

Análise Numérica da Estabilidade de Taludes Rochosos Fraturados Utilizando a Técnica de Fragmentação de Malha

Maira Vieira de Almeida

Discente do curso de Geologia, Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, Brasil,
mairava97@gmail.com

Isadora Vieira dos Santos

Mestranda, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil,
isadora.dos@ufu.br

Michael Andrade Maedo

Professor Adjunto, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil,
michael.maedo@ufu.br

Resumo: Problemas envolvendo a instabilidade de maciços rochosos fraturados podem provocar graves acidentes, resultando em lesões e fatalidades, além de prejuízos econômicos. Para tentar evitar que desastres aconteçam e detectar precocemente sinais de instabilidade do terreno, a implementação de análises geotécnicas em estabilidades de taludes surge como uma solução vital a fim de garantir a segurança e a proteção da população. O presente trabalho objetivou investigar a viabilidade e empregabilidade de utilizar a Técnica de Fragmentação da Malha (TFM) em conjunto com o Método de Redução da Resistência ao Cisalhamento para determinar o Fator de Segurança. Na TFM, elementos finitos sólidos de interface de elevada razão de aspecto munidos com modelos constitutivos apropriados foram inseridos entre os elementos da malha original, levando a malha a uma configuração fragmentada. O modelo constitutivo dos elementos de interface foi baseado no critério de Mohr-Coulomb e posteriormente, implementado no programa de elementos finitos CODE_BRIGHT para a realização dos experimentos numéricos. Através das simulações de diferentes casos de taludes foi possível observar que a metodologia proposta nesse estudo foi capaz de reproduzir o comportamento de maciços fraturados independente da malha considerada.

PALAVRAS-CHAVE: talude rochoso, fraturas, método dos elementos finitos, elementos de alta razão de aspecto.

ABSTRACT: The instability of fractured rock masses poses significant risks, potentially leading to accidents resulting in injuries, fatalities, and substantial economic losses. To mitigate such disasters and identify early indicators of terrain instability, implementing geotechnical analyses on slope stability emerges as a crucial solution to ensure the safety and protection of the populace. This study aimed to explore the feasibility and effectiveness of employing the Mesh Fragmentation Technique (TFM) in conjunction with the Shear Strength Reduction Method to determine Factor of Safety (FS). In TFM, high aspect ratio solid interface finite elements, incorporating proper constitutive models, were inserted between the elements of the original mesh, causing the mesh to adopt a fragmented configuration. The constitutive model for interface elements was based on the Mohr-Coulomb criterion and subsequently incorporated into the finite element program CODE_BRIGHT for conducting numerical experiments. Through simulations involving various slope scenarios, it was clear that the methodology proposed in this study accurately replicated the behavior of fractured rock masses, irrespective of the mesh configuration used.

KEYWORDS: rock slope, fractures, finite element method, high aspect ratio elements.

1 INTRODUÇÃO

O talude é definido basicamente como um terreno inclinado, em relação a horizontal que delimita uma massa de solo, rocha ou outro material qualquer (ABNT NBR 11682, 2009). A estabilidade de taludes sempre foi um tema de muitos estudos e é considerado um assunto de suma importância, posto que a instabilidade desse, em muitas situações geram perdas irreparáveis para a sociedade, como perdas de vidas humanas e prejuízos econômicos. Os deslizamentos são processos naturais que podem ser detectados por meio de instalação de sensores e principalmente pelo monitoramento geotécnico adequado para identificar a existência de algum risco de desabamento, com isso é possível emitir alertas a população e evitar tragédias.

