



**UNIVERSIDAD DE TALCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS**

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LAS MICROESTRUCTURAS Y  
HETEROGENEIDAD EN LA RESISTENCIA DE LAS ROCAS  
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
CIVIL DE MINAS**

Profesor tutor: Amin Hekmatnejad

Estudiante: Matías Christian Reyes Cáceres

Curicó, Chile, 2020

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

## RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo estudiar el comportamiento del macizo rocoso bajo diferentes condiciones, permitiendo observar el impacto en la resistencia de las rocas en diferentes modelos construidos de pruebas de discos brasileños y UCS. Se utiliza el software Irazu, el cual tiene la capacidad de capturar la transición de continuo a discontinuo. En primer lugar, se realiza un análisis del comportamiento del macizo rocoso asumiendo un medio homogéneo. Luego se introduce dentro del modelo la heterogeneidad mediante un mapeo uno a uno de los minerales y se procede a realizar un análisis del impacto que produce en la resistencia de la muestra. Finalmente, se realiza un análisis del impacto de las microfracturas dentro del modelo heterogéneo. Las microfracturas se ingresan mediante DFN incorporado dentro del software Irazu, con un  $p_{21}$  de  $4.5 \text{ mm/mm}^2$ . Para el modelo homogéneo se obtiene un stress máximo de 16.7 MPa, sobreestimando la capacidad de la muestra. Para el caso heterogéneo se obtiene un stress máximo de 13.6, menor que el caso homogéneo, pero aún sobreestimando los 6.15 MPa obtenidos en laboratorio. Cabe destacar que impacta en la trayectoria de falla de la muestra y se generan zonas de stress de tensión local por las diferencias de deformaciones elásticas que poseen los minerales. Al incluir las microfracturas se obtiene un stress máximo de 5.96 MPa, solo con un 3.08% de error. Los resultados demuestran que el mayor impacto lo producen las microfracturas, generando mayor debilidad en la muestra. Para el modelo UCS heterogéneo se obtuvo un stress máximo de 145 MPa, con solo un 1.05% de error. Además, la zona de fractura principal está acorde con los resultados experimentales.

## ABSTRACT

The present study aims to study the behavior of the rock mass under different conditions, allowing to observe the impact on the resistance of the rocks in different test models of Brazilian discs and UCS built. The Irazu software is used, which has the ability to capture the transition from continuous to discontinuous. First, an analysis of the behavior of the rock mass is carried out assuming a homogeneous environment. Heterogeneity is then introduced into the model through a one-to-one mapping of the minerals and an analysis of the impact it produces on the resistance of the sample is carried out. Finally, an analysis of the impact of microfractures is carried out within the heterogeneous model. Microfractures are entered using DFN incorporated into the Irazu software, with a  $p_{21}$  of 4.5 mm / mm<sup>2</sup>. For the homogeneous model, a maximum stress of 16.7 MPa is obtained, overestimating the capacity of the sample. For the heterogeneous case, a maximum stress of 13.6 is obtained, less than the homogeneous case, but still overestimating the 6.15 MPa obtained in the laboratory. It should be noted that it impacts the failure trajectory of the sample and local tension stress zones are generated due to the differences in elastic deformations that the minerals have. By including the microfractures, a maximum stress of 5.96 MPa is obtained, with only a 3.08% error. The results show that the greatest impact is produced by microfractures, generating greater weakness in the sample. For the heterogeneous UCS model, a maximum stress of 145 MPa was obtained, with only 1.05% error. Furthermore, the main fracture zone is in accordance with the experimental results.

## **AGRADECIMIENTOS**

Dentro de mis casi 6 años en la universidad pude conocer a mucha gente importante que me permitieron crecer tanto como persona como profesional. Quiero agradecer a Marco Morales y Bastián Aguilar quienes estuvieron siempre en los momentos buenos y malos y con quienes se logró formar un gran equipo de trabajo. También agradecer a Francisca Faúndez quien me apoyó en todo momento cuando preferí dedicar más tiempo a la universidad que a salir. Darle gracias a mi padre, mi abuelo y mi familia por confiar en mí en todo momento y apoyarme cuando más lo necesité. A mi madre y a mi abuela que sé que están orgullosas de este logro. Agradecer también al profesor Amin Hekmatnejad, quién confió en mis capacidades y quiso ser mi profesor guía durante el transcurso de mi memoria, aportando gran conocimiento y ayudando con mi formación profesional. La universidad fue una etapa muy bonita y creo que nunca se podrá repetir.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1. OBJETIVOS Y ALCANCES</b> .....	3
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	4
2.1 Aspectos generales.....	4
2.2 Mecánica de Rocas.....	5
2.2.1 Macizo Rocoso.....	6
2.2.2 Modelamiento en mecánica de rocas.....	7
2.3 Microescala .....	9
2.3.1 Microgrietas .....	9
2.3.2 Volumen Elemental Representativo .....	10
2.4 Metodologías para caracterización heterogénea en microescala.....	11
2.4.1 Tomografía computarizada (TC) de rayos X .....	11
2.4.2 Mapeo de Materiales.....	12
2.5 Métodos para el análisis del comportamiento mecánico de las rocas.....	14
2.5.1 Análisis de problemas continuos.....	16
2.5.1.1 Método de las diferencias finitas (FDM).....	18
2.5.1.1.1 Enfoque de volumen finito de FDM (FVM) .....	20
2.5.1.1.2 Método de los elementos finitos (FEM).....	20
2.5.1.1.3 Método del elemento límite (BEM).....	21
2.5.2 Análisis de problemas discontinuos .....	22
2.5.2.1 Método de los elementos discretos (DEM) .....	22
2.5.2.1.1 DEM explícito: método del elemento distinto .....	24
2.5.2.1.2 DEM implícito: análisis de deformación discontinua (DDA) .....	25
2.5.2.2 Método de red de fractura discreta (DFN).....	26
2.5.3 Análisis de problemas continuos-discontinuos.....	27
2.5.4 Método de elementos discretos-límites (DEM/BEM).....	28
2.5.5 Método de elementos finitos-discretos (FEM/DEM) .....	28
2.5.5.1 Detección de contactos e interacción.....	31
2.5.5.2 Modelo de Fractura .....	32

<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	34
3.1 Modelamiento Numérico .....	34
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	35
4.1 Prueba de Discos Brasileños .....	35
4.1.1 Modelo Homogéneo.....	35
4.1.2 Modelo Heterogéneo sin fracturas .....	41
4.1.3 Modelo Heterogéneo con microfracturas. ....	45
4.2 Ensayo de Compresión Uniaxial (UCS) .....	50
<b>CONCLUSIONES</b> .....	57
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	59
<b>ANEXOS</b> .....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cuatro métodos básicos, dos niveles y, por lo tanto, ocho enfoques diferentes para el modelado de mecánica de rocas y el diseño de ingeniería de rocas, de Hudson (2001) citado por Jing (2003).....	8
Figura 2. a) Imagen de proyección de rayos X de una muestra utilizada para la reconstrucción; b) Vista transversal en 2D; c) Reconstrucción en 3 dimensiones. (Rémond, Ahzi, Baniassadi y Garmestan, p.7, 2016).....	12
Figura 3. Modelado de una muestra de granito que muestra los pasos básicos involucrados en la extracción de la descomposición mineral y su asignación a la malla. (a) Imagen de la muestra no analizada; (b) imagen segmentada usando análisis de imagen y herramientas de segmentación; y (c) segmentación mapeada. (Mahabadi, 2012). ....	13
Figura 4. Comparación entre a) imagen segmentada de muestra de discos brasileños y b) modelo generado con mapeo uno a uno de los minerales mediante software Irazu.	14
Figura 5. Representación de una masa de roca fracturada mostrada en (a), por FDM o FEM mostrada en (b), BEM mostrada en (c) y DEM mostrada en (d) (Jing, 2003). ....	17
Figura 6. (a) Cuadrícula cuadrilátera regular para la FDM y (b) cuadrícula cuadrilátera irregular para FVM.....	19
Figura 7. Modelo cúbico presentado por Nayfeh & Heftzy (1978) donde a) Módulo cúbico utilizado. b) Prisma compuesto por varios módulos cúbicos (Iturrioz, Doz y Riera (1996). ....	24
Figura 8. Ejemplo de configuración de un modelo FEM/DEM mostrando elementos y nodos (Mediante software Irazu). ....	30
Figura 9. Comportamiento típico de los elementos cohesivos (Abdelaziz, Zhao, Grasselli, 2018). ....	31

Figura 10. (a) curva de tensión-deformación dividida en las ramas de endurecimiento y ablandamiento; (b) ablandamiento de deformación definido en términos de desplazamientos según Munjiza (2004), citado por Mahabadi (2012).....	32
Figura 11.. Representación de un modelo de grietas cohesivo según Munjiza (2004), citado por Mahabadi (2012).....	33
Figura 12. Malla utilizada para el modelo Homogéneo con tamaño de elemento de 0.2 mm en el centro y 1 mm en el resto de la muestra.....	36
Figura 13. Análisis de sensibilidad de carga. Se realiza un análisis de sensibilidad para valores de 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 5 y 10 m / s.....	37
Figura 14. Curva Stress-Desplazamiento para el modelo equivalente homogéneo. El valor máximo de stress alcanzado es de 16.7 MPa, sobreestimando la capacidad de la muestra.....	38
Figura 15. Resultado de la simulación para el modelo homogéneo en un tiempo de 0.288 ms. Se observa una clara ruptura en el centro de la muestra. ....	39
Figura 16. a) Fracturas paralelas a la dirección de carga. Distancia de separación y largo de fracturas de 5 mm y b) fracturas perpendiculares a la dirección de carga. Distancia de separación de 7.5 mm y largo de fracturas de 5 mm.....	40
Figura 17. Gráfico de stress máximo vs ángulo de orientación de fracturas. ....	41
Figura 18. a) Malla utilizada para el modelo heterogéneo con tamaño de elemento de 0.2 mm en el centro y 1 mm en el resto de la muestra. Se realiza un mapeo uno a uno en la muestra para obtener la ubicación exacta de los minerales; y b) imagen de una muestra de Stantead Granite obtenida mediante Tomografía Computarizada de Rayos X ( $\mu$ CT) y extraída de la literatura (Mahabadi, 2012).....	42
Figura 19. Curva Stress-Desplazamiento para el modelo heterogeneo sin fracturas. El valor máximo de stress alcanzado es de 13.6 MPa, sobreestimando la capacidad de la muestra.....	44
Figura 20. Comparación de patrones de fractura homogéneo y heterogéneo superpuestos sobre resultado experimental. La línea blanca corresponde a resultado homogéneo, la	

línea amarilla está asociada a resultado heterogéneo y la línea azul representa al resultado experimental. ....	44
Figura 21. Malla utilizada para el modelo heterogéneo con microfracturas. Se asigna un tamaño de elemento de 0.2 mm en el centro y 1 mm en el resto de la muestra. Las microfracturas se construyen dentro del modelo de forma aleatorio mediante DFN, con un p21 de 4.5 mm/mm <sup>2</sup> . ....	46
Figura 22. Curva Stress-Desplazamiento para el modelo heterogéneo con fracturas. El valor máximo de stress alcanzado es de 5.98 MPa, subestimando solo en un 3.15% el valor real.....	47
Figura 23. Comparación de distribución de stress en la dirección horizontal ( $\sigma_{xx}$ ) para los modelos homogéneo sin microfracturas, heterogéneo sin microfracturas y heterogéneo con microfracturas para dos tiempos de paso de la simulación ( $t=0.0084$ ms y $t=0.0252$ ms, correspondiendo a los desplazamientos de 0.0021 mm y 0.0063 mm). ....	49
Figura 24. a) Malla utilizada para el modelo homogéneo y heterogéneo con tamaño de elemento de 0.8 mm, b) Malla con material homogéneo y c) Malla con minerales asignados de forma aleatoria considerando distribución de muestra de 71% feldespatos, 21% cuarzo y 8% biotita. ....	51
Figura 25. Curva Stress-Desplazamiento para UCS homogéneo. El valor máximo de stress alcanzado es de 202 MPa, sobreestimando en un 72% el valor real.....	53
Figura 26. Curva Stress-Desplazamiento para UCS heterogéneo. El valor máximo de stress alcanzado es de 145 MPa, subestimando solo en un 1.56% el valor real. ....	53
Figura 27. Comparación del stress principal menor ( $\sigma_{xx}$ o $\sigma_3$ ) para modelos modelo homogéneo y heterogéneo de ensayos de compresión uniaxial para tres tiempos de paso de la simulación.....	55
Figura 28. Comparación proceso de fracturamiento entre a) el obtenido experimentalmente (figura a) (Mahabadi, 2012) y b) el fracturamiento simulado, incluyendo la zona principal de falla en c). ....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros experimentales utilizados para la construcción del modelo.....	36
Tabla 2. Parámetros experimentales de minerales constituyentes utilizados para la construcción del modelo heterogéneo.....	42
Tabla 3. Parámetros experimentales de interfaces de minerales constituyentes utilizados para la construcción del modelo heterogéneo. ....	43
Tabla 4. Resumen stress máximo alcanzado para muestra equivalente homogénea, muestra heterogénea sin microfracturas y muestra heterogénea con microfracturas. ..	47
Tabla 5. Parámetros finales utilizados para la construcción del modelo homogéneo....	50
Tabla 6. Parámetros de minerales constituyentes utilizados para la construcción del modelo heterogéneo.....	51
Tabla 7. Parámetros de interfaces de minerales constituyentes utilizados para la construcción del modelo heterogéneo.....	52

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto busca analizar el impacto de las microestructuras y heterogeneidades en la resistencia de las rocas. La importancia del tema radica en que uno de los principales problemas de la mecánica de rocas, es estar limitada para los procesos de falla de roca y la formación de discontinuidades (Mahabadi, 2012). Como ejemplo de problemas de mecánica de rocas, la literatura reporta la evaluación de la estabilidad a cielo abierto y laderas naturales, presas, así como la estabilidad de las aberturas subterránea, es decir, formación de zona dañada por excavación (ZED), desprendimiento, inestabilidad estructuralmente controlada. Tales problemas, son complejos ya que cualquier descuido puede llegar a causar un daño importante tanto humano como económico.

A su vez, es relevante destacar que las microestructuras junto con la heterogeneidad, son factores que influyen en la resistencia de las rocas. Por tanto, un correcto análisis del comportamiento reflejado por dichas condiciones, permite obtener información valiosa sobre zonas específicas de la roca consideradas como críticas. La importancia de realizar correctos análisis se centra en lograr predecir el comportamiento del macizo rocoso bajo diferentes condiciones tanto en microescala como en macroescala.

En contexto, este proyecto busca aportar herramientas que permitan con mayor precisión determinar variaciones en la resistencia de las rocas a causa de ciertas características presente. Para lograr el objetivo, se realizará, mediante el software IRAZU (el cual utiliza el método de los elementos finitos-discretos (FDEM)) un análisis del impacto de las microestructuras y heterogeneidad sobre la resistencia de las rocas, donde una de las ventajas principales que posee el código FDEM es la capacidad de modelar el comportamiento continuo y discontinuo. El análisis se realiza sobre pruebas de discos brasileños y ensayos de compresión uniaxial, comparando los resultados simulados con los experimentales.

Utilizar el código FDEM para el análisis de roca, permite capturar toda la ruta de carga y falla y el proceso de daño progresivo de rocas fracturadas (Mahabadi, 2012).

Además, permite modelar la transición de continuo a discontinuo mediante procesos de fractura y fragmentación (Munjiza et al, 1999 citado en Mahabadi, 2012). De este modo, se puede observar con mayor claridad como impacta la heterogeneidad y las microestructuras sobre el modo de falla de la roca y el proceso de fracturamiento que posee al someterse a cargas.

En síntesis, este proyecto busca complementar los estudios encontrados en la literatura y lograr que los resultados sean aplicados al comprender de mejor forma las variaciones que puedan estar presentes en el macizo rocoso.

Por otra parte, este proyecto pretende ajustarse a lo recomendado por Mahabadi (2012), Munjiza (2004) y Jing (2003), es decir, considerar los defectos microestructurales y la heterogeneidad en un análisis de la resistencia de las rocas.

## 1. OBJETIVOS Y ALCANCES

### Objetivo general:

- Analizar el impacto de las microestructuras y heterogeneidad en la resistencia de las rocas, mediante elementos finitos-discretos utilizando software Irazu.

### Objetivo específico:

- Analizar la resistencia de rocas asumiendo un medio homogéneo de una muestra de discos brasileños.
- Analizar la resistencia de rocas asumiendo un medio homogéneo de una muestra de ensayo de compresión uniaxial (UCS).
- Analizar la resistencia de rocas al incorporar la heterogeneidad de forma aleatoria dentro de un modelo UCS.
- Analizar la resistencia de rocas al incorporar la heterogeneidad de manera exacta en una muestra de discos brasileños mediante mapeo uno a uno.
- Analizar la resistencia de rocas al incorporar microestructuras dentro del modelo heterogéneo de una prueba de discos brasileños mediante DFN.

### Alcances:

- La heterogeneidad en las pruebas de discos brasileños incluye la posición exacta de los minerales y no se introduce de forma aleatoria.
- Las microfracturas son incluidas dentro del mismo software y no se requiere la utilización de alguna metodología o software adicional para su incorporación.
- No se realizan simulaciones de ensayos de compresión biaxial ni triaxial.
- Todos los resultados son comparados con información obtenida experimentalmente y extraída de la literatura.

## **2. MARCO TEÓRICO**

El presente marco teórico está compuesto por cuatro líneas teóricas. En primer lugar, se da una explicación general sobre la mecánica de rocas, el macizo rocoso y técnicas de modelamiento para estudiar la mecánica de rocas. Luego se dan a conocer las características presentes en la microescala, explicando la región mínima que se debe considerar para un análisis (Volumen Elemental Representativo) junto con defectos microestructurales que afectan a la resistencia de las rocas. Posteriormente, se habla sobre las metodologías para la caracterización heterogénea en microescala, para así obtener un mapeo con las distintas configuraciones heterogéneas presentes en la roca. Para finalizar, se explican los métodos que existen hoy en día para realizar un análisis en el comportamiento mecánico de las rocas para casos continuos-discontinuos, que permiten obtener mayor información sobre trayectoria de la falla en la roca, zonas de concentración de stress, entre otras.

### **2.1 Aspectos generales**

Los geomateriales, incluidas las rocas y el hormigón, son heterogéneos y discontinuos en múltiples escalas (Mahabadi, 2012). La microescala se caracteriza por la presencia de varias fases minerales y defectos microestructurales como microgrietas y planos de clivaje, los cuales afectan a la respuesta mecánica de la roca al momento de ser cargada y requieren de técnicas de análisis distintas a las convencionales para poder representar aquellos defectos y poder resolver problemas ingenieriles (Mahabadi, 2012). Las características observadas son de suma importancia, ya que afectan la resistencia de las rocas, influyendo aún más, según las condiciones en las que se encuentren (Orientación, frecuencia de fracturas, etc). Por ende, tanto la heterogeneidad como los defectos presentes en los materiales se deben considerar para modelar el comportamiento mecánico de los geomateriales y así obtener resultados acordes a la realidad (Mahabadi, 2012).

Dada la característica discontinua de la roca, existen problemas en la ingeniería de rocas que tienen como objetivo maximizar la formación de nuevas discontinuidades (como es el caso del método de explotación Block Caving u otros métodos de hundimiento) y otros problemas que tienen como objetivo impedir la falla de la roca y el aumento de las discontinuidades, como es el caso de la estabilidad en la minería en rajo abierto o estabilidad en taludes naturales (Mahabadi, 2012). Debido a lo anterior, se han desarrollado diferentes métodos para investigar aquellos problemas, encontrándose dentro de los más comunes el método de las diferencias finitas (FDM), el método de los elementos finitos (FEM) y el método de los elementos límites (BEM) que, como menciona Mahabadi (2012), han sido utilizados satisfactoriamente para evaluar el comportamiento global de las masas rocosas y para un análisis de tensiones y deformaciones, sin capacidad de capturar los procesos de fragmentación de roca.

