XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/113

Ruptura Planar em Taludes Rochosos: Abordagem Numérica via Elementos Finitos com Elementos de Alta Razão de Aspecto

Isabela Augusto Silveira
Pós-doutoranda, Universidade Federal de Pernambuco, Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia, Recife – PE, Brasil, isabela.silveira@ufpe.br

Michael Andrade Maedo
Professor, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia – MG, Brasil, michael.maedo@ufu.br

RESUMO: A estabilidade de taludes é tradicionalmente feita utilizando Métodos de Equilíbrio Limite, os quais desconsideram o comportamento tensão–deformação do maciço e, em muitos casos, negligenciam a influência das fraturas. Nesse contexto, este trabalho avalia o uso do método dos elementos finitos para a análise de taludes rochosos fraturados, por meio da representação explícita de uma ruptura plana utilizando elementos de alta razão de aspecto. Considerou-se um talude rochoso hipotético e homogêneo, no qual o plano de deslizamento foi previamente definido a partir de uma fenda de tração localizada no topo. A resistência ao cisalhamento foi descrita pelo critério de Mohr–Coulomb, e o fator de segurança foi determinado pelo Método de Redução da Resistência ao Cisalhamento (SSRM), no qual os parâmetros resistentes são progressivamente reduzidos até a perda de convergência ou deslocamentos excessivos, caracterizando a ruptura. As análises foram realizadas com o programa CODE_BRIGHT, considerando modelos bidimensionais, com malhas com inserção de elementos de alta razão de aspecto na região da fratura. Os resultados numéricos foram comparados com a solução analítica clássica para ruptura planar, apresentando boa concordância, confirmando o potencial do método dos elementos finitos, aliado ao uso de malhas adaptadas, como ferramenta consistente para a estimativa do fator de segurança em taludes rochosos.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Elementos Finitos, Fratura, Fator de Segurança, Alta Razão de Aspecto

ABSTRACT: Slope stability analyses are traditionally performed using Limit Equilibrium Methods, which neglect the stress–strain behavior of the rock mass and, in many cases, disregard the influence of fractures. In this context, this study evaluates the use of the finite element method for the analysis of fractured rock slopes through the explicit representation of a planar failure surface using high–aspect–ratio elements. A hypothetical and homogeneous rock slope was considered, in which the sliding plane was predefined based on a tension crack located at the slope crest. Shear strength was described using the Mohr–Coulomb criterion, and the factor of safety was determined by the Shear Strength Reduction Method (SSRM), in which the strength parameters are progressively reduced until loss of convergence or excessive displacements occur, indicating failure. The analyses were carried out using the finite element software CODE_BRIGHT, considering two-dimensional models, with meshes incorporating high–aspect–ratio elements in the fracture region. The numerical results were compared with the classical analytical solution for planar failure, showing good agreement. These results confirm the potential of the finite element method, combined with adapted meshes, as a consistent tool for estimating the factor of safety of rock slopes.

KEYWORDS: Slope Stability, Finite Element Method, Fracture, Factor of Safety, High Aspect Ratio Elements

1 INTRODUÇÃO

A avaliação da estabilidade de taludes rochosos tradicionalmente é realizada utilizando Métodos de Equilíbrio Limite, os quais desconsideram o comportamento tensão–deformação do maciço e, em muitos casos, negligenciam o efeito das fraturas. Entretanto, em meios rochosos, a presença e a orientação das descontinuidades exercem papel determinante na estabilidade global da encosta, podendo controlar o mecanismo e a superfície de ruptura. As descontinuidades estruturais podem apresentar diferentes tamanhos e formas, além de estarem aleatoriamente distribuídas e com orientações arbitrárias. Além disso, podem estar conectadas, caracterizando heterogeneidades e anisotropia inerentes ao corpo rochoso. Geralmente, essas descontinuidades apresentam menor resistência e maior deformabilidade, sendo consideradas regiões de fraqueza (LI et al., 2022).

Devido à estrutura complexa dos maciços rochosos, é praticamente impossível e oneroso considerar todas as características desse meio. Assim, as análises de estabilidade de taludes rochosos tendem a focar nas descontinuidades geológicas que mais influenciam a estabilidade do maciço, buscando reproduzir seu comportamento de forma mais realista (ZHANG et al., 2015). Nesse contexto, investigações envolvendo soluções analíticas e abordagens numéricas têm sido desenvolvidas para esse tipo de material.

