

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/142

Análise 2D e 3D Aplicada à Estabilidade de Talude Reforçado com Solo Grampeado

João Pedro Damis Vital

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil joao.vital@ufu.br

Jean Rodrigo Garcia

Professor Doutor, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, jean.garcia@ufu.br

RESUMO: O uso da técnica de solo grampeado é fundamental para aumentar e assegurar a estabilidade de taludes em situação de risco ao deslizamento. No Brasil, esta abordagem tem sido amplamente utilizada com sucesso na recuperação de taludes instáveis. No entanto, as análises de projeto desse tipo de estrutura muitas vezes são conduzidas a partir de seções planas, identificando-as vulneráveis ao escorregamento. É importante observar que as rupturas de taludes estão associadas ao fenômeno tridimensional do escorregamento do maciço que ocorre em uma geometria tridimensional. Nesse contexto, este artigo analisa a influência das análises em Equilíbrio Limite em Dimensões 2D e 3D, aplicadas para determinar o fator de segurança de taludes reforçados com solo grampeado. O objetivo principal é avaliar a eficácia dessas análises, examinando suas vantagens e desvantagens, e verificar se a estabilidade aumenta, resultando na redução ou eliminação do risco de deslizamento. Essa avaliação é realizada pela análise da variação do fator de segurança, comparando-as simulações tridimensionais e bidimensionais por meio dos softwares Slide 3D e 2D da Rocscience. A análise tridimensional identificou a superfície crítica de ruptura, cujo fator de segurança é aproximadamente 8% inferior em relação à análise bidimensional. Isso evidencia que as análises tridimensionais conseguem de maneira mais eficaz capturar a condição crítica de taludes, oferecendo uma perspectiva mais precisa e abrangente sobre a estabilidade do talude.

PALAVRAS-CHAVE: Equilíbrio limite, análise tridimensional, solo grampeado, talude instável.

ABSTRACT: The use of the soil nailing technique is essential to increase and ensure the stability of slopes in landslide-prone situations. In Brazil, this approach has been widely and successfully employed in the recovery of unstable slopes. However, the design analyses of such structures are often conducted based on flat sections, identifying them as vulnerable to slipping. It is important to note that slope failures are associated with the three-dimensional phenomenon of mass sliding that occurs in a three-dimensional geometry. In this context, this article analyzes the influence of Limit Equilibrium analysis in 2D and 3D dimensions, applied to determine the safety factor of slopes reinforced with soil nailing. The main objective is to evaluate the effectiveness of these analyses, examining their advantages and disadvantages, and verifying whether stability increases, resulting in the reduction or elimination of the risk of sliding. This evaluation is conducted by analyzing the variation in the safety factor, comparing three-dimensional and two-dimensional simulations using Rocscience's Slide 3D and 2D software. The three-dimensional analysis identified the critical failure surface, whose safety factor is approximately 8% lower compared to the two-dimensional analysis. This highlights that three-dimensional analyses can more effectively capture the critical condition of slopes, providing a more comprehensive perspective on slope stability.

KEYWORDS: Limit equilibrium, Three-dimensional analysis, Soil nail, Unstable slope

1 INTRODUÇÃO

A falta de moradia adequada e em local que garanta condições de segurança aos seus moradores tem afetado uma parcela significativa da população no Brasil. Isto tem levado pessoas a ocupação de áreas de risco com elevado potencial de danos material e a vida humana devido ao escorregamento de taludes e encostas. Algumas medidas podem ser adotadas para evitar ou mitigar esses danos, como por exemplo, por meio do

emprego da técnica de solo grampeado que comprovadamente aumenta e garante a estabilidade de taludes ou encostas em situação de risco ao deslizamento.

O uso de grampos no solo, conhecido como solo grampeado, é uma técnica globalmente empregada para conter taludes e túneis, proporcionando estabilidade e rapidez construtiva. Isso envolve inserir grampos, barras de aço revestidas com cimento, reforçando o maciço, seguido pela aplicação de concreto projetado para formar uma superfície (França 2007).