Tradicionalmente, as análises de estabilidades de taludes e encostas são realizadas por meio de métodos baseados no Método do Equilíbrio Limite (MEL), o qual despreza a relação tensões deformação e calcula o Fator de Segurança (FS) de uma superfície de ruptura de geometria pré-definida admitindo nessa superfície a relação entre a resistência ao cisalhamento (τ_r) e os esforços cisalhantes atuante (τ_s). Os métodos mais conhecidos baseados no MEL são: o Método das Fatias (Lamelas) de Fellenius (1927), que foi o primeiro a ser desenvolvido considerando a superfície de ruptura como sendo circular. Neste método o talude é dividido em fatias, assumindo-se a base da fatia como linear e em cada base da lamela deve se compreender um tipo de solo, não podendo existir dois materiais na mesma base. O Método de Bishop Simplificado (1955) é baseado no Método das Fatias e considera-se que as forças de interação entre as fatias são horizontais e se anulam, desconsiderando as forças tangenciais entre essas e o equilíbrio das forças é feito na vertical. Há outros métodos baseados no MEL, como o Método de Spencer (1967) e o Método de MORGENSTERN & PRICE (1965), que juntamente são considerados como métodos de análises rigorosos, pois satisfazem todas as condições de equilíbrio, tanto as de forças quanto as de momento. No método de Spencer (1967), segundo Silva (2011) as forças de interação entre as fatias são representadas por uma resultante Q que assume uma inclinação constante T com a horizontal, essa resultante é aplicada na base da fatia e no ponto intermédio dela. A reação normal N é obtida pelo equilíbrio de forças na direção paralela e perpendicular à base das fatias. O fator de segurança pode ser obtido por duas formas: somatório de momentos em relação a um ponto ou somatório de forças na direção horizontal ou paralela à base das fatias. Já no método de MORGENSTERN & PRICE (1965), que foi desenvolvido para permitir que a superfície de ruptura assumira qualquer formato, seja circular, não-circular ou composta, as forças de interação são controladas pela função $f(x)$ multiplicada por um fator λ . A função $f(x)$ é arbitrada como arco seno e apresenta menor influência sobre o fator de segurança. Essa função determinará a inclinação das forças entre as fatias.

Devido ao desenvolvimento da capacidade dos computadores e na facilidade em resolver problemas de estabilidade de taludes, o Método dos Elementos Finitos (MEF) ficou cada vez mais conhecido e atualmente é um dos mais procurados em análises geotécnicas. Um exemplo disso, está no trabalho realizado pelos autores (XINXIN, Li; JIANSHE, Liu; WENPING, Gong; YI, Xu; BOWA, 2021), em que um esquema de modelagem baseado em rede de Fratura Discreta Eficiente (FDE) foi desenvolvido. Para identificar a superfície de deslizamento crítica e avaliar o Fator de Segurança, foi empregado a análise de redução de resistência baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF). Outra proposta consiste em utilizar a Técnica de Fragmentação da Malha (TFM) (MAEDO, 2015; MAEDO, et al. (2020); MAEDO, et al. (2021)) para reproduzir o comportamento do meio fraturado e que, em conjunto com o Método de Redução de Resistência ao Cisalhamento, é capaz de determinar o FS.

Neste trabalho, dois casos de taludes bidimensionais fraturados foram estudados utilizando a Técnica de Fragmentação da Malha (TFM), na qual elementos de alta razão de aspecto foram inseridos entre os elementos da malha original, para prever a superfície de ruptura de taludes e determinar o FS. O modelo constitutivo de dano dos elementos de alta razão de aspecto foram implementados com base no critério de Mohr-Coulomb.

2 MECÂNICA DO DANO CONTÍNUO

Lamaitre (1992) afirma que o dano de materiais é um processo físico progressivo gradual que leva à sua desintegração. O campo da Mecânica do Dano investiga os mecanismos que causam essa degradação quando os materiais sofrem cargas, usando fatores mecânicos. Além disso, o processo de degradação altera as propriedades elásticas do material, diminuindo sua área efetiva resistente e aumentando consequentemente a degradação da rigidez. Desta forma, o presente trabalho irá apresentar conceitos e componentes da formulação da mecânica do dano contínuo aplicada na descrição do comportamento inelástico do material, associado a degradação e ao dano friccional ao cisalhamento.