A abordagem numérica é particularmente interessante por permitir descrever o comportamento complexo de maciços rochosos fraturados de maneira mais realista. De forma geral, com base na mecânica dos meios contínuos e descontínuos, as abordagens computacionais para análise da estabilidade de taludes rochosos podem ser divididas em (LI et al., 2022): (i) modelos de meios contínuos, como o Método dos Elementos Finitos; (ii) modelos de meios descontínuos, como o Método dos Elementos Discretos; e (iii) modelos híbridos contínuo–descontínuo. Nesta última categoria destacam-se análises numéricas via Método dos Elementos Finitos com inserção de elementos de alta razão de aspecto, incorporados à malha regular por meio de técnicas de fragmentação de malha. Esses elementos, associados a leis constitutivas de ruptura, permitem que programas de elementos finitos representem descontinuidades do material em problemas bidimensionais e tridimensionais.

Elementos de alta razão de aspecto são elementos sólidos descritos com base na Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes, permitindo que relações constitutivas contínuas representem a cinemática da descontinuidade. Esses elementos possuem como característica geométrica uma base muito maior que sua altura e, quando inseridos em uma malha convencional, possibilitam que a análise de elementos finitos seja conduzida integralmente no contexto de meios contínuos (BARBOSA, 2024). Entre as aplicações dessa abordagem destacam-se análises de fraturamento hidráulico (BESERRA, 2015), abordagens termo-hidromecânicas (MAEDO et al., 2021) e problemas de fissuração por ressecamento em solos (MAEDO, 2020). Apesar dessas aplicações, o uso de elementos de alta razão de aspecto para representar explicitamente descontinuidades em análises de estabilidade de taludes rochosos ainda é pouco explorado na literatura.

Este artigo investigou a aplicação do Método dos Elementos Finitos na análise da estabilidade de taludes rochosos fraturados por meio da representação explícita de descontinuidades utilizando elementos de alta razão de aspecto. Para isso, considerou-se um talude rochoso hipotético no qual o plano potencial de ruptura foi previamente definido a partir de uma fenda de tração localizada no topo do maciço. A resistência ao cisalhamento ao longo da descontinuidade foi descrita pelo critério de Mohr–Coulomb, enquanto o fator de segurança foi determinado pelo Método de Redução da Resistência ao Cisalhamento. As análises foram realizadas com o programa CODE_BRIGHT, empregando modelos bidimensionais com inserção de elementos de alta razão de aspecto na região da fratura. Por fim, os resultados numéricos obtidos foram comparados com a solução analítica clássica para ruptura planar, demonstrando o potencial da abordagem proposta para a estimativa do fator de segurança em taludes rochosos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solução analítica: Ruptura planar em rochas com estrutura fortemente orientada

Taludes rochosos, em geral, apresentam modos de ruptura classificados em: ruptura planar, em cunha, tombamento e ruptura sem padrão estrutural. Neste trabalho foi analisado um talude rochoso hipotético cuja

ruptura deu-se de modo planar, ou seja, é governada por uma descontinuidade e o movimento ocorre em uma única superfície aproximadamente plana. A Figura 1 ilustra a geometria adotada para as análises de estabilidade, bem como um detalhamento do plano de deslizamento e da fenda de tração. Trata-se, portanto, de um talude hipotético e homogêneo, cujo plano de deslizamento foi previamente definido a partir de uma fenda de tração localizada no topo. Não foi considerada a influência do posicionamento do nível de água, sendo, portanto, uma análise de um talude seco ou quase seco.

