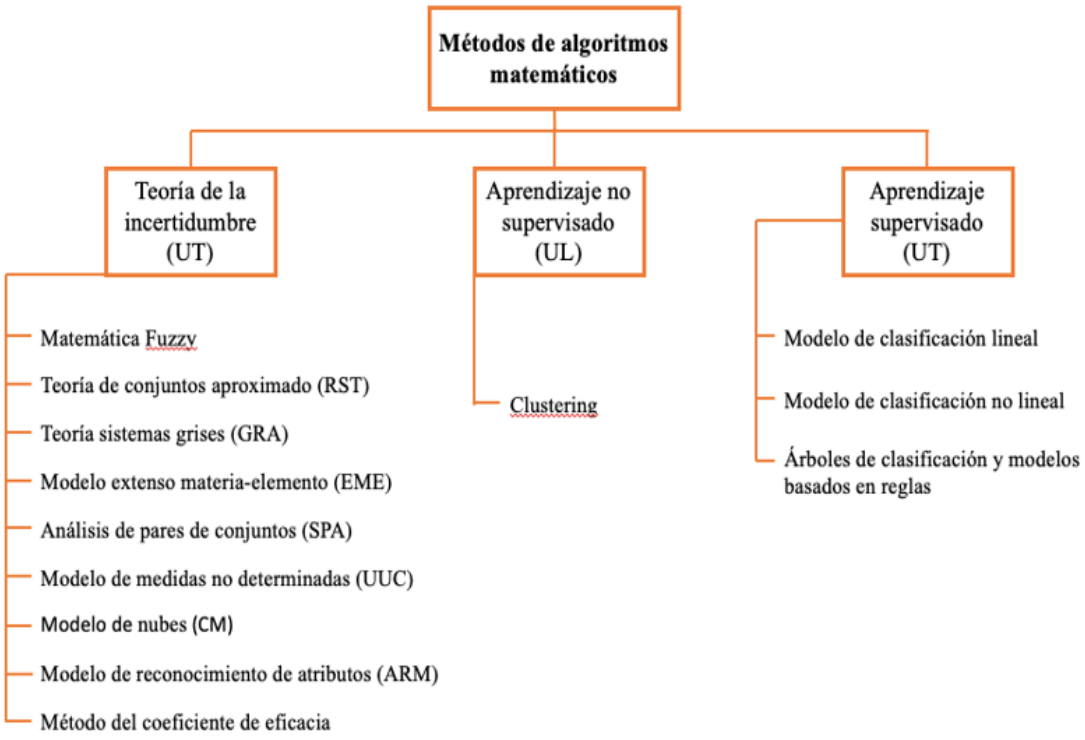


Figura 10: Visión general de los métodos de algoritmos matemáticos (Zhou et al., 2018).

En la Figura 10 se reflejan los métodos de algoritmos matemáticos, donde se encuentra la teoría de la incertidumbre, las cuales son metodologías de predicción que se encargan de resolver problemas complejos de ingeniería trabajando con información incierta, inexacta e incompleta en base a varios análisis cualitativos y cuantitativos.

Luego, está el método de aprendizaje no supervisado, los cuales buscan la similitud entre sets de datos para determinar si es que pueden estos dividirse en grupos llamados “clusters”.

Finalmente se encuentra el método de aprendizaje supervisado, donde generalmente se trabaja con atributos de cada dato para posteriormente analizarlos y crear una función que permita evaluar los estallidos de rocas.

2.3 MODELAMIENTO DINÁMICO

2.3.1 FLAC3D

FLAC3D es un programa de modelación numérica para análisis geotécnicos avanzados de suelos, rocas y estabilidad, siendo usado para testeos y diseñado por ingenieros geotécnicos, civiles y mineros. Está diseñado para llevar a cabo cualquier proyecto que requiera análisis continuos. Este programa usa formulación explícita de diferencias finitas que puede modelar comportamientos complejos, como

problemas que constan de varias etapas, grandes desplazamientos y deformaciones, comportamiento no lineal de los materiales o sistemas inestables.

Los materiales están representados por elementos poliédricos en una malla tridimensional que el usuario puede ajustar para adaptarse a la forma del objeto que se está modelando. Cada elemento se comporta en respuesta a fuerzas o restricciones aplicadas de acuerdo con leyes de tensión/deformación lineales o no lineales especificadas. Los materiales pueden ceder y fluir, y las mallas pueden deformarse (en modo de alta deformación) y moverse con el material representado. Así, FLAC3D ofrece una herramienta de análisis ideal para la solución de problemas tridimensionales en ingeniería geotécnica (Itasca Consulting Group, 2009).

Para realizar una simulación en FLAC3D, se debe especificar una malla en tres dimensiones, un modelo constitutivo, las propiedades del material, las condiciones iniciales y las condiciones de borde.

La malla tridimensional define la geometría general del problema a estudiar, la cual se debe crear considerando las definiciones básicas del software, como se aprecia en la Figura 11. Por otro lado, el modelo constitutivo y las propiedades del material determinarán cómo se comportará el modelo al aplicarle distintas perturbaciones, tales como cargas estáticas o dinámicas. Finalmente, las condiciones iniciales y de borde definen el estado de la estructura al momento de realizar la simulación (Itasca Consulting Group, 2009).

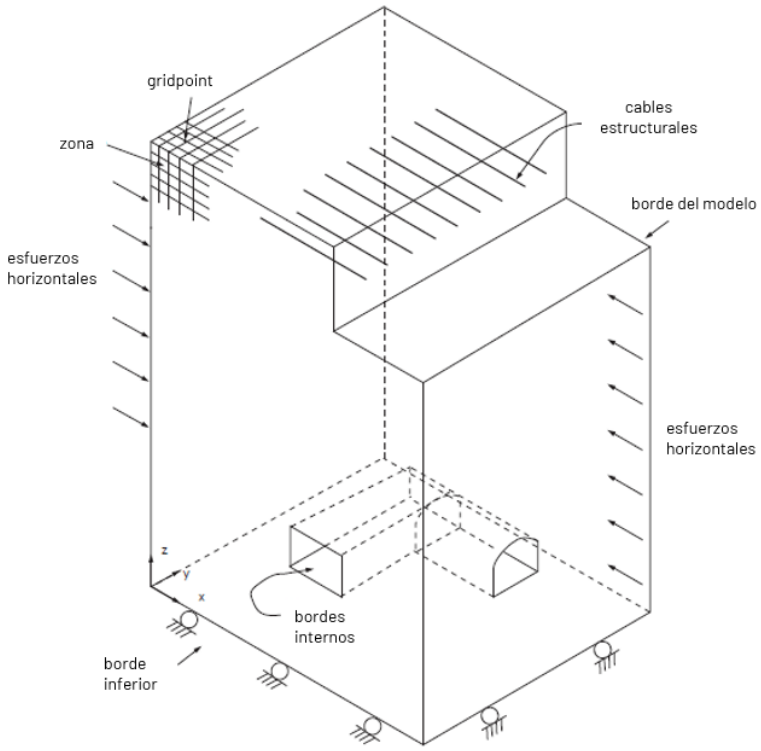


Figura 11: Definiciones básicas de FLAC3D (Itasca Consulting Group, 2009).

En FLAC3D, existe la opción para llevar a cabo análisis dinámicos, la cual realiza cálculos basados en el esquema de volumen explícito finito para poder resolver las ecuaciones de movimiento, usando masas

de “gridpoints” agrupados que se derivan de las densidades reales de las zonas aledañas, en lugar de masas ficticias usadas en el análisis estático.

Para realizar un modelo dinámico en FLAC3D, es necesaria:

- Una carga dinámica y condiciones de borde
- Transmisión de ondas a través del modelo
- Amortiguación mecánica

En FLAC3D se puede aplicar una carga dinámica, la cual puede ser en cualquier dirección, ya sea en los ejes x, y o z, o en la dirección normal o de corte. Estas se aplican usualmente en los bordes del modelo, y pueden ser:

- Un historial de aceleración
- Un historial de velocidad
- Un historial de esfuerzos o presiones
- Un historial de fuerzas

En análisis estáticos, las condiciones de borde fijas se pueden imponer realísticamente a cierta distancia de la región de interés. En el caso de análisis dinámicos, estas condiciones causan reflexión de las ondas que se propagan hacia el interior del modelo. Para evitar esto, se usan condiciones de borde viscosas o “quiet boundaries”, las cuales corresponden a puntos de control independientes en la dirección normal y de corte que generan tracciones viscosas (Itasca Consulting Group, 2009).

El análisis dinámico comienza a partir de alguna condición in-situ. Si se usa una condición de borde fija mientras se genera el estado de tensión estática, esta puede reemplazarse por “quiet boundaries”. Así, los “gridpoints” se liberarán y las fuerzas de reacción en los bordes se calcularán y se mantendrán automáticamente durante toda la fase dinámica. También se debe aplicar una condición de borde de tensión que tenga el signo opuesto sobre el mismo borde cuando el “quiet boundary” se aplica para la fase dinámica, permitiendo que existan las fuerzas de reacción correctas en el borde para el cálculo dinámico (Itasca Consulting Group, 2009).

Para aplicar un movimiento sísmico en un borde, se utiliza una condición de esfuerzos, es decir, un registro de velocidad que se transforma en un registro de esfuerzos, para luego ser aplicado a un borde. Una onda de velocidad puede convertirse en un esfuerzo aplicado mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_n = 2(\rho C_p)v_n \tag{6}$$

Donde:

σ_n : Esfuerzo normal aplicado [MPa]
ρ : Densidad del medio [kg/cm^3]
C_p : Velocidad de propagación de la onda p a través del medio [m/s]
v_n : Velocidad normal de la partícula aplicada [m/s]

2.3.2 RHINOCEROS Y GRIDDLE

Rhinoceros es una herramienta de modelado para diseñadores e ingenieros, con la cual se puede importar, crear, editar y exportar objetos geométricos en distintos formatos para utilizar en un software ITASCA, tal como FLAC3D.

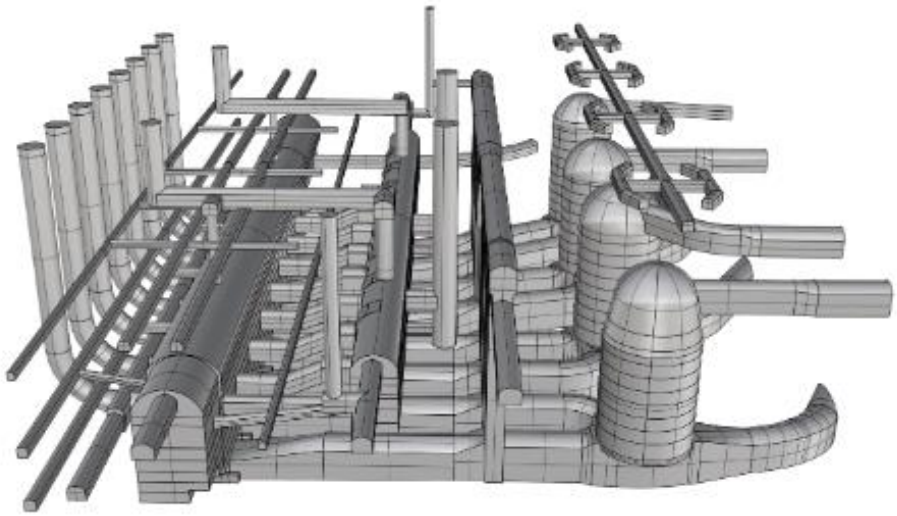


Figura 12: Superficie creada en Rhino que representa una central eléctrica subterránea (Itasca Consulting Group, 2009).

El software es capaz de manejar desde formas geométricas simples hasta diseños muy complejos, siendo utilizado en ingeniería para realizar modelos y análisis de estructuras, siendo una herramienta versátil para el modelado en tres dimensiones, como se aprecia en la Figura 12.

Por su parte, Griddle es un software complementario a Rhinoceros, el cual brinda soluciones para generar mallados en geometrías complejas, con la ventaja de que presenta una interfaz de usuario simple y requiere pocos parámetros de entrada para producir mallas de superficie y volumen de alta calidad (Itasca Consulting Group, 2009)

Dentro de las funciones principales de Griddle, es facilitar la creación de mallas a partir de superficies y volúmenes, realizar intersecciones y fusiones de distintas superficies, remallados y refinados de superficies no estructuradas y optimizaciones de mallas, con la ventaja de también tener una facilidad para exportar los modelos procesados a formatos que pueden ser utilizados en otros programas tales como FLAC3D. Un ejemplo de mallado a partir de Griddle es el representado en la Figura 13, donde se realiza para una central eléctrica subterránea.

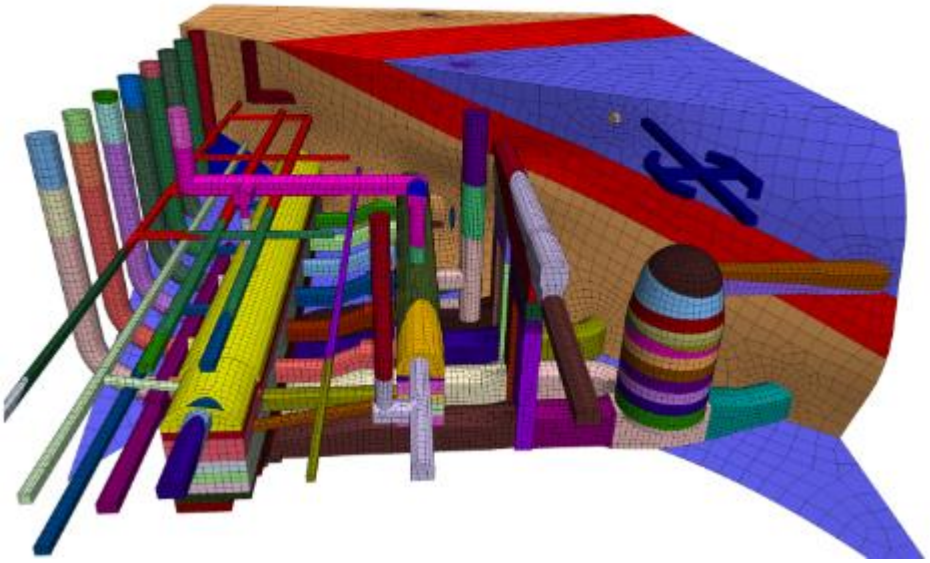


Figura 13: Malla de volumen FLAC3D final construida con Rhino y Griddle para una central eléctrica subterránea (Itasca Consulting Group, 2009).

Entonces, Griddle actúa como un complemento de Rhinoceros, de manera que el último permite la construcción de la geometría del modelo con distintas posibilidades de herramientas y opciones, mientras que Griddle proporciona herramientas adicionales para garantizar mallas de superficie y mallas de volumen de buena calidad con zonas hexaédricas o tetraédricas para FLAC3D.

3 METODOLOGÍA

Para poder realizar la evaluación del parámetro de resistencia de la roca se realizan simulaciones de un modelo dinámico en FLAC3D, el cual consta de un ensayo Split-Hopkinson Pressure Bar, donde la muestra se compone de cierta litología, la cual varía en los distintos casos de estudio.

En primer lugar se caracterizan las condiciones de modelamiento y cada uno de los casos a considerar. Se consideran cinco litologías distintas; CMET, caliza, dolomía, andesita y granodiorita. Sus propiedades mecánicas se verán en detalle en el inciso respectivo.

Definidas las condiciones de modelamiento, se lleva a cabo la primera parte de la modelación numérica, donde se considera un modelo constitutivo elástico estático, el cual es utilizado para realizar la calibración y validación de los experimentos mediante modelación numérica, para así comparar estos resultados con los obtenidos teóricamente. Para realizar estas calibraciones, se usan ensayos uniaxiales de muestras de roca para cada una de las litologías, verificando así que el modelamiento funcione de forma correcta.

En la segunda parte de la modelación numérica, se considera una modelación dinámica. Este tipo de modelos se utilizan para simular el comportamiento de materiales bajo cargas dinámicas a alta velocidad, como lo son los eventos sísmicos. Se realizan calibraciones usando el ensayo dinámico Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB), el cual es utilizado para medir propiedades mecánicas de materiales bajo cargas dinámicas y, una vez validados los resultados, se realizan simulaciones con distintas litologías y a diferentes velocidades de impacto, ángulo de fricción y cohesión, con el objetivo de lograr entender el comportamiento de cada muestra frente a una perturbación dinámica.

En la Figura 14 se presenta un esquema que resume los pasos a seguir en la metodología.