2.1 Modelo de dano friccional de Mohr-Coulomb

O modelo de dano isotrópico do tipo Mohr-Coulomb (GIMENES et al, 2023) foi utilizado no presente trabalho para simular o deslizamento da massa de solo. Este modelo degrada as componentes do tensor de tensão do EF-ERA associadas ao cisalhamento, seguindo como referência a direção s (Figura 1). Dessa forma, usando um sistema de coordenadas locais (n, s) a equação constitutiva para o modelo pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{nn} & \sigma_{ns} \\ \sigma_{sn} & \sigma_{ss} \end{bmatrix} = \mathbb{C} : \begin{bmatrix} \varepsilon_{nn} & \varepsilon_{ns} \\ \varepsilon_{sn} & \varepsilon_{ss} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

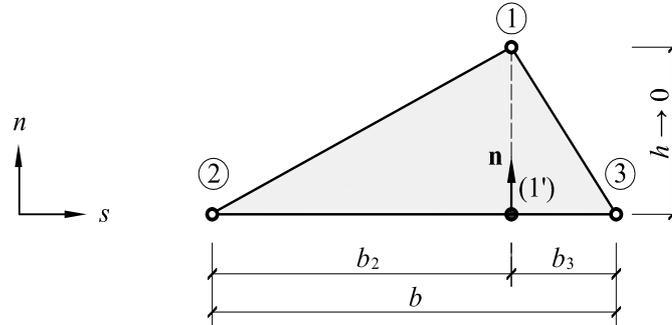


Figura 1. Elemento finito triangular de três nós (MMAEDO, 2015).

O tensor de tensão, σ , é obtido aplicando a variável do dano $d_s \in [0,1]$ nas componentes de cisalhamento:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \sigma_{nn} & \sigma_{ns} \\ \sigma_{sn} & \sigma_{ss} \end{bmatrix}}_{\sigma} = \underbrace{\begin{bmatrix} \bar{\sigma}_{nn} & 0 \\ 0 & \bar{\sigma}_{ss} \end{bmatrix}}_{\bar{\sigma}_n} + (1 - d_s) \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \bar{\sigma}_{ns} \\ \bar{\sigma}_{sn} & 0 \end{bmatrix}}_{\tau_s} \quad (2.2)$$

O dano é definido fisicamente como uma propriedade que mede o nível de integridade de um corpo, podendo ter valores variáveis de 0 a 1, em que $d = 0$ representa o estado do material intacto e $d = 1$ representa o estado do material completamente degradado.

Com isso, o critério de dano estabelecido para este caso é:

$$f_s = \|\sigma_{ns}\| - q_s(r_s) \leq 0 \quad (2.3)$$

em que q_s é a variável interna do tipo tensão aparente e r_s é a variável interna do tipo tensão elástica. Fazendo a divisão da equação anterior por $(1 - d_s)$, o critério pode ser apresentado no contexto da tensão elástica como:

$$\bar{f}_s = \|\bar{\sigma}_{ns}\| - r_s \leq 0 \quad (2.4)$$

A variável r_s é dada pelo valor máximo da tensão de cisalhamento $\|\bar{\sigma}_{ns}\|$ atingido durante todo o processo de carregamento, partindo do valor inicial r_0 :

$$r_s = \max_{k \in [0, t]} [\|\bar{\sigma}_{ns}(k)\|, r_0] \quad (2.5)$$

onde $r_0 = c + \bar{\sigma}_{nn} \tan \phi$, de modo que c é o intercepto de coesão e ϕ é o ângulo de atrito que controla a influência da tensão normal de compressão $\bar{\sigma}_{nn} \geq 0$.

Como a variável interna depende das propriedades elásticas, é possível calculá-la diretamente usando as componentes do tensor de deformação em cada etapa. Posteriormente, a evolução da variável dano é obtida por:

$$d_s(r_s) = 1 - \frac{q_s(r_s)}{r_s} \quad (2.6)$$

A variável do tipo tensão aparente, q_s , é expressa pela seguinte lei exponencial:

$$q_s(r_s) = r_0 \exp \left[h \mathcal{H} \left(1 - \frac{r_s}{r_0} \right) \right] \quad (2.7)$$

sendo \mathcal{H} o parâmetro de abrandamento, o qual é regularizado pela espessura h do elemento de alta razão de aspecto.