O processo de solo grampeado para estabilidade de encostas é construído em estágios sequenciais, de cima para baixo à medida que a construção avança. O processo de solo grampeado é o método mais eficiente e econômico para estabilizar encostas naturais e taludes de obras de engenharia (Lazarte et al. 2015). Segundo Cornforth (2005), o processo pode ser implementado em espaços pequenos sem vibração ou perturbação do ambiente.

Em taludes reforços em solo grampeado, os métodos numéricos são mais adequados para simular o efeito da interação solo-reforço e a influência da heterogeneidade do solo na instabilidade da encosta em um solo-grampeado, o que não é possível incorporar em métodos analíticos e modelos de laboratório (Li *et al.*, 2014). Os autores ressaltam ainda, que os métodos numéricos podem modelar a não uniformidade do meio do solo e as propriedades do solo, incluindo endurecimento com o tempo e propriedades dependentes da temperatura. O conceito básico de um sistema de solo reforçado depende da transferência de forças de tração para o solo via atrito ou adesão desenvolvidos nas interfaces dos grampos.

Muitas análises geotécnicas estabelecidas e bem testadas baseiam-se em métodos de equilíbrio limite para avaliar a estabilidade de taludes (Duncan 1996; Duncan et al. 2014) Embora as abordagens 2D sejam bastante comuns, existem menos aplicações do método para análise 3D.

A maioria dos métodos de equilíbrio limite 3D assume que a direção da falha é predefinida, assim como nas análises 2D, tornando a localização da superfície crítica de falha um problema (LU et al., 2013). Entretanto, no presente estudo, foram empregados métodos de pesquisa e formatos de superfície de ruptura disponíveis na ferramenta computacional auxiliando na determinação do fator de segurança crítico.

Enquanto a análise 2D oferece uma visão simplificada e rápida, a análise 3D proporciona uma análise tridimensional mais detalhada e aprofundada. Essa diferença na complexidade impacta na compreensão dos fatores de segurança e na precisão das estimativas de estabilidade. O estudo da abordagem do equilíbrio limite revela que a maioria dos métodos de estabilidade de taludes em 3D são derivados dos métodos em 2D, e o fator de segurança nos modelos 3D é maior do que em 2D (Chakraborty and Goswami 2016).

Dentre os diversos métodos empregados para garantir a estabilidade de encostas, três abordagens são frequentemente utilizadas na análise de encostas com solo grampeado, a saber: o método do equilíbrio limite (Mohsen 2017), o método das diferenças finitas (Derghoum and Meksaouine 2021) e o método dos elementos finitos (Derghoum and Meksaouine 2021).

Uma comparação dos resultados 3D e 2D indica que as análises 2D subestimam seriamente as previsões de estabilidade, conforme apontado por Derghoum; Meksaouine (2021).

Alguns métodos de dimensionamento de equilíbrio limite para análise de estabilidade em talude com solo grampeado têm sido utilizados majoritariamente por meio de software 2D, porém com o desenvolvimento e aplicação do equilíbrio limite no emprego do software 3D surge como método de dimensionamento e análise das estruturas de contenção como forma mais realista e precisa, pois, apresenta maior similaridade com as características da estrutura e solo do local em estudo.

Nesse sentido, o objetivo deste artigo é analisar e apresentar as principais diferenças dos resultados da estabilidade de um mesmo talude, aplicando diferentes tipos de análises e métodos de determinação fator de segurança (FS), por meio do uso de ferramentas computacionais baseadas no método do equilíbrio limite, sendo o Slide 3 e o Slide 2, ambos da Rocscience.

1.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO E DO REFORÇO

Uma análise preliminar foi conduzida em relação a um talude com uma inclinação de 1(H) para 3(V) e altura de 12 metros. As características geotécnicas do maciço para esse talude indicam uma condição próxima à instabilidade (Figura 1).