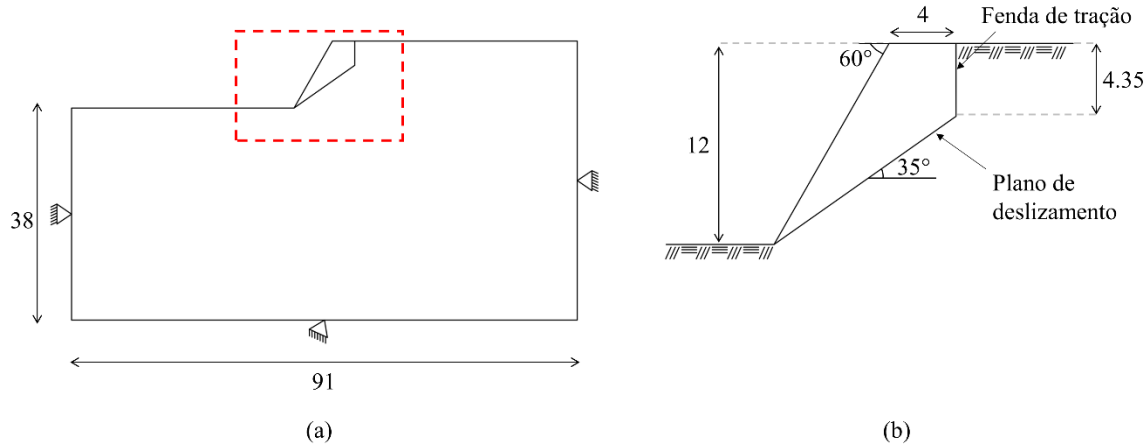


Figura 1. (a) Geometria adotada. (b) Detalhe do plano de deslizamento e da fenda de tração.

A análise de estabilidade de talude para ruptura planar possui solução analítica (HOEK, 2006; LINS, CELESTINO, BORTOLUCCI, 2003). Para que haja ruptura planar considera-se que: (i) o mergulho do plano de deslizamento é menor que o mergulho da face do talude; (ii) o mergulho do plano de deslizamento é maior que o ângulo de atrito da superfície; e (iii) são desconsideras as influências de feições laterais. Tendo-se atendido as hipóteses admitidas e considerando que a resistência ao cisalhamento do plano deslizante é definido pelo critério de Mohr-Coulomb, tem-se que o fator de segurança é dado pela Equação 1.

$$FS = \frac{cA}{W \sin\theta} + \cot\theta \tan\phi \qquad (1)$$

Em que: θ é o mergulho do plano deslizante; c é a coesão; A é a área do plano deslizante; W é o peso próprio do plano deslizante.

A área do plano deslizante é dada por:

$$A = [H + (b - H\cot\beta)\tan\alpha - z]\ \csc\theta \qquad (2)$$

Em que: H é a altura do talude, b é o comprimento horizontal da base da face inclinada até a fenda de tração; β é o mergulho da face do talude; α é a inclinação do topo; z é a profundidade da fenda de tração.

Por fim, o peso próprio do plano deslizante para fendas de tração localizadas no topo inclinado é dado por:

$$W = \gamma\left[(1 - \cot\beta\tan\alpha)\left(bH - \frac{1}{2}H^2\cot\beta\right) + \frac{1}{2}b^2(\tan\alpha - \tan\theta)\right] \qquad (3)$$

Em que: γ é o peso específico da rocha.

O equacionamento aqui apresentado refere-se ao caso de estudo, no qual considerou-se um talude seco ou quase seco com fenda de tração no topo. O equacionamento completo para demais situações de análise de estabilidade para ruptura planar é referenciado na literatura (HOEK, 2006.; LINS, CELESTINO,

BORTOLUCCI, 2003). A Tabela 1 resume os parâmetros de entrada de geometria e parâmetros materiais considerados neste trabalho.

Tabela 1. Parâmetros da geometria e parâmetros materiais considerados

Parâmetro	Unidade	Valor
θ	°	35.0
β	°	60.0
α	°	0.0
H	m	12.00
b	m	10.93
z	m	4.35
γ	kN/m³	26.0
c	kPa	Variável
ϕ	°	Variável

2.2 Simulação numérica

A simulação numérica da análise de ruptura planar foi realizada usando o programa de elementos finitos CODE_BRIGHT (OLIVELLA et al.,1996), que é baseado em um conjunto de equações acopladas que descrevem o comportamento do meio geológico.