Finalmente, o modelo de dano de Mohr-Coulomb é integrado por meio do esquema de integração implícito-explicito IMPL-EX (OLIVER, 2008; Prazeres, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Todas as simulações foram realizadas em um computador de mesa, cujo sistema operacional é o Linux OpenSUSE LEAP 15.5. A máquina possui processador Intel Core i9-12900 K 3.2 GHz 30, 32 GB de memória RAM, 480 GB de SSD e 4 TB de HD para armazenamento.

O método aplicado para a geração dos casos estudados consistiu em três etapas, dívidas em pré-processo, processo e pós-processo, conforme a Figura 2. Para a realização da etapa de pré-processo foi utilizado o software GiD Simulation v. 16.0.6 com o intuito de configurar os parâmetros do problema como: fazer a descrição geométrica do maciço, escolher o modelo constitutivo apropriado, definir as propriedades dos materiais, prescrever as condições de contorno e gerar as malhas de elementos finitos. Os casos estudados nesse projeto foram problemas puramente mecânicos e, para o contexto de simulação de ruptura da superfície do talude, foi utilizado um modelo constitutivo de dano baseado no critério de Mohr-Coulomb. Utilizando este modelo e o Método de Redução da Resistência ao Cisalhamento (*Shear Strength Reduction Method*), pode-se determinar o Fator de Segurança (FS) associado a superfície limite da ruptura do talude em que começa a sofrer dano. No modelo de Mohr-Coulomb implementado, utiliza-se como parâmetros elásticos o módulo de elasticidade do material (E) e o coeficiente de Poisson (ν), enquanto o ângulo de atrito (ϕ) e a coesão (c) são os parâmetros utilizados para definir o limite de dano do material geológico.

Após a geração das malhas foi necessário fragmentá-las e para isso foi utilizado o programa denominado FRAG, desenvolvido pelo grupo de pesquisa de Métodos Numéricos e Engenharia Geotécnica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Tanto o programa FRAG quanto o CODE_BRIGHT (Olivella, 1996) foram compilados com o auxílio do compilador da Intel e dos pacotes oneAPI Base Toolkit e HPC Toolkit. Para fragmentar a malha, o programa recebe dados topológicos do sistema e elabora uma nova topologia, gerando e inserindo os elementos finitos de elevada razão de aspecto entre os elementos da malha original (MAEDO, (2015); MAEDO, et al. (2020); MAEDO, et al. (2021)).

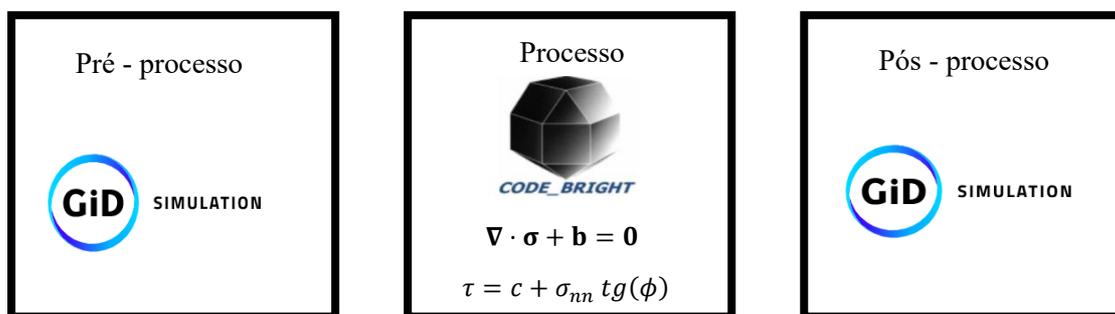


Figura 2. Fluxograma de Processos.

4 RESULTADOS

De acordo com Fossen 2017, “as fraturas representam descontinuidades nas propriedades mecânica e deslocamentos físicos nos locais onde as rochas são rompidas. A redução ou a perda de coesão caracterizam a maioria das fraturas”. Com isso, para analisar a estabilidade e explorar como as fraturas influenciam no comportamento de deformação e o modo de falha desses taludes, foram modelados taludes rochosos com uma fratura e com múltiplas fraturas. Para esse teste utilizou-se como base o estudo de (Xinxin et al., 2021) e juntamente foi incorporado o método do dano friccional ao cisalhamento.