En consecuencia, para lograr capturar los procesos de fracturamiento y fragmentación de la roca (que no se puede observar mediante la aplicación de las formulaciones tradicionales) se han desarrollado nuevos enfoques numéricos, donde se encuentran el método de elementos discretos (DEM), análisis de deformación discontinua (DDA) y el método combinado de elementos finitos-discretos (FEM / DEM) (Mahabadi, 2012).

## **2.2 Mecánica de Rocas**

Una de las grandes problemáticas de la ingeniería mecánica que se plantea en todo diseño estructural es la predicción del rendimiento de la estructura bajo las diferentes cargas que se le imponen durante su operación funcional (Brady y Brown, 2005). La ingeniería de la mecánica de rocas está estrechamente relacionada con las corrientes principales de la mecánica clásica y la mecánica con enfoques continuos, pero varios factores específicos la identifican como un campo de ingeniería distinto y coherente. Con esto, la mecánica de rocas está definida según el Comité Nacional de Mecánica de Rocas de EE. UU. en 1964, y posteriormente modificado en 1974, citado por (Brady y Brown, 2005) como la ciencia teórica y aplicada del comportamiento mecánico de rocas y masas de rocas; es esa rama de la mecánica preocupada por la respuesta de las rocas y las masas de rocas a los campos de fuerza de su entorno físico. Por ende, un estudio de las

propiedades físicas y mecánicas de los macizos rocosos, que influyen en gran medida en el comportamiento de las rocas es de suma importancia.

### **2.2.1 Macizo Rcoso**

El concepto de macizo rocoso posee múltiples definiciones, las cuales varían con diferentes literaturas o autores. Ramírez y Alejano (2004) proponen dos definiciones para macizo rocoso:

Forma en la que se presentan las rocas en el medio natural. Así pues, un macizo rocoso estará definido por la roca y la estructura, que a su vez contendrá planos de estratificación, fallas, juntas, pliegues y otros caracteres estructurales. Los macizos rocosos son por tanto discontinuos y pueden presentar propiedades heterogéneas y/o anisótropas. (p.1)

Consisten en una serie de bloques o elementos de roca intacta y una estructura formada por múltiples discontinuidades (comúnmente agrupadas en familias) y otros caracteres estructurales. Su naturaleza y comportamiento dependerá, por tanto, de ambos (roca + discontinuidades) influyendo más unas u otras en función de las características del macizo y las propiedades, situación y volumen de las obras que se realicen en ellos (p.2).

Además, es importante destacar que el macizo rocoso está compuesto por roca intacta, que según Ramírez y Alejano (2004) es un elemento (trozo, bloque, probeta) de roca que no presenta discontinuidades observables; y también por discontinuidades. La presencia de estas discontinuidades influye en gran medida en las propiedades de resistencia y deformación de la roca y varía según el tamaño de estas discontinuidades Ramírez y Alejano (2004).

Como menciona Jing (2003), la razón de la dificultad general en el modelado de un macizo rocoso, por cualquier método numérico, es que la roca es un material geológico natural, por lo que las propiedades físicas o de ingeniería deben establecerse, en lugar de definirse a través de un proceso de fabricación. Además, como menciona Harrison y

Hudson (2000) la masa rocosa es en gran medida discontinua, anisotrópica, no homogénea y no elástica (DIANE). Según Jing (2003), para representar adecuadamente la masa de roca en los modelos computacionales, capturando tal fractura y la naturaleza DIANE completa de la masa de roca, es necesario poder incluir las siguientes características durante la conceptualización del modelo:

- los procesos físicos relevantes y sus representaciones matemáticas mediante ecuaciones diferenciales parciales (PDE), especialmente cuando los procesos térmicos, hidráulicos y mecánicos acoplados deben considerarse simultáneamente.
- los mecanismos relevantes y las leyes constitutivas con las variables y parámetros asociados.
- el estado preexistente de tensión de roca (la masa de roca ya está bajo tensión).
- el estado preexistente de temperatura y presión de agua (la masa de roca es porosa, fracturada y calentada por un gradiente de calor geotérmico natural o fuentes de calor artificiales).
- la presencia de fracturas naturales (la masa rocosa es discontinua).
- variaciones en las propiedades en diferentes lugares (la masa rocosa no es homogénea).
- variaciones de propiedades en diferentes direcciones (la masa de roca es anisotrópica).
- comportamiento dependiente del tiempo / velocidad (la masa de roca no es elástica y puede sufrir deformación o deformación plástica).
- variaciones de propiedades a diferentes escalas (la masa de roca depende de la escala).

### **2.2.2 Modelamiento en mecánica de rocas**

Como el modelado de la mecánica de rocas se ha desarrollado para el diseño de estructuras de ingeniería de rocas con propósitos muy diferentes, y debido a que se han desarrollado diferentes métodos de modelado, ahora tenemos un amplio espectro de

enfoques de modelado (Jing, 2003). Estos pueden presentarse de diferentes maneras: la categorización en ocho enfoques basados en cuatro métodos y dos niveles, como se ilustra en la Fig. 1, mencionado por Hudson (2001) en Jing (2003).

El trabajo de modelado y diseño comienza con el objetivo, cuadro superior en la Fig. 1. Luego están los ocho métodos de modelado y diseño en el cuadro central principal. Existen dos filas en el recuadro central grande de la Figura 1. La fila superior, Nivel 1, incluye métodos en los que hay un intento de lograr un mapeo de mecanismo que se cree que está ocurriendo en la realidad de la roca y que debe incluirse en el modelo se modela directamente, como las relaciones explícitas de tensión-deformación (Jing, 2003). Por el contrario, la fila inferior, Nivel 2, incluye métodos en los que dicho mapeo de mecanismos no es directo, como en las técnicas de clasificación de macizo rocoso.

Algunos parámetros de caracterización del macizo rocoso de apoyo se obtendrán de la investigación del sitio, cuadro de la izquierda. Luego continúa el diseño y la construcción de ingeniería de rocas, con un ciclo de retroalimentación para el modelado desde la construcción (Jing, 2003). Además, es importante considerar la caracterización

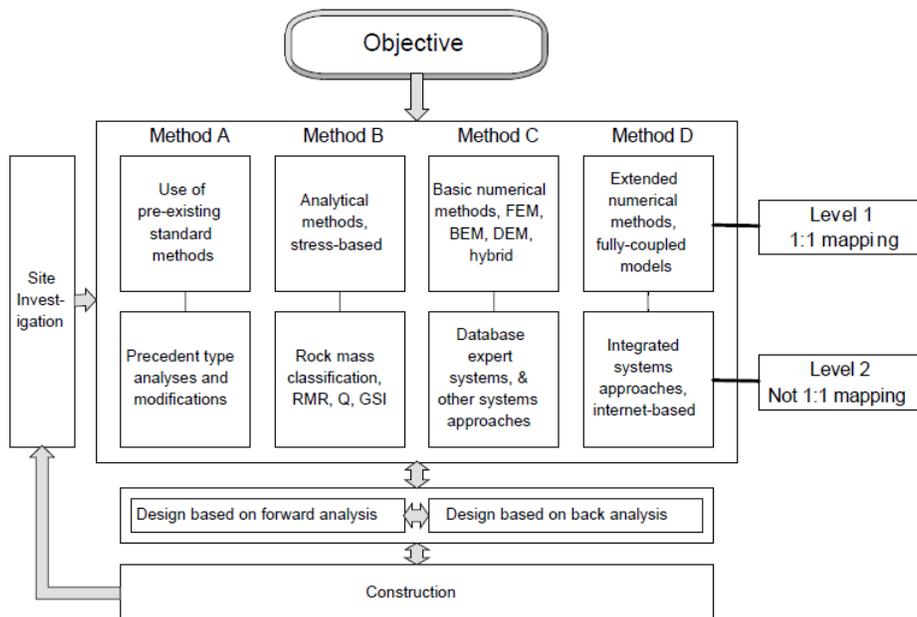


Figura 1. Cuatro métodos básicos, dos niveles y, por lo tanto, ocho enfoques diferentes para el modelado de mecánica de rocas y el diseño de ingeniería de rocas, de Hudson (2001) citado por Jing (2003).

del macizo rocoso, ya que es el input necesario para proporcionar información a los modelos numéricos (Jing, 2003).

## **2.3 Microescala**

El proceso en rocas frágiles bajo compresión, según Lockner et al. (1991); Benson et al. (2008) mencionado en Lisjak y Grasselli (2014), se caracteriza por procesos micromecánicos complicados, incluida la nucleación, crecimiento y coalescencia de microgrietas, que conducen a la localización de la tensión en forma de fractura macroscópica. La evolución del microagrietamiento, típicamente asociado con la emisión de energía acústica (AE), da como resultado una respuesta de tensión de esfuerzo no lineal distintiva, con ablandamiento de tensión macroscópico comúnmente observado en condiciones de bajo confinamiento (Brace et al, 1966., Bieniawski, 1967., Eberhardt et al, 1997; Martin, 1997., mencionado en Lisjak y Grasselli, 2014).

Además, según Jaeger y Cook (1976), mencionado en Lisjak y Grasselli (2014), a diferencia de otros materiales (por ejemplo, metales), las rocas muestran un comportamiento mecánico fuertemente dependiente de la presión. De hecho, a menudo se observa una variación del modo de falla, desde la división axial hasta la formación de banda de corte, al aumentar las presiones de confinamiento.

A nivel de masa de roca, el proceso de falla observado durante los experimentos a escala de laboratorio se complica aún más por la presencia de discontinuidades, como fracturas, fallas, zonas de cizallamiento, planos de esquistosidad y planos de clivaje (Goodman, 1989).

### **2.3.1 Microgrietas**

Los estudios de microgrietas en rocas, según Kranz (1983), pueden arrojar luz sobre la historia de una roca y pueden usarse para inferir el estrés local dominante. Además, pueden usarse para comparaciones entre condiciones naturales y de laboratorio, y debido a las aparentes similitudes morfológicas y mecánicas entre microgrietas, fracturas y fallas, pueden ser útiles para problemas de escala geofísica. El

conocimiento sobre las poblaciones de microgrietas es un input necesario para modelar estudios micromecánicos de fracturas y formación de fallas.

Según Simmons y Richter (1976) mencionado por Kranz (1983) las microgrietas pueden ser definidas como una abertura que se produce en las rocas y que tiene una o dos dimensiones más pequeñas que la tercera y típicamente son del orden de los 100  $\mu\text{m}$  o menos. Las microgrietas se subdividen en grietas de límite de los granos (asociadas y quizás coincidentes con el límite del grano), grietas intragranulares o intracristalinas (que se encuentran totalmente dentro del grano) y grietas intergranulares o intercristalinas (que se extienden desde un límite de grano y que se cruza en uno o más granos) (Abdelaziz, Zhao, Grasselli, 2018). También es utilizado el término grieta transgranular, que da lugar para grietas que atraviesan un grano desde el límite del grano hasta el otro límite del grano.

### **2.3.2 Volumen Elemental Representativo**

El Volumen Elemental Representativo (RVE en sus siglas en inglés, o también conocido como REV) es el tamaño de volumen más pequeño de materiales heterogéneos que puede usarse para medir propiedades efectivas tales como módulos elásticos, propiedades térmicas, propiedades electromagnéticas y otras cantidades promediadas (Rémond, Ahzi, Baniassadi y Garmestan, 2016). Un volumen más pequeño no representaría correctamente las características de los materiales y se obtendrían resultados incorrectos o que no están relacionados con los materiales analizados. La mayoría de los materiales heterogéneos tienen una disposición estadística en lugar de una disposición determinista de las fases, por lo tanto, los enfoques de la micromecánica se basan normalmente en el concepto RVE (Rémond, Ahzi, Baniassadi y Garmestan, 2016).

El efecto de tamaño es una característica especial de las rocas fracturadas, principalmente debido a dos factores causados por la existencia de fracturas de varios tamaños en las masas rocosas. El primero es el hecho de que los sistemas de fractura dividen la masa de roca en una gran cantidad de subdominios o bloques, cuyos tamaños

e interacciones dominan el comportamiento general de las masas de roca (Jing, 2003). El segundo es el hecho de que el comportamiento físico de las fracturas en sí depende del tamaño de las fracturas, debido a la dependencia de la rugosidad de la superficie de las fracturas de roca (Fardin et al., 2001).

Los métodos más representativos y contemporáneos para tener en cuenta el efecto del tamaño del comportamiento físico de las rocas fracturadas es el enfoque continuo equivalente establecido sobre la base del Volumen Elemental Representativo (REV), a través de procesos analíticos o numéricos de homogeneización y/o escalamiento y basado en modelos constitutivos asumidos (Jing, 2003).

La existencia del REV para rocas fracturadas todavía está en debate, donde el foco es si tales REV pueden existir físicamente considerando la presencia de una estructura jerárquica de tamaños y anchos de fractura (aberturas) y su comportamiento y propiedades físicas muy diferentes (Jing, 2003).

## **2.4 Metodologías para caracterización heterogénea en microescala.**

Como mencionan Rémond, Ahzi, Baniassadi y Garmestan (2016), el desarrollo de metodologías avanzadas para la reconstrucción de microestructuras es esencial para acceder a una variedad de información analítica asociada con complejidades en la microestructura de materiales de múltiples fases, además de lograr un mapeo de cada una de las fases existentes en las muestras para observar su heterogeneidad. Varias técnicas experimentales y teóricas como la tomografía computarizada (TC) se han utilizado para obtener una secuencia de imágenes bidimensionales (2D) y que puede reconstruirse aún más en un espacio tridimensional (3D).

### **2.4.1 Tomografía computarizada (TC) de rayos X**

La tomografía computarizada (TC, o CT por sus siglas en inglés) de rayos X es una tecnología de imagen no destructiva, para la cual la estructura interna tridimensional de un objeto se reconstruye a partir de una serie de proyecciones de rayos X

bidimensionales (Rémond, Ahzi, Baniassadi y Garmestan, 2016). Además, como mencionan Rémond, Ahzi, Baniassadi y Garmestan (2016), desde el punto de vista más simple, el objeto se irradia con una fuente de rayos X con una intensidad conocida, mientras que la intensidad de los rayos X transmitida a través del objeto se mide a través de un detector. El grado de atenuación de los rayos X depende de la ruta que siguen a través del objeto (es decir, el grosor y las características de atenuación del material). Un ejemplo de reconstrucción de imagen mediante tomografía computarizada es presentado en la figura 2.

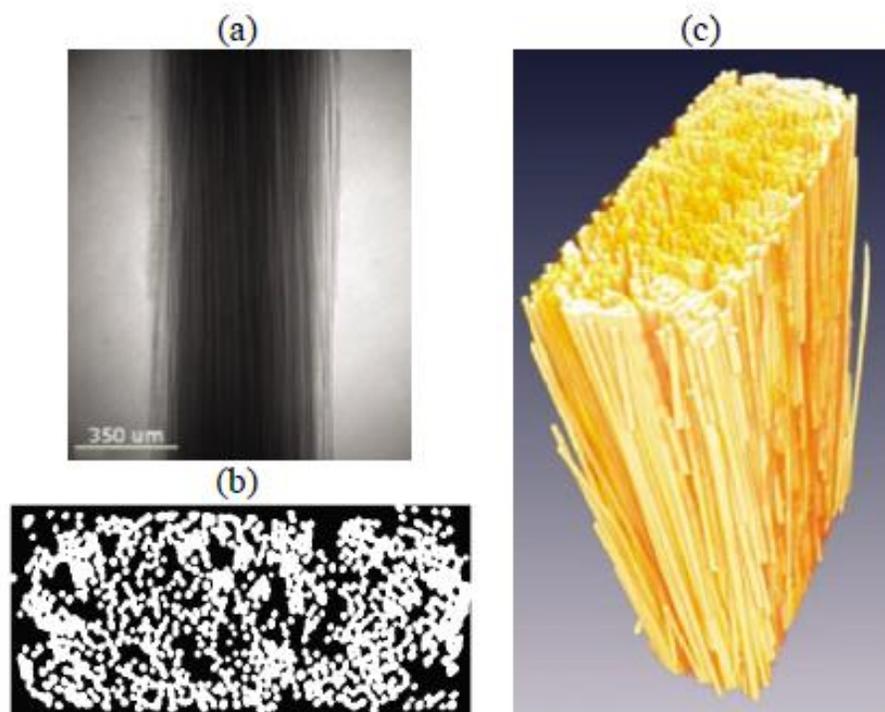
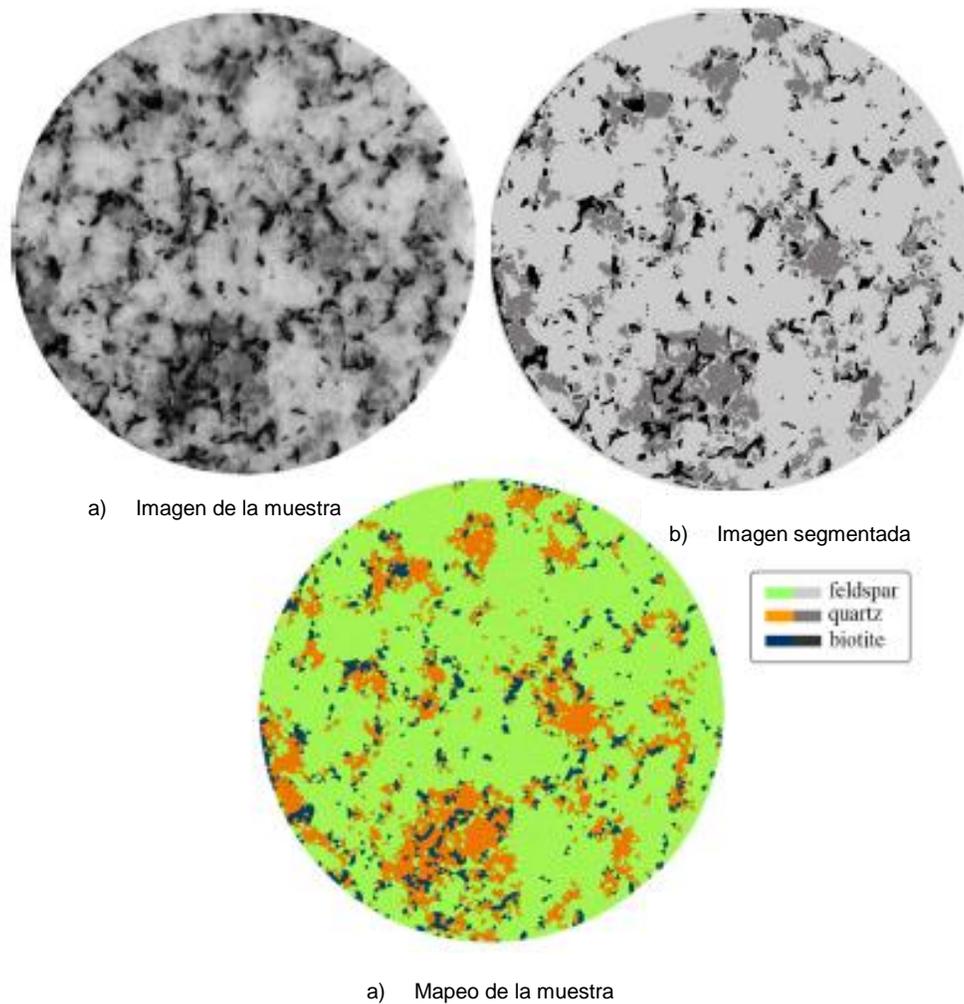


Figura 2. a) Imagen de proyección de rayos X de una muestra utilizada para la reconstrucción; b) Vista transversal en 2D; c) Reconstrucción en 3 dimensiones. (Rémond, Ahzi, Baniassadi y Garmestan, p.7, 2016).

