

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS Y ALCANCES	3
2. MARCO TEÓRICO	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

3. METODOLOGÍA	34
3.1 Modelamiento Numérico	34
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	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
CONCLUSIONES	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	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 (μ 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 ²	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 (σ_{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 (σ_{xx} o σ_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