A geometria adotada na simulação numérica está ilustrada na Figura 1. As condições de contorno adotadas foram de restrições de deslocamento, tal qual ilustrado na Figura 1(a). Neste trabalho, utilizou-se uma análise puramente mecânica, sendo que a ruptura planar foi simulada valendo-se da técnica de inserção de elementos de alta razão de aspecto no plano de deslizamento previamente definido. Os elementos de alta razão de aspecto foram dispostos em pares e inseridos na malha de elementos finitos, cuja principal característica geométrica é ter a base muito maior que a altura. A malha de elementos finitos usada na simulação bidimensional é do tipo triangular e possui 9496 nós e 18697 elementos (Figura 2), suficientemente refinada para garantir a acurácia dos resultados.

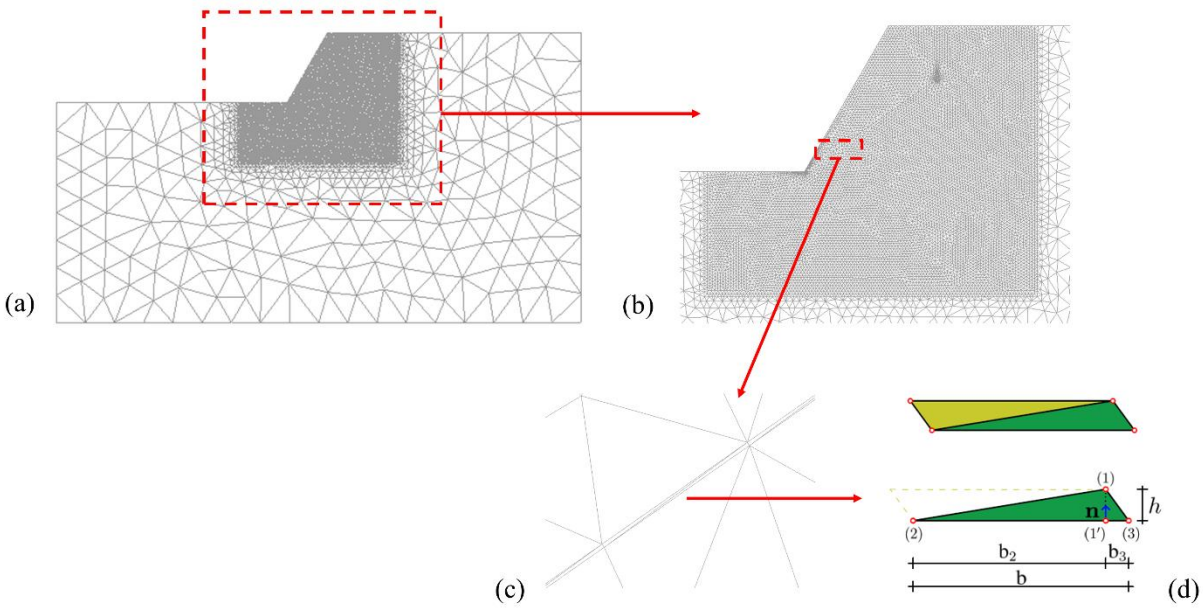


Figura 2. (a) Malha de elementos finitos para o problema bidimensional; (b) Detalhamento do refinamento da malha nas proximidades do plano de deslizamento e da fenda de tração; (c) Detalhamento dos elementos de interface no plano de deslizamento; (d) Elementos de alta razão de aspecto (BARBOSA, 2024)

Os materiais considerados nas análises foram considerados em regime elástico linear, com módulo de elasticidade (E) de 30000 MPa e Poisson (ν) de 0.3, com exceção do material de interface no plano de deslizamento, no qual foram inseridos os elementos de alta razão de aspecto, que foi simulado usando o modelo de Mohr-Coulomb. Para este material, considerou-se E = 30000 MPa e ν = 0.0, e os parâmetros de resistência coesão e ângulo de atrito variaram ao longo das simulações.