4.1 Talude Rochoso Com Uma Fratura

Foi desenvolvido um talude rochoso com uma fratura não contínua, de 24 metros de comprimento e 0,2 de espessura. Este modelo possui comprimento de 80 metros e altura de 60 metros, além dos seguintes parâmetros: tangente do ângulo de atrito (ϕ) de 0,695, coesão (c) de 100 kPa, módulo de elasticidade (E) de 590 MPa, coeficiente de Poisson (ν) de 0,3 e peso específico do solo (γ) de 26,8 kN/m³. A fratura gerada possui propriedades mecânicas

diferentes em comparação com o maciço rochoso, o que pode influenciar diretamente na deformação e no fator de segurança geral desse talude, assim suas propriedades são: tangente do ângulo de atrito (φ) de 0,531, coesão (c) de 10 kPa, módulo de elasticidade (E) de 1 MPa e coeficiente de Poisson (ν) zero. Todos esses parâmetros utilizados no talude foram baseados no artigo (Xinxin et al., 2021).

É imprescindível salientar que, a superfície inferior desse talude ($y=0$ m) foi completamente restringida, e as faces da esquerda e direita ($x=0$ m e $x=60$ m) foram fixadas horizontalmente. Ademais, foram utilizados 1000 passos de tempo, para garantir a convergência dos resultados e a carga do peso próprio do talude foi aplicada em rampa ao longo desses 1000 passos de tempo. Para testar esse caso, foram feitas três malhas regulares, como mostra na Figura 3, em que a Malha A é a mais grossa, a Malha B é intermediária e a Malha C é a mais fina. As informações das quantidades de elementos sólidos triangulares e nós de cada malha estão disponíveis na Tabela 1. Essas análises foram feitas para verificar e validar a influência que uma fratura teria na ruptura do talude.

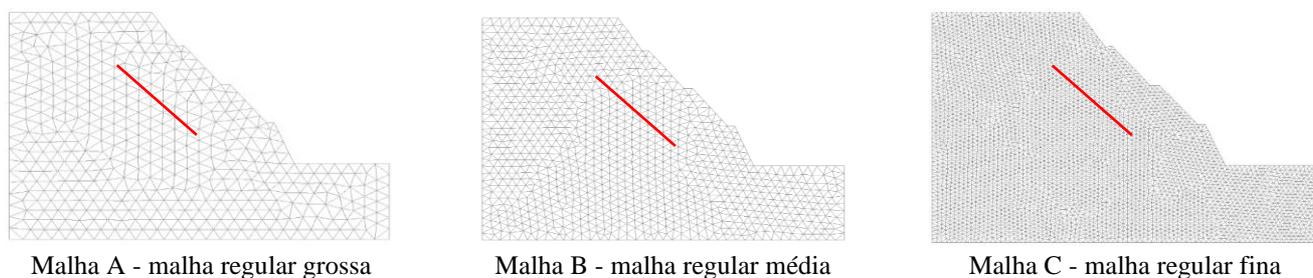


Figura 3 - Malhas regulares empregadas para simular o talude com uma fratura.

Tabela 1 - Quantidades de elementos e nós de cada malha

	Números de elementos	Números de nós
Malha A	854 elementos	474 nós
Malha B	1939 elementos	1036 nós
Malha C	7837 elementos	4051 nós

Na Figura 4, as cores das malhas indicam os deslocamentos. É possível notar nas malhas deformadas A, B e C, que a falha desses taludes concentra-se principalmente na zona onde ocorre a fratura. Dessa forma, a presença de uma fratura no talude impõe forte influência para o deslizamento no maciço rochoso, como é uma zona estrutural fraca e descontínua, com resistência relativamente menor, a fratura desencadeia a ruptura desse talude. Devido a isso, essas malhas apresentaram comportamentos de ruptura semelhantes, rompendo com $FS = 2$. Esse comportamento também pode ser observado nas curvas da Figura 5.