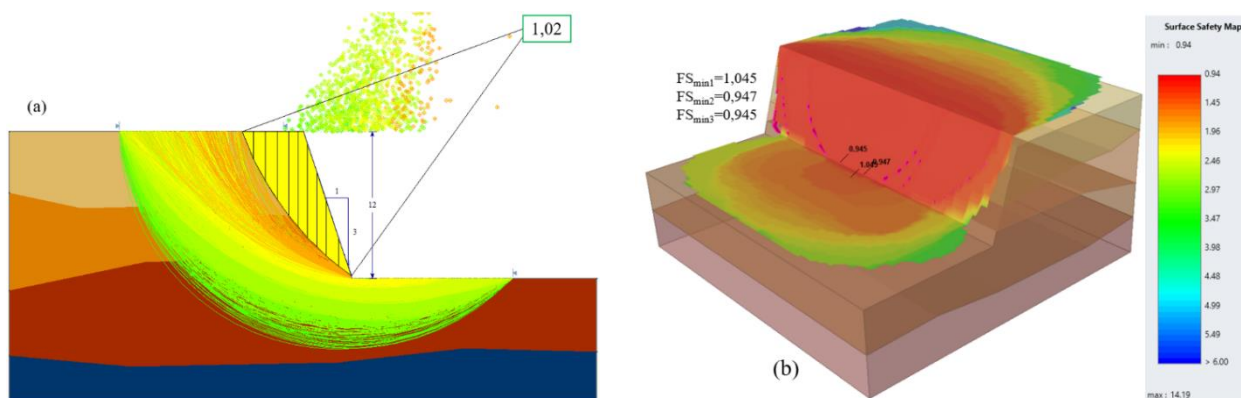


Figura 1. Análise do talude em situação próxima à instabilidade: a) bidimensional e b) tridimensional.

Diante desse cenário, tornou-se imperativo realizar uma intervenção para elevar o fator de segurança, assegurando que o talude cumpra os requisitos de segurança essenciais para uma área urbana. A solução adotada para aprimorar a estabilidade do talude consiste em 12 linhas de grampos, disposta em uma malha quadrada, com um espaçamento horizontal (S_h) e vertical (S_v) de 1 metro, e uma inclinação de 15 graus em relação à horizontal.

O subsolo local é composto por quatro camadas de solo, predominantemente arenoso, variando de areia argilo-siltosa a areia silto-argilosa (Figura 2). A resistência do solo, medida pelo N_{SPT} , varia de 4 a 19 golpes, respectivamente, da camada superficial até a camada mais profunda.