#### 2.4.2 Mapeo de Materiales

Las rocas son heterogéneas por naturaleza. En muchos problemas prácticos de mecánica de rocas, es esencial considerar la heterogeneidad existente del material

(Mahabadi, 2012). Mediante la técnica de Tomografía Computarizada de Rayos X, es posible reconstruir la heterogeneidad presente en materiales a microescala (Rémond, Ahzi, Baniassadi y Garmestan, 2016) y así mapear una muestra dentro de algún modelo a simular y obtener los materiales (o fases) junto con la localización exacta de cada uno de ellos. El procedimiento típico de mapeo de minerales es presentado en la figura 3.

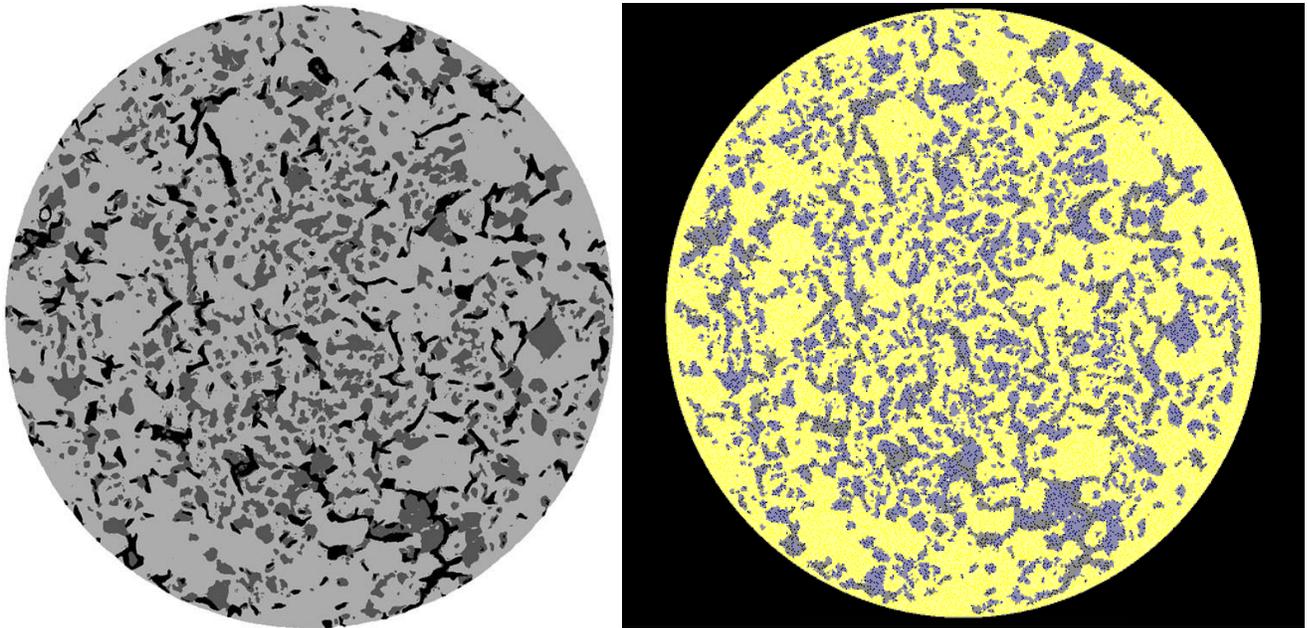


*Figura 3.* Modelado de una muestra de granito que muestra los pasos básicos involucrados en la extracción de la descomposición mineral y su asignación a la malla. (a) Imagen de la muestra no analizada; (b) imagen segmentada usando análisis de imagen y herramientas de segmentación; y (c) segmentación mapeada. (Mahabadi, 2012).

Primero, se debe adquirir una imagen de la muestra a analizar, donde la Tomografía Computarizada u otros sistemas de imágenes se pueden utilizar para este

propósito. Para este caso, se utiliza una muestra *Stanstead Granite*, la cual consiste de cuarzo, feldespato y biotita (figura 3.a). Una vez que se adquiere una imagen en escala de grises de alta resolución, se utilizan técnicas de análisis de imágenes para segmentar la imagen en función de su composición mineral (Figura 3.b) (Mahabadi, 2012). Posteriormente, la imagen segmentada puede utilizarse para ingresar la heterogeneidad de la muestra dentro de un modelo numérico y así, realizar simulaciones con un mapeo uno a uno de la mineralización (Figura 3.c) (Mahabadi, 2012).

Un ejemplo de dicha metodología realizada mediante software Irazu se presenta en la figura 4., la imagen ya segmentada (figura 4.a) permite diferenciar los minerales presentes en la muestra y reconocer la posición exacta de ellos. Con una malla fina dentro del modelo (tamaño de elemento 0.2 mm), es posible observar con mayor claridad la similitud entre la muestra experimental y el modelo generado (figura 4.b).



*Figura 4. Comparación entre a) imagen segmentada de muestra de discos brasileños y b) modelo generado con mapeo uno a uno de los minerales mediante software Irazu.*

## **2.5 Métodos para el análisis del comportamiento mecánico de las rocas**

En el modelamiento numérico de problemas de ingeniería, algunos problemas pueden ser representados por un modelo adecuado usando un número finito de

componentes bien definidos. El comportamiento global del sistema puede determinarse a través de interrelaciones bien definidas entre los componentes individuales (elementos). Dichos problemas se denominan discretos y la representación discreta y la solución de dichos sistemas por métodos numéricos son generalmente directos (Jing, 2003).

En otros problemas, la definición de tales componentes independientes puede requerir una subdivisión infinita del dominio del problema, y el problema sólo puede tratarse utilizando la suposición matemática de un elemento infinitesimal, lo que implica en teoría un número infinito de componentes que generalmente llevan a ecuaciones diferenciales para describir el comportamiento del sistema en los puntos de campo (Jing, 2003). Dichos sistemas se denominan continuos y tienen infinitos grados de libertad.

Para que el modelado incorpore los componentes principales de la realidad de la roca (las fracturas, la falta de homogeneidad, la anisotropía y la inelasticidad, incluida la falla), se requiere tanto un modelo como una caracterización de la masa rocosa más extensos (Jing, 2003). Sin embargo, existen diferentes problemas en las diferentes escalas, sobre todo cuando la fractura afecta a las propiedades del macizo rocoso (Jing, 2003), donde los principales problemas identificados son:

- la tensión de la roca in situ no es fácil de caracterizar sobre la región a modelar.
- las propiedades de las rocas medidas en el laboratorio pueden no representar los valores a mayor escala.
- las propiedades de las rocas no se pueden medir directamente a gran escala.
- las propiedades de las rocas pueden tener que estimarse a partir de técnicas de caracterización empírica.
- la incertidumbre en las estimaciones de las propiedades de la roca no es fácil de cuantificar.

Es de suma importancia lograr diferenciar el tipo de problema que se analizará, para así elegir una técnica de modelamiento apropiada que permita obtener resultados de acorde al objetivo del estudio, ya que, como menciona Jing (2003), el propósito del modelado numérico en la mecánica de rocas no es sólo proporcionar valores específicos

de, por ejemplo, tensión y deformación, en puntos específicos, sino también mejorar nuestra comprensión de los procesos involucrados, particularmente los cambios que resultan de las perturbaciones introducidas por la ingeniería.

### **2.5.1 Análisis de problemas continuos**

En ingeniería, la microestructura de los materiales es discontinua. Sin embargo, para una gran proporción de problemas de ingeniería no es necesario tener en cuenta la naturaleza discontinua del material, debido a que los problemas de ingeniería toman material en cantidades lo suficientemente grandes como para que la microestructura del material pueda describirse mediante propiedades de material promediadas, que son continuas (Munjiza, 2004). Además, representar los componentes microscópicos individualmente es intratable matemáticamente e innecesario en la práctica (Jing, 2003). El supuesto continuo implica que, en todos los puntos en un dominio problemático, los materiales no se pueden abrir o romper en pedazos (Jing, 2003).

La hipótesis de asumir un medio continuo es válida dependiendo de ciertas características. Según Munjiza (2004), siempre que la longitud característica del problema de ingeniería particular sea, por ejemplo, mucho mayor que la trayectoria libre media de las moléculas, la hipótesis podrá ser utilizada. Para problemas de ingeniería, la longitud característica se define por la dimensión más pequeña del problema en sí o por la dimensión más pequeña de la parte del problema de interés práctico (Munjiza, 2004). Dicha hipótesis, permite definir las propiedades físicas del material como funciones continuas de volumen, denominando a aquellas propiedades como ecuaciones físicas o leyes constitutivas que, al combinarse con los principios de equilibrio (ecuaciones de equilibrio) dan como resultado un conjunto de ecuaciones de gobierno (Munjiza, 2004).

Las ecuaciones de gobierno, cuando se combinan con acciones externas en forma de límites y condiciones iniciales (como cargas, soportes, velocidad inicial, etc.), crean un problema de valor límite o un problema de valor límite inicial (Munjiza, 2004). A menudo, dicho problema se expresa en forma analítica, pero más a menudo, se emplean métodos numéricos aproximados, incluyendo el método de diferencia finita, el método de

volumen finito, el método de elementos finitos, el método de elemento de frontera, etc. (Munjiza, 2004). La figura 5 muestra una discretización de una masa de roca mediante FDM o FEM, BEM y DEM.

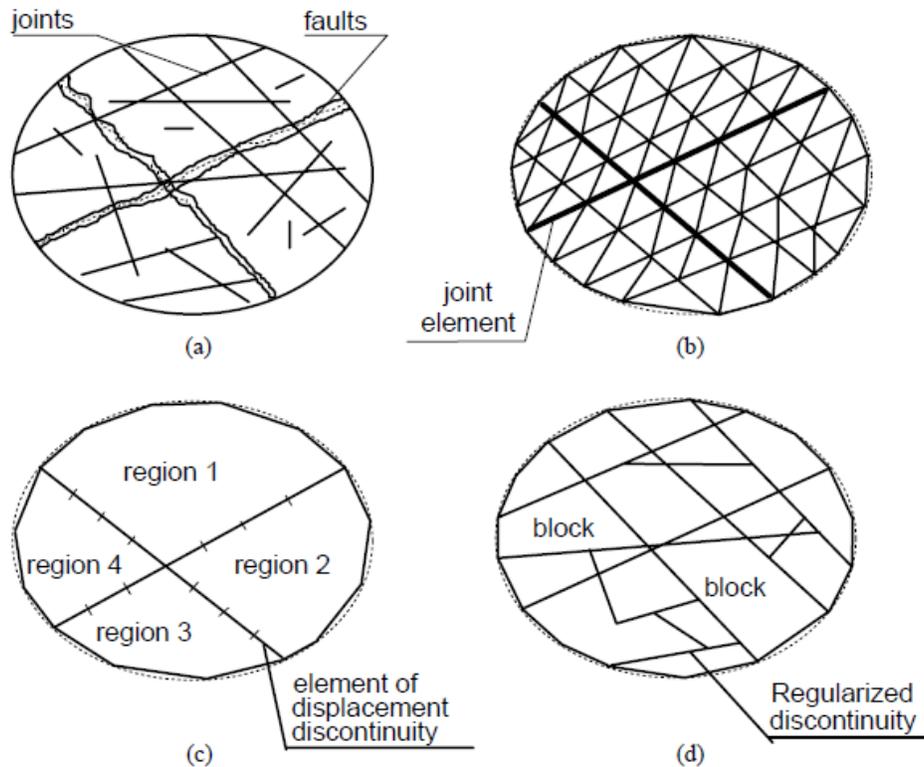


Figura 5. Representación de una masa de roca fracturada mostrada en (a), por FDM o FEM mostrada en (b), BEM mostrada en (c) y DEM mostrada en (d) (Jing, 2003).

El método de las diferencias finitas (FDM), según Jing (2003), es una aproximación directa de las ecuaciones diferenciales parciales que rigen al reemplazar derivadas parciales (PDE) con diferencias en cuadrículas regulares o irregulares impuestas sobre dominios problemáticos, transfiriendo así las PDE originales a un sistema de ecuaciones algebraicas en términos de incógnitas en los puntos de la cuadrícula. La solución de la ecuación del sistema se obtiene después de imponer las condiciones iniciales y de frontera necesarias. Este método es el miembro más antiguo de la familia de métodos numéricos, uno que se aplica ampliamente y es la base del enfoque explícito de los DEM (Jing, 2003).

El método de elementos finitos se basa en la discretización del dominio en subdominios finitos, también llamados elementos finitos (Munjiza, 2004). Los elementos finitos comparten nodos, bordes y superficies, todos los cuales comprenden una malla de elementos finitos, obteniendo la solución sobre elementos finitos individuales de forma aproximada utilizando funciones de forma (base) (Munjiza, 2004). Los elementos son de tamaños más pequeños y formas estándar (triángulo, cuadrilátero, tetraédrico, etc.) con un número fijo de nodos en los vértices y / o en los lados de la discretización (Jing, 2003). Por lo general, producen ecuaciones algebraicas, por ejemplo, el equilibrio de las fuerzas nodales, reemplazando efectivamente las ecuaciones diferenciales parciales gobernantes con un sistema de ecuaciones algebraicas simultáneas, cuya solución da resultados (por ejemplo, desplazamientos) en los nodos de elementos finitos (Munjiza, 2004).

FEM es quizás el método numérico más ampliamente aplicado en ingeniería hoy en día debido a su flexibilidad en el manejo de la heterogeneidad del material, la no linealidad y las condiciones límite, con muchos códigos comerciales bien desarrollados y verificados con grandes capacidades en términos de potencia informática, complejidad del material y facilidad de uso (Jing, 2003).

El BEM, por otro lado, requiere discretización en el límite de los dominios de solución solamente, reduciendo así las dimensiones del problema en uno y simplificando en gran medida los requisitos de entrada (Jing, 2003). Disfruta de una mayor precisión sobre el FDM y el FEM en el mismo nivel de discretización y también es la técnica más eficiente para el análisis de propagación de fracturas (Jing, 2003).

#### **2.5.1.1 Método de las diferencias finitas (FDM)**

El FDM es el método numérico más antiguo para obtener soluciones aproximadas a PDEs en ingeniería, especialmente en dinámica de fluidos, transferencia de calor y mecánica de sólidos (Jing, 2003). El FDM convencional utiliza una cuadrícula regular de nodos, como una cuadrícula rectangular como se muestra en la figura 6.

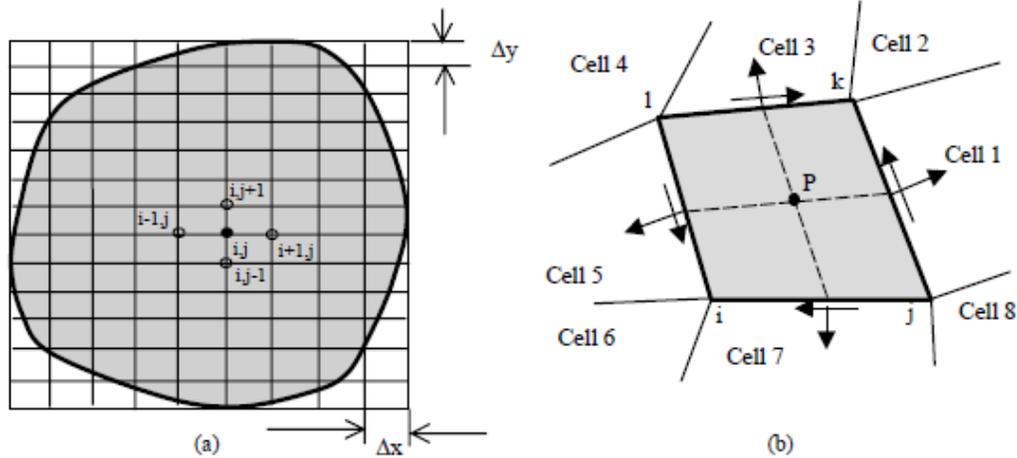


Figura 6. (a) Cuadrícula cuadrilátera regular para la FDM y (b) cuadrícula cuadrilátera irregular para FVM.

Usando un esquema FDM estándar, el llamado esquema de diferencia de 5 puntos (Fig. 6b), la ecuación FDM resultante en el nodo de la cuadrícula  $(i, j)$  se expresará como combinaciones de valores de función en sus cuatro nodos circundantes (Jing, 2003).

La naturaleza fundamental de FDM es la discretización directa de las PDE que gobiernan al reemplazar las derivadas parciales con diferencias definidas en los puntos vecinos de la cuadrícula (Jing, 2003). El sistema de cuadrícula es sólo una forma conveniente de generar valores de función objetivo en puntos de muestreo con intervalos lo suficientemente pequeños entre ellos, de modo que los errores así introducidos son lo suficientemente pequeños como para ser aceptables (Jing, 2003). No se emplean funciones locales de prueba (o interpolación) para aproximar el PDE en las cercanías de los puntos de muestreo, como se hace en FEM y BEM, por lo tanto, es la técnica más directa e intuitiva para la solución de las PDE (Jing, 2003).

El FDM convencional con sistemas de grillas regulares sufre deficiencias, sobre todo en su inflexibilidad para tratar fracturas, condiciones límite complejas e inhomogeneidad del material, lo que hace que el FDM estándar sea generalmente inadecuado para modelar problemas prácticos de mecánica de rocas (Jing, 2003). Sin embargo, se han realizado progresos significativos en la FDM para que las mallas irregulares, como las cuadrículas cuadriláteras y las cuadrículas de Voronoi también

puedan usarse (Jing, 2003). Aunque tales mallas irregulares pueden mejorar la aplicabilidad del FDM para problemas de mecánica de rocas, según Jing (2003), la mejora más significativa proviene de los llamados enfoques de volumen de control o volumen finito.

#### **2.5.1.1.1 Enfoque de volumen finito de FDM (FVM)**

Como una rama de la FDM, la FVM puede superar la inflexibilidad de la generación de grillas y las condiciones de contorno en la FDM tradicional con grillas no estructuradas de forma arbitraria. Tiene similitudes con el FEM y también se considera como un puente entre FDM y FEM, según Selim (1993) y Fallah et al. (2000), mencionado en Jing (2003). Un modelo FVM puede construirse fácilmente utilizando una malla FEM estándar, como se muestra en Bailey y Cross (1995), mencionado en Jing (2003). La razón es su ventaja especial de la formulación y estructura de datos sin resolución de ecuaciones matriciales, de modo que la integración de ecuaciones constitutivas no lineales es un paso directo de implementación por computadora, en lugar de bucles de integración iterativos de mapeo de predicción requeridos en FEM (Jing, 2003).

#### **2.5.1.2 Método de los elementos finitos (FEM)**

El Método de los elementos finitos (FEM) ha sido el método numérico más popular en las ciencias de la ingeniería, incluida la mecánica de rocas y la ingeniería de rocas (Jing, 2003). Su popularidad se debe en gran parte a su flexibilidad para manejar la falta de homogeneidad y anisotropía del material, las condiciones de contorno complejas y los problemas dinámicos, junto con la eficiencia moderada en el tratamiento de fracturas y modelos constitutivos complejos, es decir, las características de DIANE (Jing, 2003).