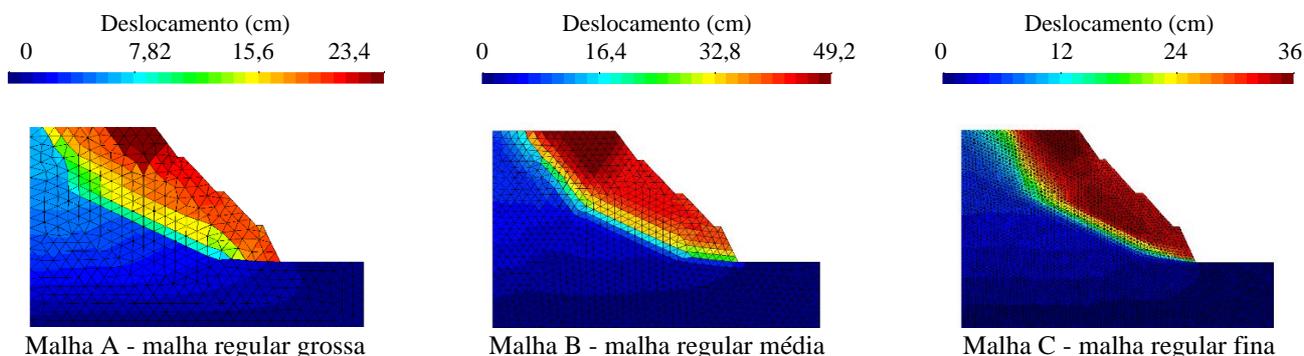


Figura 4 - Deslocamentos obtidos nas simulações do talude rochoso com uma fratura.

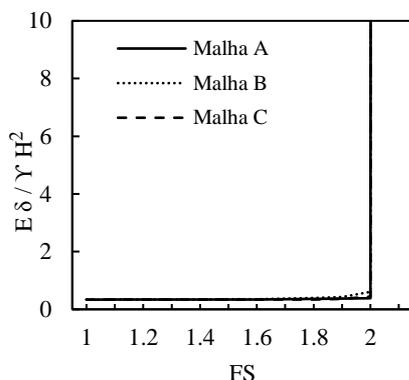


Figura 5 - Valores de deslocamento adimensional obtidos por meio das simulações do talude rochoso com uma única fratura.

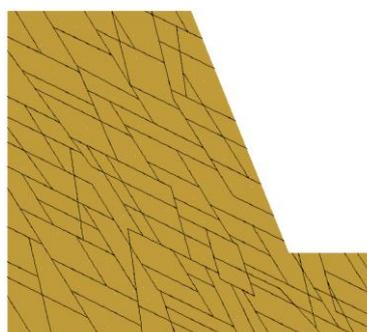
4.2 Talude Rochoso Com Múltiplas Fraturas

Neste caso foi desenvolvido um talude rochoso com múltiplas fraturas, de 125 metros de comprimento e 95 metros de altura, possuindo as seguintes propriedades: tangente do ângulo de atrito (φ) de 0,781, coesão (c) de 1 MPa, módulo de elasticidade (E) de 10000 Mpa, coeficiente de Poisson (ν) com 0.2 e peso específico do solo (γ) de 25 kN/m³. Além disso, as propriedades dessas fraturas são: tangente do ângulo de atrito (φ) de 0,445, coesão (c) de 0,12 MPa, módulo de elasticidade (E) de 10 MPa e coeficiente de Poisson (ν) zero.

É importante frisar que, a superfície inferior desse talude ($y=0$ m) foi completamente restringida, e as superfícies esquerda e direita ($x=0$ m e $x = 95$ m) foram fixados horizontalmente. Para este caso foram utilizados 1000 passos de tempo, para garantir a convergência dos resultados e a carga do peso próprio do talude foi aplicada em rampa ao longo desses 1000 passos de tempo. Assim sendo, foram feitas simulações de duas malhas, uma com fraturas aleatórias (Figura 6 (a)), com elementos de tamanhos de 1 metro e a outra com fraturas alinhadas, com elementos de tamanhos de 18 metros, como mostra na Figura 6 (b). As informações das quantidades de elementos sólidos triangulares e nós de cada malha estão disponíveis na Tabela 2. O intuito de se fazer essas análises nos diferentes padrões de fraturas foi para verificar a influência que isso teria no comportamento da ruptura e no valor do Fator de Segurança, utilizando o Método de Redução da Resistência ao Cisalhamento (*Shear Strength Reduction Method*) por elementos finitos.