O fator de segurança do maciço rochoso fraturado foi avaliado usando Método de Redução da Resistência ao Cisalhamento (*Shear Strength Reduction Method* – SSRM). Tal método é usalmente aplicado em simulações numéricas de estalibilidade de taludes (ZHANG et al, 2015; GRIFFTHS; LANE, 1999; CHENG et al. 2007). No SSRM, o fator de segurança (FS) é definido como a relação entre a resistência ao cisalhamento real e a resistência ao cisalhamento reduzida na falha. Assim, os parâmetros de resistência do material, coesão e ângulo de atrito, são reduzidos de acordo com as Equações (4) e (5) até que haja a falha do talude, ou seja, perda de convergência da simulação numérica. O fator de segurança do talude é, portanto, igual ao valor do fator de redução da resistência (SRF) no momento da ruptura.

$$\bar{c} = \frac{c}{SRF} \tag{4}$$

$$\bar{\phi} = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\phi}{SRF}\right) \tag{5}$$

Foram realizados dois conjuntos de análises de simulações numéricas: (i) variação da coesão conforme a Equação (4), considerando valores de 1 kPa e de 10 a 100 kPa, com incrementos de 10 kPa, mantendo-se constante o ângulo de atrito em 20°; e (ii) variação do ângulo de atrito conforme a Equação (5), com valores entre 10° e 60°, em incrementos de 10° por simulação, mantendo-se constante a coesão em 1 kPa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir das simulações numéricas são apresentados a seguir, com ênfase na avaliação do fator de segurança e na comparação com a solução analítica clássica para ruptura planar.

Inicialmente, avaliou-se o comportamento global do talude rochoso durante o processo de redução da resistência ao cisalhamento, de modo a verificar se o mecanismo de ruptura observado nas simulações numéricas ocorreu ao longo do plano de deslizamento previamente definido. A Figura 3 apresenta o campo de vetores de deformação obtido para um fator de segurança próximo à iminência de ruptura (como exemplo, tomou-se uma análise cujo valor de coesão era de 1 kPa e o valor do âgulo de atrito era de 34.6028°, sendo que uma pequena diminuição deste ângulo de atrito levaria a ruptura planar). Observa-se uma concentração das deformações ao longo da interface correspondente ao plano de deslizamento, onde foram inseridos os elementos de alta razão de aspecto. Em contraste, o maciço rochoso adjacente apresenta deformações significativamente menores, comportamento compatível com a hipótese de material predominantemente rígido-elástico fora da descontinuidade. Esse comportamento indica que o mecanismo de ruptura foi adequadamente capturado pelo modelo numérico, ocorrendo de forma localizada ao longo do plano previamente definido, em concordância com o mecanismo de ruptura planar assumido na solução analítica.

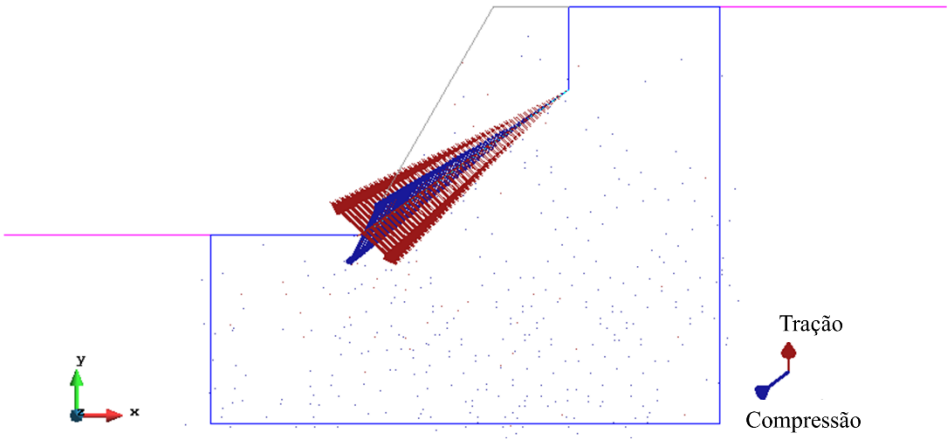


Figura 3. Campo de vetores de deformação para um fator de segurança próximo à iminência de ruptura (Fator de escala de 200).

Em seguida, os resultados numéricos obtidos pelo método dos elementos finitos foram comparados com a solução analítica clássica para ruptura planar, com o objetivo de avaliar a capacidade do modelo numérico em reproduzir o fator de segurança de um talude rochoso com estrutura fortemente orientada. As análises foram conduzidas variando-se separadamente os parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito, conforme descrito na Seção 2, mantendo-se constantes os demais parâmetros geométricos e materiais.