La falta de homogeneidad del material en FEM se incorpora de manera más directa al asignar diferentes propiedades del material a diferentes elementos (o regiones). Para imponer la condición de compatibilidad de desplazamiento, el orden de las funciones de forma a lo largo de un borde común compartido por dos elementos debe ser el mismo, de modo que no se produzca una discontinuidad de desplazamiento a lo largo y a través del borde (Jing, 2003). Para imponer la condición de compatibilidad de desplazamiento,

el orden de las funciones de forma a lo largo de un borde común compartido por dos elementos debe ser el mismo, de modo que no se produzca una discontinuidad de desplazamiento a lo largo y a través del borde (Jing, 2003).

Al simular el proceso de crecimiento de fracturas, el FEM se ve obstaculizado por el requisito de un tamaño de elemento pequeño, un reencadenamiento continuo con el crecimiento de fracturas y una trayectoria de fractura y bordes de elementos conformables, lo que hace al método FEM menos eficiente en el tratamiento de problemas de fractura que sus contrapartes BEM (Jing, 2003). Sin embargo, a pesar de que se han desarrollado algoritmos especiales en un intento de superar esta desventaja, la apertura a gran escala, el deslizamiento y el desprendimiento completo de elementos no están permitidos (Jing, 2003).

Debido a que la mecánica de rocas es uno de los campos más estimulantes para el desarrollo de métodos numéricos, con muchos desafíos especiales, como fracturas, heterogeneidad de propiedades y anisotropía, no linealidad material y geométrica, y efectos de escala y tiempo, mucho trabajo de desarrollo y aplicación de FEM tiene orientado específicamente a problemas de mecánica de rocas (Jing, 2003). El método FEM ha sido el método numérico más ampliamente aplicado para problemas de mecánica de rocas en ingeniería civil porque fue el primer método numérico con suficiente flexibilidad para el tratamiento de la heterogeneidad del material, la deformabilidad no lineal (principalmente plasticidad), las condiciones de contorno complejas, las tensiones in situ y gravedad (Jing, 2003).

### **2.5.1.3 Método del elemento límite (BEM)**

La principal ventaja de BEM es la reducción de la dimensión del modelo computacional en uno, con una generación de malla mucho más simple y, por lo tanto, la preparación de datos de entrada, en comparación con los métodos de discretización de dominio completo como FEM y FDM (Jing, 2003). Usando el mismo nivel de discretización, el BEM es a menudo más preciso que el FEM y el FDM, debido a su formulación integral directa y, además, las soluciones dentro del dominio son continuas,

a diferencia de las soluciones discontinuas puntuales obtenidas por los grupos FEM y FDM (Jing, 2003). Los dominios de solución de BEM se pueden dividir en varios subdominios con diferentes propiedades de material, y esto a menudo también reducirá el tiempo de cálculo (Jing, 2003).

Sin embargo, en general, el BEM no es tan eficiente como el FEM en el tratamiento de la heterogeneidad material, porque no puede tener tantos subdominios como elementos en el FEM (Jing, 2003). El BEM tampoco es tan eficiente como el FEM en la simulación del comportamiento de materiales no lineales, como la plasticidad y los procesos de evolución de daños, porque, como menciona Jing (2003), las integrales de dominio a menudo se presentan en estos problemas. El BEM es más adecuado para resolver problemas de fractura en cuerpos homogéneos y linealmente elásticos (Jing, 2003).

### **2.5.2 Análisis de problemas discontinuos**

La formulación matemática de los problemas discontinuos implica la ley de interacción entre partículas y principios de equilibrio. Las soluciones analíticas de estas ecuaciones rara vez están disponibles, y en su lugar se buscan soluciones numéricas aproximadas (Munjiza, 2004). Los métodos numéricos más avanzados y más utilizados son el Análisis de deformación discontinua (DDA) y los Métodos de elementos discretos (DEM). Estos métodos están diseñados para manejar situaciones de contacto para una gran cantidad de partículas irregulares. El DDA es más adecuado para problemas estáticos, mientras que DEM es más adecuado para problemas que involucran dinámicas transitorias hasta que se alcanza el estado de reposo o estado estable (Munjiza, 2004). El DEM para modelar un discontinuo es relativamente nuevo en comparación con los tres métodos descritos anteriormente para modelar problemas continuos y se centra principalmente en aplicaciones en los campos de medios geológicos fracturados o particulados (Jing, 2003).

#### **2.5.2.1 Método de los elementos discretos (DEM)**

En el método de elementos discretos, como mencionan Iturrioz, Doz y Riera (1996) se discretiza espacialmente un medio continuo mediante módulos regulares de reticulado

espacial, en los cuales las barras adoptan una rigidez equivalente al continuo que se desea modelar. Además, las masas de la estructura se concentran en los nodos, permitiendo así modelar estructuras homogéneas, y con ello, representar satisfactoriamente procesos no lineales complejos como los son la propagación de fracturas y problemas de contacto (Iturrioz, Doz y Riera, 1996). La figura 7.b muestra un prisma discretizado por varios módulos cúbicos. Como se muestra en la figura 7.a, el arreglo cúbico posee un módulo con ocho nodos en sus vértices, más un nodo central (Kosteski, Cóceres, Barrios D'Ambraa, Iturrioz y Cisilino, 2006). Es importante mencionar que cada uno de los nodos posee tres grados de libertad.

La esencia del DEM es representar el medio fracturado como conjuntos de bloques formados por fracturas conectadas en el dominio del problema, y resolver las ecuaciones de movimiento de estos bloques a través de la detección continua y el tratamiento de contactos entre los bloques (Jing, 2003).

Según lo mencionado por Jing (2003), para formular un método DEM para simular los procesos mecánicos en aplicaciones de mecánica de rocas, se deben resolver los siguientes problemas:

- subdivisión espacial e identificación de la topología del sistema de bloques.
- representación de la deformación del bloque (rígido o deformable, utilizando FVM o FEM).
- desarrollar un algoritmo para la detección de contactos (función de penalización, multiplicador de Lagrange o multiplicador de Lagrange aumentado).
- obtener ecuaciones constitutivas para los bloques de roca y fracturas.
- integración de las ecuaciones de movimiento de los bloques / partículas (relajación dinámica; FVM de marcha en el tiempo).

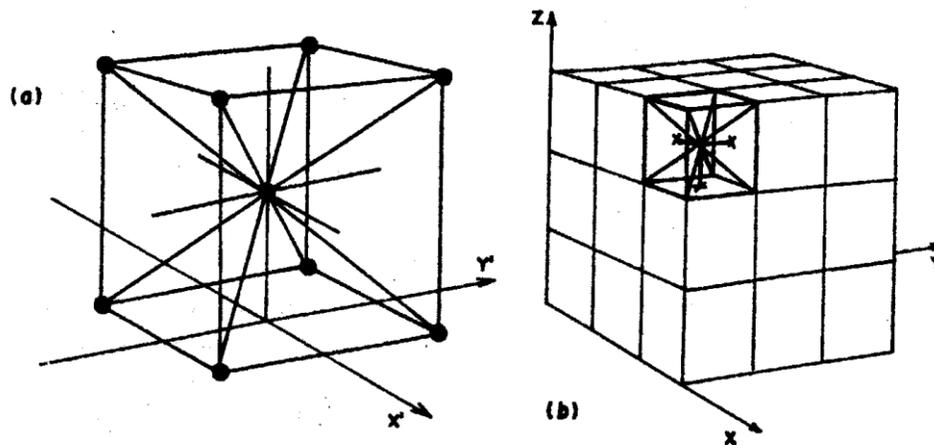


Figura 7. Modelo cúbico presentado por Nayfeh & Heftzy (1978) donde a) Módulo cúbico utilizado. b) Prisma compuesto por varios módulos cúbicos (Iturrioz, Doz y Riera (1996).

Además, no todos los problemas son tratados de la misma manera. Para el análisis de bloques rígidos, se utiliza un esquema de marcha temporal explícito para resolver las ecuaciones dinámicas de movimiento del sistema de bloques rígidos, basado en un esquema de relajación dinámico o estático, o un enfoque FDM en el dominio del tiempo (Jing, 2003). Para sistemas de bloques deformables, las estrategias de solución son diferentes para el tratamiento de la deformabilidad de bloques (Jing, 2003). Una es la solución explícita con discretización de volumen finito de los interiores del bloque, sin la necesidad de resolver ecuaciones matriciales a gran escala, siendo el Método del elemento distinto el más representativo para este tipo de problemas (Jing, 2003). La otra, como menciona Jing (2003), es una solución implícita con la discretización de elementos finitos de los interiores del bloque, lo que conduce a una ecuación matricial que representa la deformabilidad de los sistemas de bloques, similar a la del FEM, y representada principalmente por un enfoque de Análisis de deformación discontinua (DDA).

#### 2.5.2.1.1 DEM explícito: método del elemento distinto

Debido principalmente a sus atracciones conceptuales en la representación explícita de fracturas, el DEM, especialmente el Método del Elemento Distinto, ha estado disfrutando de una amplia aplicación en la ingeniería de rocas (Jing, 2003), las cuales se

concentran en problemas de roca dura y se enfocan cada vez más en el comportamiento hidromecánico acoplado, debido a los efectos dominantes de las fracturas de roca en estos aspectos, y por lo tanto, donde es necesaria la representación explícita de las fracturas. Para las rocas más blandas y débiles, los modelos continuos equivalentes son más aplicables porque hay menos diferencia entre la deformabilidad de las fracturas y la matriz de rocas (Jing, 2003).

A pesar de las ventajas de DEM, la falta de conocimiento de la geometría de las fracturas de roca limita sus aplicaciones más generales (Jing, 2003). En general, la geometría de los sistemas de fractura en las masas rocosas no se puede conocer y solo se puede estimar de manera aproximada, por lo que la adecuación de los resultados de DEM en la captura de la realidad de la roca depende en gran medida de la interpretación de la geometría del sistema de fractura in situ, que ni siquiera puede validarse moderadamente en la práctica (Jing, 2003). Una de las técnicas utilizadas para reducir la incertidumbre es la simulación de fractura de Monte Carlo, pero que, según Jing (2003), produce un incremento computacional. Por lo tanto, un tema principal para la investigación es la mayor calidad de la caracterización del sistema de fractura de rocas con medios más avanzados y asequibles, posiblemente utilizando técnicas de exploración geofísica (Jing, 2003).

#### **2.5.2.1.2 DEM implícito: análisis de deformación discontinua (DDA)**

En comparación con el enfoque explícito del DEM, el método DDA, según lo mencionado por Jing (2003) tiene cuatro ventajas básicas sobre el DEM explícito:

- la condición de equilibrio se satisface automáticamente para problemas cuasiestáticos sin utilizar ciclos de iteración excesivos.
- la duración del intervalo de tiempo puede ser mayor y sin inducir inestabilidad numérica.
- las integraciones de forma cerrada para las matrices de rigidez de elementos y bloques se pueden realizar sin la necesidad de técnicas de cuadratura gaussianas.
- es fácil convertir un código FEM existente en un código DDA e incluir muchas técnicas FEM maduras sin heredar las limitaciones del FEM ordinario, como

pequeñas deformaciones, la geometría continua del material y la eficiencia reducida para el análisis dinámico. Sin embargo, las ecuaciones matriciales se producen y necesitan ser resueltas, utilizando la misma técnica FEM.

El método DDA se ha convertido en un modelo atractivo para problemas geomecánicos debido a que sus ventajas no pueden ser reemplazadas por métodos continuos o formulaciones DEM explícitas (Jing, 2003). Las aplicaciones se centran principalmente en procesos de túneles, cavernas, fracturas y fragmentación de materiales geológicos y estructurales y efectos de terremotos (Jing, 2003).

### **2.5.2.2 Método de red de fractura discreta (DFN)**

El método DFN es un modelo discreto especial que considera el flujo de fluidos y los procesos de transporte en masas de rocas fracturadas a través de un sistema de fracturas conectadas (Jing, 2003).

El enfoque DFN, como es mencionado por Jing (2003) dificulta la modelación de los efectos de la deformación mecánica y la transferencia de calor en una masa de roca sobre el flujo y el transporte de fluidos y tal vez se aproximen sin una representación explícita de las fracturas. Por lo tanto, este método es más útil para el estudio del flujo y transporte en medios fracturados en el cual, un modelo equivalente continuo es difícil de establecer, y para la derivación del flujo continuo equivalente y las propiedades de transporte de las rocas fracturadas (según Yu et al., 1999; Zimmerman y Bodvasson, 1996, mencionado en Jing, 2003).

El modelo DFN, según lo mencionado por Jing (2003) se establece en la comprensión y representación de los dos factores clave: la geometría del sistema de fractura y la transmisividad de fracturas individuales. El primero se basa en simulaciones estocásticas de sistemas de fractura, utilizando las PDF de los parámetros de fractura (densidad, orientación, tamaño, apertura o transmisividad) formulados de acuerdo con los resultados del mapeo de campo, además del supuesto sobre la forma de la fractura (circular, elíptica o generalmente poligonal), donde la confiabilidad de la información de la red de fractura depende de la calidad del mapeo y la representatividad del muestreo,

y por lo tanto su adecuación es difícil de evaluar (Jing, 2003). Igualmente, difícil es la representación de la transmisividad de la población de fracturas, debido al hecho de que las pruebas in situ y de laboratorio sólo pueden realizarse en un número limitado de muestras de fracturas en lugares restringidos, y el efecto de la escala de la muestra es difícil de determinar (Jing, 2003).

A pesar de los obstáculos anteriores, el modelo DFN goza de amplias aplicaciones para problemas de rocas fracturadas, tal vez debido principalmente al hecho de que es una herramienta hasta ahora insustituible para modelar el flujo de fluidos y los fenómenos de transporte en la escala de "campo cercano", donde un dominio de la geometría de la fractura en escalas pequeñas y moderadas hace que el principio de promedio de volumen utilizado en aproximaciones continuas a veces sea inaceptable en tales escalas (Jing, 2003). Su aplicabilidad disminuye para problemas de "campo lejano" a grandes escalas cuando la representación explícita de grandes cantidades de fracturas hace que el modelo computacional sea menos eficiente, y el modelo continuo con propiedades equivalentes se vuelve más atractivo, similar al DEM (Jing, 2003).

### **2.5.3 Análisis de problemas continuos-discontinuos**

Existen problemas que se consideran una combinación de un análisis continuo y discontinuo, y por lo tanto se denominan problemas combinados continuos-discontinuos (Munjiza, 2004). La deformabilidad de ciertas partículas individuales se describe mejor utilizando la formulación hipotética continua, mientras que la interacción y el movimiento de las partículas individuales se describe mejor usando la formulación discontinua (Munjiza, 2004). Las soluciones analíticas de las ecuaciones de gobierno obtenidas rara vez están disponibles, y se deben emplear enfoques numéricos, donde se incluyen DDA y DEM con características adicionales para capturar la deformabilidad (Munjiza, 2004).

Sin embargo, según Munjiza (2004) el enfoque más avanzado es utilizar el método de elementos finitos para modelar fenómenos basados en problemas continuos (en este caso, la deformabilidad) y el método del elemento discreto para modelar fenómenos discontinuos (interacción y movimiento de partículas individuales). Por lo tanto, el nuevo

método es una combinación tanto del método de elementos finitos como del método de elementos discretos, y se denomina método combinado de elementos finitos y discretos (FEM / DEM).

#### **2.5.4 Método de elementos discretos-límites (DEM/BEM)**

El concepto básico del método DEM/BEM es tratar la región BEM (que rodea a la región DEM) como un bloque 'súper' que tiene contactos con bloques más pequeños a lo largo de las interfaces con la región DEM. Las condiciones clave, según Jing (2003) son:

- la continuidad cinemática a lo largo de las interfaces de las dos regiones durante el proceso de marcha en el tiempo.
- las propiedades elásticas de las dos regiones cercanas a la interfaz son similares.

La condición dos indica que los bloques en las regiones DEM deben ser deformables, es decir, no ser bloques rígidos (Jing, 2003). En el caso de sistemas mixtos de bloques rígidos y deformables, es necesario desarrollar ecuaciones de movimiento especiales para manejar tales casos (Jing, 2003).

Además, el campo cercano de una masa de roca fracturada se simula usando modelos DEM y DFN, usando códigos DFN y DEM independientes, para representar el dominio de las fracturas en el flujo de fluido de campo cercano y la tensión/deformación de los bloques de roca, y el campo lejano es simulado por códigos BEM para flujo y esfuerzo / deformación en un continuo (Jing, 2003).

#### **2.5.5 Método de elementos finitos-discretos (FEM/DEM)**

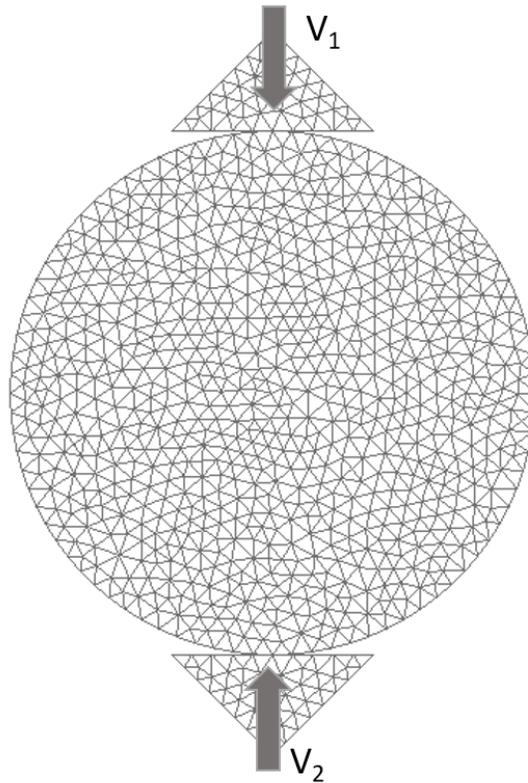
FDEM es una técnica numérica innovadora que combina las ventajas de los enfoques de modelado continuo y los métodos de elementos discretos para superar la incapacidad de estos métodos para capturar procesos progresivos de daño y falla en

rocas (Mahabadi, 2012). En particular, FDEM ofrece la capacidad de modelar explícitamente la transición del comportamiento continuo a discontinuo mediante procesos de fractura y fragmentación (Mahabadi, 2012).

En el método combinado de elementos discretos (FDEM), como menciona Mahabadi (2012), cada elemento discreto se combina en elementos finitos, donde las mallas definen la forma y los límites de los elementos discretos y el contacto entre ellos, y permiten que los elementos discretos se deformen. Las deformaciones continuas se modelan a través de elementos finitos, mientras que el comportamiento discontinuo se analiza mediante elementos discretos (Mahabadi, 2012). Una simulación combinada del método del elemento finito-discreto comprende una gran cantidad de cuerpos que interactúan, cada uno con una malla separada de elementos finitos. Un ejemplo es presentado en la figura 8, donde es posible observar la configuración de un modelo FDEM con sus respectivos elementos y nodos.

Como menciona Munjiza (2004), el número total de mallas de elementos finitos empleados es igual al número total de elementos discretos, donde cada una de las mallas de elementos finitos empleada captura la deformabilidad de un único elemento discreto (partícula, cuerpo).

En la técnica híbrida continua-discontinua conocida como FDEM, la simulación comienza con una representación continua del dominio sólido de interés. A medida que avanza la simulación, típicamente a través de la integración explícita de las ecuaciones de movimiento, se permite que se formen nuevas discontinuidades al satisfacer algún criterio de fractura, lo que conduce a la formación de nuevos cuerpos discretos. En general, el enfoque combina técnicas FEM con conceptos DEM, según Barla y Beer (2012), mencionado por Lisjak y Grasselli (2014).



*Figura 8.* Ejemplo de configuración de un modelo FEM/DEM mostrando elementos y nodos (Mediante software Irazu).