(a) Fraturas com disposição aleatória



(b) Fraturas com disposição alinhada

Figura 6 - Malhas com fraturas aleatórias e alinhadas para simular o talude com múltiplas fraturas.

Tabela 2 - Quantidades de elementos e nós de cada malha

	Números de elementos	Números de nós
Malha Irregular	21082 elementos	9643 nós
Malha Regular	74990 elementos	66181 nós

Na Figura 7 é possível observar os mapas de contorno preenchidos para ambos os casos estudados. É possível notar que a diferença nas regulares e irregularidades das fraturas não influenciaram no rompimento, pois ambas as malhas apresentaram comportamento semelhante, como mostra nas curvas da Figura 8 (a) e (b). Assim sendo, as duas malhas começaram a romper com $FS = 1,8$ e atingem o seu pico com $FS = 2$.

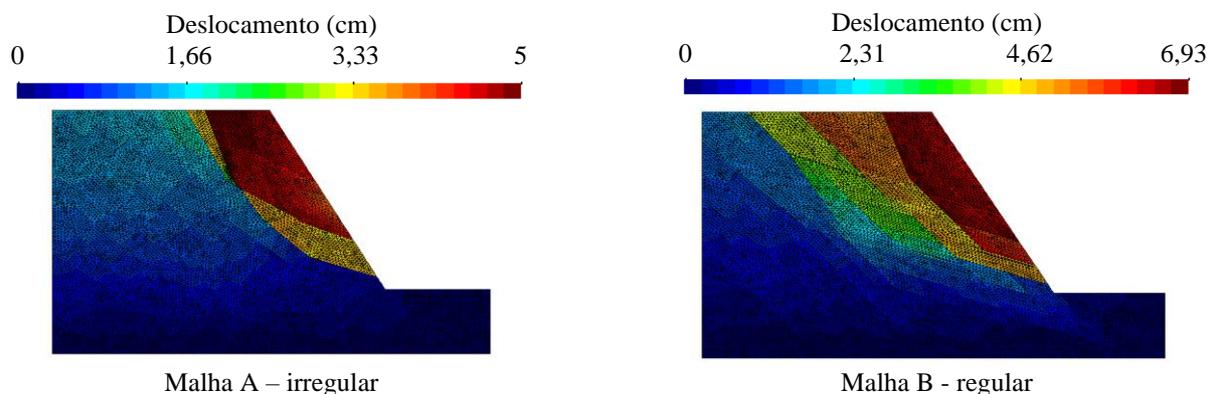


Figura 7 - Deslocamentos obtidos nas simulações do talude rochoso com múltiplas fraturas.