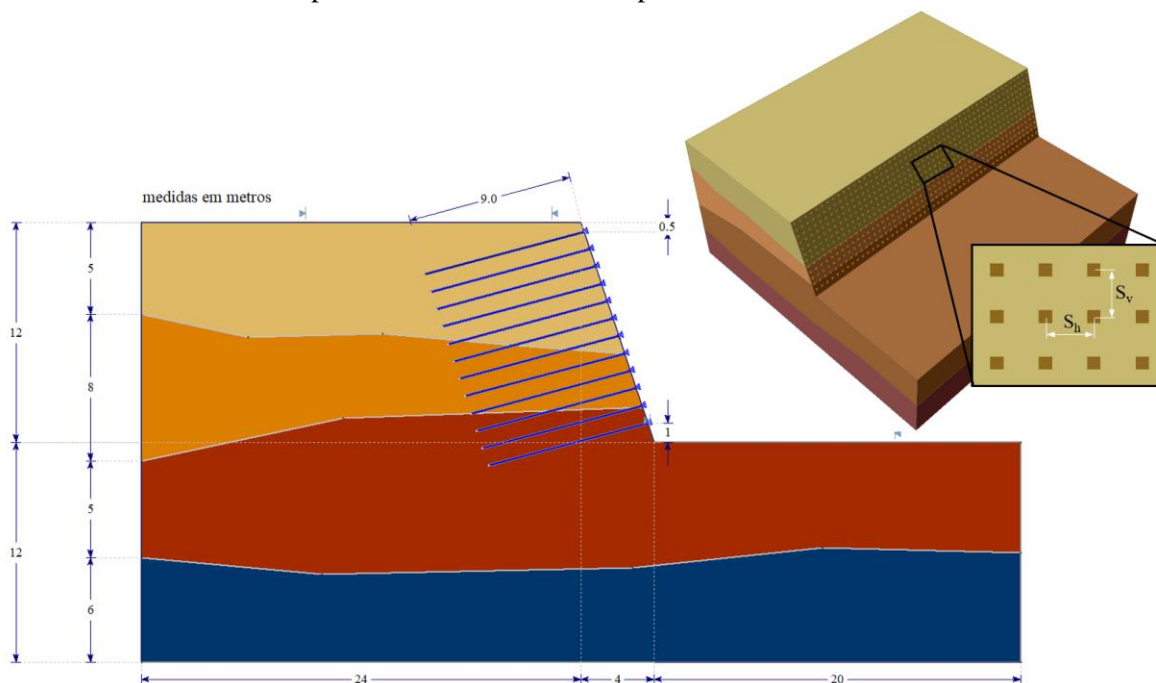


Figura 2. Modelo do talude utilizado nos softwares 2D e 3D.

Na fase preliminar de análise, os parâmetros do solo e das camadas do talude instável foram obtidos por meio de sondagens a percussão (SPT) realizadas no local. Nesse contexto, o peso específico (γ) e a coesão (c) foram inicialmente determinados utilizando valores médios propostos por Joppert (2007) e por correlações disponíveis na literatura (Tabela 1). Para a estimativa do ângulo de atrito (ϕ), recorreu-se à seguinte equação proposta por Teixeira e Godoy (1996):

$$\phi = \sqrt{20 \cdot N_{SPT}} + 15 \quad (1)$$

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos do solo

Material	N _{SPT} médio (golpes)	φ (°)	c (kPa)	γ (kN/m ³)
Areia argilo-siltosa *	4	24	15	17
Areia argilosa	9	25	25	18
Areia argilo-siltosa **	11	30	30	18
Areia silto-argilosa	19	34	37	19

Para análise do reforço, inicialmente foram considerados barras de aço (chumbador) CA-50, com 20 mm de diâmetro e perfuração de 100 mm de diâmetro. Dessa forma, a resistência de cálculo à tração do grampo (R_{td}) foi calculada pela seguinte equação (2).

$$R_{td} = f_{yd} \cdot A_{\text{útil}} \quad (2)$$

Onde:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \text{ (Resistência de cálculo do aço CA-50);}$$

$A_{\text{útil}}$ = Área da seção da barra de aço descontada a espessura de sacrifício por corrosão que equivale a 0,6 mm (ABNT NBR 16920-2: 2021). Sendo assim:

A carga na cabeça (T_0) do grampo para efeito de cálculo e comparação dos métodos em análise foi desprezado.

Os grampos são peças montadas, com elementos resistentes à tração, inseridos no solo por perfuração própria e fixados através de injeções de calda de cimento. Dessa forma, a interação solo-grampo é uma etapa necessária para o dimensionamento da estrutura de contenção. Para isso, é obtido os resultados de cada camada foi possível determinar a resistência de aderência solo grampo (q_s) que foram deduzidas através de equações empíricas relacionadas aos valores de N_{SPT} . Na literatura existem diversas correlações para estimativa da tensão de aderência, a partir dos resultados da sondagem à percussão. Entre essas destacam-se as propostas de Ortigão (1997), Ortigão e Sayo (2004) e Springer (2006), conforme apresentado nas equações (3), (4) e (5), respectivamente.

$$q_s = 50 + 7,5 \cdot (N_{SPT}) \quad (3)$$

$$q_s = 67 + 60 \cdot \ln(N_{SPT}) \quad (4)$$

$$q_s = 45,12 \cdot \ln(N_{SPT}) - 14,99 \quad (5)$$

Através das equações acima, foram obtidos os valores da tensão de aderência, os quais são indispensáveis às análises realizadas neste trabalho (Tabela 2).