Según Abdelaziz, Zhao y Grasselli (2018), el método se desarrolló aún más para simular el comportamiento de la roca, modelando explícitamente la deformación elástica de la roca, el inicio de la grieta y la propagación de la grieta. Se construye un modelo FDEM bidimensional (2D) basado en una malla de elementos triangulares discretos (Fig. 9), donde cada par adyacente de elementos triangulares está conectado con un elemento de grieta cohesivo (CCE por sus siglas en ingles) de cuatro nodos (Abdelaziz, Zhao, Grasselli, 2018).

Como mencionan Abdelaziz, Zhao, Grasselli (2018), CCE sufre una deformación elástica de acuerdo con las condiciones de tensión, y una vez que la tensión dentro de los elementos supera la resistencia intrínseca del material, se inicia el proceso de rendimiento y falla basado en el desplazamiento. Este proceso se simula modelando explícitamente el inicio y la propagación de grietas utilizando el ablandamiento y la rotura del CCE, lo que permite que el modelo pase de un estado continuo a uno discontinuo

(Fig. 9). A medida que avanza la simulación, se permiten desplazamientos finitos y rotaciones de los cuerpos discretos y se reconocen nuevos contactos (Abdelaziz, Zhao, Grasselli, 2018).

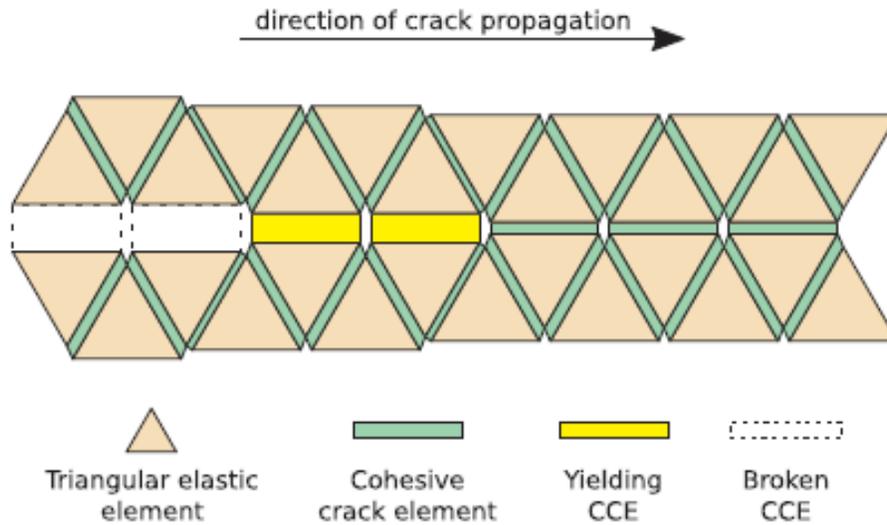


Figura 9. Comportamiento típico de los elementos cohesivos (Abdelaziz, Zhao, Grasselli, 2018).

### 2.5.5.1 Detección de contactos e interacción

Un algoritmo de detección de contactos permite detectar todos los pares de elementos de contacto y también aquellos pares que se encontraban en contacto y que actualmente se encuentran demasiado lejos para estar en contacto. Como menciona Munjiza (Citado por Mahabadi, 2012), dentro del código FDEM se implementa un algoritmo de detección denominado Munjiza-NBS. El algoritmo Munjiza-NBS es uno de los algoritmos de detección más eficientes desarrollados hasta la fecha. El tiempo total de ejecución de CPU depende linealmente de la cantidad total de elementos discretos (Mahabadi, 2012) y la interacción de contactos tiene una importancia fundamental en FDEM debido a que este define el comportamiento de la interacción entre los distintos elementos. Tan pronto como el algoritmo de detección de contacto detecta pares de elementos en contacto, se realiza la interacción de contacto para calcular las fuerzas entre cuerpos discretos, utilizando un método de función potencial para el algoritmo de

interacción. Este método se basa en el supuesto de que los pares en contacto tienden a penetrar entre sí, generando fuerzas de contacto distribuidas (Mahabadi, 2012).

### 2.5.5.2 Modelo de Fractura

La transición de continuo a discontinuo se logra a través de procesos de fractura y fragmentación, al conducir fracturas a través de la interfaz entre elementos finitos triangulares adyacentes, donde la alteración, daño, deformación o falla de elementos microestructurales del material conduce a la fractura (Mahabadi, 2012). Debido a la presencia de defectos microestructurales y concentraciones de tensión, los campos de tensión y deformación deben modificarse.

En cada modelo de fractura presente en el código FDEM, una curva de tensión-deformación típica para roca (en tensión directa) se divide en dos secciones (figura 10). (1) endurecimiento por deformación antes de alcanzar la deformación máxima ( $\epsilon_t$ ), que se implementa en FDEM a través de una ley constitutiva, y (2) ablandamiento por deformación donde el estrés disminuye con un aumento en la deformación (Mahabadi, 2012).

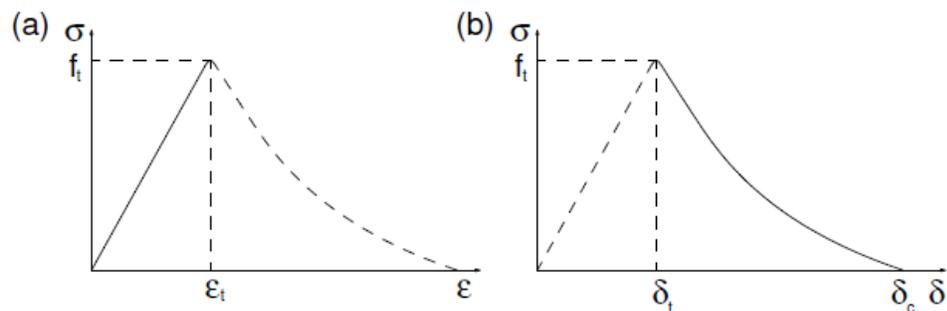


Figura 10. (a) curva de tensión-deformación dividida en las ramas de endurecimiento y ablandamiento; (b) ablandamiento de deformación definido en términos de desplazamientos según Munjiza (2004), citado por Mahabadi (2012).

La relación entre el estrés por ablandamiento y el desplazamiento se modela a través de un modelo de grietas cohesivas mediante el cual se genera un esfuerzo de

unión proporcional a la separación de los bordes de fractura (es decir, apertura de grietas y deslizamiento) (figura 11) (Mahabadi, 2012).

Cuando el tamaño de la separación es cero ( $\bar{\delta} = \bar{\delta}_t = 0$ ), el esfuerzo de unión,  $\sigma$ , es igual a la resistencia a la tracción  $f_t$ , por lo tanto, la separación comienza solo después de que se excede la resistencia a la tensión del material (Mahabadi, 2012).

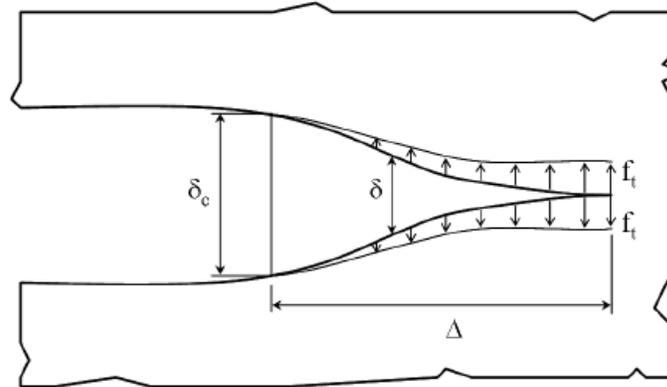


Figura 11. Representación de un modelo de grietas cohesivo según Munjiza (2004), citado por Mahabadi (2012).

A medida que aumenta la separación ( $\bar{\delta} > \bar{\delta}_t$ ), el esfuerzo de unión disminuye hasta  $\bar{\delta} = \bar{\delta}_c$ , la distancia crítica de apertura en cuyo punto el esfuerzo de unión llega a cero (Mahabadi, 2012).

### 3. METODOLOGÍA

En esta sección, se presenta una descripción de la metodología utilizada para llevar a cabo el estudio. La metodología implica una serie de simulaciones mediante un modelado numérico, que son comparadas con datos experimentales para comprobar su idoneidad y representatividad.

#### 3.1 Modelamiento Numérico

El código numérico utilizado para este estudio fue el Método combinado de elementos finitos y discretos (FEM/DEM), basado en el código Y-Geo. El software utilizado y que implementa dicho código es el software Irazu, el cual ofrece la capacidad de modelar explícitamente la transición de un medio continuo a discontinuo, mediante los procesos de fractura y fragmentación. El modelo de fractura utiliza elementos de unión cohesivos a lo largo de los límites de los elementos y permite el agrietamiento de modo I, el modo II y modo mixto.

Para utilizar el código y así evaluar el impacto de la heterogeneidad y las microestructuras en el comportamiento de la muestra de roca, se construyen tres modelos basados de una prueba de discos brasileños. Primero, se construye un modelo equivalente homogéneo, construido a partir de las propiedades de los minerales medidas en laboratorio. Segundo, se introduce la heterogeneidad de la muestra dentro del modelo. La muestra se basa en una muestra *Stanstead Granite*, la cual contiene 71% de feldespato, 21% de cuarzo y un 8% de biotita. Para ello, se realiza un mapeo uno a uno de la muestra para incorporar la ubicación exacta de los minerales dentro de cada uno de los elementos. Finalmente, se incorpora dentro del modelo heterogéneo una densidad de microgrietas, cuyo P21 posee un valor de  $4.5 \text{ mm/mm}^2$ . Las microfracturas son incorporadas dentro del modelo mediante DFN mediante el mismo software Irazu. Cada uno de los modelos fue construido en dos dimensiones, con un único grosor de los discos de 1 mm. Además, debido a que la resistencia de la muestra aumenta a medida que se le aplica una mayor tasa de carga, se realiza un análisis de sensibilidad para obtener una condición límite aplicable en cada uno de los modelos y que no altere los resultados. Para

ello, se utiliza una muestra homogénea con una malla constante para cada una de las velocidades de carga. La malla posee un tamaño de elemento de 0.2 mm en el centro y 1 mm en el resto de la muestra. La resistencia de la muestra es medida para velocidades de carga de 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 5 y 10 m / s.

Luego, de manera análoga se construye tanto un modelo homogéneo como heterogéneo de muestras de ensayos de compresión uniaxial simple (UCS) para ser comparados con resultado experimental. Para el caso heterogéneo, los minerales son asignados a los elementos de forma aleatoria, considerando la proporción de cada uno de ellos (71% feldespatos, 21% cuarzo y 8% biotita).

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

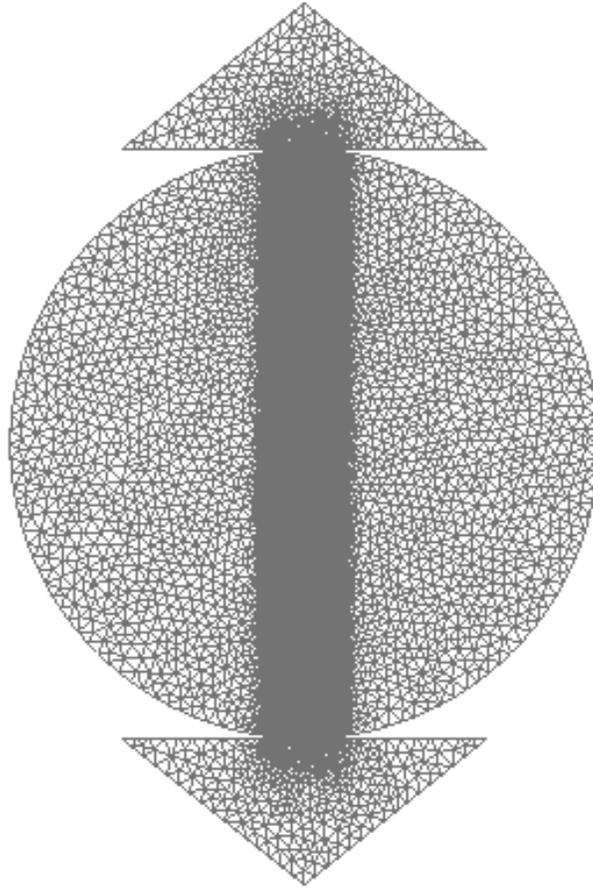
### **4.1 Prueba de Discos Brasileños**

#### **4.1.1 Modelo Homogéneo.**

##### **4.1.1.1 Configuración Modelo Homogéneo**

Se utiliza un tamaño de disco de 40 mm de diámetro para poder representar lo mejor posible la muestra real. Una malla fina de 0.2 mm en el centro es utilizada y con un tamaño de 1 mm en el resto de la muestra para reducir la demanda computacional (figura 12). La malla fina en el centro permite capturar de mejor forma el proceso de falla de la muestra. Para este caso no se consideran microfracturas dentro del modelo. En total se utilizan 21334 elementos y 10833 nodos. Un modelo equivalente homogéneo es construido a partir de los parámetros geomecánicos de una muestra heterogénea, basándose en los porcentajes de cada mineral presente (tabla 1).

Debido a que la resistencia de la muestra aumenta a medida que la tasa de carga es incrementada, se realiza un análisis de sensibilidad para valores de 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 5 y 10 m / s. Los resultados son presentes en la figura 13. Se observan valores casi constantes hasta una velocidad de carga de 0.5 m /s. Para efectos computacionales, una velocidad de 0.25 m/s es seleccionada para cada uno de los modelos construidos.



*Figura 12.* Malla utilizada para el modelo Homogéneo con tamaño de elemento de 0.2 mm en el centro y 1 mm en el resto de la muestra

*Tabla 1.* Parámetros experimentales utilizados para la construcción del modelo.

Modelo equivalente Homogéneo	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	2661,0
Modulo de Young (GPa)	52,0
Ratio de poisson	0,23
Resistencia a la tensión (MPa)	6,48
Cohesión (MPa)	26.3
Ángulo de fricción Interna (°)	52,1
Modo I Falla (N/m)	243,72
Modo II Falla (N/m)	487,45

## Análisis de sensibilidad de carga

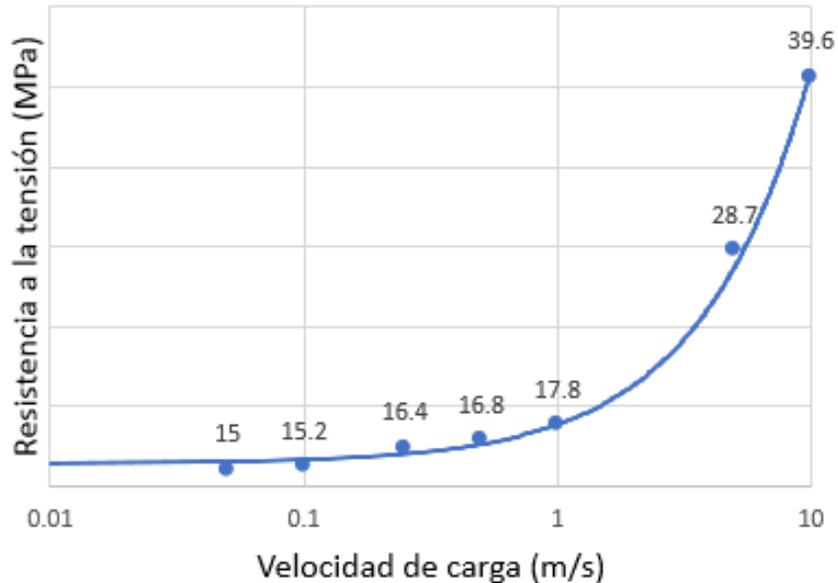


Figura 13. Análisis de sensibilidad de carga. Se realiza un análisis de sensibilidad para valores de 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 5 y 10 m / s.

### 4.1.1.2 Resultados modelo homogéneo

El modelo equivalente homogéneo obtuvo una resistencia a la tensión de 16.7 MPa, muy superior al valor experimental (6.48 MPa para el valor promedio de los ensayos experimentales la roca). Esto se debe principalmente a no incluir heterogeneidad y microestructuras dentro del modelo. Luego de alcanzar el valor máximo de stress permitido en la muestra, se observa un comportamiento frágil, decayendo en gran cantidad los valores de stress (figura 14). El resultado de la simulación captura una clara ruptura en el centro de la muestra (figura 15), presentando división por tensión en el centro de la muestra (modo I de falla), mientras que un modo de falla por compresión o corte (modo II de falla) cerca de los puntos de carga (anexo 1).

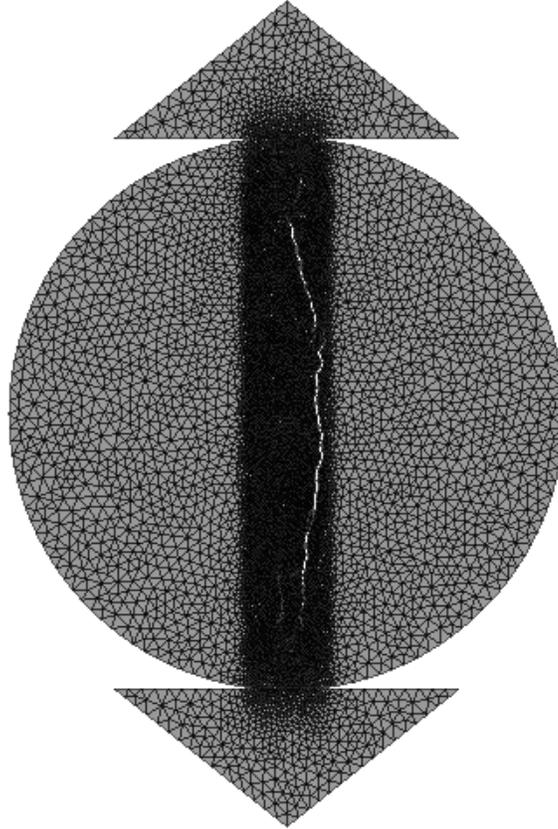


*Figura 14.* Curva Stress-Desplazamiento para el modelo equivalente homogéneo. El valor máximo de stress alcanzado es de 16.7 MPa, sobreestimando la capacidad de la muestra.

Se analiza la influencia de la orientación de microestructuras dentro del modelo equivalente homogéneo. Para ello, se consideraron tres fracturas con orientación de 90° (paralelas a la dirección de carga y separación entre fracturas de 5 mm entre fracturas) mostradas en la figura 16.a) y tres fracturas con orientación de 0° (perpendiculares a la dirección de carga y separación de 7.5 mm entre fracturas) visualizadas en la figura 16.b), analizados por separado y con un largo de fracturas de 5 mm.

La malla utilizada para el primer caso posee un total de 5302 elementos y 2795 nodos, con un tamaño promedio de elemento de 0.8 mm. Para las fracturas perpendiculares a la dirección de carga se utiliza un total de 6872 elementos y 3580 nodos, con un tamaño promedio de elemento de 0.8 mm.