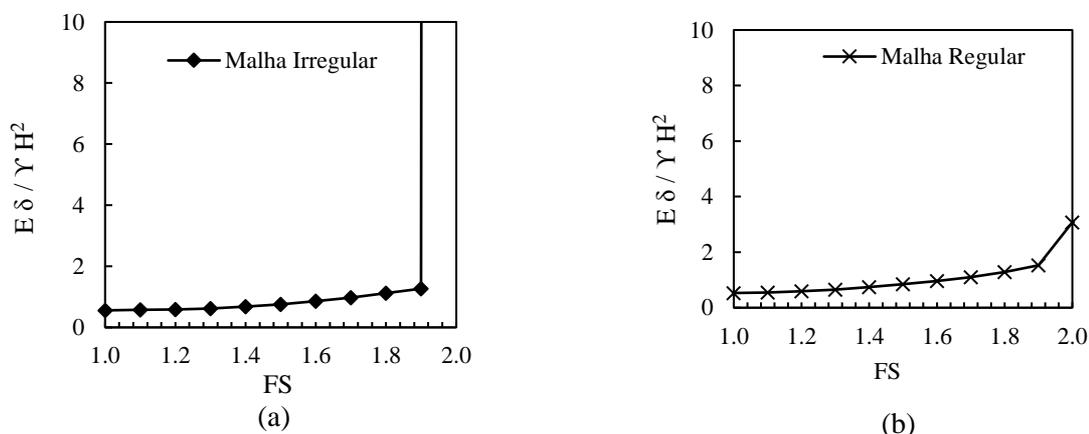


Figura 8 - Valores de deslocamento adimensional obtidos por meio das simulações do talude com múltiplas fraturas (a) malha com fraturas irregular; (b) malhas com fraturas regular.

5 CONCLUSÃO

A modelagem numérica da estabilidade de taludes rochosos com fraturas ainda é um desafio, principalmente em relação a identificação da superfície de deslizamento crítica e a estimativa do fator de segurança. No que diz respeito a abordagem proposta neste trabalho, a análise de estabilidade dos diferentes casos de taludes utilizando a técnica de fragmentação de malha forneceu uma representação adequada do processo de ruptura desses taludes e assim determinar o Fator de Segurança, independente da malha utilizada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Michael Maedo pela oportunidade para desenvolver esse estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682. Estabilidade de Encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- BISHOP, A.W. 1955. *The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes*. *Geotechnique*, 5(1): 7–17.

- FELLENIUS, W. *Stability analysis of earth slopes and retaining walls considering both friction and cohesion and assuming cylindrical sliding surfaces*. Ernst. 1927.
- FOSSSEN, Haakon. *Geologia estrutural*. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. Acesso em: 31 out. 2023.
- GIMENES, M.; RODRIGUES, E.A.; BITERN COURT, L.A.G.; MANZOLI, O.L. *2D mesoscale modeling of compressive fracture in concrete using a mesh fragmentation technique*. *International Journal of Solids and Structures*, v.260-261, p.112031, 2023.
- LAMAITRE, J. *A Course on Damage Mechanics*. [S.I.]: Springer Science & Business Media, 1992. ISBN 978-3-662-02763-9.
- MAEDO, M. A. *Simulação computacional por elementos finitos de múltiplas fissuras em sólidos usando técnica de fragmentação da malha*. Bauru, 2015.
- MAEDO, M; SÁNCHEZ, M; ALJEZNAW, D; MANZOLI, O; GUIMARÃES, L. J; CLETO, P. R. *Analysis of soil drying incorporating a constitutive model for curling*. *Acta Geotechnica*, 15, 2619-2635. 2020.
- MAEDO, M. A; SÁNCHEZ, M; FABBRI, H; CLETO, P.R; GUIMARÃES, L. J; MANZOLI, O. L. *Coupled thermo-hydro-mechanical numerical modeling of evolving fractures in rocks*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54, 3569-3591. 2021.
- MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. *The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces*. *Geotechnique*, p. 79-93, 1965.
- Oliver, J., Huespe, A. E., & Cante, J. C. (2008). *An implicit/explicit integration scheme to increase computability of non-linear material and contact/friction problems*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197(21-24), 1865-1889.
- Olivella, S., Gens, A., Carrera, J., & Alonso, E. E. (1996). *Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media*. *Engineering computations*, 13(7), 87-112.
- Prazeres, P. G., Bitencourt, L. A., Bittencourt, T. N., & Manzoli, O. L. (2016). *A modified implicit–explicit integration scheme: an application to elastoplasticity problems*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 38, 151-161.
- SILVA, J.P. M. *Os métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Talude*. 2011. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade do Porto – U. PORTO, Portugal, 2011.
- SPENCER, E. A. *Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-slice Forces*. *Geotechnique*, n.17, p.11-26, 1967.
- XINXIN, Li; JIANSHE, Liu; WENPING, Gong; YI, Xu; BOWA, Victor. *A discrete fracture network based modeling scheme for analyzing the stability of highly fractured rock slope*. Elsevier, ano 2021, 24 nov. 2021. *Computers and Geotechnics*, p. 1-18. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104558>. Acesso em: 24 nov. 2021.