A Figura 4 apresenta a comparação entre os fatores de segurança obtidos pelas simulações numéricas bidimensionais, por meio do Método de Redução da Resistência ao Cisalhamento (SSRM), e os valores calculados analiticamente. Na Figura 4(a), tem-se o resultado do primeiro conjunto de análise, no qual variou-se a coesão pelo SSRM, mantendo-se constante o valor do ângulo de atrito em 20°. Na Figura 4(b), estão dispostos os resultados do segundo conjunto de análise, no qual variou-se, por sua vez, o valor do ângulo de atrito pelo SSRM mantendo a coesão constante em 1kPa.

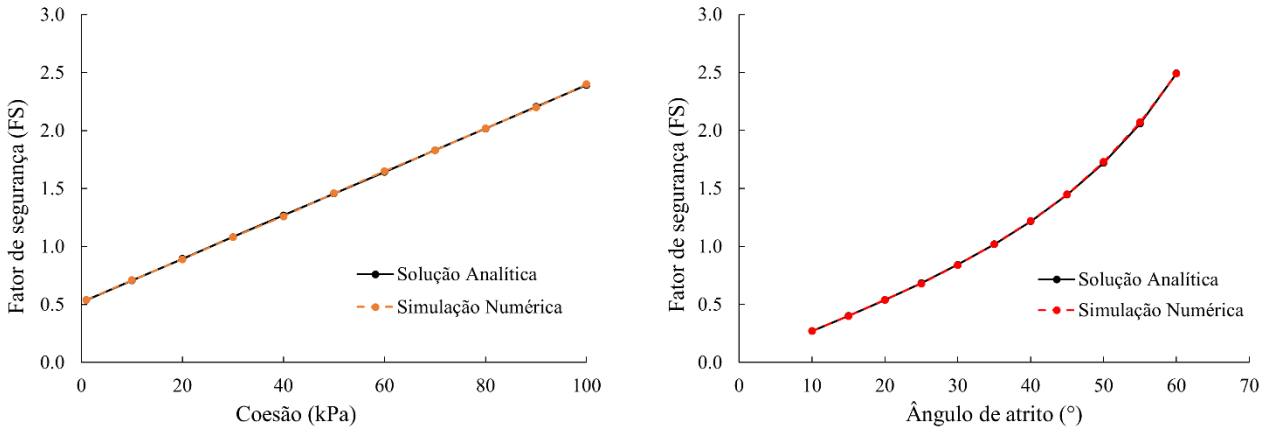


Figura 4. Comparação entre os fatores de segurança obtidos pelas simulações numéricas, por meio do SSRM, e os valores calculados analiticamente: (a) Variação do valor da coesão e mantendo-se o ângulo de atrito constante e igual a 20°; (b) Variação do valor do ângulo de atrito e mantendo-se o valor da coesão constante e igual a 1 kPa.

Observa-se que os resultados numéricos reproduzem adequadamente a tendência prevista pela solução analítica, apresentando boa concordância ao longo da faixa de parâmetros analisados. Em ambos os conjuntos de análises (variação do ângulo de atrito e variação da coesão), os valores do fator de segurança obtidos de

forma analítica praticamente se confundem com os obtidos na simulação numérica, com valor de erro relativo máximo de 0.71% para variação da coesão (e ângulo de atrito constante) e 0.73% para variação do ângulo de atrito (e coesão constante). Esses resultados confirmam a capacidade do método dos elementos finitos, aliado ao uso de elementos de alta razão de aspecto, em reproduzir adequadamente a solução analítica clássica para ruptura planar.