Tabela 2. Tensão de aderência para as diferentes camadas do talude

Proposta	Areia argilo-siltosa *	Areia argilosa	Areia argilo-siltosa **	Areia silto-argilosa
(em kPa)				
Ortigão (1997)	80,00	114,69	130,36	188,75
Ortigão et al (1997)	150,18	196,28	209,29	242,07
Springer (2006)	47,56	82,23	92,02	116,66

Desse modo, foram considerados os valores mais críticos de cada camada para encontrar a força de aderência unitária (t). Essa força, ocasionada pelo grampo, representa a força de arrancamento por metro do

grampo, conforme apresentada na equação (6). Com os valores encontrados da força de aderência unitária, é possível definir as propriedades do solo grampeado juntamente com o tipo de método a ser analisado.

$$t = q_s \cdot \pi \cdot D \quad (6)$$

D: Diâmetro nominal do grampo, em metros.

2 MÉTODOS DE ANÁLISE E SUPERFÍCIES DE RUPTURA

Os métodos de análise de equilíbrio limite utilizados para ambos os softwares foram o método de *Bishop Simplified* e *Morgenstern-Price/GLE*. De acordo com Lazarte *et al.* (2015) há diversos tipos de superfícies de ruptura, sendo dois grupos principais, locais e globais. Entretanto foram analisados para o modelo 2D, três tipos de rupturas locais e uma global, conforme apresentado na Figura 3.

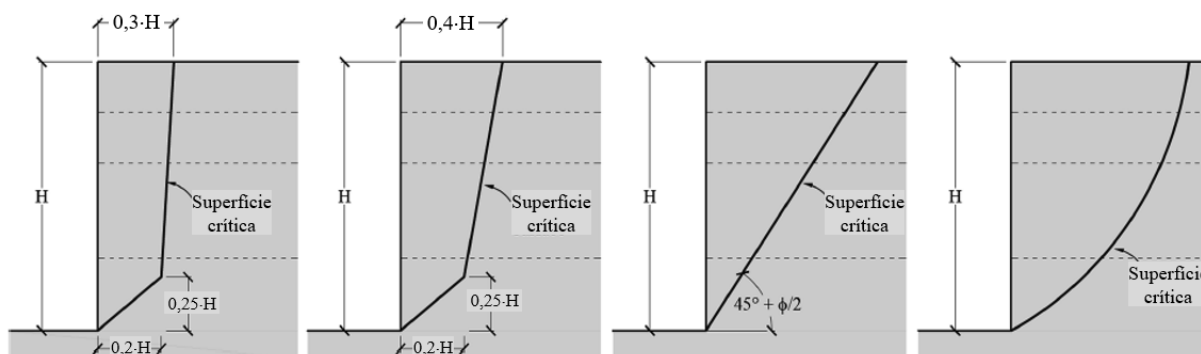


Figura 3. Superfícies de ruptura. (Garcia et al. 2019).

As superfícies de ruptura analisadas no modelo 3D foram determinadas por meio do método de busca automática conhecido como *Cuckoo Search*. Este método visa encontrar a superfície crítica que resulta no Fator de Segurança (FS) mínimo global. Adicionalmente, foi implementada uma análise de superfície esférica e elipsoidal, representando tanto superfícies circulares quanto não-circulares.

Nesse contexto, utilizou-se o algoritmo *Particle Swarm Search* e o *Cuckoo Search* para identificar a superfície mínima global.

As análises das superfícies de ruptura no software revelam discrepâncias notáveis tanto nos resultados obtidos quanto nas geometrias dessas superfícies, especialmente ao comparar os diferentes algoritmos disponíveis no contexto do software 3D. Essas disparidades sugerem que a escolha do algoritmo pode desempenhar um papel crucial na precisão e na representação visual das superfícies de ruptura, impactando diretamente na interpretação dos dados de estabilidade geotécnica. No entanto, para efeito de comparação, foi utilizado o mesmo algoritmo, o *Particle Swarm Search*.