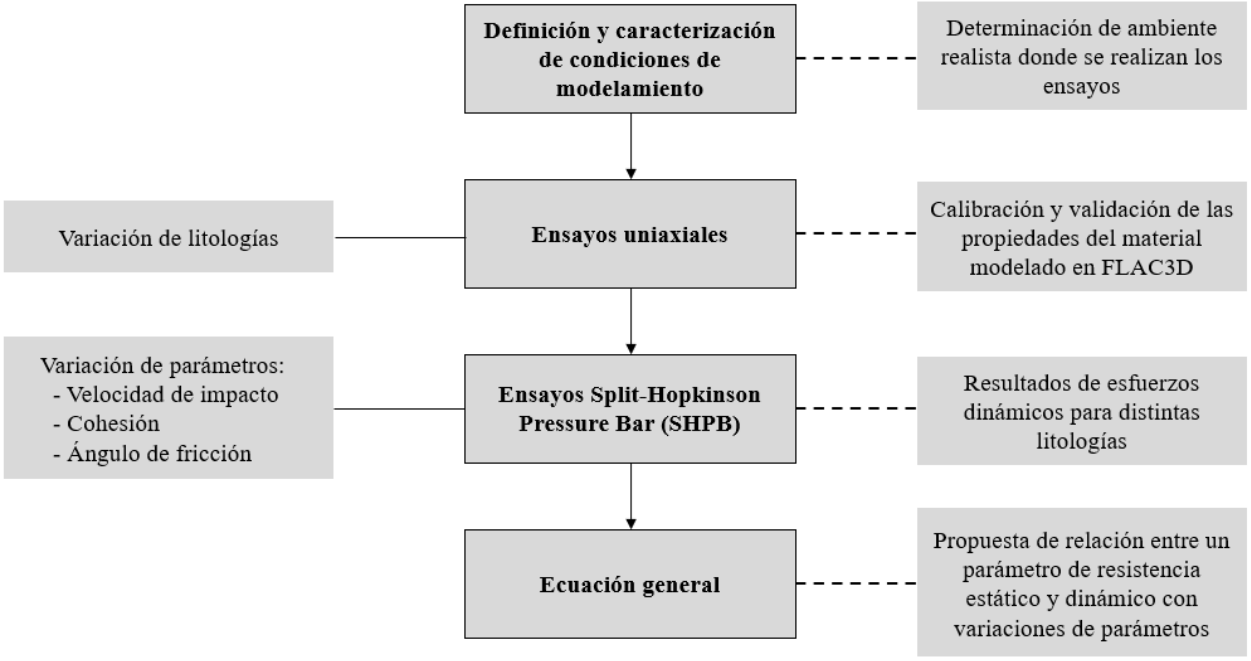


Figura 14: Esquema de metodología a implementar.

3.1 DEFINICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CONDICIONES DE MODELAMIENTO

En primer lugar, es necesario conocer cuales son las características que presentará el modelo a realizar, definir las litologías y sus propiedades geomecánicas, de manera que el modelo sea lo más representativo posible de la realidad.

Se trabaja con cinco litologías diferentes, las cuales son:

- CMET
- Caliza
- Dolomita
- Andesita
- Granodiorita

A continuación, se presentan sus propiedades mecánicas, con las que, posteriormente, se llevará a cabo las calibraciones pertinentes.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de las litologías en estudio.

Propiedad	CMET	Caliza	Dolomita	Andesita	Granodiorita	
Módulo de Young	35	45	31	37	29	[GPa]
Coeficiente de Poisson	0,22	0,25	0,17	0,27	0,24	-
Densidad	2820	2690	2580	2640	2600	[kg/m^3]
Ángulo de fricción	20	45	31	46	51	[°]
Cohesión	32	22	20	25	18	[MPa]

3.2 ENSAYOS UNIAXIALES

Los ensayos uniaxiales tienen un papel importante en la determinación de los parámetros estáticos de un macizo rocoso, ya que permiten determinar la resistencia uniaxial no confinada de la roca, la resistencia a la compresión simple (UCS) y las constantes elásticas, tales como el módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

Este ensayo consiste en colocar una probeta cilíndrica o prismática en una prensa, como se refleja en la Figura 15, y romperla a compresión, sin ningún confinamiento lateral, es decir, donde el esfuerzo principal mínimo (σ_3) es igual a cero.



Figura 15: Ensayo de compresión uniaxial (Extraída de Prodyogi).

En máquinas de ensayo convencionales, la variable de control es la fuerza, la cual puede ser controlada en su magnitud y velocidad de aplicación. Las deformaciones axiales que se van produciendo en

la probeta se miden a través de bandas extensométricas. Durante el ensayo, se van registrando las curvas esfuerzo-deformación axial de la probeta. La Figura 16 ilustra el resultado típico de una curva esfuerzo-deformación en un ensayo de compresión simple realizado en laboratorio.

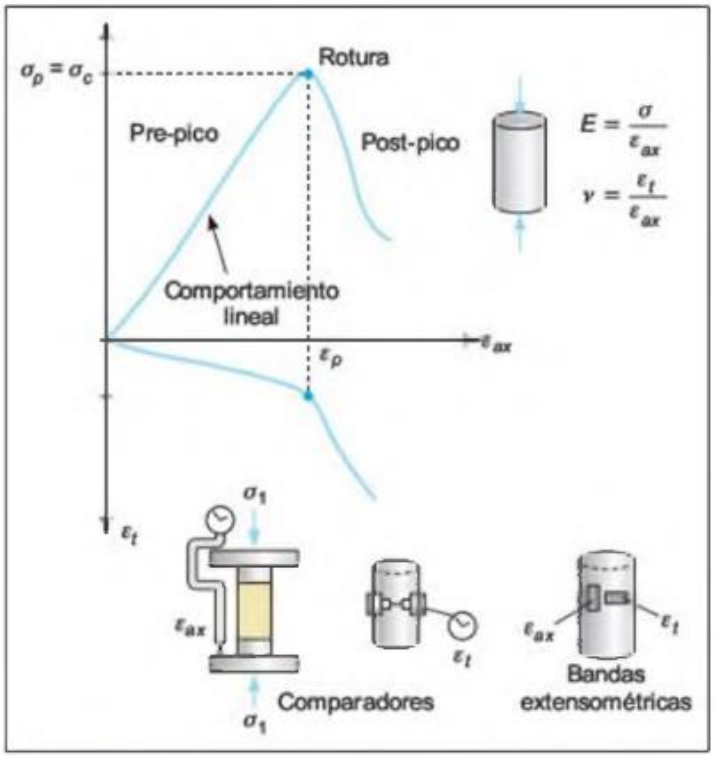


Figura 16: Curvas esfuerzo-deformación obtenidas de un ensayo de compresión simple (González de Vallejo, 2002).

Las curvas esfuerzo-deformación que se obtienen en este ensayo, presentan una pendiente ascendente hasta alcanzarse la resistencia peak y una pendiente descendente que refleja la pérdida de resistencia de la roca. El valor de la fuerza máxima que soporta la probeta sobre el área sobre la que se aplica esta corresponde a su resistencia a la compresión simple. Este parámetro depende de la forma y tamaño de la probeta, del contenido en humedad, de la litología, entre otras cosas (González de Vallejo, 2002).

Para efectos de esta memoria de título, se utiliza el programa FLAC3D para realizar esta calibración, comparando los resultados obtenidos mediante la modelación numérica con los resultados de experimentos reales.

Para realizar lo anterior, primero se genera un modelo numérico tridimensional en FLAC3D, ilustrado en la Figura 17, el cual representa la muestra que estará bajo cargas uniaxiales. A este modelo se le aplican las propiedades físicas y mecánicas de cada litología que se estudia, replicando así las condiciones reales de un ensayo uniaxial. En este caso, la probeta consta de un cilindro de 5 cm de altura y un radio de 2,5 cm.

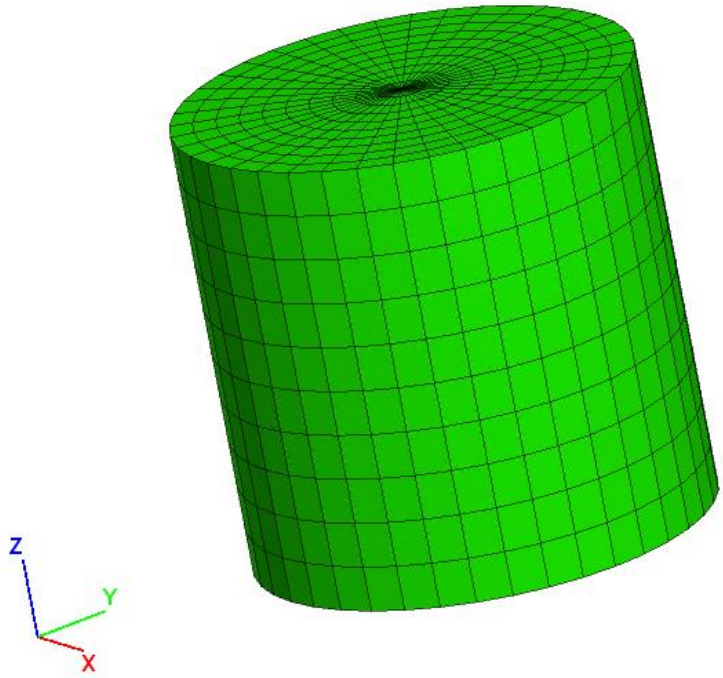


Figura 17: Probeta utilizada en FLAC3D para ensayos uniaxiales.

Luego, utilizando el software y, a través de códigos en lenguaje FISH, se aplican cargas uniaxiales controladas a la muestra, por la parte inferior y superior de esta, para así simular un ensayo uniaxial realizado en laboratorio.

La validación de ensayos uniaxiales es un paso crucial que tiene como objetivo comparar los resultados teóricos con los obtenidos de la simulación para asegurar que el modelo numérico reproduczca de forma adecuada el comportamiento de la roca bajo condiciones de compresión uniaxial.

Para proceder con lo anterior, se debe ingresar las propiedades mecánicas específicas de la litología la cual se desea validar. Estas propiedades incluyen la densidad, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, ángulo de fricción y cohesión. Además, se deben establecer condiciones de borde, las cuales se encargan de restringir los desplazamientos de la muestra mientras se aplican esfuerzos compresivos en dirección axial de la muestra. Luego, se ejecuta la simulación hasta alcanzar el punto de falla de la muestra y se registran los valores de esfuerzo en su punto más alto y la deformación a la que ocurre.

Para que los ensayos uniaxiales realizados mediante modelación numérica se consideren válidos, es necesario que los valores de esfuerzo registrados sean acordes a los obtenidos en un ensayo de compresión uniaxial de laboratorio. Para esto, se toma como referencia la Tabla 3 y Tabla 4, las cuales contienen rangos de valores de resistencia a la compresión simple de las litologías consideradas en este estudio.

3.3 ENSAYOS SPLIT-HOPKINSON PRESSURE BAR

Los ensayos con barra de Hopkinson, como se explicó en el marco teórico, representan un método que permite determinar propiedades de los materiales en condiciones dinámicas, siendo utilizado cada vez con mayor frecuencia. La carga dinámica se aplica en la muestra de roca mediante una barra golpeadora impulsada por una pistola de aire y una barra incidente y transmitida que comprimen la muestra.

Las características de falla y el esfuerzo dinámico son capturados por el test Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB), como se muestra en la Figura 18.

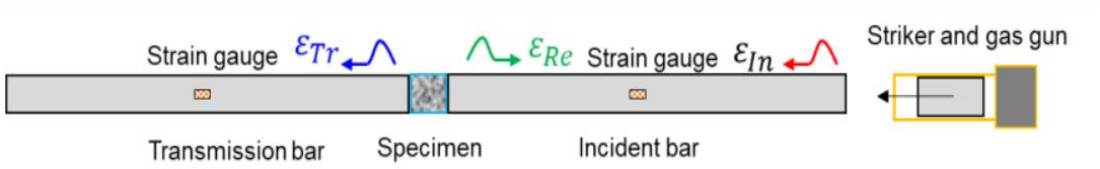


Figura 18: Esquema de los componentes del SHPB (Gonzalez de Vallejo, 2002)

La calibración dinámica del modelo numérico se llevó a cabo mediante ensayos Split-Hopkinson simulados en FLAC3D, lo que permite capturar las respuestas dinámicas de las rocas y ajustar el modelo para reflejar con precisión tales condiciones.

Para realizar el ensayo, se desarrolla el modelo reflejado en la Figura 19, que incorpora las características específicas de la geometría del ensayo Split-Hopkinson, incluyendo la implementación de las barras de Hopkinson descritas anteriormente y una carga para lograr simular la propagación de ondas de esfuerzos a través de la muestra de la roca.

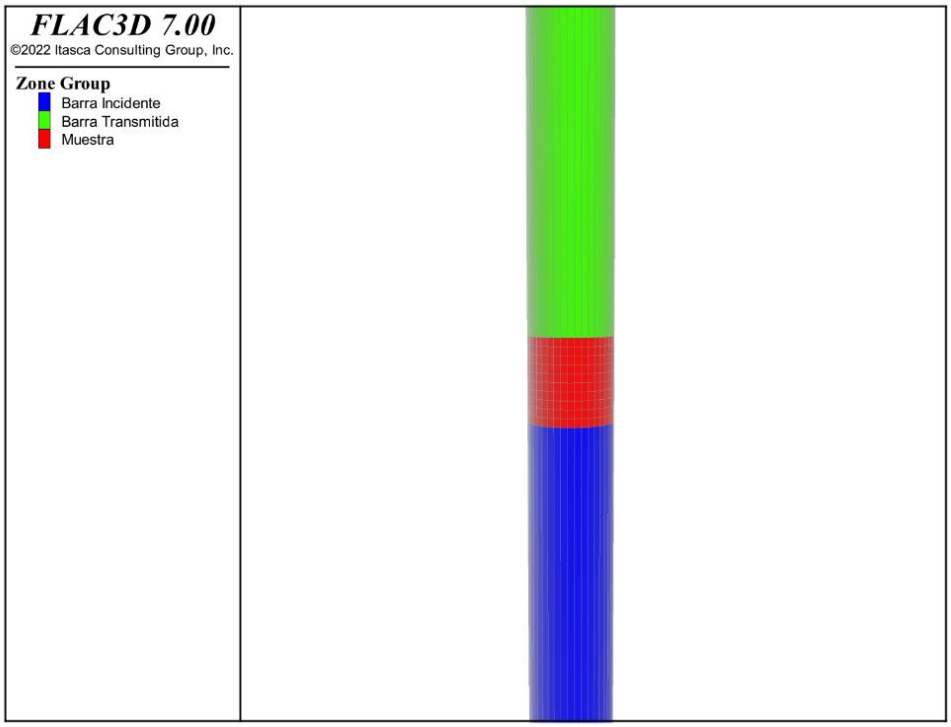


Figura 19: Modelo numérico tipo Hopkinson en FLAC3D.

Luego, se realiza la configuración del ensayo Split-Hokpinson, con parámetros que imitan las condiciones experimentales. Se aplican pulsos dinámicos en las barras de Hopkinson que serán transmitidas por las barras, para así generar ondas de estrés en la muestra de roca y luego registrar las respuestas dinámicas. Para este caso en particular, las propiedades de las barras golpeadora, incidente y transmitida se ven reflejadas en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades de las barras golpeadora, incidente y transmitida.

Propiedad	**Valor**	**Unidad**
Longitud	2,5	[m]
Diametro	0,05	[m]
Densidad	7850	[kg/m^3]
Módulo de Young	210	[GPa]
Velocidad de onda	5200	[m/s]

Los resultados obtenidos, los cuales incluyen velocidades de onda, de esfuerzos y deformaciones dinámicas, se analizan para extraer esfuerzos peak dinámicos. Así, se van registrando estos datos para obtener una relación entre la velocidad de impacto de parte de la barra golpeadora y el esfuerzo peak dinámico obtenido en el modelo para cada muestra de cada litología.

Para que un ensayo Split-Hopkinson se considere válido, se debe realizar un balance de esfuerzos, que se lleva a cabo comparando los esfuerzos incidentes, reflejados y transmitidos obtenidos durante los ensayos, asegurando que el equilibrio de esfuerzos se mantenga durante el proceso.

El equilibrio se alcanza una vez que el esfuerzo dinámico incidente más el reflejado es equivalente al esfuerzo dinámico transmitido, como se puede ver en la Figura 20.

Estos esfuerzos normalmente son medidos a cierta distancia de la muestra; para el caso de la barra incidente, el esfuerzo incidente y reflejado se mide aproximadamente a 1.2 m de la muestra, desde la interfaz entre la barra y la muestra, mientras que para el caso de la barra transmitida, el esfuerzo se mide a 1 m desde la interfaz entre la barra y la muestra.

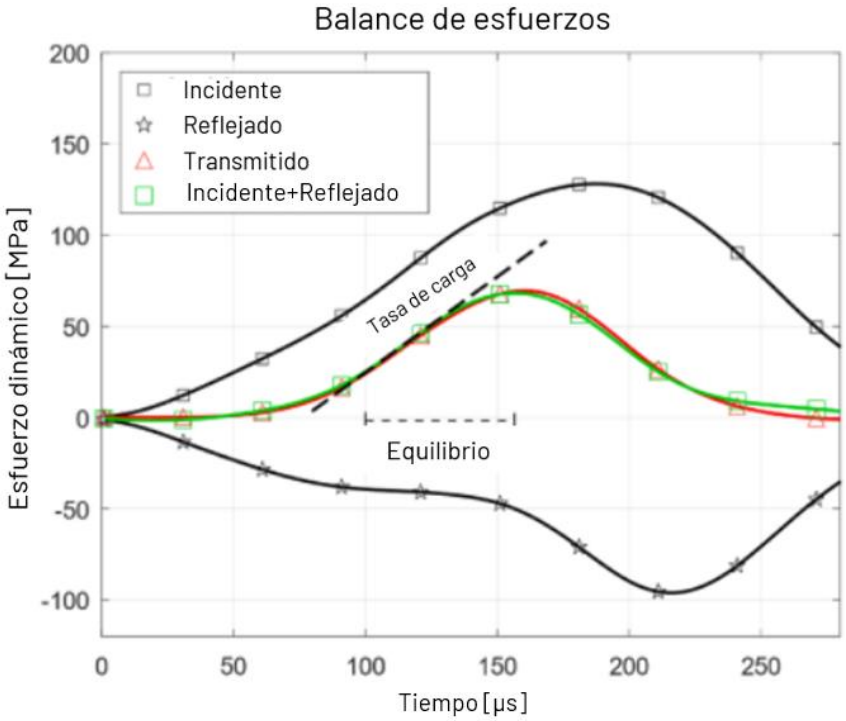


Figura 20: Validación de ensayo Split-Hopkinson mediante balance de esfuerzos dinámicos para las ondas incidente, transmitida y reflejada (Robbiano et al., 2022).