Embora a excelente concordância entre os resultados numéricos e a solução analítica seja importante para validar a metodologia empregada, a principal vantagem da abordagem numérica não está necessariamente na análise deste caso simplificado, mas na possibilidade de extensão para situações em que soluções analíticas não estão disponíveis. Entre essas situações destacam-se geometrias complexas, múltiplas descontinuidades, propriedades heterogêneas do maciço, condições hidromecânicas acopladas e mecanismos de ruptura mais complexos. Nesse contexto, os resultados obtidos demonstram que a representação explícita de descontinuidades por meio de elementos de alta razão de aspecto constitui uma estratégia adequada para aplicações futuras em problemas de maior complexidade.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho investigou a aplicação do Método dos Elementos Finitos para a análise de estabilidade de taludes rochosos fraturados por meio da representação explícita de plano de fratura utilizando a técnica de inserção de elementos de alta razão de aspecto. O caso analisado tratou de um talude hipotético no qual o potencial plano de ruptura foi previamente definido a partir de uma fenda de tração localizada no topo do maciço. Tal configuração geométrica foi avaliada dada a existência de solução analítica para validação dos resultados simulados numericamente. O fator de segurança resultante das simulações foi determinado pelo Método de Redução da Resistência ao Cisalhamento.

Os resultados das simulações numéricas indicaram que o modelo foi capaz de reproduzir adequadamente o mecanismo de ruptura planar em rochas com estrutura fortemente orientada assumido para a análise. Observou-se que houve concentração de deformações ao longo da interface correspondente ao plano de deslizamento onde estavam inseridos os elementos de alta razão de aspecto. Este resultado evidencia a capacidade da simulação em representar a localização da ruptura do maciço rochoso ao longo da descontinuidade previamentes definida.

Com relação ao fator de segurança, os valores determinados nas simulações numéricas apresentaram concordância com aqueles calculados via solução analítica para ambos os conjuntos de analises estudados: variação da coesão mantendo-se constante o ângulo de atrito e variação do ângulo de atrito mantendo-se a coesão constante. Para ambos os conjuntos de análises, os erros relativos máximos entre resultado da simulação numérica e solução analítica foram inferiores a 1%.

Desta forma, os resultados indicam que o Método de Elementos Finitos aliado ao uso de malhas adaptadas com elementos de alta razão de aspecto é uma ferramenta consistente para a estimativa do fator de segurança em taludes rochosos com descontinuidade. A abordagem mostra-se promissora em análises numéricas de estabilidade, podendo contribuir para avaliações mais realistas do comportamento de maciços rochosos fraturados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro concedido por meio do processo APQ-00990-22 (Edital nº 001/2022).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbosa, L. G. (2024) *Simulação numérica de fraturamento hidráulico em meios porosos naturalmente fraturados utilizando elementos de interface com elevada razão de aspecto.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Geotecnia, Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), Universidade Estadual Paulista - UNESP, 107 p.

Beserra, L. B. S. (2015) *Análise hidromecânica do fraturamento hidráulico via Elementos Finitos com descontinuidades fortes incorporadas.* Tese de Doutorado, Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 145 p.

Cheng, Y. M., Lansivaara, T., Wei, W. B. (2007) Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. *Computers and geotechnics*, 34 (3), p. 137-150.

Griffiths, D. V., Lane, P. A. (1999) Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique*, 49 (3), p. 387-403.

Hoek, H. (2006) *Practical rock engineering.* Disponível em: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2026.

Li, X., Liu, J., Gong, W., Xu, Y., Bowa, V. M. (2022) A discrete fracture network based modeling scheme for analyzing the stability of highly fractured rock slope. *Computers and Geotechnics*, 141, p. 104558.

Lins, P. G. C., Celestino, T. B., Bortolucci, A. A. (2003) *Elementos de mecânica das rochas (Notas de aula da disciplina de Mecânica das Rochas),* Escola de Engenharia de São Carlos/ USP e Escola Politécnica/ UFBA, v. 3, p. 157.

Maedo, M. A., Sánchez, M., Aljeznawi, D., Manzoli, O. L., Guimarães, L. J. N., Cleto, P. R. (2020) Analysis of soil drying incorporating a constitutive model for curling. *Acta Geotechnica, 15*, p. 2619-2635.

Maedo, M. A., Sánchez, M., Fabbri, H., Cleto, P., Guimarães, L. J. N., Manzoli, O. L. (2021) Coupled termo-hydro-mechanical numerical modeling of evolving fractures in rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering,* 54, p. 3569-3591.

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), p. 87-112.

Zhang, K., Cao, P., Meng, J., Li, K., Fan, W. (2015) Modeling the progressive failure of jointed rock slope using fracture mechanics and the strength reduction method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48 (2), p. 771-785.