O software 3D também permite uma modelagem mais fiel ao modelo real em estudo, além de possibilitar uma análise abrangente de diferentes formas e situações de superfície de ruptura, podendo estas estar centralizadas ou descentralizadas no talude.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizadas análises de estabilidade do talude, inicialmente sem reforço, tanto em modelo bidimensional quanto tridimensional (Figura 1). Posteriormente, foram conduzidas análises considerando o emprego de reforço com solo grampeado em três superfícies locais e uma superfície global mínima. Os resultados dessas análises forneceram os valores dos fatores de segurança para os modelos 2D nos diferentes cenários, os quais estão apresentados na Tabela 3 para cada superfície (Figura 4 e Figura 5). Em seguida, utilizando a análise tridimensional, procedeu-se à mesma análise da estabilidade, aplicando as mesmas propriedades e características do solo (Figura 6). Foram então obtidos os valores das superfícies de ruptura mínimas globais (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados do Fator de Segurança em diferentes cenários de análise.

Modelo / Método	Local 0,3H	Local 0,4H	Local $45^\circ + \phi/2$	FS _{global}	Varição FS _{global} (%)
3D / Bishop	-	-	-	1,57	-7%*
3D / GLE-MP	-	-	-	1,57	-8%*
2D / Bishop	1,76	1,77	1,84	1,68	+7%**
2D / GLE-MP	1,76	1,77	-	1,69	+8%**

Legenda: * (FS_{global_3D} - FS_{global_2D}) / FS_{global_2D}; ** (FS_{global_2D} - FS_{global_3D}) / FS_{global_3D}

Observa-se uma variação percentual de 7% nos Fatores de Segurança obtidos por meio do método de Bishop ao comparar os modelos 2D e 3D, e uma variação de 8% ao empregar o método de GLE/Morgenstern-Price. Essa discrepância nos valores dos fatores de segurança (FS) entre os modelos 2D e 3D sugere que, em situações de análises de talude com FS próximo ao mínimo, poderia ocorrer uma interpretação equivocada sobre a estabilidade do talude. Isso ocorre porque grande parte dos métodos de equilíbrio limite 3D baseia-se em superfícies de ruptura pré-definidas, assim como nos casos de análise bidimensional.

Verificou-se, ainda que, para um mesmo método de cálculo, Bishop e GLE/Morgenstern-Price, não apresentam variação em uma mesma análise, bidimensional ou tridimensional.

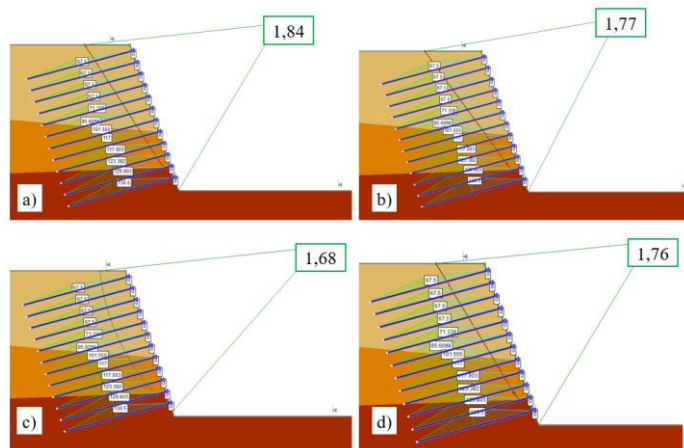


Figura 4. Fator de Segurança em diferentes cenários de análise pelo método do Bishop: a) local $45^\circ + \phi/2$; b) local 0,4H, c) global e d) local 0,3H.

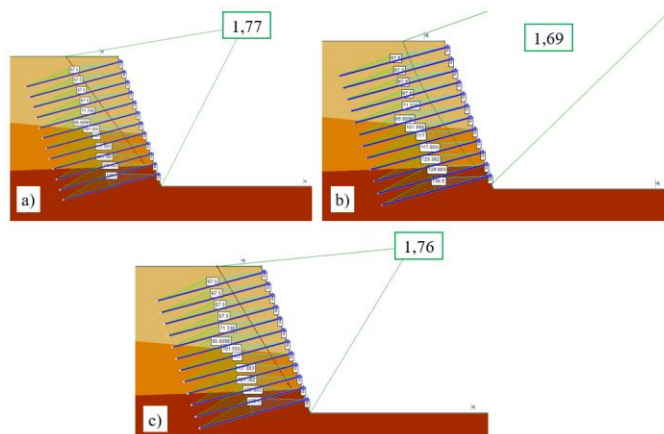


Figura 5. Fator de Segurança em diferentes cenários de análise pelo método GLE/Morgenstern-Price: (a) local 0,4H, (b) global e (c) local 0,3H.