Para complementar la validación del ensayo Split-Hopkinson, se consideraron los resultados obtenidos en ensayos reales, presentados en la Figura 21. De esta manera, se compararon con los obtenidos en las simulaciones, donde resultados de esfuerzo dinámico similares a los obtenidos en la figura asegurarían la validación del ensayo en modelación numérica.

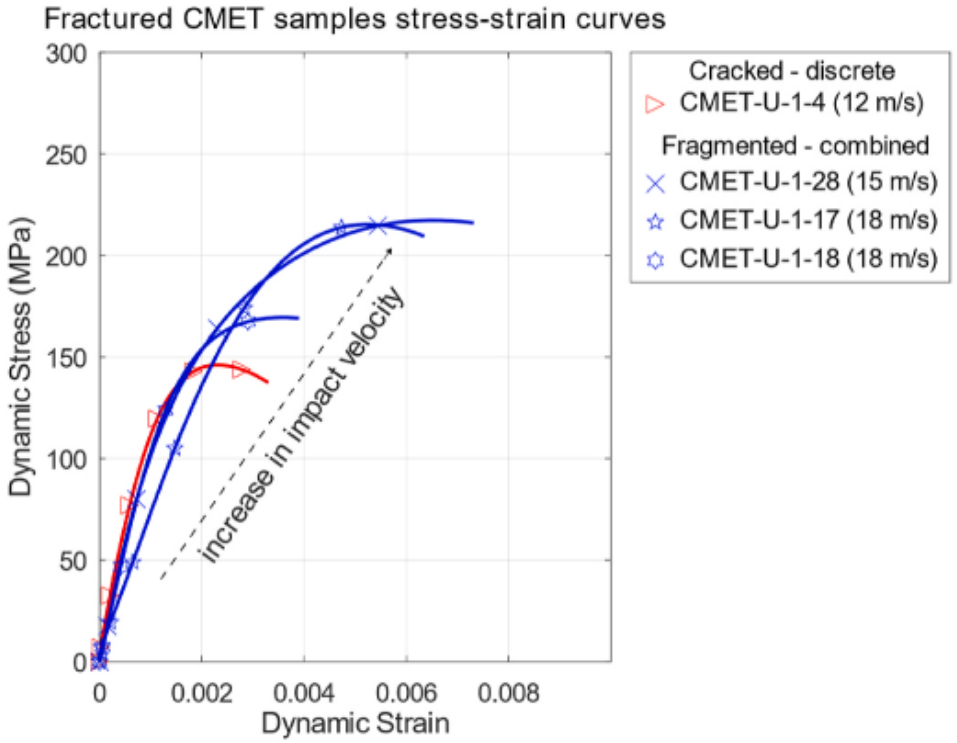


Figura 21: Curvas esfuerzo-deformación para muestras de CMET (Robbiano et al., 2022).

3.4 ECUACIÓN GENERAL

Realizadas las validaciones de los ensayos, se llevan a cabo las simulaciones usando el modelo numérico del ensayo Split-Hopkinson Pressure Bar, donde se estudian las cinco litologías mencionadas anteriormente y un rango de nueve velocidades de impacto diferentes; desde 10 a 18 m/s.

En estas se realizan variaciones en la velocidad de impacto, en la cohesión y en el ángulo de fricción de la litología. Además, se debe considerar que cada litología tiene un módulo de Young, un coeficiente de Poisson y una densidad respectiva. Con cada una de las simulaciones se realiza una base de datos, la cual contiene tanto los parámetros mecánicos de la roca descritos anteriormente como las velocidades de impacto a las cuales fueron sometidas las muestras en el modelo numérico.

Con esto, es posible realizar una regresión lineal múltiple, la cual permite estudiar la posible relación entre varias variables independientes (en este caso, los parámetros mecánicos y la velocidad de impacto) y una variable dependiente (el UCS dinámico). Esto tiene como objetivo obtener una ecuación general que permita relacionar esta variable dependiente con el UCS estático de una litología, y que dependa también de la velocidad de impacto que se le aplica a la muestra en este ensayo dinámico.

4 DESARROLLO

4.1 VALIDACIÓN DE ENSAYOS UNIAXIALES

Se usó la siguiente tabla como referencia para validar que los valores alcanzados en la modelación fueran acordes con los que se ven en un ensayo de compresión uniaxial de laboratorio.

Tabla 3: Parámetros resistentes de roca intacta (González de Vallejo, 2002).

Roca intacta	Resistencia a compresión simple [MPa]	
	Valores medios	Rango de valores
Andesita	210-320	100-500
Caliza	80-140	60-200
Dolomita	90-250	65-350
Granodiorita	170-350	100-300

Roca intacta	Cohesión [MPa]	Ángulo de fricción [°]
Andesita	28	45
Caliza	5-40	35-50
Dolomita	22-60	25-35
Granodiorita	15-50	45-58

Tabla 4: Valores típicos de resistencia a la compresión uniaxial de varias rocas (Attewell & Farmer, 1976).

Litología	Resistencia a compresión simple [MPa]
Caliza	30-250
Dolomita	30-250
Granodiorita	100-250

En el caso de la litología perteneciente al CMET, el rango de valores correspondiente a su UCS está entre 92,5 ± 14 MPa (Robbiano et al., 2022). Al realizar el ensayo uniaxial correspondiente mediante modelación numérica, se obtuvo el gráfico mostrado en la Figura 37 del Anexo, donde se logra apreciar que el valor obtenido para el esfuerzo de compresión uniaxial es de 91 MPa.

La caliza, roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por calcita, tiene como rango de valores correspondiente a su UCS entre 60 y 200 MPa, según la Tabla 3. Realizado el ensayo uniaxial correspondiente, se obtiene el gráfico esfuerzo-deformación ilustrado en la Figura 38 del Anexo, en la cual se puede apreciar que el valor alcanzado por el esfuerzo de compresión uniaxial es de 106 MPa.

La dolomita, mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio, tiene como rango de valores correspondiente a su UCS entre 65 y 350 MPa, según la Tabla 3. Una vez simulado el ensayo uniaxial en FLAC3D correspondiente a esta litología, el valor arrojado para el esfuerzo de compresión uniaxial es de 71 MPa, reflejado en la Figura 39.

La andesita, roca ígnea extrusiva de grano fino, tiene como rango de valores correspondiente al UCS de entre 100 y 500 MPa, según la Tabla 3. Al colocar sus propiedades en la muestra y realizar la simulación, como se puede ver en la Figura 40, se obtuvo un valor correspondiente al esfuerzo de compresión uniaxial de 123 MPa.

La granodiorita, roca ígnea plutónica muy parecida al granito, tiene como rango de valores correspondiente al UCS de entre 100 y 300 MPa, según la Tabla 3. Una vez realizado el ensayo, observa en la Figura 41 que se obtiene el valor de 102 MPa.

Tabla 5: Resultados de ensayos de compresión uniaxial.

Litología	**UCS [MPa]**	**Deformación Crítica**
CMET	91	0,000026
Caliza	106	0,000023
Dolomita	71	0,000022
Andesita	123	0,000033
Granodiorita	102	0,000036

La Tabla 5 resume los resultados obtenidos en el ensayo de compresión uniaxial para cada una de las litologías consideradas en el presente estudio, donde cabe destacar que la litología que obtuvo un mayor valor fue la Andesita con 123 MPa, mientras que la que obtuvo un menor valor de UCS fue la Dolomita, con 71 MPa.

Respecto a los resultados obtenidos para la validación de ensayos uniaxiales, se logra observar en la totalidad de los casos que el comportamiento del gráfico esfuerzo-deformación corresponde a un elasto-plástico perfecto, el cual está caracterizado por una fase elástica inicial donde la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal. Luego de esta zona, se sigue por una meseta que identifica a la región plástica, donde el esfuerzo se mantiene constante mientras la deformación aumenta. Este tipo de comportamientos es menos frecuente y se caracteriza porque no hay un endurecimiento del material por deformación, implicando también la aparición de deformaciones irreversibles. Se analiza de los gráficos que hay una pendiente en la zona elástica que es acorde a los valores del módulo de Young para cada litología, lo que quiere decir que estas siguen la ley de Hooke.

La totalidad de los ensayos para las litologías seleccionadas cumple con los rangos de valores de resistencia a la compresión simple, expuestos en la Tabla 3 y comprobados en la Tabla 4, lo cual valida los modelos numéricos realizados del ensayo de compresión uniaxial.

4.2 VALIDACIÓN DE ENSAYOS SPLIT-HOPKINSON PRESSURE BAR

La Figura 22 representa los resultados obtenidos para una muestra de CMET a distintas velocidades de impacto. La curva verde representa el ensayo en modelación numérica con una velocidad de impacto de

18 m/s, la curva cian corresponde a una velocidad de impacto de 15 m/s, y finalmente, la curva roja representa una velocidad de impacto de 12 m/s.

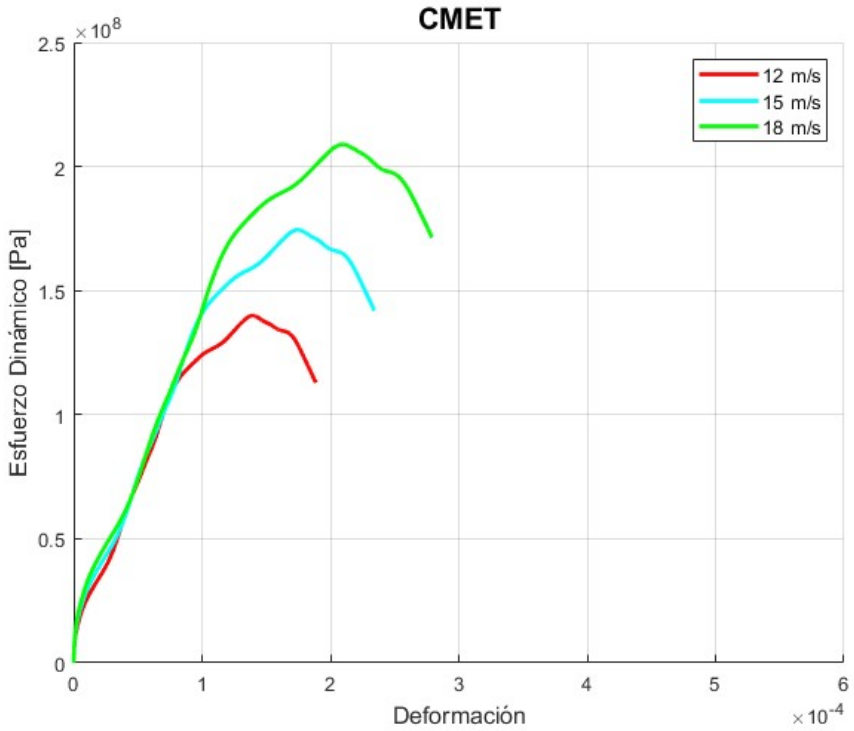


Figura 22: Curvas esfuerzo-deformación para una muestra de CMET a distintas velocidades de impacto.

Al comparar los resultados obtenidos por modelación numérica con los obtenidos en laboratorio, ilustrados en la Figura 21, se logra apreciar una gran semejanza en los valores de esfuerzo dinámico obtenidos a cada velocidad de impacto, lo que representa un acercamiento a la validación de los modelos numéricos realizados del ensayo Split-Hopkinson.

La Figura 23 muestra el gráfico de balance de esfuerzos obtenido de las simulaciones, donde se representan las ondas de esfuerzo incidente, reflejado y transmitido en función del tiempo.

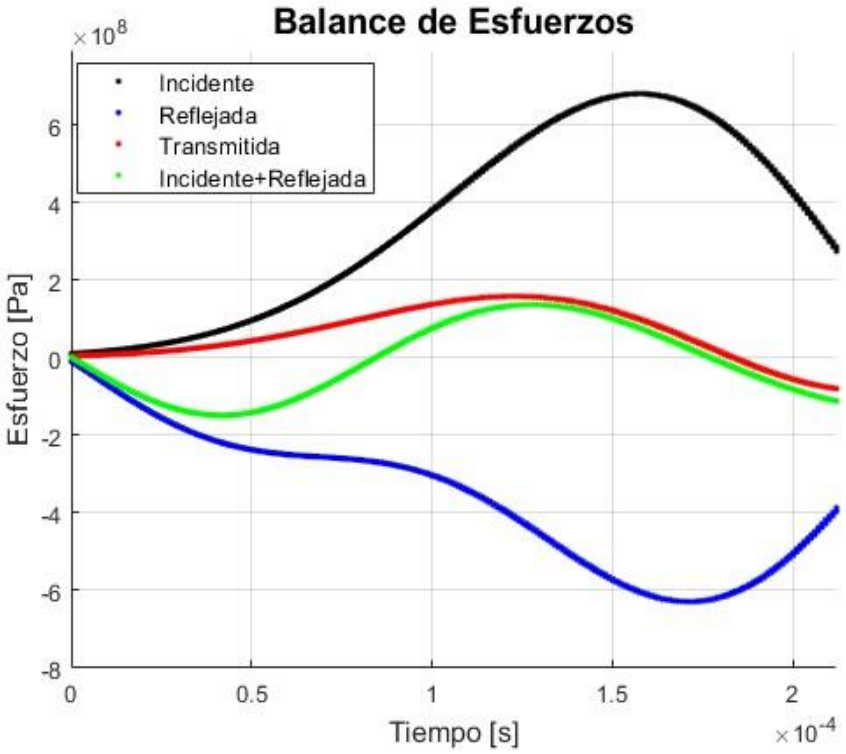


Figura 23: Balance de esfuerzos obtenido para el ensayo dinámico.

La curva negra representa el esfuerzo incidente que se aplica a la barra. Se puede ver un aumento de este hasta alcanzar un peak de aproximadamente 700 MPa en 1.5×10^{-4} s. La curva azul corresponde al esfuerzo reflejado en la interfaz entre la barra incidente y la muestra y tiene valores negativos. La curva roja es el esfuerzo transmitido a través de la muestra y tiene magnitudes menores a la incidente. Finalmente, la curva verde muestra la suma entre el esfuerzo incidente y reflejado, la cual tiene un comportamiento similar a la curva roja en el tramo final.

Al analizar el comportamiento de los esfuerzos incidente, reflejado y transmitido en la Figura 23, se puede apreciar que la curva que representa el esfuerzo transmitido es menor que la correspondiente al esfuerzo incidente, lo que es coherente ya que hay parte de la energía que es absorbida por la muestra y otra parte que se refleja. También se observó que la curva que representa la suma entre el esfuerzo incidente y el esfuerzo reflejado no es del todo igual que la correspondiente al esfuerzo transmitido, como la que se aprecia en la Figura 20. Si bien se puede observar una coincidencia al final de la onda transmitida, al principio se logra apreciar que hay una pequeña discrepancia. Esta podría deberse por varios factores, pero principalmente porque existe una superposición de ondas generadas con la onda reflejada, lo que puede tener relación con el código o el software como tal. Otro factor que podría relacionarse a esta diferencia es la aplicación de condiciones de borde no ideales o la adherencia imperfecta en la interfaz entre la barra incidente y la muestra, la cual podría afectar en la forma y propagación de las ondas de esfuerzo.

Si bien la discrepancia visible no invalida la precisión del modelo numérico, sería ideal el hecho de considerar y ajustar estos factores en simulaciones futuras, donde se pueden realizar mejoras en la aplicación de condiciones de borde y la alineación de la muestra para reducir estas diferencias.

5 RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente, se realizan simulaciones en el contexto de un ensayo tipo Hopkinson, el cual consta de una barra golpeadora impulsada que percute en una barra incidente, la cual comprime, junto con una barra transmitida, una muestra que se encuentra entre ambas. Se presentan y comparan los resultados obtenidos tanto experimentalmente mediante modelamiento numérico como por la ecuación obtenida a través de regresión múltiple.

Para lograr la comprensión de lo que implica cada litología al presentarse una perturbación dinámica en un macizo rocoso, se llevan a cabo distintos casos de estudio, donde se realizan variaciones en el tipo de roca que compone el macizo rocoso. Se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones para cada litología considerada en este estudio.

5.1 ENSAYOS ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Se realiza la modelación de ensayos dinámicos en FLAC3D por cada litología, donde se varía la velocidad de impacto en la probeta para analizar cual es la reacción de esta. Se usó un rango desde 0 m/s a 25 m/s, considerando también que se modelaron 5 litologías diferentes.

En las Figuras 24, 25 y 26, se muestran ensayos dinámicos tipo Split-Hopkinson realizados mediante modelamiento numérico, al cual se le aplican velocidades de impacto de 10, 14 y 18 m/s, respectivamente. Se pueden observar las curvas que representan los resultados obtenidos para cada litología. La caliza, representada por la curva celeste, alcanzó valores del UCS dinámico de 158, 220 y 282 MPa. La curva morada corresponde a la andesita, la cual llega a un valor de UCS dinámico de 123, 171 y 219 MPa. Por otro lado, el CMET alcanza los 117, 163 y 209 MPa, siendo esta litología representada por la curva roja. La curva azul refleja el comportamiento de la granodiorita, la cual alcanza su UCS dinámico a los 108, 151 y 194 MPa. Finalmente, la curva verde alcanza los 107, 150 y 192 MPa, siendo esta la correspondiente a la dolomita.