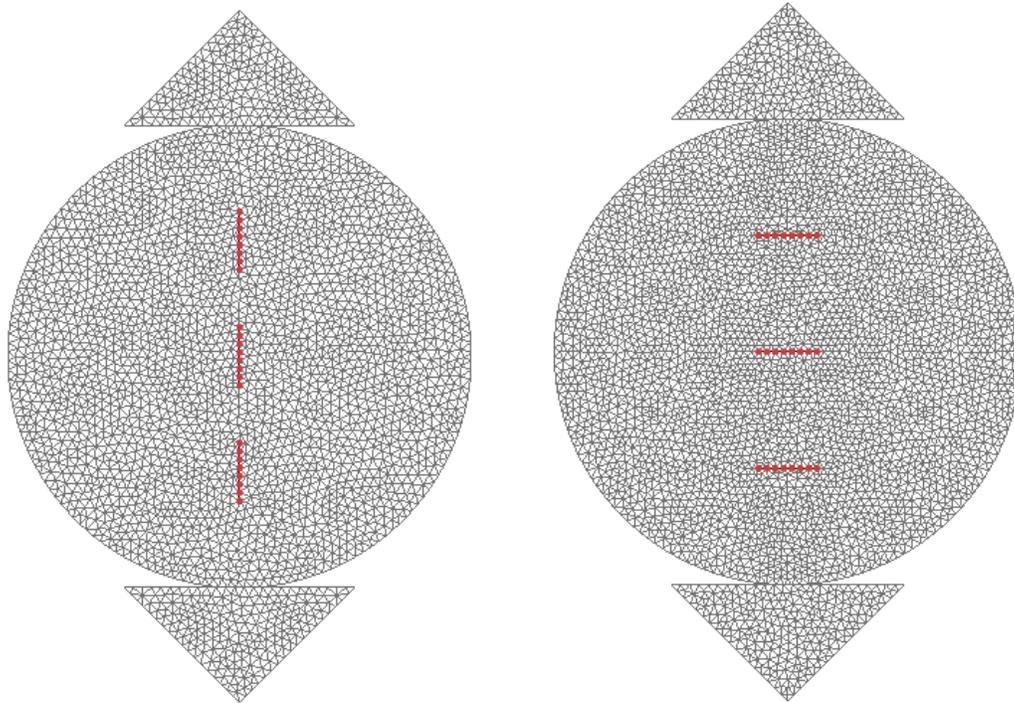
Considerando fracturas paralelas a la dirección de carga se obtiene un stress máximo de 4.7 MPa (curva Stress-Desplazamiento para modelo con fracturas paralelas en Anexo 2), reduciendo en un 71.1% el valor obtenido sin fracturas (16.7 MPa) y facilitando la falla de la muestra al existir coalescencia entre las fracturas (Anexo 3).



*Figura 15.* Resultado de la simulación para el modelo homogéneo en un tiempo de 0.288 ms. Se observa una clara ruptura en el centro de la muestra.

Para el caso con fracturas perpendiculares a la dirección de carga, se obtiene un stress máximo de 13.9 MPa, reduciendo solo en un 16.7% (curva Stress-Desplazamiento para modelo con fracturas perpendiculares en Anexo 4).

El hecho de que las fracturas estén orientadas perpendicular a la dirección de carga, impide que la carga aplicada se distribuya por toda muestra, dificultando la ruptura y que las fracturas se junten como en el caso anterior.



*Figura 16.* a) Fracturas paralelas a la dirección de carga. Distancia de separación y largo de fracturas de 5 mm y b) fracturas perpendiculares a la dirección de carga. Distancia de separación de 7.5 mm y largo de fracturas de 5 mm.

De forma análoga, se analiza la influencia de la orientación de las fracturas en la resistencia de la muestra equivalente homogénea. Para ello, se utilizan las mismas tres fracturas utilizadas anteriormente, pero orientadas con un ángulo de  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $165^\circ$  y  $180^\circ$  girando en torno al centro de cada una de ellas. Los resultados mostrados en la figura 17 muestran una disminución en el stress máximo alcanzado en la muestra a medida que la orientación de las fracturas se acerca a la dirección de carga, demostrando que la orientación afecta en su resistencia. Se observa que el menor stress es alcanzado para una orientación de fracturas de  $45^\circ$ , alcanzando un valor de 3,83 MPa. Por otro lado, el mayor stress es obtenido para una orientación de fracturas de  $0^\circ$  y  $180^\circ$  (perpendicular a la dirección de carga), con un valor de 13.9 MPa.

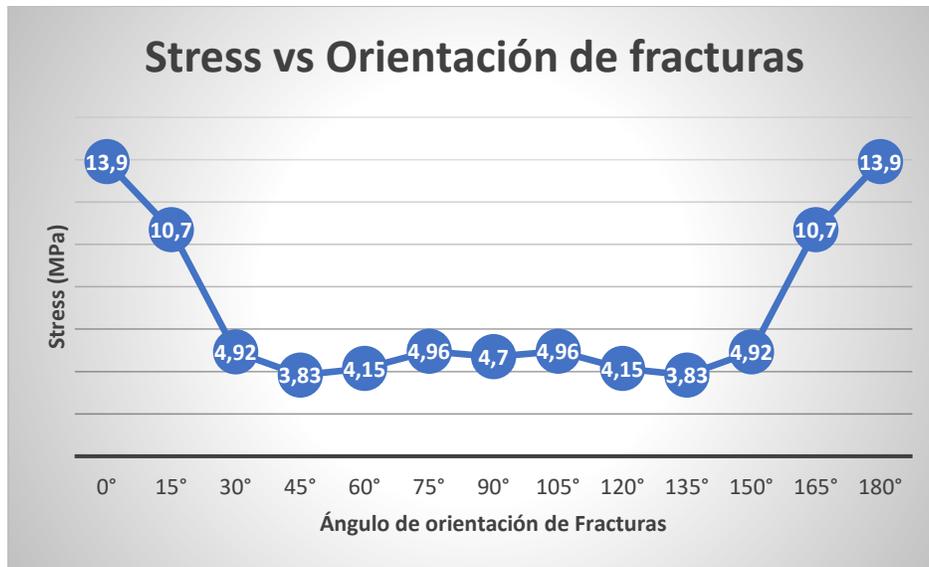


Figura 17. Gráfico de stress máximo vs ángulo de orientación de fracturas.

## 4.1.2 Modelo Heterogéneo sin fracturas

### 4.1.2.1 Configuración Modelo Heterogéneo

Se utiliza un tamaño de disco de 40 mm de diámetro para poder representar lo mejor posible la muestra real. Una malla fina de 0.2 mm en el centro es utilizada y con un tamaño de 1 mm en el resto de la muestra para reducir la demanda computacional. La malla fina en el centro permite capturar de mejor manera el modo de falla de la muestra. Para este caso no se consideran microfracturas dentro del modelo. En total se utilizan 16668 elementos y 8486 nodos con la malla utilizada. A partir de una imagen de una muestra de *Stantead Granite* obtenida mediante Tomografía Computarizada de Rayos X ( $\mu$ CT) y extraída de la literatura (Mahabadi, 2012), el modelo es construido realizando un mapeo uno a uno de la muestra para obtener la ubicación exacta de los minerales (figura 18). Cabe destacar que, como es posible observar en la figura 4, a menor tamaño de elemento, mayor parecido de la muestra con el modelo.

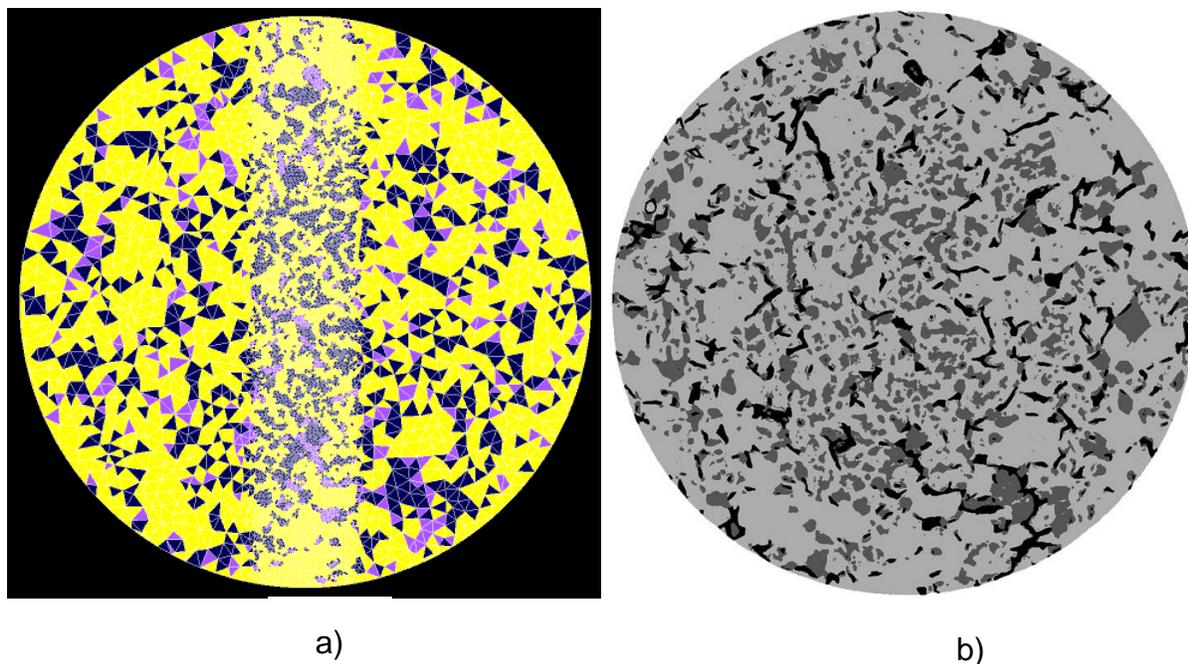


Figura 18. a) Malla utilizada para el modelo heterogéneo con tamaño de elemento de 0.2 mm en el centro y 1 mm en el resto de la muestra. Se realiza un mapeo uno a uno en la muestra para obtener la ubicación exacta de los minerales; y b) imagen de una muestra de *Stantead Granite* obtenida mediante Tomografía Computarizada de Rayos X ( $\mu$ CT) y extraída de la literatura (Mahabadi, 2012).

Los parámetros de entrada para cada uno de los minerales constituyentes utilizados para simular la muestra son extraídos de la literatura y presentados en la tabla 2. Los parámetros de entrada de las interfaces entre los minerales son presentados en la tabla 3.

Tabla 2. Parámetros experimentales de minerales constituyentes utilizados para la construcción del modelo heterogéneo.

Parámetros de entrada minerales constituyentes	Cuarzo	Feldespatos	Biotita
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	2600	2600	2800
Modulo de Young (GPa)	83.1	56.4	17.2
Ratio de poisson	0.17	0.29	0.2
Resistencia a la tensión (MPa)	10	10	7
Cohesión (MPa)	25	25	25
Ángulo de fricción Interna	1.27	1.27	1.27
Modo I Falla (N/m)	906.65	309.79	599.08

Parámetros de entrada minerales constituyentes	Cuarzo	Feldespatos	Biotita
Modo II Falla (N/m)	1813.29	619.59	1198.15

*Tabla 3. Parámetros experimentales de interfaces de minerales constituyentes utilizados para la construcción del modelo heterogéneo.*

INTERFACES	Feld-Qz	Qz-Bt	Feld-Bt
Coeficiente de Fricción	0.82	0.82	0.82
Cohesión (MPa)	19.30	19.30	19.30
Resistencia a la tensión (MPa)	0.24	0.21	0.21
Modo I Energía de Fractura (N/m)	0.006	0.0005	0.0005
Modo II Energía de Fractura(N/m)	1451	382	382

Al aplicar una velocidad de carga de  $v / 2 = 0.125 \text{ m / s}$  (al igual que en el modelo homogéneo) sobre cada una de las placas (misma dirección, pero distinto sentido) en compresión se obtienen condiciones de carga uniaxial con una velocidad de carga total igual a  $0.25 \text{ m / s}$ .

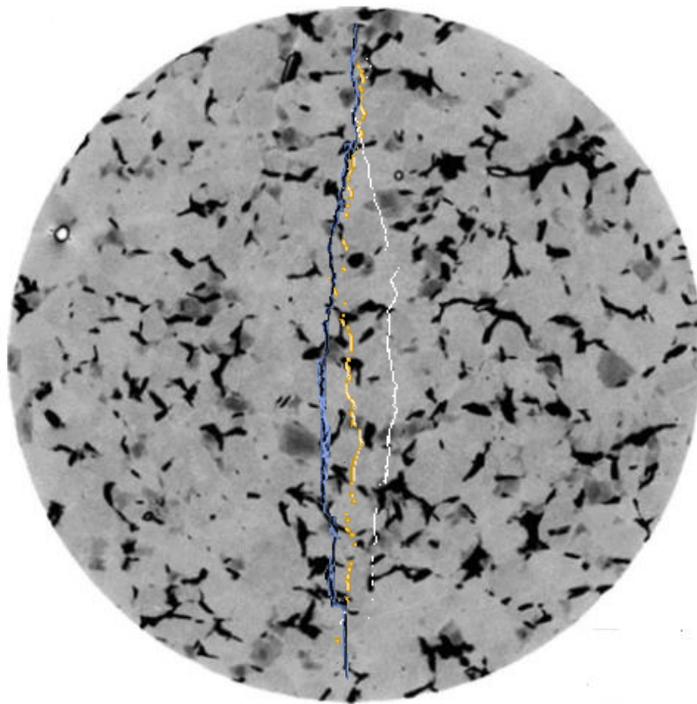
#### 4.1.2.2 Resultados modelo heterogéneo

El modelo heterogéneo sin fracturas obtuvo una resistencia a la tensión de 13.6 MPa, aún muy superior al valor obtenido en laboratorio (6.48 MPa para el valor promedio de los ensayos experimentales la roca y 6.15 para la muestra específica) (figura 19). Si bien, la resistencia de la muestra disminuyó en comparación al modelo homogéneo, al no incluir las microfisuras dentro del modelo, se sigue sobreestimando la capacidad de carga de la muestra y aún no es posible capturar su comportamiento mecánico real.

Para demostrar la importancia de la heterogeneidad dentro de la muestra, los patrones de fractura obtenidos en la simulación heterogénea son comparados con la simulación homogénea y superpuestos sobre el resultado experimental extraído de la literatura (figura 20) (Mahabadi, 2012). Como se muestra en la figura 20, el resultado homogéneo falla la captura del patrón de fractura de la muestra experimental analizada. Para el caso heterogéneo, si bien aún se sobreestima la capacidad de la muestra, el resultado de dicha simulación captura el patrón de fractura con mayor precisión.



*Figura 19.* Curva Stress-Desplazamiento para el modelo heterogeneo sin fracturas. El valor máximo de stress alcanzado es de 13.6 MPa, sobreestimando la capacidad de la muestra.



*Figura 20.* Comparación de patrones de fractura homogéneo y heterogéneo superpuestos sobre resultado experimental. La línea blanca corresponde a resultado homogéneo, la línea amarilla está asociada a resultado heterogéneo y la línea azul representa al resultado experimental.

Al incorporar la heterogeneidad dentro del modelo, se perturba el estado de stress de la muestra homogénea, creando stress de tensión local. Además, las interfaces de los minerales son más débiles que los minerales mismos. En consecuencia, la combinación de los stress de tensión local, junto con las interfaces débiles crea zonas preferenciales de fractura, además de alterar el proceso de fractura obtenido en el modelo homogéneo.

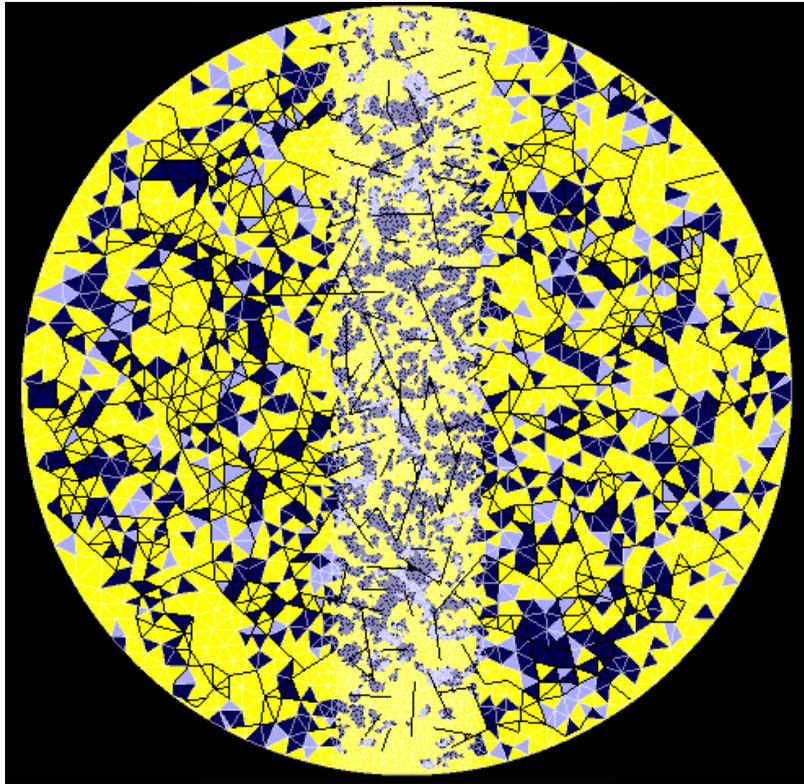
#### **4.1.3 Modelo Heterogéneo con microfracturas.**

##### **4.1.3.1 Configuración Modelo Heterogéneo**

La misma geometría que el modelo heterogéneo sin fracturas es utilizada (tamaño de disco de 40 mm de diámetro, malla fina de 0.2 mm en el centro y tamaño de elemento de 1 mm en el resto de la muestra para reducir la demanda computacional). En total se utilizan 16668 elementos y 8486 nodos con la malla utilizada. A diferencia del modelo anterior, se incorporan redes de fracturas discretas (DFN) de forma aleatoria (figura 21). Para ello, se considera una densidad de microgrietas de 4.5 mm/mm<sup>2</sup> obtenida al analizar la muestra en laboratorio mediante pequeñas secciones y extraída de la literatura (Mahabadi, 2020). Los parámetros de entrada para los minerales constituyentes y sus interfaces son los presentes en las tablas 2 y 3. Nuevamente se considera una velocidad de carga de  $v / 2 = 0.125 \text{ m / s}$  sobre cada una de las placas en compresión (misma dirección, pero distinto sentido) para obtener condiciones de carga uniaxial con velocidad de carga total igual a 0.25 m / s.

##### **4.1.3.2 Resultados modelo heterogéneo con fracturas**

El modelo heterogéneo con fracturas obtuvo una resistencia a la tensión de 5.98 MPa (figura 22), muy cercano a los 6.15 MPa obtenidos experimentalmente. Debido a que la muestra real presentaba microfracturas, al incorporar de forma aleatoria una densidad de microgrietas dentro del modelo se logra obtener un comportamiento muy cercano a la realidad, subestimando solo en un 3.15%.



*Figura 21.* Malla utilizada para el modelo heterogéneo con microfracturas. Se asigna un tamaño de elemento de 0.2 mm en el centro y 1 mm en el resto de la muestra. Las microfracturas se construyen dentro del modelo de forma aleatorio mediante DFN, con un  $p_{21}$  de  $4.5 \text{ mm/mm}^2$ .

La Tabla 4 presenta un resumen del stress máximo alcanzado para las muestras homogénea, heterogénea sin microfracturas y heterogénea con microfracturas. Al incorporar la heterogeneidad dentro de la muestra, la trayectoria de falla varía con respecto al resultado homogéneo, pero el stress máximo aún es sobreestimado. Se comprueba que el incorporar los defectos microestructurales dentro de la muestra permite obtener una respuesta más precisa con respecto al resultado experimental. Además, se comprueba que el mayor impacto en la resistencia de la muestra es producido por los defectos microestructurales, cumpliendo un rol más importante que la heterogeneidad al generar mayor debilidad en la muestra.