Para situações de taludes estáveis com boa margem de FS em relação ao fator de segurança mínimo, essa variação percentual entre análises 2D e 3D pode não ser significativa. No entanto, para valores próximos ao fator de segurança mínimo exigido pela norma, essa variação poderia determinar se os requisitos de

segurança estão sendo atendidos ou não. De forma análoga, porém mais preocupante, seria em relação ao fator de segurança próximo a 1, indicando um risco iminente de instabilidade.

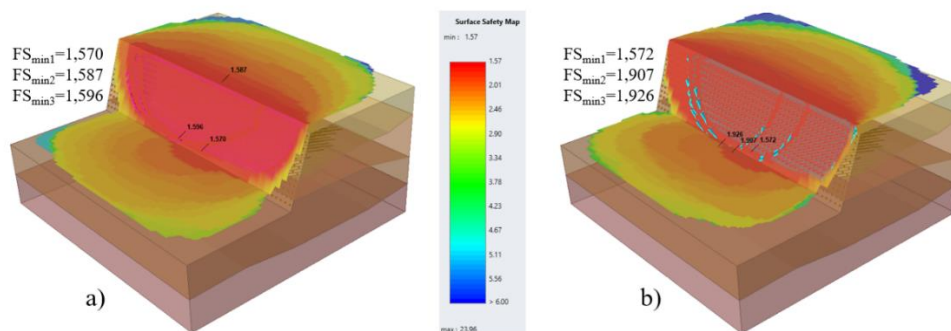


Figura 6. Fatores de segurança mínimos e superfícies de ruptura tridimensional para diferentes métodos de cálculo: a) Bishop e b) GLE/Morgenstern-Price.

As duas abordagens 2D e 3D, tornam-se ainda mais evidente quando se exploram as particularidades das superfícies de ruptura em um contexto tridimensional, sendo possível analisar diversos tipos de superfícies de ruptura ao longo de toda a seção do talude e uma análise da força axial em cada grampo do reforço.

Quando esses métodos são analisados em uma modelagem tridimensional, em comparação com a modelagem bidimensional, proporcionam uma visão mais detalhada das áreas críticas de ruptura na superfície do talude (Figura 6).

A capacidade de realizar uma análise tridimensional oferece uma perspectiva mais abrangente, permitindo uma compreensão mais aprofundada das características do terreno e das condições de estabilidade do talude. Dessa forma, ao comparar as Figuras 4, 5, 6 e 7, não apenas se destaca a diferença nas posições centralizadas das superfícies de ruptura, mas também se enfatiza a importância de escolher a abordagem adequada para uma avaliação precisa da estabilidade geotécnica. Essa análise mais aprofundada é crucial para tomar decisões informadas em projetos de engenharia civil, especialmente quando se trata de estruturas em encostas e taludes.

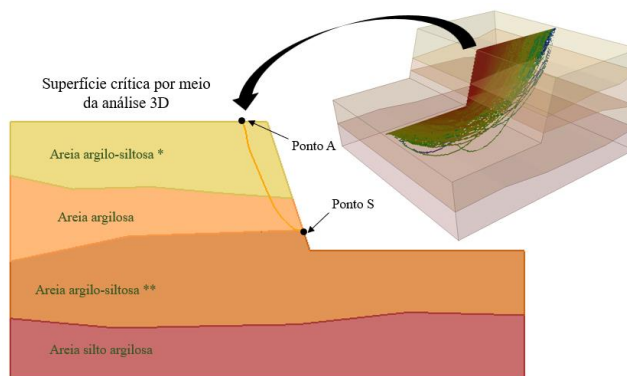


Figura 7. Superfície de ruptura tridimensional pelo método do GLE: a) global mínimo 1; a) global mínimo 2 e a) global mínimo 3.