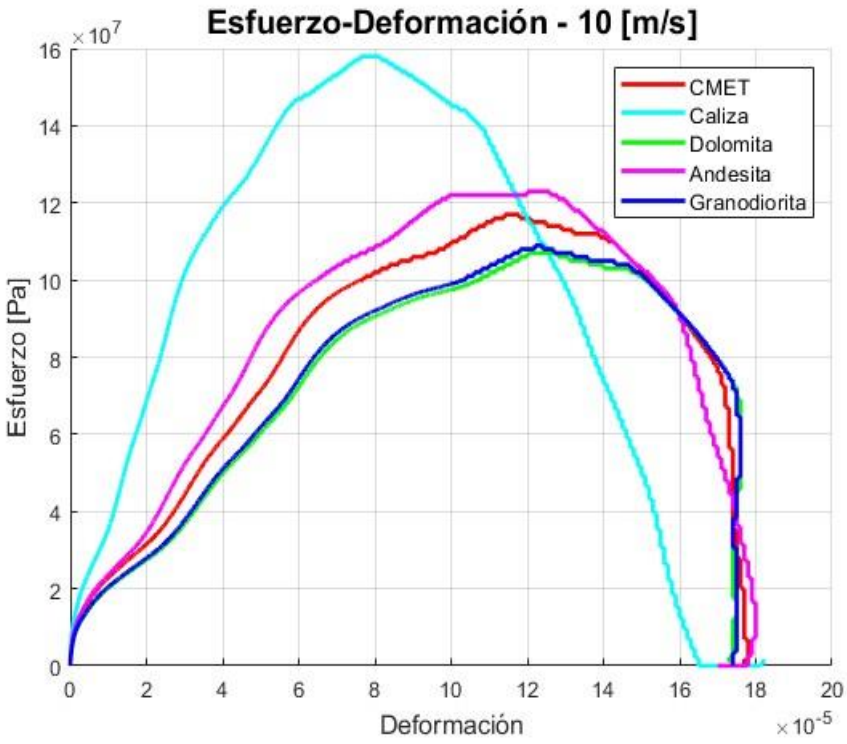


Figura 24: Ensayo dinámico tipo Hopkinson para las litologías consideradas en el estudio a una velocidad de impacto de 10 m/s.

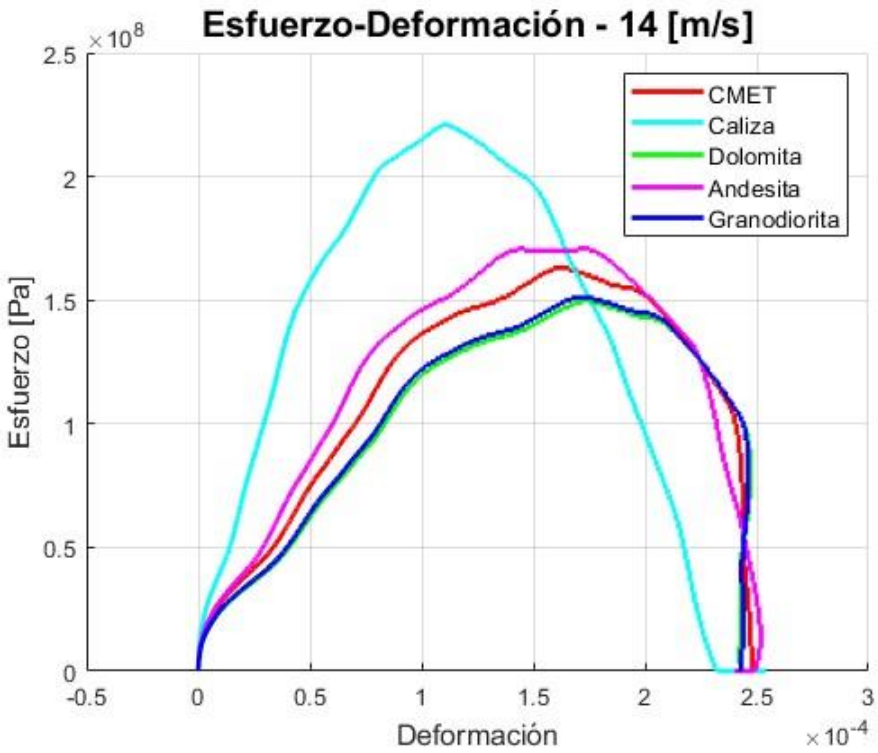


Figura 25: Ensayo dinámico tipo Hopkinson para las litologías consideradas en el estudio a una velocidad de impacto de 14 m/s.

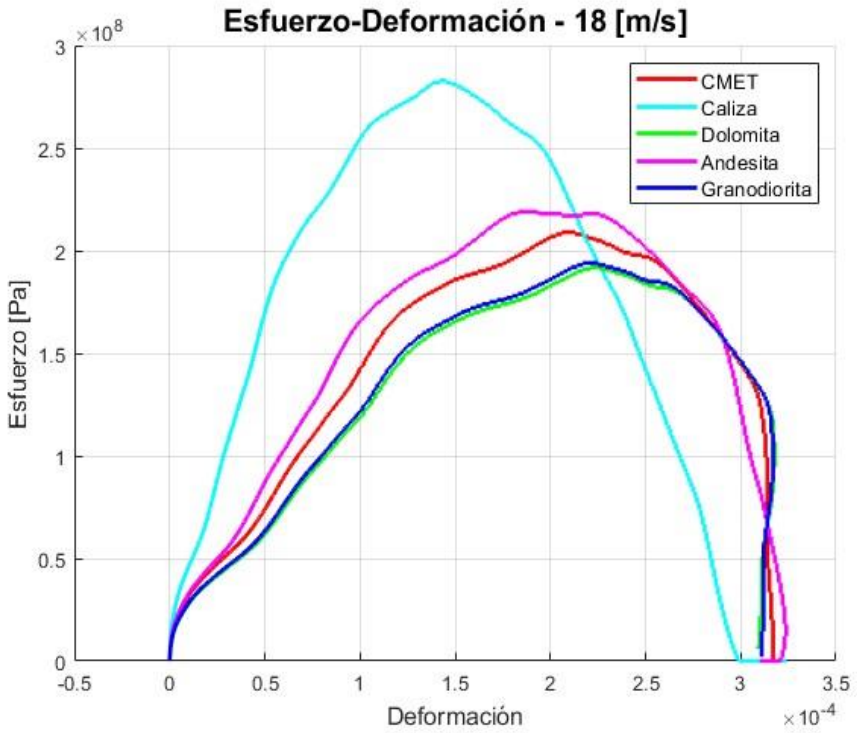


Figura 26: Ensayo dinámico tipo Hopkinson para las litologías consideradas en este estudio a una velocidad de impacto de 18 m/s.

5.2 EFECTO DE PARÁMETROS EN EL ESFUERZO DINÁMICO

Junto con la obtención de los gráficos esfuerzo-deformación, es posible también dar cuenta del efecto que tienen algunos parámetros mecánicos intrínsecos de la roca en la evaluación del esfuerzo dinámico obtenido en el ensayo dinámico.

Dentro de los parámetros que fueron considerados para estudiar su efecto en el esfuerzo dinámico obtenido, está la velocidad de impacto aplicado en el ensayo, la cohesión y el ángulo de fricción.

En la Figura 27, se logra apreciar la relación entre el esfuerzo dinámico y la velocidad de impacto para las cinco litologías consideradas en el estudio, tomando en cuenta que este estudio se realizó con sus propiedades mecánicas por defecto por cada una, es decir, las presentadas en la Tabla 1. Se puede observar que todas las litologías tienen un incremento en el esfuerzo dinámico a medida que aumenta la velocidad de impacto. Además, la caliza presenta los mayores valores de esfuerzo dinámico en todo el rango de velocidades de impacto consideradas en el estudio, comenzando cerca de los 160 MPa a 10 m/s y alcanzando los 280 MPa a 18 m/s. Por otro lado, la dolomita junto con la granodiorita muestran valores de esfuerzo similares, las cuales comienzan en 107 MPa a 10 m/s y alcanzan aproximadamente 195 MPa a 18 m/s y, al mismo tiempo, son valores menores que en las demás litologías. Se ve también que cada litología tiene un aumento prácticamente fijo en el valor de esfuerzo dinámico; por cada aumento en 1 m/s, el CMET lo hace en 12 MPa, la caliza en 15 MPa, la dolomita en 10 MPa, la andesita en 12 MPa y la granodiorita en 11 MPa.

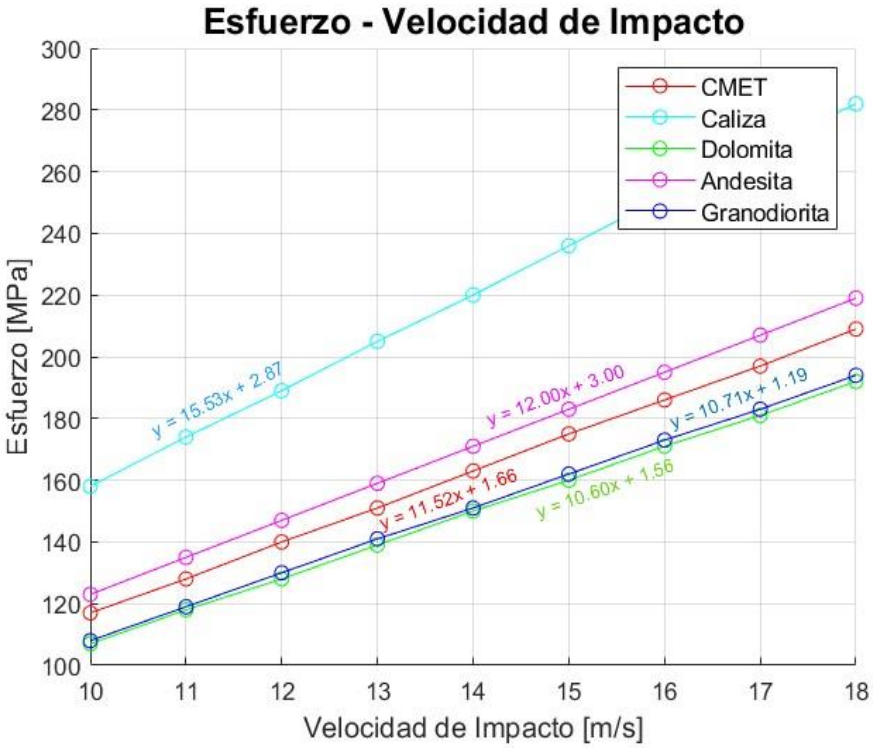


Figura 27: Esfuerzo dinámico obtenido con respecto a la velocidad de impacto para cada litología.

En la Figura 28, se puede ver un gráfico que relaciona el esfuerzo dinámico obtenido a una velocidad de impacto de 18 m/s con respecto a un cambio de cohesión para cada litología. Si bien no hay una variación en el valor de los esfuerzos dinámicos en la mayoría de las litologías, el caso del CMET es distinto, debido a que se ve un pequeño cambio. Con 20 MPa de cohesión, el valor de su UCS dinámico es 196 MPa, mientras que con 40 MPa de cohesión, su valor de UCS dinámico es de 209 MPa.

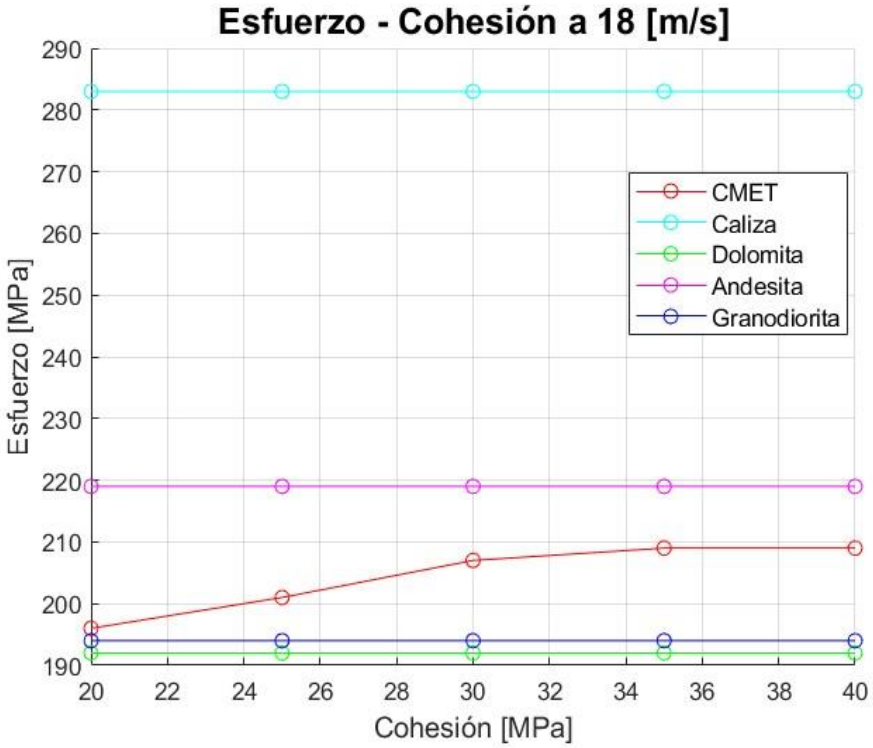


Figura 28: Esfuerzo dinámico obtenido con respecto a la cohesión para cada litología.

En la Figura 29, se expone el esfuerzo dinámico de cada litología a medida de que se varía el ángulo de fricción. Se logra apreciar que en el caso del CMET, la caliza y la andesita, no hay una variación en el valor del esfuerzo dinámico, manteniéndose constante a medida de que se incrementa el ángulo de fricción. En el caso de la dolomita, se ve un incremento desde 170 MPa con 20° hasta llegar a los 192 MPa con 40°. Por otro lado, para la granodiorita, se ve un incremento desde 186 MPa con 20° hasta 194 MPa con 40°.

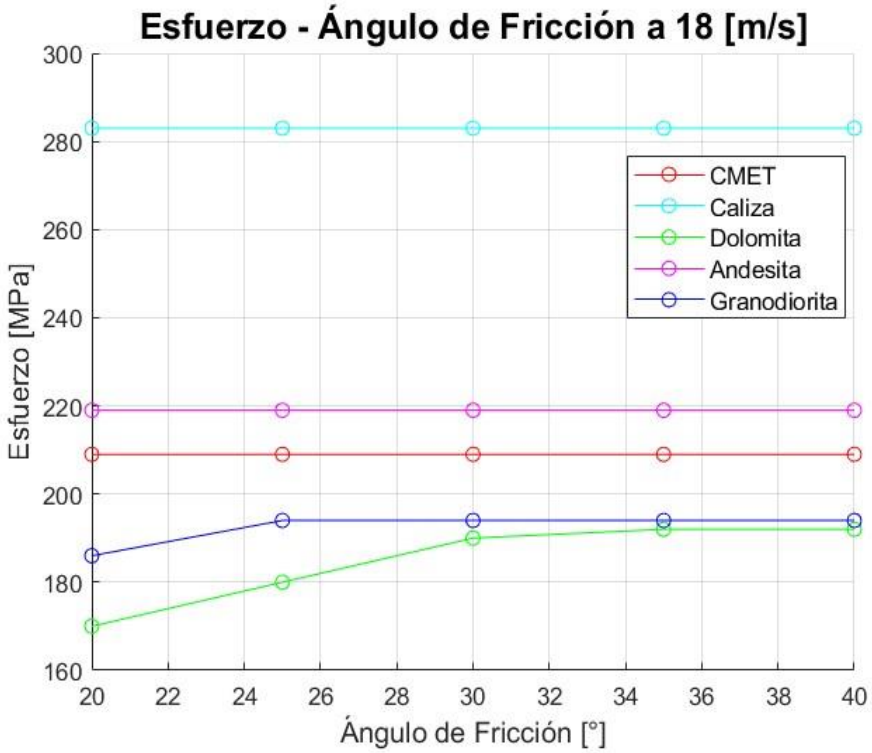


Figura 29: Esfuerzo dinámico obtenido con respecto al ángulo de fricción para cada litología.

5.3 ECUACIÓN GENERAL

Luego de presentar los resultados principales obtenidos del ensayo dinámico tipo Split-Hopkinson donde se realizaron variaciones en distintos parámetros, se presenta la ecuación obtenida mediante regresión múltiple.

$$UCSd = UCS + (0.22v_n + 0.03E + 0.76\nu)^{2.83}$$

Donde:

v_n: Velocidad de impacto del test [m/s]
E: Módulo de Young [GPa]
ν: Coeficiente de Poisson

Esta ecuación cuenta con un coeficiente de correlación de 0.97 y un coeficiente de determinación (R^2) ajustado de 0.94.

Para comprobar que la ecuación puede aproximarse a los valores obtenidos a través del ensayo dinámico mediante modelamiento numérico, se realizaron gráficos para cada litología, donde se realiza una comparación entre los UCS dinámicos obtenidos a cada velocidad de impacto a través de FLAC3D y a través de la ecuación obtenida por regresión múltiple.

En la Figura 30, se observa la comparación descrita anteriormente para la litología CMET, donde la línea contínua representa los resultados del ensayo dinámico y la línea discontínua muestra los resultados de la ecuación propuesta. Se puede ver que hay una pequeña diferencia en cada valor de esfuerzo obtenido por la ecuación con respecto al valor obtenido en el ensayo dinámico. También, se puede observar que, a medida que aumenta la velocidad de impacto, la recta que representa a la ecuación presenta una leve desviación de la correspondiente al ensayo.