## Stress vs Desplazamiento

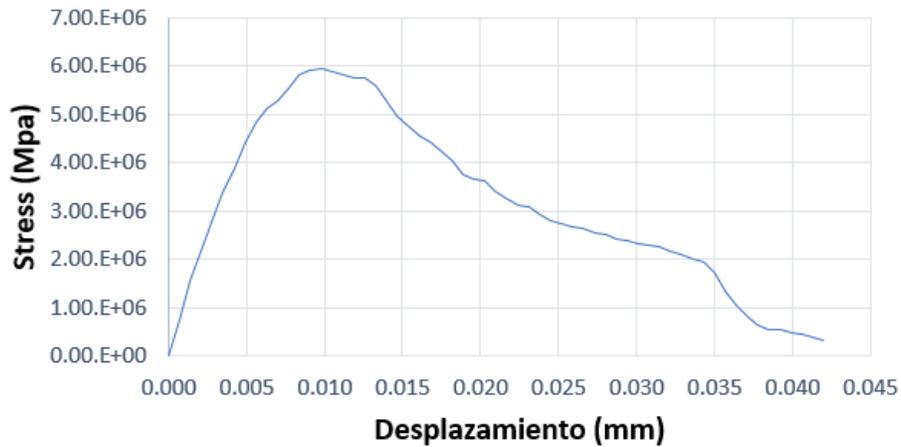


Figura 22. Curva Stress-Desplazamiento para el modelo heterogéneo con fracturas. El valor máximo de stress alcanzado es de 5.98 MPa, subestimando solo en un 3.15% el valor real.

Tabla 4. Resumen stress máximo alcanzado para muestra equivalente homogénea, muestra heterogénea sin microfracturas y muestra heterogénea con microfracturas.

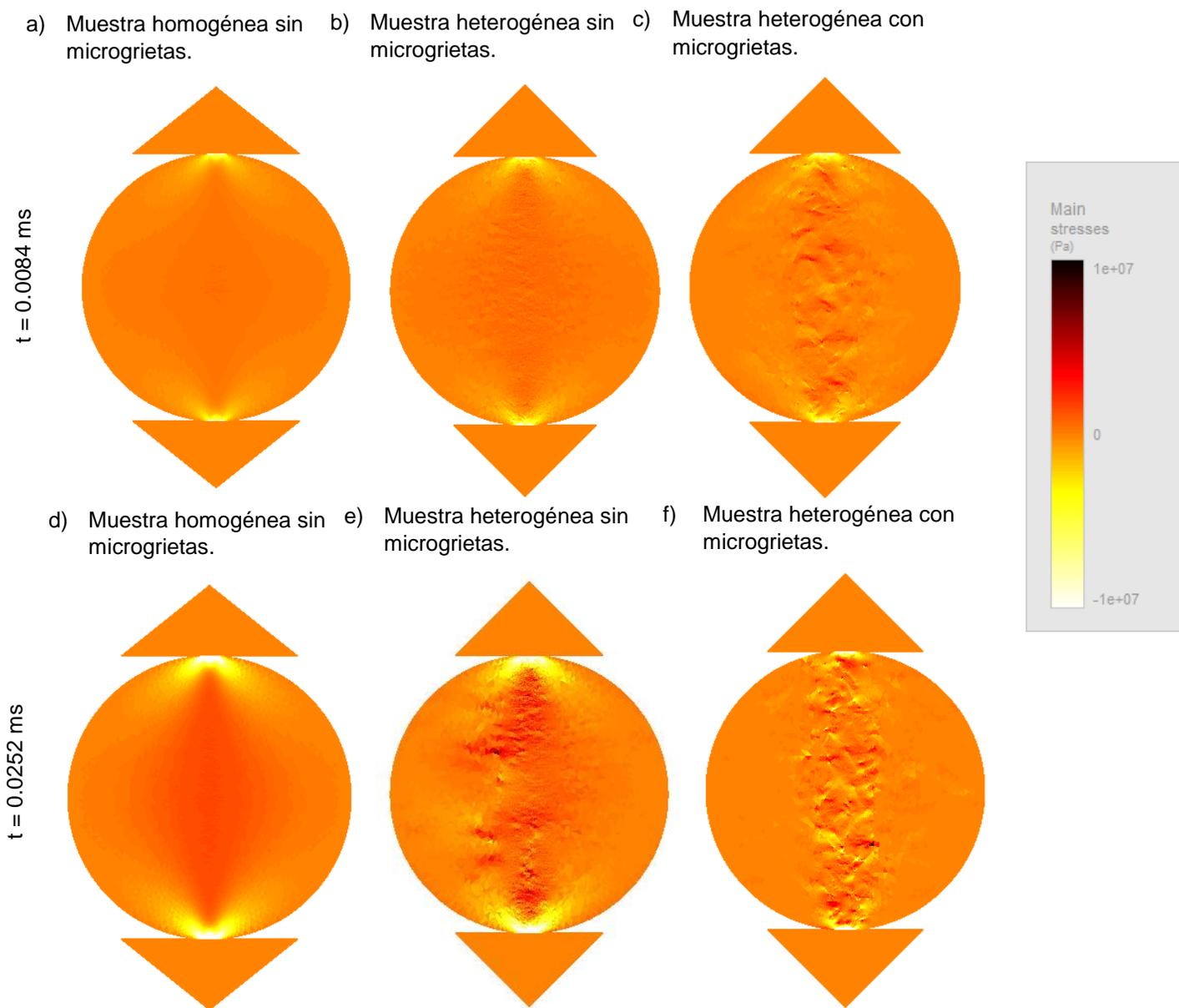
	Stress Máximo (MPa)	Error (%)
Resultado experimental	6.15	-
Muestra homogénea equivalente	16.7	+ 171
Muestra heterogénea sin microfracturas	13.6	+ 121
Muestra heterogénea con microfracturas	5.96	- 3.08

#### 4.1.3.4 Distribución de stress

La heterogeneidad y los defectos microestructurales influyen en la distribución de stress y como consecuencia, en el crecimiento e inicio de fracturas. La figura 23 muestra la comparación de la distribución de stress en la dirección horizontal ( $\sigma_{xx}$  o  $\sigma_3$ ) para los modelos homogéneo sin microfracturas, heterogéneo sin microfracturas y heterogéneo con microfracturas para dos tiempos de paso de la simulación ( $t=0.0084$  ms y  $t=0.0252$  ms, correspondiendo a unos desplazamientos de 0.0021 mm y 0.0063 mm). Para el caso homogéneo, se observa una distribución gradual de los stress, variando de una zona más compresiva en los puntos de carga cercanos a las placas a una zona tensional en el centro de la muestra (figura 23.a)).

Al añadir heterogeneidad dentro de la muestra, se observa una perturbación en los stress (figura 23.b), generando stress de tensión local en las interfaces de los minerales (figura 23.e). Luego de incluir microfracturas dentro del modelo heterogéneo, se perturbó aún más la muestra, generando gradientes más pronunciados y stress de tensión local más pronunciados que el caso anterior. La baja resistencia a la tensión de la biotita (8 Mpa) junto con los campos de stress local producidos por la heterogeneidad de la muestra tienen como consecuencia la fractura en aquellas interfaces colindantes con aquel mineral.

El hecho de que los minerales posean diferente respuesta elástica es uno de los principales motivos que producen que la muestra sufra una redistribución de stress al incluir la heterogeneidad dentro del modelo. Los minerales no pueden ser deformados de forma independiente al estar conectados físicamente, por lo que los campos de stress son producidos en las interfaces de los minerales. Debido a que el cuarzo y feldespato poseen altos valores de módulo de Young (83.1 GPa y 56.4 GPa respectivamente) comparados con el de la biotita (17.2 GPa), los campos de stress local son producidos principalmente los primeros dos.



*Figura 23.* Comparación de distribución de stress en la dirección horizontal ( $\sigma_{xx}$ ) para los modelos homogéneo sin microfracturas, heterogéneo sin microfracturas y heterogéneo con microfracturas para dos tiempos de paso de la simulación ( $t=0.0084$  ms y  $t=0.0252$  ms, correspondiendo a los desplazamientos de 0.0021 mm y 0.0063 mm).

## 4.2 Ensayo de Compresión Uniaxial (UCS)

### 4.2.1.1 Configuración UCS

La muestra uniaxial posee un diámetro de 54 mm y un alto de 108 mm. Se utiliza un tamaño de elemento 0.8 mm, 4 veces más grande que el tamaño utilizado en las muestras de discos brasileños. La malla contiene un total 28850 elementos y 14790 nodos (figura 24.a). Además, se utilizan las propiedades de los materiales presentadas en las tablas 1,2 y 3. Parámetros de entrada obtenidos de pruebas de laboratorio pueden servir como datos de entrada inicial para el modelo, pero deben ser calibrados para obtener una respuesta correcta del material. Para lograr obtener un resultado lo más cercano a la realidad, la resistencia a la tensión, cohesión y coeficiente de fricción de los minerales constituyentes de la roca fueron aumentados. El módulo de Young para el caso de feldespato y cuarzo no sufren cambio, pero para el caso de la biotita, se utiliza un módulo de Young de 29.3 GPa (Mahabadi, 2012).

A pesar de que el ratio de Poisson de los minerales constituyentes utilizados en los modelos construidos de discos brasileños fueron basados en sus propiedades a nivel de granos, para el modelo UCS se utiliza un ratio de Poisson de 0.36 para la biotita, 0.32 para el feldespato y 0.07 para el cuarzo (Mahabadi, 2012). La distribución espacial de los minerales fue generada de manera aleatoria, considerando una composición de 71% feldespato, 21% cuarzo y 8% de biotita (figura 24.c). La resistencia a la tensión, cohesión y coeficiente de fricción son aumentados hasta obtener un resultado de acorde a la realidad, el cual es logrado con un aumento del 80%. Los valores finales utilizados tanto para el modelo homogéneo como heterogéneo son presentados en las tablas 5, 6 y 7.

*Tabla 5. Parámetros finales utilizados para la construcción del modelo homogéneo.*

Modelo equivalente Homogéneo	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	2661,0
Modulo de Young (GPa)	52,0
Ratio de poisson	0,23
Resistencia a la tensión (MPa)	6.48
Cohesión (MPa)	26.3
Coefficiente de fricción Interna	1.27

Modelo equivalente Homogéneo	
Modo I Falla (N/m)	243,72
Modo II Falla (N/m)	487,45

Tabla 6. Parámetros de minerales constituyentes utilizados para la construcción del modelo heterogéneo.

Parámetros de entrada minerales constituyentes	Cuarzo	Feldespato	Biotita
Densidad (Kg/m3)	2600	2600	2800
Modulo de Young (GPa)	83.1	56.4	17.2
Ratio de poisson	0.17	0.29	0.2
Resistencia a la tensión (MPa)	18	18	12.6
Cohesión (MPa)	45	45	45
Coefficiente de fricción Interna	2.29	2.29	2.29
Modo I Falla (N/m)	906.65	309.79	599.08
Modo II Falla (N/m)	1813.29	619.59	1198.15

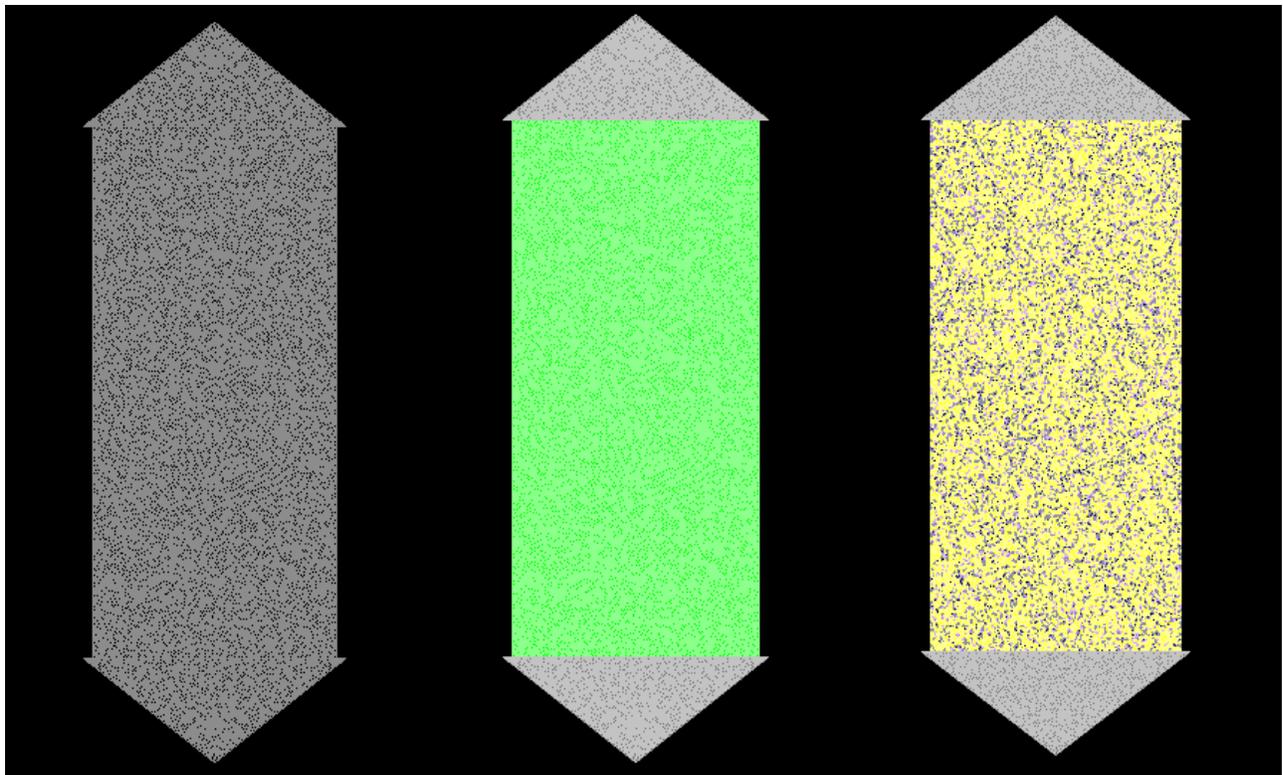


Figura 24. a) Malla utilizada para el modelo homogéneo y heterogéneo con tamaño de elemento de 0.8 mm, b) Malla con material homogéneo y c) Malla con minerales asignados de forma aleatoria considerando distribución de muestra de 71% feldespato, 21% cuarzo y 8% biotita.

*Tabla 7. Parámetros de interfaces de minerales constituyentes utilizados para la construcción del modelo heterogéneo.*

<b>INTERFACES</b>	<b>Feld-Qz</b>	<b>Qz-Bt</b>	<b>Feld-Bt</b>
Coeficiente de Friccion	0.82	0.82	0.82
Cohesión (MPa)	19.30	19.30	19.30
Resistencia a la tensión (MPa)	0.24	0.21	0.21
Modo I Fracture Energy (N/m)	0.006	0.0005	0.0005
Modo II Fracture Energy (N/m)	1451	382	382

Debido a que la resistencia de la muestra aumenta a medida que la tasa de carga es incrementada, y basándose en el análisis de sensibilidad de carga realizado para las pruebas de discos brasileños, una velocidad de 0.25 m / s es seleccionada para cada uno de los modelos construidos.

Al aplicar una velocidad de carga de  $v / 2 = 0.125$  m / s sobre cada una de las placas (misma dirección, pero distinto sentido) en compresión se obtienen condiciones de carga uniaxial con velocidad de carga total igual a 0.25 m / s.

#### **4.2.1.2 Resultados ensayos de compresión uniaxial (UCS)**

El modelo homogéneo obtuvo un stress máximo de 202 MPa, sobreestimando en un 72% la capacidad real de la muestra (ver figura 25). Al incluir la heterogeneidad de manera aleatoria dentro del modelo, se obtiene una resistencia a la compresión uniaxial de 145 MPa, valor muy cercano a los 147.3 MPa obtenidos en pruebas de laboratorio (1.56% de error). La figura 26 muestra la gráfica de stress-desplazamiento para la muestra heterogénea construida. Al incorporar la heterogeneidad dentro del modelo UCS es posible obtener un comportamiento más cercano a la realidad. Además, para verificar la influencia de la heterogeneidad dentro de un modelo, se realiza una comparación en diferentes tiempos de la simulación entre los stress de los modelos homogéneo y heterogéneo. La figura 27 muestra la distribución del stress menor principal ( $\sigma_{xx}$ ) para los modelos homogéneo y heterogéneo durante tres tiempos de paso diferentes.

## Stress vs Desplazamiento

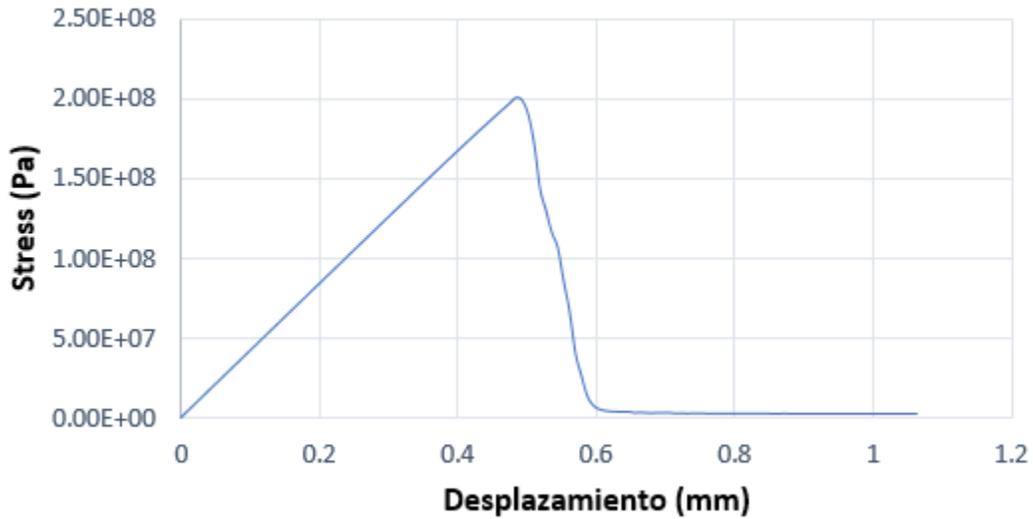


Figura 25. Curva Stress-Desplazamiento para UCS homogéneo. El valor máximo de stress alcanzado es de 202 MPa, sobreestimando en un 72% el valor real.

## Stress vs Desplazamiento

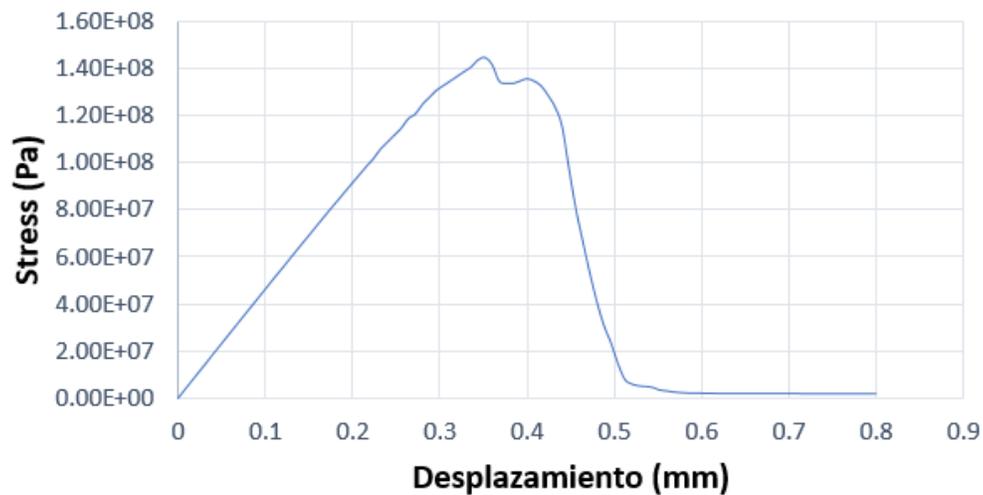


Figura 26. Curva Stress-Desplazamiento para UCS heterogéneo. El valor máximo de stress alcanzado es de 145 MPa, subestimando solo en un 1.56% el valor real.