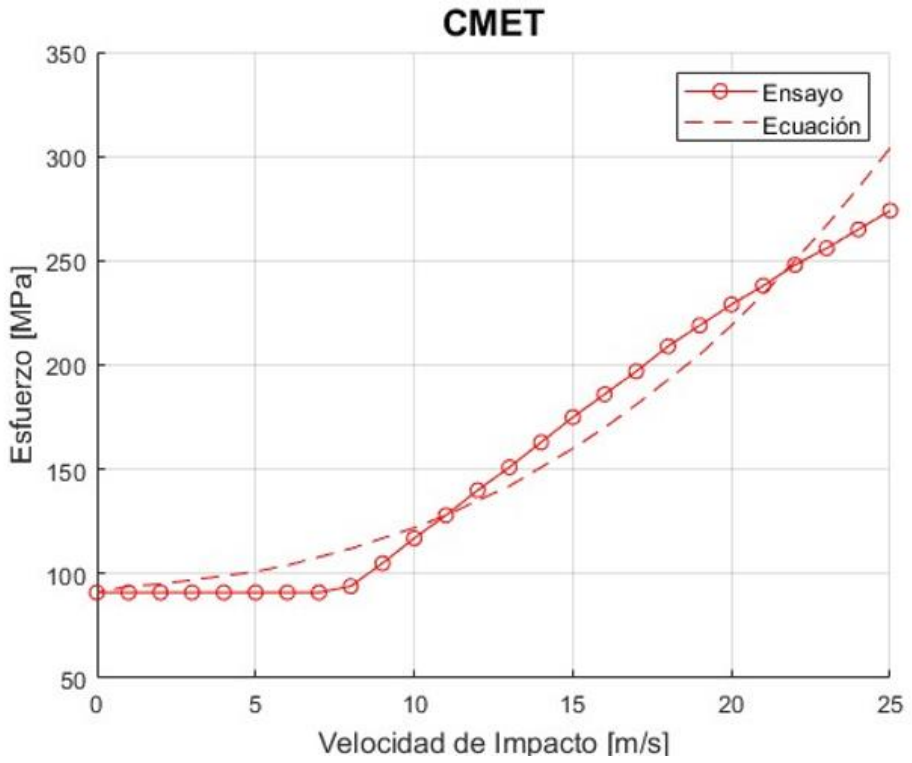


Figura 30: Esfuerzo dinámico obtenido mediante ensayo dinámico en FLAC3D y la ecuación general para el CMET.

En la Tabla 6 se muestra el porcentaje de error relativo que posee cada valor de esfuerzo obtenido con respecto al valor original, donde se puede ver que este no supera el 19%, por lo que no hay una diferencia significativa entre la ecuación propuesta y el modelo original, indicando así que la ecuación es una buena representación del modelo considerando esta litología.

Tabla 6: Errores relativos para esfuerzos dinámicos obtenidos mediante FLAC3D y la ecuación general para el CMET.

	Velocidad de impacto [m/s]	UCS dinámico FLAC3D [MPa]	UCS dinámico ecuación [MPa]	Error Relativo
CMET	0	91	93	-2%
	1	91	94	-3%
	2	91	95	-4%
	3	91	97	-6%
	4	91	99	-8%
	5	91	101	-11%
	6	91	104	-15%
	7	91	108	-19%
	8	94	112	-19%
	9	105	117	-11%
	10	117	122	-4%
	11	128	128	0%
	12	140	135	4%
	13	151	142	6%
	14	163	151	8%
	15	175	160	9%
	16	186	170	9%
	17	197	181	8%
	18	209	193	8%
	19	219	205	6%
	20	229	219	4%
	21	238	234	2%
	22	248	250	-1%
	23	256	267	-4%
	24	265	285	-7%
	25	274	304	-11%

En la Figura 31 se puede apreciar la diferencia obtenida entre los esfuerzos dinámicos del ensayo con los obtenidos por la ecuación general. Se ve que ambas rectas intersectan a los 189 MPa y 327 MPa aproximadamente, en una velocidad de impacto de 12 m/s y 21 m/s, respectivamente. En este rango, ambas líneas muestran una tendencia ascendente, lo que implica que al aumentar la velocidad de impacto, el esfuerzo también lo hace de manera proporcional, destacando también la buena correlación entre ambas rectas.

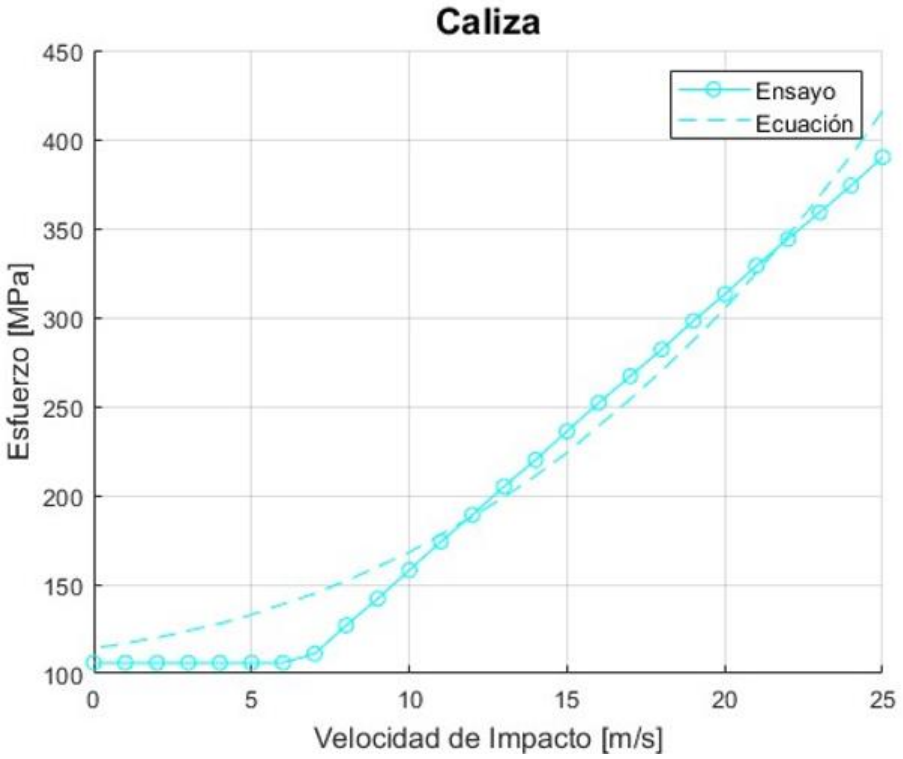


Figura 31: Esfuerzo dinámico obtenido para una muestra de caliza mediante un ensayo dinámico en FLAC3D y la ecuación general.

Los errores relativos mostrados en la Tabla 7 están por debajo del 31% para este rango de valores, siendo este último el error relativo correspondiente a una velocidad de impacto de 6 y 7 m/s.

Tabla 7: Errores relativos para esfuerzos dinámicos obtenidos mediante FLAC3D y la ecuación general para la caliza.

	Velocidad de impacto [m/s]	UCS dinámico FLAC3D [MPa]	UCS dinámico ecuación [MPa]	Error Relativo
Caliza	0	106	114	-8%
	1	106	117	-10%
	2	106	120	-14%
	3	106	124	-17%
	4	106	128	-2%
	5	106	133	-26%
	6	106	139	-31%
	7	111	145	-31%
	8	127	152	-20%
	9	142	160	-13%
	10	158	168	-7%
	11	174	178	-2%
	12	189	188	0%
	13	205	199	3%
	14	220	211	4%
	15	236	224	5%
	16	252	239	5%
	17	267	254	5%
	18	282	270	4%
	19	298	287	4%
	20	313	305	2%
	21	329	325	1%
	22	344	346	-1%
	23	359	368	-2%
	24	374	391	-5%
	25	390	416	-7%

En la Figura 32, se observa una comparación entre los valores de esfuerzo obtenidos para una muestra de dolomita en un rango de velocidades de impacto. Se puede observar que la ecuación sobreestima el valor obtenido en el ensayo dinámico, luego hay una coincidencia entre ambas cuando hay un esfuerzo dinámico de 90 MPa y a los 238 MPa, a velocidades de impacto de 8 y 23 m/s, respectivamente, para posteriormente sobreestimar el valor del test. También se ve una tendencia ascendente y una buena correlación entre ambas rectas.

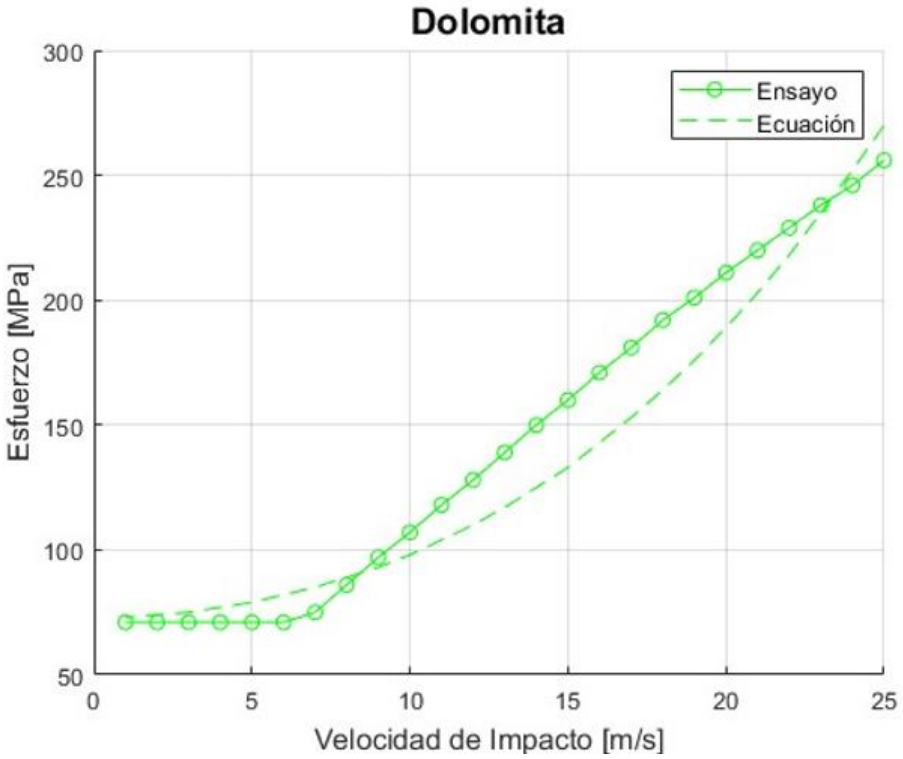


Figura 32: Esfuerzo dinámico obtenido para una muestra de dolomita mediante un ensayo dinámico en FLAC3D y la ecuación general.

En la Tabla 8 se observan las diferencias entre los valores del UCS dinámico obtenido por el modelo numérico y los correspondientes a la ecuación propuesta, con sus respectivos porcentajes de error relativo entre ambas. En el caso de la dolomita, el error no supera un 17%, siendo este último el correspondiente a una velocidad de impacto de 14 y 15 m/s.

Tabla 8: Errores relativos para esfuerzos dinámicos obtenidos mediante FLAC3D y la ecuación general para la dolomita.

	Velocidad de impacto [m/s]	UCS dinámico FLAC3D [MPa]	UCS dinámico ecuación [MPa]	Error Relativo
Dolomita	0	71	72	-2%
	1	71	73	-3%
	2	71	74	-4%
	3	71	75	-6%
	4	71	77	-9%
	5	71	79	-12%
	6	71	82	-16%
	7	75	85	-14%
	8	86	89	-4%
	9	97	93	4%
	10	107	98	8%
	11	118	104	12%
	12	128	110	14%
	13	139	117	16%
	14	150	125	17%
	15	160	133	17%
	16	171	143	16%
	17	181	153	15%
	18	192	164	14%
	19	201	176	12%
	20	211	189	10%
	21	220	203	8%
	22	229	218	5%
	23	238	235	1%
	24	246	252	-2%
	25	256	270	-6%

La Figura 33 muestra una comparación entre los valores de esfuerzo dinámico obtenidos a través del ensayo dinámico y a través de la ecuación propuesta para una muestra de andesita considerando el rango de velocidades de impacto mencionado anteriormente. Se logra observar una tendencia lineal ascendente, como en los gráficos anteriores pero, para este caso en particular, la ecuación propuesta sobreestima en gran parte del gráfico el valor real del ensayo dinámico realizado mediante modelamiento numérico, sobretodo en los valores más altos del rango de velocidades de impacto. En este caso, no existe coincidencia alguna entre los valores propuestos por la ecuación y aquellos obtenidos en las simulaciones.

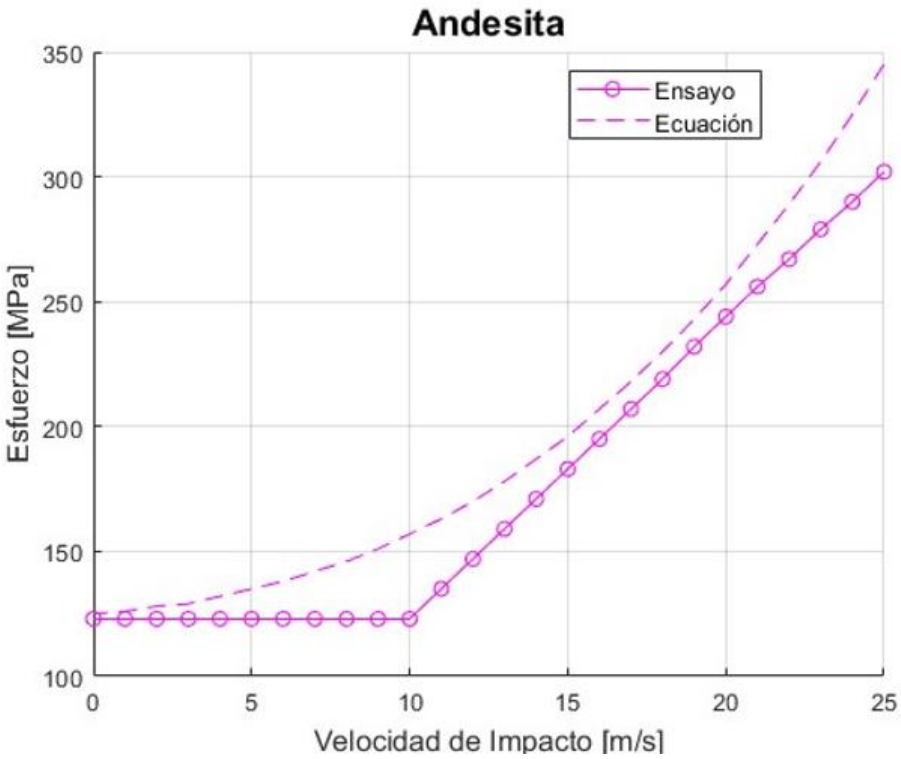


Figura 33: Esfuerzo dinámico obtenido para una muestra de andesita mediante un ensayo dinámico en FLAC3D y la ecuación general.

La Tabla 9 muestra principalmente el error relativo existente entre el UCS dinámico obtenido en FLAC3D y el UCS dinámico obtenido a través de la ecuación propuesta en este estudio, para una muestra de andesita. Como se puede apreciar, este valor está por debajo del 27% en el rango de velocidades de impacto consideradas en este estudio, siendo este último correspondiente a una velocidad de 10 m/s.

Tabla 9: Errores relativos para esfuerzos dinámicos obtenidos mediante FLAC3D y la ecuación general para la andesita.

	Velocidad de impacto [m/s]	UCS dinámico FLAC3D [MPa]	UCS dinámico ecuación [MPa]	Error Relativo
Andesita	0	123	125	-2%
	1	123	126	-3%
	2	123	128	-4%
	3	123	129	-5%
	4	123	132	-7%
	5	123	135	-9%
	6	123	138	-12%
	7	123	142	-15%
	8	123	146	-19%
	9	123	151	-23%
	10	123	157	-27%
	11	135	163	-21%
	12	147	170	-16%
	13	159	178	-12%
	14	171	187	-9%
	15	183	196	-7%
	16	195	207	-6%
	17	207	218	-5%
	18	219	230	-5%
	19	232	243	-5%
	20	244	257	-5%
	21	256	273	-6%
	22	267	289	-8%
	23	279	306	-10%
	24	290	325	-12%
	25	302	345	-14%

En la Figura 34 se observa una comparación entre los valores de esfuerzo dinámico obtenidos mediante el test dinámico y la ecuación propuesta para una muestra de granodiorita considerando el rango de velocidades de impacto mencionado en los gráficos anteriores. Al igual que para las demás litologías, existe una tendencia ascendente, donde las curvas tienen un grado de similitud. A pesar de esto, ve una ligera discrepancia entre los valores de esfuerzo dinámico a medida que aumentan las velocidades de impacto. A valores más bajos, hay una mejor aproximación de parte de la ecuación propuesta a los valores reales de esfuerzo dinámico modelados en el ensayo.

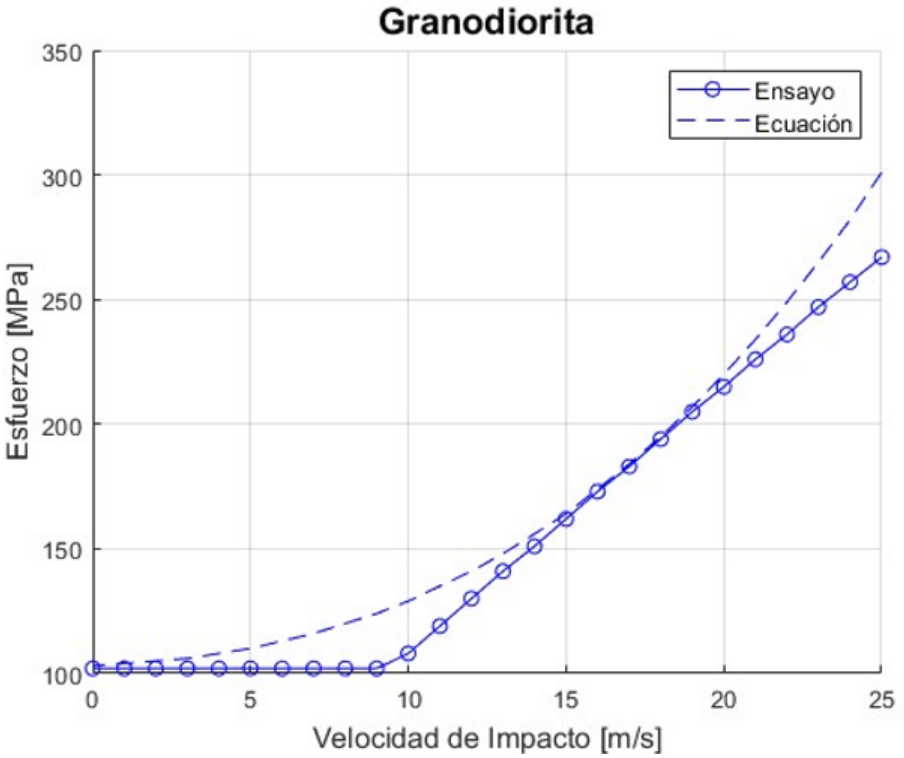


Figura 34: Esfuerzo dinámico obtenido para una muestra de granodiorita mediante un ensayo dinámico en FLAC3D y la ecuación general.

En la Tabla 10 se observan los errores relativos que existen entre los esfuerzos dinámicos obtenidos mediante modelación numérica y la ecuación propuesta a cada velocidad de impacto para la granodiorita. Se logra observar que para este rango de velocidades de impacto, los errores están bajo el 22%, siendo este último el valor correspondiente a una velocidad de 9 m/s.

Tabla 10: Errores relativos para esfuerzos dinámicos obtenidos mediante FLAC3D y la ecuación general para la granodiorita.

	Velocidad de impacto [m/s]	UCS dinámico FLAC3D [MPa]	UCS dinámico ecuación [MPa]	Error Relativo
Granodiorita	0	102	103	-1%
	1	102	104	-2%
	2	102	105	-3%
	3	102	106	-4%
	4	102	108	-6%
	5	102	110	-8%
	6	102	113	-11%
	7	102	116	-14%
	8	102	120	-18%
	9	102	124	-22%
	10	108	129	-20%
	11	119	135	-13%
	12	130	141	-8%
	13	141	148	-5%
	14	151	156	-3%
	15	162	164	-1%
	16	173	174	0%
	17	183	184	0%
	18	194	195	0%
	19	205	207	-1%
	20	215	220	-2%
	21	226	234	-4%
	22	236	249	-6%
	23	247	265	-7%
	24	257	282	-10%
	25	267	301	-13%

6 ANÁLISIS Y DISCUSIONES

En esta sección se analizan y discuten los resultados obtenidos de los ensayos dinámicos tipo Split-Hopkinson realizados mediante modelamiento numérico, con el objetivo de analizar el comportamiento dinámico de las muestras estudiadas y validar la propuesta de una expresión para el UCS dinámico.

Según Wang et al. (2021), la realidad y la precisión de los resultados de los modelos numéricos dependen de las propiedades mecánicas de las rocas y las discontinuidades. Sólo si estas son razonables, los resultados del modelamiento numérico pueden reflejar con precisión la deformación y los daños reales de las rocas o macizos rocosos in situ, considerando que las propiedades mecánicas de las rocas y discontinuidades están relacionadas con las condiciones de carga y velocidades de deformación. Hasta ahora, se han hecho una gran cantidad de investigaciones acerca de los parámetros mecánicos dinámicos de las rocas en el laboratorio, pero estas adoptan las propiedades mecánicas estáticas de las rocas.

6.1 ENSAYOS ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Con respecto al análisis de los ensayos de esfuerzo-deformación dinámicos, en la Figura 21 se puede apreciar que la caliza posee un mayor UCS dinámico y una pendiente mucho más inclinada con respecto a las demás litologías. Esto se debe a que su módulo de Young, el cual se aproxima a los 65 GPa, tiene un valor más grande que las otras litologías, en las cuales los valores para este parámetro rondan entre los 29 y 37 GPa. Esto quiere decir que esta roca, frente a una misma cantidad de esfuerzo, presenta una menor deformación y mayor resistencia a la deformación elástica que otra roca con un módulo de Young más bajo. En la Figura 22 y Figura 23 se incrementa la velocidad de impacto en 4 y 8 m/s respectivamente y se logra apreciar que el comportamiento de las curvas correspondientes a cada litología es similar. Sin embargo, al fijarse en los valores de esfuerzo dinámico, se observa que estos se van incrementando linealmente, tomando como ejemplo el caso de la caliza, donde en ambos casos aumenta 64 MPa. Analizando lo anterior, se ve que el valor del UCS dinámico para cada una de ellas aumenta de manera proporcional a la velocidad de impacto, lo que es coherente y esperado ya que existe una mayor energía cinética transmitida al material debido a la mayor fuerza durante el impacto y, por lo tanto, una mayor absorción de energía.

6.2 EFECTOS DE PARÁMETROS EN EL ESFUERZO DINÁMICO

Con respecto al análisis del efecto de la velocidad de impacto en el esfuerzo dinámico reflejado en la Figura 24, a medida que aumenta la velocidad de impacto, aumenta el esfuerzo dinámico de manera directamente proporcional para todas las litologías, es decir, existe una tendencia lineal entre ambas variables en el rango estudiado. Según lo mencionado en la sección de resultados, se observó que la caliza tiene un mayor aumento de esfuerzos por cada 1 m/s incrementado, lo que, por lo dicho en la sección anterior, podría deberse a su valor del módulo de Young, coincidiendo en este caso en que mientras mayor es este parámetro, mayor aumento hay en el valor del esfuerzo dinámico a medida de que va incrementando la velocidad de impacto. Además, se puede asociar el aumento del esfuerzo dinámico a medida que aumenta la velocidad de impacto con el aumento de la energía cinética y, por lo tanto, energía que absorbe la muestra.

En el caso del efecto de la cohesión en el esfuerzo dinámico ilustrado en la Figura 25, se logra observar que para la caliza, dolomita, andesita y granodiorita, el esfuerzo es independiente de la cohesión, por lo que podría no ser un parámetro significativo que influya en el esfuerzo bajo las condiciones de impacto estudiadas. Esto puede deberse a propiedades intrínsecas del material que hacen que el esfuerzo sea insensible a la variación en la cohesión en estas condiciones, por lo que sería de interés realizar pruebas bajo diferentes condiciones de impacto o estudios estructurales de cada litología. Además, la única litología que muestra un comportamiento ascendente en la relación cohesión-esfuerzo es el CMET, por lo que, en este caso, la cohesión tiene un impacto directo en el esfuerzo dinámico que le es aplicado.

Observando el efecto del ángulo de fricción en el esfuerzo dinámico ilustrado en la Figura 26, se puede apreciar que la caliza, la andesita y el CMET son litologías donde el esfuerzo no depende del ángulo de fricción bajo las condiciones estudiadas. Por otro lado, la dolomita y la granodiorita muestran un incremento en el esfuerzo con el aumento del ángulo de fricción, por lo que es un parámetro importante en el esfuerzo dinámico de estas litologías. Así, bajo las condiciones del estudio, la influencia del ángulo de fricción en el esfuerzo dinámico no recae en todas las litologías, por lo que se sugiere explorar las causas de esta variabilidad o estudiar el efecto de este parámetro bajo distintas condiciones de carga.

6.3 ECUACIÓN GENERAL

En cuanto al análisis de los gráficos donde se comparan los UCS dinámicos obtenidos a cada velocidad de impacto a través del modelo numérico y a través de la expresión propuesta en este estudio, se observó que, en general, esta entrega una aproximación precisa a los resultados obtenidos de las simulaciones para cada una de las litologías. Si se observan las figuras expuestas en la sección de resultados, las rectas correspondientes al ensayo dinámico y a la ecuación propuesta muestran una correlación estrecha, lo que indica que esta permite predecir el comportamiento de la roca dentro del rango de velocidades de impacto consideradas en el estudio. Además, como los valores del coeficiente de correlación y del coeficiente de determinación son muy cercanos a 1, significa que existe una correlación positiva casi perfecta entre los valores observados y los predichos por la ecuación y también existe un buen ajuste del modelo.

Sin embargo, a pesar de que exista un error relativo menor al 30%, existen ciertos casos donde hay ciertas desviaciones en los resultados de ambos modelos. Como se puede ver, los resultados de esfuerzo dinámico entregados por la simulación empiezan a aumentar luego de un cierto valor de velocidad de impacto, lo cual depende de la litología. Así, la ecuación adopta este comportamiento exponencial, de manera de lograr representar de una buena manera estos resultados. Para estas condiciones de estudio, en el caso del CMET, la caliza y la dolomita, la ecuación alcanza valores muy cercanos a los obtenidos en al simulación, pero en el caso de la andesita y la granodiorita, la ecuación sobreestima los valores de esfuerzo dinámico obtenidos en la simulación. Estas diferencias pueden deberse a factores tales como detalles específicos del ensayo que no se replican perfectamente en el modelo numérico, por lo que se recomienda considerar un reajuste de los parámetros de la ecuación para mejorar su aplicación, sobretodo si se desea aplicar el modelo a velocidades de impacto fuera del rango estudiado.

7 APLICACIÓN EN UN MACIZO ROCOSO

Con el objetivo de analizar la influencia del UCS dinámico y de la energía sísmica que se propaga a través del medio rocoso y con la presencia de una discontinuidad, es que se crea un modelo de un macizo rocoso en el cual esta será el origen de una fuente sísmica.

7.1 MODELO DEL MACIZO ROCOSO

La creación del modelo del macizo rocoso se realiza utilizando los softwares Rhino, Griddle y FLAC3D, el cual incluye las propiedades específicas de las rocas obtenidas a través de la calibración con ensayos uniaxiales.

Este modelo, el cual se ve ilustrado en la Figura 35, consta de una representación de un macizo rocoso de 50 m de ancho, 50 m de alto y 1 m de profundidad, al cual también se le agrega, al centro, un plano de discontinuidad de 14 m de extensión con un buzamiento de 45°.

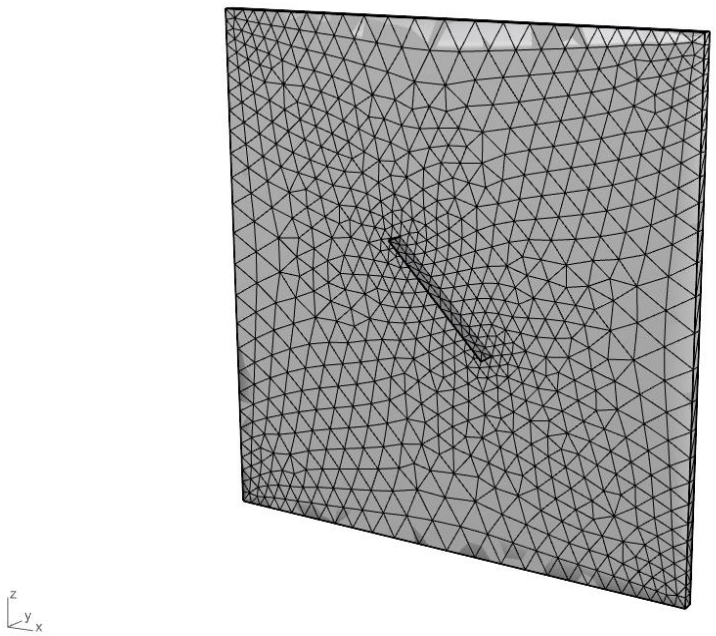


Figura 35: Superficies creadas en Rhino que definen el macizo rocoso y el plano de discontinuidad utilizadas en el estudio.

Luego de ser creada esta geometría en Rhino, se utilizan las herramientas GInt, GSurf y GVol de Griddle, las cuales intersectan las mallas de superficies para conformar mallas, realizan un remallado de superficies no estructuradas para crear mallas de superficies con parámetros específicos y realizan una malla de volumen, respectivamente, para poder así extraerla a FLAC3D, dejando como resultado la ilustrada en la Figura 36.

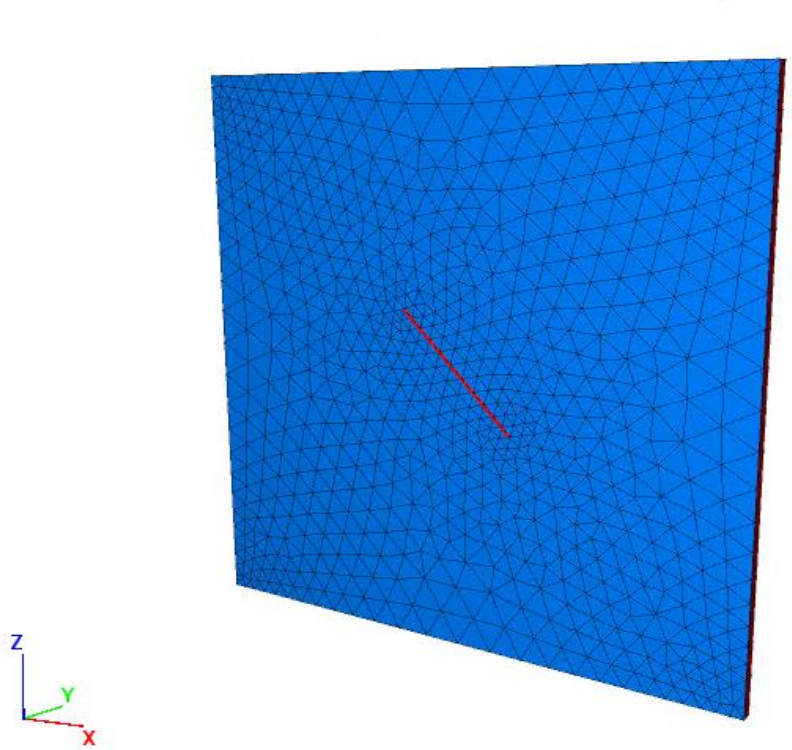


Figura 36: Malla de volumen FLAC3D final construida con Rhino y Griddle.

La malla de volumen final importada a FLAC3D está separada por 4604 zonas, las cuales se dividen en 6 grupos distintos (un grupo por cara).

A este modelo, se le aplicó un modelo constitutivo de Hoek & Brown, además de que se asignaron las propiedades físicas de la litología CMET, tales como el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, la densidad, el ángulo de fricción y la cohesión, usados en los ensayos uniaxiales anteriores, así como también se le asignan propiedades a la discontinuidad, las cuales se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11: Propidedades de la discontinuidad.

Propiedad	**Valor**	**Unidad**
Rigidez normal	5	[GPa]
Rigidez de corte	0,5	[GPa]
Ángulo de fricción	20	[°]
Cohesión	0	[MPa]

Junto con lo anterior, se puede observar en la Figura 37 las condiciones de borde agregadas en las caras del modelo, las cuales logran simular una situación in-situ en donde se encuentra el entorno del macizo rocoso con una discontinuidad presente.

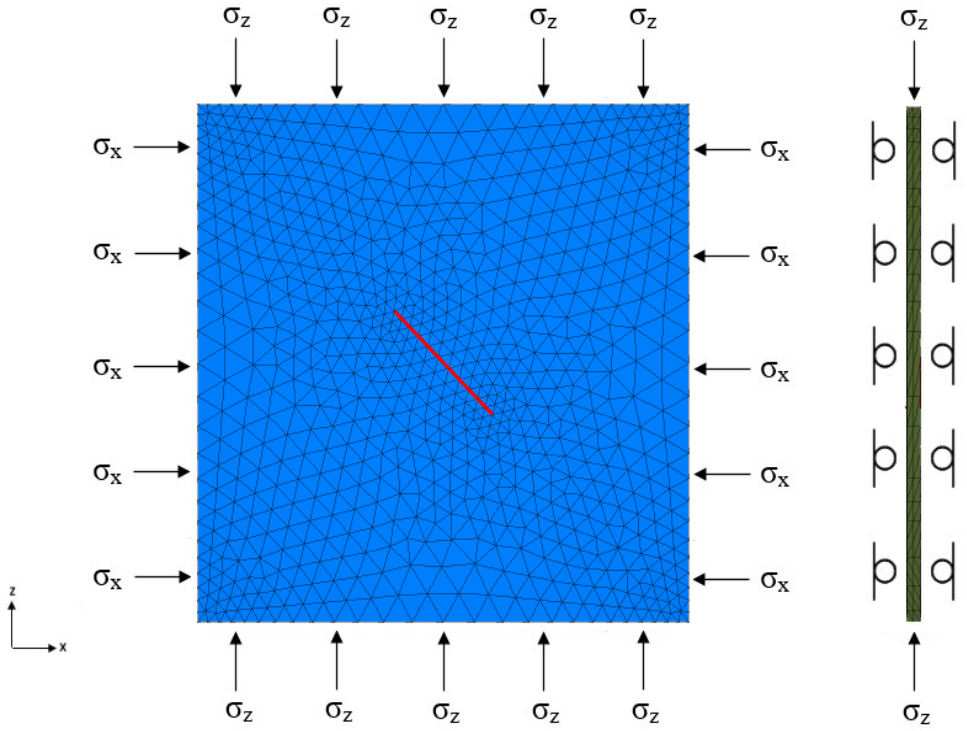


Figura 37: Condiciones de borde aplicadas al modelo del macizo rocoso.

Para lograr identificar lo sucedido en el macizo rocoso al momento de presentarse un movimiento sísmico, se realiza un modelo dinámico de este, el cual se someterá a la aplicación de una perturbación dinámica en forma de onda sísmica. Para esto, al modelo se le introduce un pulso en el centro de la discontinuidad, con el objetivo de representar lo más idénticamente posible a lo ocurrido al momento de presentarse un movimiento sísmico.

En este modelo se agrega, además, un amortiguamiento local, el cual se debe aplicar debido a la disipación de energía como resultado del deslizamiento a lo largo de los contactos entre los bloques dentro del modelo y la pérdida por fricción interna en el material intacto (Itasca Consulting Group, 2009). De caso contrario, el modelo se mantendría oscilando indefinidamente al ser sometido a cargas dinámicas y sería algo perjudicial al momento de realizar cálculos.