Como se observa en la figura 27 a) el stress principal menor varía de una zona compresiva cerca de los puntos de carga de la muestra a una zona tensional en el centro

de la muestra. En el mismo paso de tiempo, como se muestra en la figura 27 d), el modelo heterogéneo presenta mayor perturbación en los campos de stress, generando algunas zonas de stress de tensión local que condujeron a mayor cantidad de fracturas tensionales. Aquellas zonas tensionales se ubicaron por casi toda la muestra, a excepción de las zonas cercanas a los puntos de carga, donde se observa una zona de compresión.

A medida que la carga sobre la muestra aumenta, se observa un crecimiento en los stress tensionales de los modelos homogéneo y heterogéneo, pero existe un aumento mayor para el último (Figura 27 e) y f)). Debido a las diferencias elásticas de los minerales constituyentes del modelo, se generan zonas de stress local. Además, debido a que la muestra en un comienzo estaba intacta, los granos inicialmente estaban conectados, impidiendo la deformación de forma independiente y generando los campos de stress local en los límites entre los granos. Es importante mencionar que la mayoría de las zonas de stress local ocurren los granos de cuarzo, que al poseer una gran rigidez permite soportar una mayor deformación. Sin embargo, al encontrarse cerca de los granos de biotita que poseen una baja resistencia a la tensión, se genera un mayor daño en la muestra y reduce su capacidad de carga global.

La figura 28 muestra la comparación entre el proceso de fracturamiento obtenido experimentalmente (Mahabadi, 2012) y el fracturamiento simulado. El resultado de la simulación muestra un mayor daño en los extremos de la muestra y presenta una zona de falla principal alineada en un ángulo entre  $78^{\circ}$  -  $83^{\circ}$  representada con una línea azul en la figura 26 c). Dicho valor corresponde bien a los valores empíricos, siendo  $45^{\circ} + \phi / 2$  el valor propuesto. Para este caso, el ángulo de fricción utilizado como parámetro de entrada es de  $66.37^{\circ}$ , por lo tanto, da como resultado un valor empírico de  $78.18^{\circ}$ .

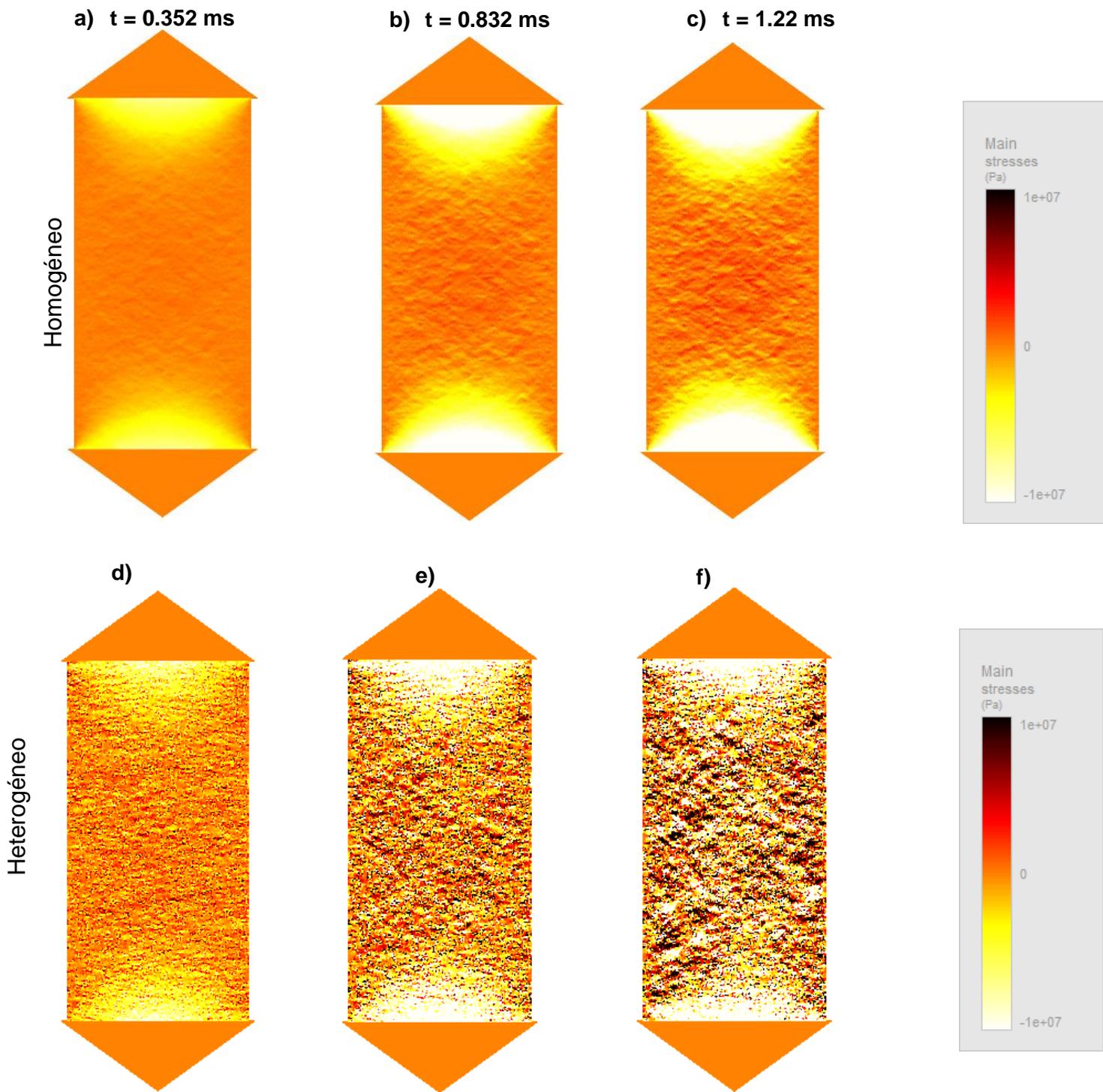
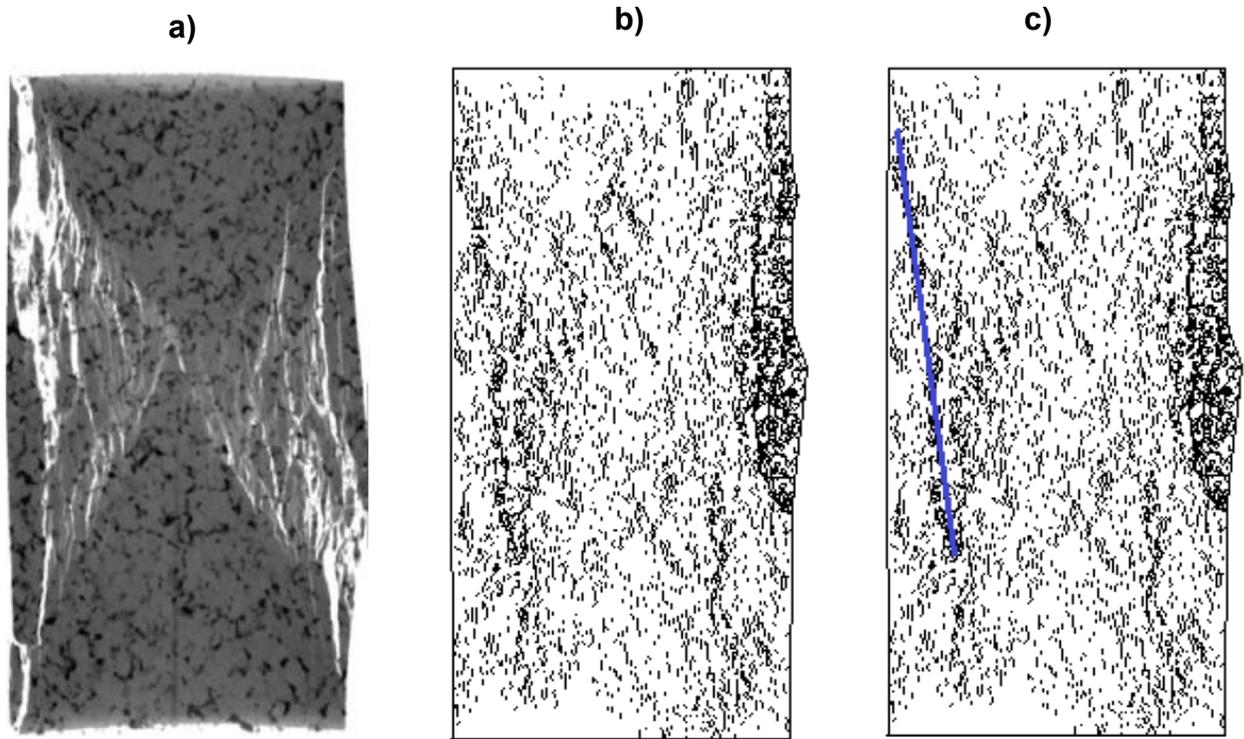


Figura 27. Comparación del stress principal menor ( $\sigma_{xx}$  o  $\sigma_3$ ) para modelos modelo homogéneo y heterogéneo de ensayos de compresión uniaxial para tres tiempos de paso de la simulación.



*Figura 28.* Comparación proceso de fracturamiento entre a) el obtenido experimentalmente (figura a) (Mahabadi, 2012) y b) el fracturamiento simulado, incluyendo la zona principal de falla en c).

## CONCLUSIONES

Se estudiaron diferentes modelos de pruebas de discos brasileños y ensayos de compresión uniaxial para verificar el impacto en la resistencia de las rocas producida al incluir los defectos microestructurales y heterogeneidad de la muestra mediante el código FEM/DEM incorporado en el software Irazu y comparándolos con los resultados experimentales. Con ello, se logró captar las variaciones en las distribuciones de stress al incorporar la heterogeneidad y microfracturas, además de la variación en los patrones de falla.

Para los ensayos modelados de discos brasileños, tanto homogéneo como heterogéneo (donde se incorpora la ubicación exacta de los minerales), se sobreestima la resistencia de la muestra, pero al incorporar las microfracturas dentro del modelo, se logra capturar una resistencia muy similar a la obtenida en laboratorio. Esto demuestra la importancia de incorporar dentro de las simulaciones los defectos microestructurales, que en este caso cumplen un rol muy importante en la resistencia de las rocas al generar mayor debilidad. Por otro lado, pese a que la muestra heterogénea sobreestimó la resistencia de la muestra, impactó en la distribución de stress del modelo homogéneo y en la trayectoria de falla de la muestra. Los minerales, al poseer diferente respuesta elástica, generan stress de tensión local, principalmente en el feldespato y cuarzo, y junto con la baja resistencia en las interfaces produce una zona propensa a agrietarse. Esto impacta en la trayectoria de falla de la muestra, obteniendo un patrón de falla más preciso que el caso homogéneo. Por ende, incorporar parámetros de entrada lo más parecido a la realidad permite obtener resultados más precisos y representativos.

Los modelos construidos de ensayos de compresión uniaxial, tanto homogéneo y heterogéneo, debieron ser calibrados para obtener una respuesta lo más similar al resultado experimental. Si bien, los parámetros de entrada fueron obtenidos de pruebas experimentales, se debe verificar la respuesta mecánica de la simulación. Estos pueden ser utilizados como punto de partida para la calibración. El método de elementos finitos-discretos posee elementos de unión de cuatro nodos entre los elementos triangulares donde la fractura da inicio, impactando en la rigidez de la muestra. Debido a lo anterior

es que los parámetros obtenidos en laboratorio deben ser calibrados, así obtener una respuesta lo más real posible. La calibración se consideró correcta al aumentar en 80% la cohesión, resistencia a la tensión y coeficiente de fricción. Para el caso homogéneo, se sobreestima la capacidad de la muestra, pero el caso heterogéneo logra capturar la resistencia a la compresión uniaxial de la muestra, subestimando solo en un 1.56%. Además, al igual que en las pruebas de discos brasileños, se logra observar una perturbación en la distribución de stress al incorporar la distribución de los minerales dentro del modelo. Nuevamente se generan stress de tensión local debido a las diferencias en el comportamiento elástico de los minerales constituyentes, lo que genera una respuesta más precisa que el caso homogéneo.

Se observa un mayor impacto en la resistencia de las rocas al incorporar las microfracturas, jugando un rol muy importante en el comportamiento mecánico de la muestra. Junto con lo anterior, la orientación de aquellas microestructuras afecta la respuesta mecánica, siendo aquellas paralelas a la dirección de carga las que permiten una mayor facilidad en la ruptura de la muestra. Por otro lado, las fracturas perpendiculares a la dirección de carga de alguna manera impiden la distribución de la carga hacia el centro de la muestra, y con ello, se genera una mayor resistencia. Es por esto que, para lograr predecir el comportamiento mecánico de las rocas, la orientación de las microfracturas presentes es un aspecto que debe tomarse en cuenta al realizar un análisis de su respuesta mecánica.

Queda demostrado que el método de los elementos finitos-discretos es una herramienta muy útil que permite capturar el comportamiento mecánico de una muestra. Utilizar parámetros de entradas precisos permite obtener una respuesta muy similar a la real. Por ende, mientras más información se tenga sobre las muestras a simular, más precisa será la respuesta de la simulación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdelaziz, A., Zhao, Q., & Grasselli, G. (2018). Grain based modelling of rocks using the combined finite-discrete element method. *Computers and Geotechnics*, 103, 73–81. Doi: 10.1016/j.compgeo.2018.07.003

Brady, B., & Brown, E. (2005). *Rock Mechanics for underground mining* (3° Ed.). USA: Springer.

Fardin, N., Estephansson, O., & Jing, L (2001). The scale dependence of rock joint surface roughness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 38(5), 659-669.

Goodman, R. (1989). *Introduction to Rock Mechanics* (2° Ed). Berkeley: Wiley.

Harrison, J., & Hudson, J. (2000). *Engineering Rock Mechanics Part II: Illustrative Worked Examples*. Kidlington: Elsevier.

Iturrioz, I., Doz, G., & Riera, J. (1996). Método de los Elementos Discretos (DEM): Una Alternativa Interesante en el Análisis Numérico de Sistemas Estructurales No Lineales. *Mecánica Computacional*, 17, 63 – 72.

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. doi:10.1016/s1365-1609(03)00013-3

Mahabadi, O. (2012). *Investigating the influence of micro-scale heterogeneity and microstructure on the failure and mechanical behaviour of geomaterials*. (Tesis Doctoral en Filosofía Departamento de Posgrado de Ingeniería Civil). Universidad de Toronto, Toronto.

Kosteski, L., Cóceres, H., Barrios D'ambra, R., Iturrioz, I., & Cisilino, A. (2006). Aplicación del método de los elementos discretos para la determinación del factor de intensidad de tensiones estático y dinámico. *Mecánica Computacional*, 25, 2109-2123.

Kranz, R. (1983). Microcracks in rocks: a review. *Tectonophysics*, 100(1), 449-480.

Lisjak, A., & Grasselli, G. (2014). A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6(4), 301–314. Doi: 10.1016/j.jrmge.2013.12.007

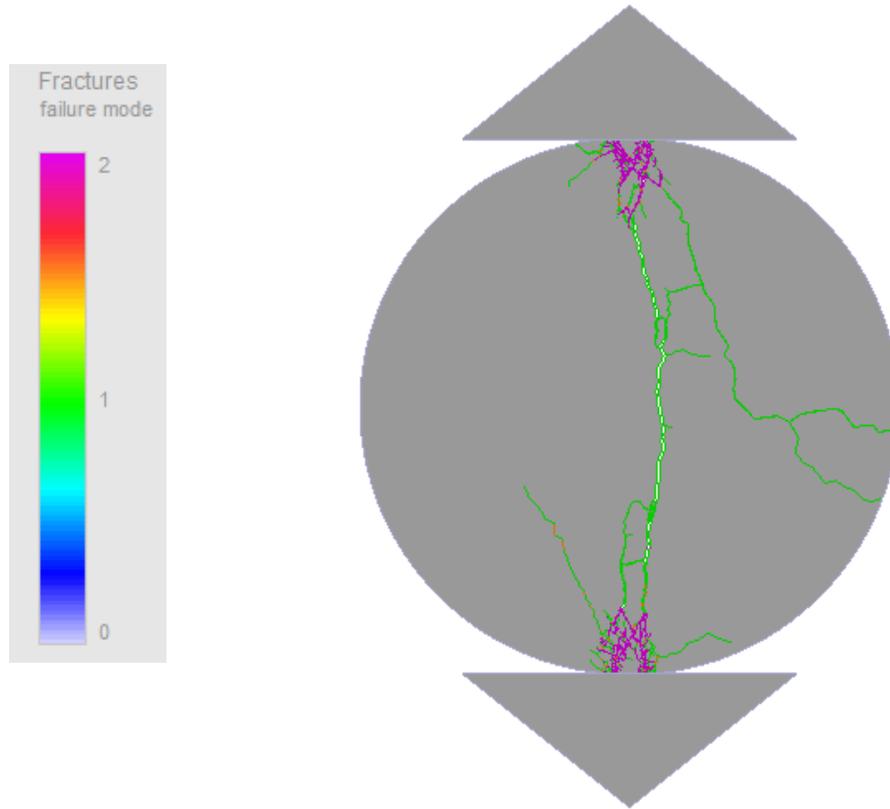
Munjiza, A. (2004). *The combined Finite-Discrete Element Method*. England: Wiley.

Ramírez, P., & Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*. Madrid: Red DESIR.

Rémond, Y., Ahzi, S., Baniassadi, M., & Garmestani, H. (2016). *Applied RVE Reconstruction and Homogenization of Heterogeneous Materials*. Londres: Wiley.

## ANEXOS

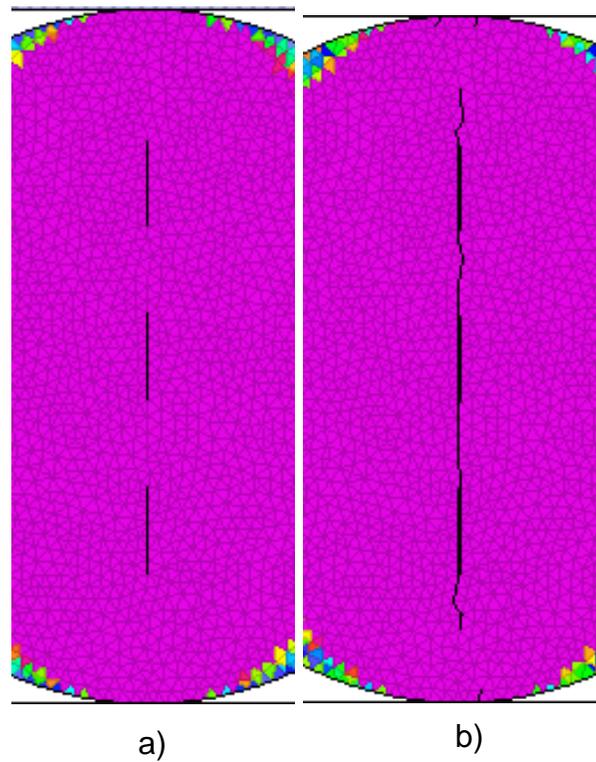
**Anexo 1.** Resultado simulación modelo equivalente homogéneo para un tiempo de 0.288 ms. Se observa una división por tensión en el centro de la muestra, mientras que una división por corte o compresión en sectores cercanos a los puntos de carga.



**Anexo 2.** Curva Stress-Desplazamiento para modelo equivalente homogéneo con tres fracturas paralelas a la dirección de carga.



**Anexo 3.** Resultado simulación modelo equivalente homogéneo con fracturas paralelas a la dirección de carga para tiempo de a) 0.019 ms y b) 0.038 ms.



**Anexo 3.** Curva Stress-Desplazamiento para modelo equivalente homogéneo con fracturas perpendiculares a la dirección de carga.