7.2 METODOLOGÍA DEL MODELO

Existen muchos parámetros que definen un movimiento sísmico, pero el más importante es la determinación de la energía. La energía sísmica excita partículas y ellas comienzan a oscilar. Al inicio de un movimiento sísmico, la energía de deformación se libera rápidamente y se transforma en parte en energía cinética (Delipetrov et al., 2014).

Por su parte, la energía cinética (E_k) es la energía que un cuerpo posee debido a su movimiento, y es definida por la siguiente ecuación:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \tag{7}$$

Donde:

m : Masa de la muestra en el ensayo SHPB [kg]
v : Velocidad de impacto [m/s]

Las velocidades de impacto que fueron consideradas en este estudio se utilizarán para calcular la energía cinética que se aplica en el modelo numérico.

A su vez, la energía sísmica (E_s) es la energía que se libera en forma de ondas sísmicas cuando ocurre un evento sísmico. Según la ley de Gutenberg-Richter, la relación entre la energía sísmica y la magnitud sísmica se describe de la siguiente forma:

$$\log(E_s) = 11.8 + 1.5M \tag{8}$$

Donde:

E_s : Energía sísmica [ergs]
M : Magnitud sísmica del evento

Esta relación nuestra que un aumento de 1 unidad en la magnitud, corresponde a un aumento de aproximadamente 32 veces en la energía sísmica liberada.

En términos de cálculos, si se define una masa para la muestra y una velocidad de impacto, se puede obtener la energía cinética del ensayo para luego, usando la Ecuación 7 y la Ecuación 8, estimar una magnitud sísmica asociada a la energía que se propaga a través del macizo rocoso. Para esto es necesario también considerar un factor de escalamiento, para ajustar la energía y magnitud de los eventos sísmicos simulados en el modelo numérico a la escala de un macizo rocoso. Este factor podría depender de las propiedades mecánicas del material, o bien de una comparación entre las dimensiones del ensayo y un macizo rocoso.

Usando las dimensiones de la muestra y de cada bloque del macizo rocoso y, considerando una litología CMET, las masas tienen un valor de 0.282 y 2.820 kg, respectivamente. Considerando la totalidad de los bloques del macizo rocoso, la masa de este tiene un valor de 7.050.000 kg.

Hipotéticamente se podría considerar un factor de escalamiento, el cual será el cociente entre la masa del macizo rocoso y la masa de la muestra, según la siguiente fórmula:

$$F = \frac{m_{MACIZO}}{m_{MUESTRA}} \tag{9}$$

El valor obtenido por la Ecuación 9 es de 25.000.000, el cual se aplica al momento de calcular la energía cinética para la muestra con el uso de la Ecuación 7 de la siguiente forma:

$$E_{k,ESCALADO} = E_k * F \tag{10}$$

La energía resultante de la Ecuación 10 está en Joules. La ley de Gutenberg expresada en la Ecuación 8 considera la energía en ergios, por lo que se debe convertir usando la relación de que un Joule equivale a 10^7 ergios. Así, se despeja el valor de la magnitud M, de la siguiente manera:

$$M = \frac{\log(E_{k,ESCALADO}) - 11.8}{1.5} \tag{11}$$

Al reemplazar los valores en la Ecuación 11, considerando una velocidad de impacto de 18 m/s, se obtiene que la magnitud del sismo en un macizo rocoso corresponde a 2.84. Por otro lado, si se considera una velocidad de impacto de 10 m/s, la magnitud del sismo es igual a 2.69.

7.3 RESULTADOS DEL MODELO

Se logra apreciar, en la Figura 38, la energía cinética calculada por el software, la cual se propaga desde la discontinuidad a través del macizo rocoso. Se agregaron dos velocidades de impacto; en la Figura 36-A de 3 m/s, y en la Figura 36-D de 24 m/s, las cuales corresponden a sismos de magnitud 2.0 y 3.0, respectivamente.

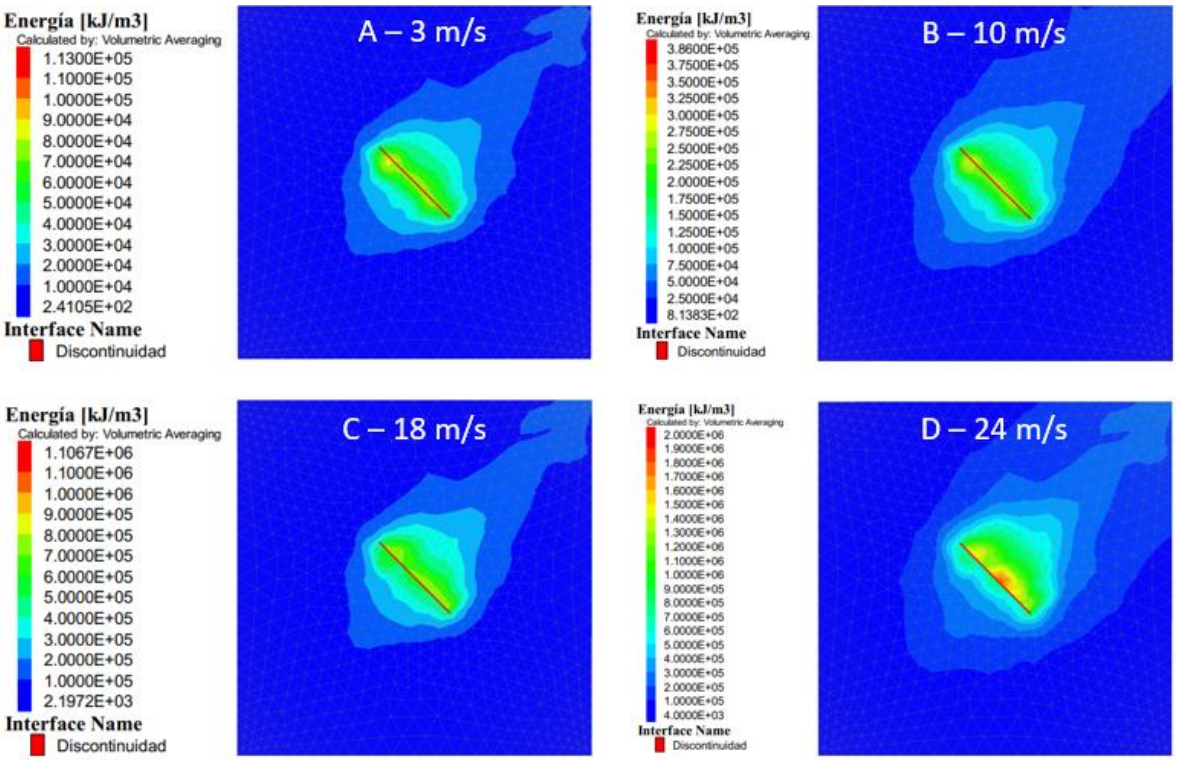


Figura 38: Distribución de la energía cinética en el macizo rocoso modelado a diferentes velocidades de impacto, a) 3 [m/s], b) 10 [m/s], c) 18 [m/s], d) 24 [m/s].

Se puede observar que, en todos los casos, la energía cinética se concentra alrededor de la discontinuidad, donde, a medida que va aumentando la velocidad de impacto, la propagación de la energía alcanza mayores distancias y valores máximos.

Las velocidades de impacto también permiten relacionar la energía cinética con un UCS dinámico a través de la Ecuación 7, donde se reemplazan las primeras en la ecuación general obtenida en este estudio, permitiendo así graficar el comportamiento del macizo rocoso con respecto a los valores de este parámetro de resistencia dinámico al momento de aplicarle un pulso, tal como se puede apreciar en la Figura 39.

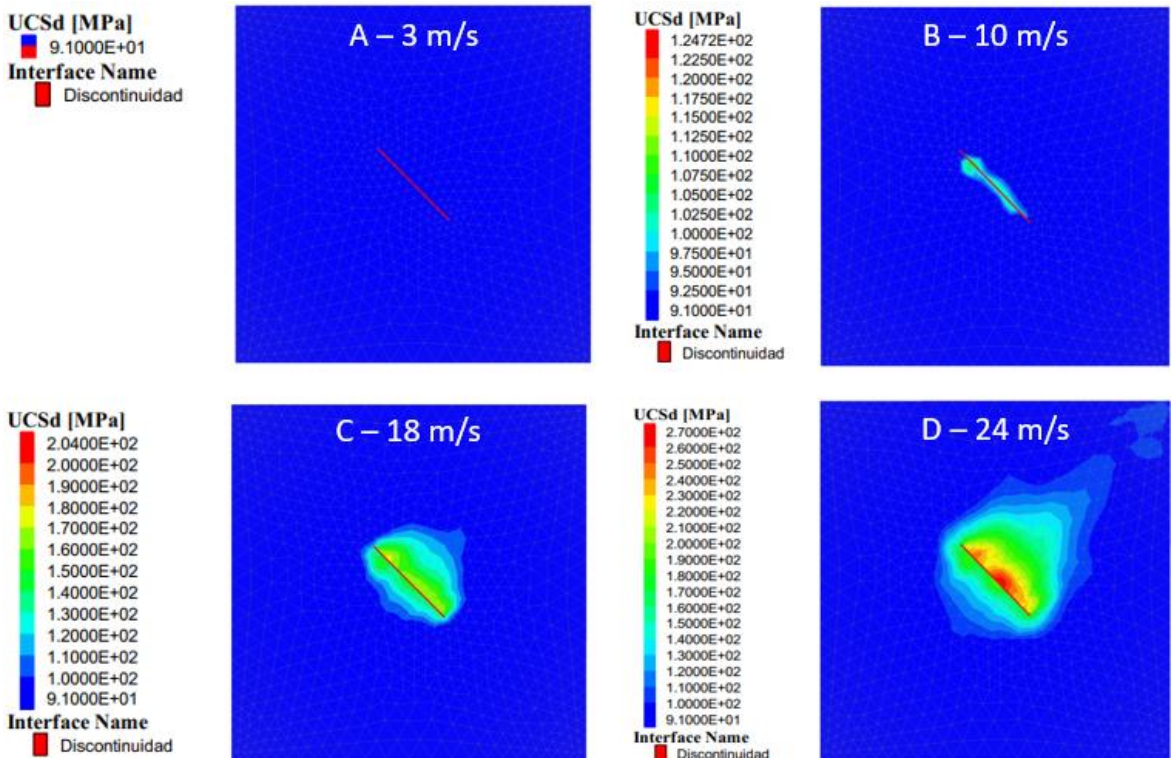


Figura 39: UCS dinámico en el macizo rocoso modelado a diferentes velocidades de impacto, a) 3 [m/s], b) 10 [m/s], c) 18 [m/s], d) 24 [m/s].

Se observa que, en el primer caso, el UCS del macizo rocoso no varía y se mantiene fijo en toda su área, por lo que no existe un UCS dinámico. En el segundo caso, existe un UCS dinámico cerca de la discontinuidad, el cual alcanza un valor de 124 MPa, pero no hay una expansión significativa y la distancia máxima entre la discontinuidad y el punto donde el UCS vuelve a ser el estático no supera los 2 metros. Por otro lado, en el tercer caso existe un incremento significativo del UCS dinámico en el área alrededor de la discontinuidad, alcanzando valores de 204 MPa y con una distancia máxima de influencia de 10 metros. En el último caso, se aprecia un UCS dinámico más elevado, correspondiente a 270 MPa, donde se ve una influencia clara del pulso en la resistencia del macizo rocoso y su distancia máxima abarca los 25 metros.

Finalmente, se observó que es posible convertir la energía cinética en energía sísmica utilizando la ley de Gutenberg-Ricther para estimar la magnitud de un sismo. Sin embargo, para lograr una extrapolación de los resultados obtenidos a escala ensayo a una escala de macizo rocoso, se necesita un factor de escalamiento, el cual, para este estudio, se consideró hipotéticamente una relación entre las masas entre la muestra y un macizo rocoso, lo que permitió estimar la energía sísmica y la magnitud del evento. Según los resultados obtenidos, se observó que debe existir una variación significativa en la velocidad de impacto para aumentar en una unidad la magnitud del evento sísmico. Esto es coherente, considerando que la relación entre la energía sísmica y la magnitud del evento sísmico en la Ecuación 8 es logarítmica, lo que quiere decir que cualquier incremento lineal en la magnitud sísmica requiere un incremento exponencial en la energía liberada. Sin embargo, sería de utilidad ahondar con mayor profundidad sobre la implementación de un factor de escalamiento que logre relacionar cualquier ensayo con cualquier tipo de macizo rocoso que pueda ser considerado en un futuro.

Los resultados obtenidos muestran como la energía cinética se propaga a través del macizo rocoso, influenciada por la presencia de una discontinuidad. En la Figura 38 se observa que la mayor cantidad de energía se sitúa en el punto donde se encuentra la discontinuidad, debido a que esta es la fuente sísmica. Se logra observar también que a mayores velocidades de impacto, se generan mayores cantidades de energía cinética, lo que, considerando la Ecuación 7, es coherente con la teoría. Por otra parte, se observa la tendencia de la propagación de la energía hacia el extremo superior derecho del modelo, en lugar de hacerlo uniformemente alrededor de la discontinuidad, que es lo esperable en un modelo de estas características, por lo que es importante investigar este fenómeno con mayor profundidad para un estudio posterior. Sin embargo, en la realidad, un macizo rocoso es heterogéneo y existen zonas con menor resistencia que otras, las que alrededor de una discontinuidad podrían ser las más vulnerables.

Observando la Figura 39, se logra apreciar que existe un comportamiento similar al de la energía cinética, donde existe un aumento del valor del UCS dinámico a medida que aumenta la energía cinética y, por lo tanto, la magnitud del evento sísmico, por lo que cuando existen eventos sísmicos de mayor intensidad, se pueden provocar mayores cambios en las propiedades mecánicas del macizo rocoso.

Por otro lado, la propagación de la energía sísmica en el macizo rocoso, como se observó en el modelo numérico, se puede relacionar con los estallidos de rocas por fallas, los cuales ocurren debido a la liberación de energía en formas de ondas de compresión o cizalladura por eventos de deslizamiento de fallas. La discontinuidad actúa como una fuente sísmica, la cual concentra la energía para luego dar paso a su propagación. Cuanta mayor energía sea liberada, mayor será el evento sísmico y más lejos se sentirá la perturbación dinámica y los movimientos de terreno. Es por esta razón que los grandes eventos sísmicos, como los deslizamientos de falla, aumentan el área de daño potencial por estallidos de rocas y la gravedad del daño relacionado a este evento (Cai & Kaiser, 2018).

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La dinámica de rocas es un campo complejo de entender debido a su naturaleza heterogénea y a lo poco predecible que puede resultar el comportamiento de las propiedades intrínsecas de las rocas bajo cargas dinámicas. Este comportamiento puede variar, dependiendo de la composición de cada litología, la estructura interna y las condiciones de carga. La modelación numérica y la simulación de estos comportamientos requieren herramientas avanzadas y un amplio conocimiento en mecánica de rocas, destacando que la interpretación precisa de los datos experimentales y la recreación de modelos numéricos para reflejar condiciones reales son un tema importante para lograr avanzar en este tópico.

Se estudió el comportamiento de la resistencia de la roca, haciendo uso de ensayos uniaxiales estáticos y dinámicos a través de modelación numérica. En estos últimos, se observó la influencia de cada litología en los valores obtenidos para el UCS dinámico de la muestra. Los resultados muestran que la caliza presenta un valor de resistencia a la compresión más alto que las demás litologías consideradas, seguida por la andesita, el CMET, la granodiorita y la dolomita, respectivamente. Esto destaca la importancia de considerar las características litológicas específicas al momento de evaluar la resistencia de las rocas, debido a que cada tipo de roca responde de manera distinta a las cargas dinámicas.

Los resultados obtenidos de los efectos de parámetros en el esfuerzo dinámico indican que los esfuerzos de resistencia dinámicos de las litologías estudiadas están influenciadas por varios parámetros. La velocidad de impacto se identificó como el factor más determinante entre ellas, influyendo significativamente en los valores de resistencia dinámica. La cohesión y el ángulo de fricción también son parámetros significativos, pero para estas condiciones de estudio, su efecto depende de la litología y de sus propiedades intrínsecas. De aquí la importancia a considerar múltiples factores al evaluar la resistencia de las rocas, para así obtener una visión más completa de su comportamiento bajo condiciones de carga dinámica.

La ecuación obtenida como resultado principal de esta investigación refleja la relación entre el UCS estático y dinámico considerando las variables más influyentes del estudio, como la velocidad de impacto, la cohesión, el ángulo de fricción, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson y la densidad de la litología. Esta ecuación muestra un muy buen ajuste con los datos experimentales, lo que demuestra su capacidad ser una buena herramienta para predecir de manera precisa los valores de UCS dinámico obtenidos en la modelación numérica.

Adicionalmente, se estudió la relación entre la velocidad de impacto obtenida del ensayo Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) con la energía cinética y la energía sísmica propagada en un macizo rocoso. Mediante el modelo numérico en FLAC3D, se observó que la energía inicialmente se concentra en la discontinuidad, para luego distribuirse y atenuarse a medida que se propaga a través del macizo rocoso. Esta atenuación resulta por la disipación de energía dentro del macizo rocoso y a lo largo del plano de discontinuidad debido a la fricción interna. Lo anterior mejora la comprensión del comportamiento de un

macizo rocoso bajo cargas dinámicas, además de predecir su respuesta frente a eventos sísmicos e identificar áreas que tienen un mayor riesgo de estallidos de rocas.

A partir de este estudio, se observó que los resultados obtenidos son coherentes con la teoría existente y aportan una expresión que mejora la comprensión de la dinámica de rocas. Esta última permite predecir el comportamiento de las rocas bajo cargas dinámicas, lo cual es fundamental para futuros estudios y desarrollos en el área que permitirán mejorar la seguridad y la eficiencia en aplicaciones de ingeniería civil, minería y mitigación de riesgos sísmicos.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que las condiciones geológicas reales pueden diferir de las realizadas en los modelos numéricos debido a las simplificaciones que se deben realizar para poder manejar la complejidad del problema, por ejemplo en la consideración de un macizo rocoso homogéneo y la incorporación de una sola discontinuidad, así como también en las condiciones de borde, las cuales son idealizadas y no representan perfectamente las condiciones in-situ. No se debe descartar también que las propiedades dinámicas de las rocas podrían variar con factores geológicos no considerados en este estudio, como por ejemplo la presencia de vetillas, humedad, o múltiples discontinuidades con distintas orientaciones y propiedades, por lo que se recomienda realizar estudios adicionales con una mayor cantidad de datos, litologías y condiciones geológicas para obtener una mayor precisión en los resultados.

9 REFERENCIAS

Attewell, P.B. & Farmer, I.W. (1976). Principles of engineering geology. Chapman and Hall, London.

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

Cai, M. (2013). Principles of rock support in burst-prone ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *36*, 46-56. https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.02.003

Cai, M., Kaiser, P. K. (2018). Rockburst support reference book. Vol. 1: Rockburst phenomena and support characteristics: MIRARCO, Laurentian University, Sudbury, Ontario.

Dai, F., Huang, S., Xia, K., & Tan, Z. (2010). Some Fundamental Issues in Dynamic Compression and Tension Tests of Rocks Using Split Hopkinson Pressure Bar. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *43*(6), 657-666. https://doi.org/10.1007/s00603-010-0091-8

Delipetrov, T., Doneva, B., & Delipetrev, M. (2014). *Theoretical model for defining seismic energy*.

Feng, X., Ding, Z., Ju, Y., Zhang, Q., & Ali, M. (2022). "Double Peak" of Dynamic Strengths and Acoustic Emission Responses of Coal Masses Under Dynamic Loading. *Natural Resources Research*, *31*(3), 1705-1720. https://doi.org/10.1007/s11053-022-10066-3

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica (Pearson Educación, S.A.).

Itasca Consulting Group, Inc, 2009. *Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (FLAC3D version 4.0): User's Guide.* Cuarta ed. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.

Jing, L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *40*(3), 283-353. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00013-3

Li, X., Zou, Y., & Zhou, Z. (2014). Numerical Simulation of the Rock SHPB Test with a Special Shape Striker Based on the Discrete Element Method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *47*(5), 1693-1709. https://doi.org/10.1007/s00603-013-0484-6

Manouchehrian, A., & Cai, M. (2017). Analysis of rockburst in tunnels subjected to static and dynamic loads. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *9*(6), 1031-1040. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.07.001

Medina, N. (2015). Prevención de accidentes por estallido de rocas en la construcción de túneles y labores subterráneas. https://www.geoxnet.com/

Nikolić, M., Roje-Bonacci, T., Ibrahimbegović, A. (2016) Overview of the numerical methods for the modelling of rock mechanics problems. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, *23*(2). https://doi.org/10.17559/TV-20140521084228

Ortlepp, W. D., & Stacey, T. R. (1994). *Rockburst Mechanisms in Tunnels and Shafts*.

Robbiano, F., Liu, K., Zhang, Q.-B., & Orellana, L. F. (2022). Dynamic uniaxial compression testing of veined rocks under high strain rates. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *153*, 105085. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105085

Wang, J., Apel, D. B., Pu, Y., Hall, R., Wei, C., & Sepehri, M. (2021). Numerical modeling for rockbursts: A state-of-the-art review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *13*(2), 457-478. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.09.011

Yang, Y., Li, Q., & Qiao, L. (2023). Review of SHPB Dynamic Load Impact Test Characteristics and Energy Analysis Methods. *Processes*, *11*(10), 3029. https://doi.org/10.3390/pr11103029

Yuan, F., Prakash, V., & Tullis, T. (2011). Origin of pulverized rocks during earthquake fault rupture. *Journal of Geophysical Research*, *116*(B6), B06309. https://doi.org/10.1029/2010JB007721

Zhao, J. (2011). *An overview of some recent progress in rock dynamics research*.

Zhao, J., Zhou, Y., & Xia, K. (2011). Advances in rock dynamics modelling, testing and engineering. En Y. Zhou (Ed.), *Harmonising Rock Engineering and the Environment* (pp. 147-154). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b11646-19

Zhou, J., Li, X., & Mitri, H. S. (2018). Evaluation method of rockburst: State-of-the-art literature review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *81*, 632-659. https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.08.029

Zhou, Y. X., Xia, K., Li, X. B., Li, H. B., Ma, G. W., Zhao, J., Zhou, Z. L., & Dai, F. (2012). Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *49*, 105-112. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.10.004

Zhu, W. C., Bai, Y., Li, X. B., & Niu, L. L. (2012). Numerical simulation on rock failure under combined static and dynamic loading during SHPB tests. *International Journal of Impact Engineering*, *49*, 142-157. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.04.002

10 ANEXOS

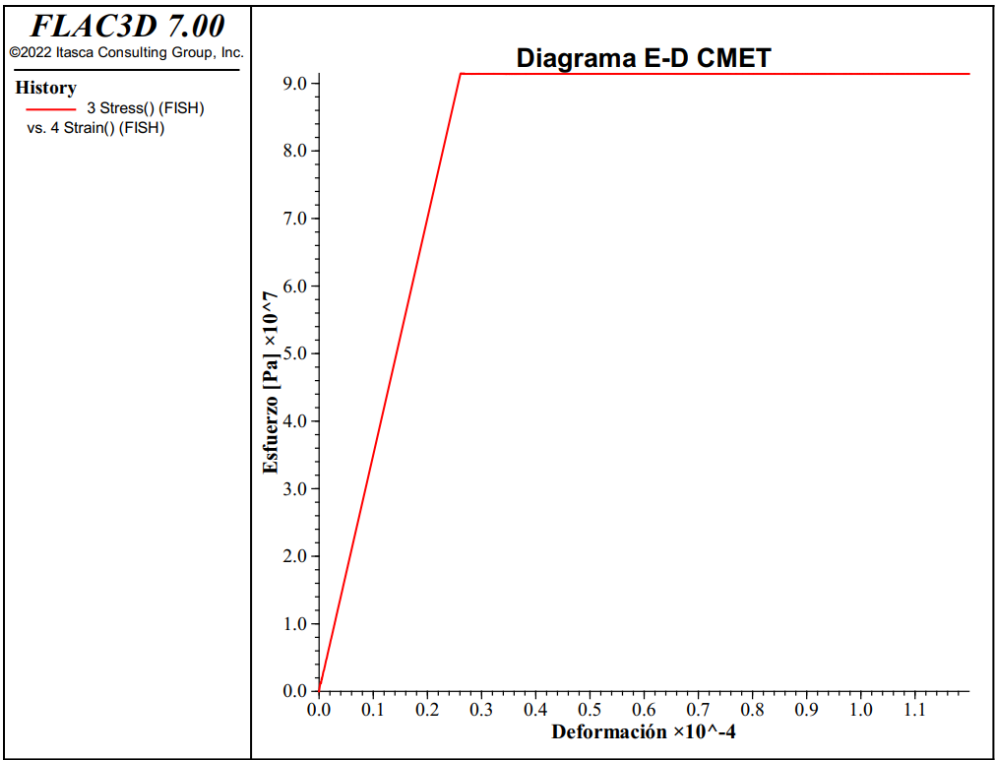


Figura 40: Gráfico esfuerzo-deformación de la litología CMET, obtenido a través de FLAC3D.

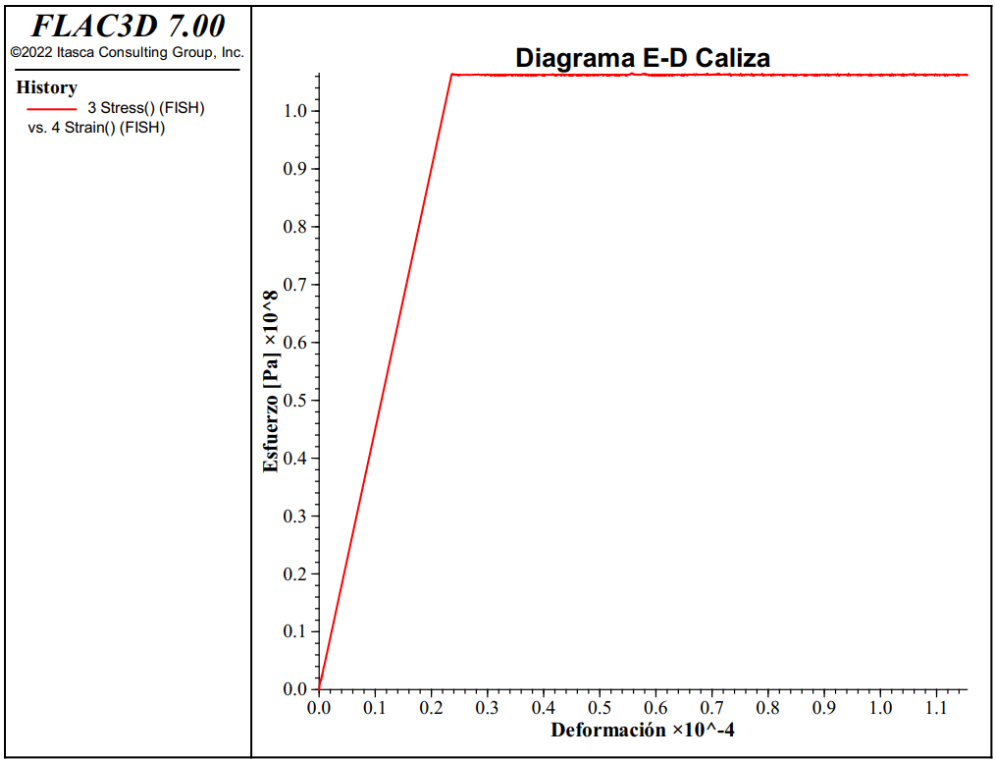


Figura 41: Gráfico esfuerzo-deformación de la litología caliza, obtenido a través de FLAC3D.

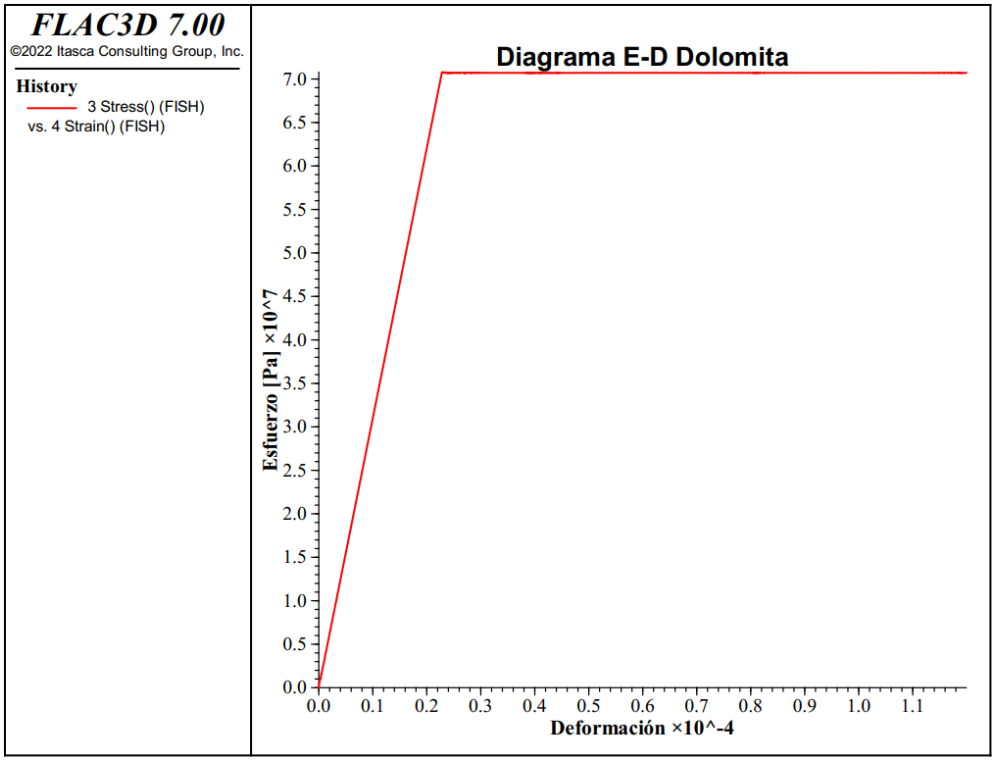


Figura 42: Gráfico esfuerzo-deformación de la litología dolomita, obtenido a través de FLAC3D.

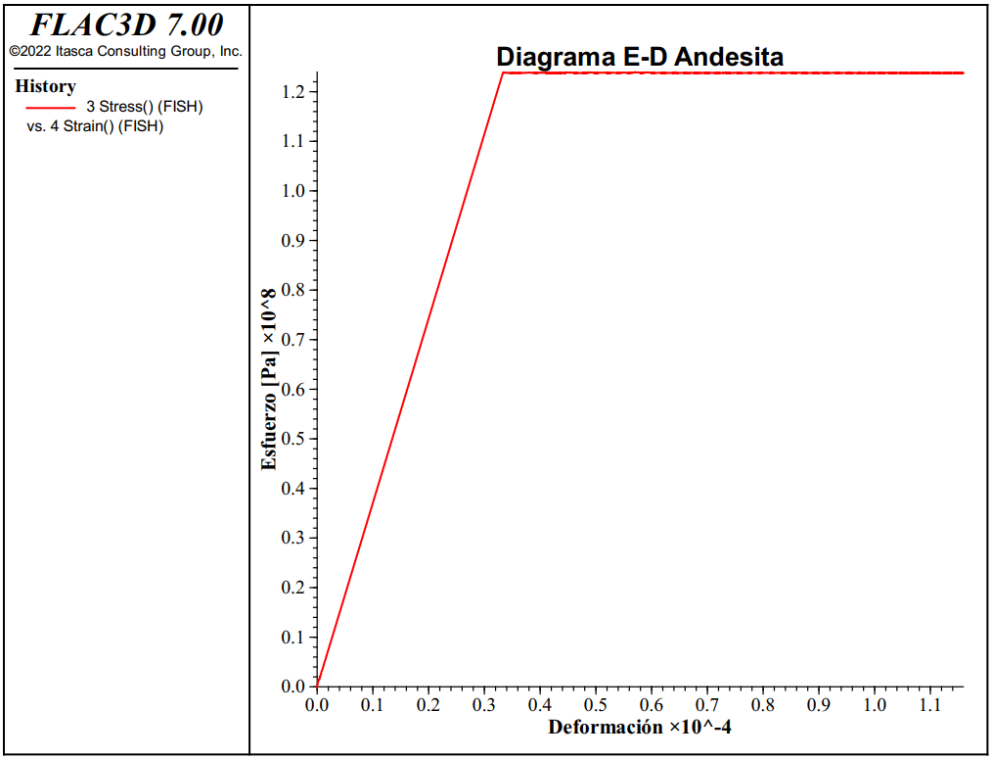


Figura 43: Gráfico esfuerzo-deformación de la litología andesita, obtenido a través de FLAC3D.

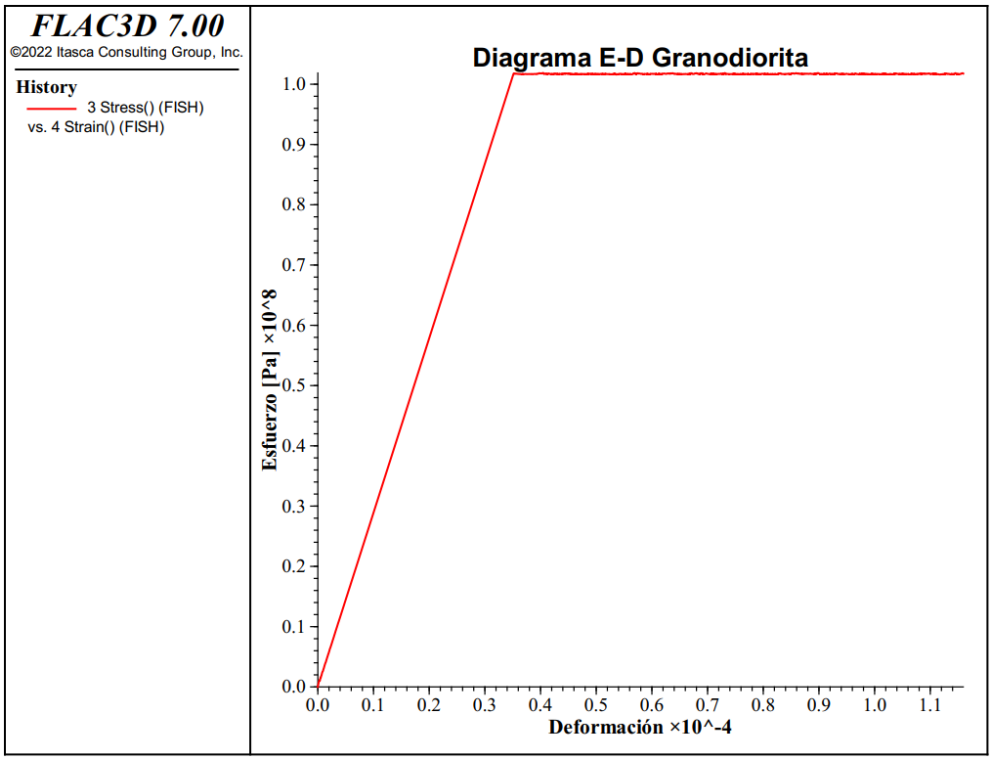


Figura 44: Gráfico esfuerzo-deformación de la litología granodiorita, obtenido a través de FLAC3D.