A análise 2D é mais simples de implementar e requer menos tempo computacional e recursos em comparação com a análise 3D. Por outro lado, a análise 3D ajuda a identificar áreas críticas de ruptura que podem ser negligenciadas na análise 2D.

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados das análises, verificou-se que o modelo tridimensional proporciona uma análise mais próxima à realidade, demonstrando diferenças nos valores finais do fator de segurança em comparação com o modelo bidimensional. Ao comparar as análises de equilíbrio limite nos softwares Slide 2D e Slide 3D, observam-se abordagens distintas. O método das lamelas que em estudos 2D tem a capacidade de acomodar geometrias complexas, solos variáveis, condições de pressão de água e diferentes sistemas de reforço.

Entretanto, no caso analisado neste estudo, a diferença é da ordem de 8% no Fator de Segurança, entre a modelo 2D em relação ao 3D. A escolha entre os dois depende da profundidade desejada na análise, considerando a complexidade do projeto e as necessidades específicas de cada situação.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo apoio à pesquisa e à Universidade Federal de Uberlândia pela obtenção da licença do software utilizado nas análises desse artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2021. “NBR 16920-2 - Muros e Taludes em solos reforçados - Parte 2: Solos grampeados.” 2021.
- Chakraborty, A., and D. Goswami. 2016. “State of the art: Three Dimensional (3D) Slope-Stability Analysis.” *Int. J. Geotech. Eng.*, 10 (5): 493–498. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1172807>.
- Cornforth, D. H. 2005. *Landslide in Practice: Investigation, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Derghoum, R., and M. Meksaouine. 2021. “3D numerical analysis of soil nailing in sedimentary soil with vertical inclusions.” *Int. J. Geo-Engineering*, 12 (1): 15. <https://doi.org/10.1186/s40703-021-00144-5>.
- Duncan, J. M. 1996. “State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes.” *J. Geotech. Eng.*, 122 (7): 577–596. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:7\(577\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(577)).
- Duncan, J. M., S. G. Wright, and T. L. Brandon. 2014. *Soil Strength and Slope Stability*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- França, F. A. N. 2007. “Ensaio de arrancamento em solo grampeado em laboratório. Dissertação (Mestrado).” Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Garcia, J. R., P. J. R. Albuquerque, and A. S. Mucheti. 2019. “Probabilistic and Deterministic Analysis of an Excavation Supported by Tiebacks and Nailing in Residual Soil of Gneiss.” 31–41.
- Joppert Jr., I. 2007. *Fundações e Contensões de Edifícios - qualidade total na gestão do projeto e execução*. São Paulo: Pini Ltda.
- Lazarte, C. A., H. Robinson, J. E. Gómez, A. Baxter, A. Cadden, and R. Berg. 2015. *Geotechnical Engineering Circular N° 7 Soil Nail Walls - Reference Manual*. Washington, DC, USA.
- Li, J., X. Xie, Q. Zhang, P. Fang, and W. Wang. 2014. “Distress Evaluation and Remediation for a High-Rise Building with Pile-Raft Foundation.” *J. Perform. Constr. Facil.*, 28 (4): 04014005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000503](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000503).
- LU, H.H.; XU, L.M.; FREDLUND, M.D.; FREDLUND, D. G. 2013. “Comparison of 3D Finite Element Slope Stability With 3D Limit Equilibrium Analysis.” *Proc. 18th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng.*
- Mohsen, F. 2017. “The Effect of Nail Inclination Angle on Improving the Performance of Nailing System in Vertical Excavation.” *Civ. Eng. Res. J.*, 1 (3). <https://doi.org/10.19080/CERJ.2017.01.555561>.
- Ortigão, J. A. R. 1997. “Solo, Ensaio de arrancamento para projetos de Grampeado.” ABMS.
- Ortigão, J. A. R., and A. S. Sayao. 2004. *Handbook of Slope Stabilisation*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH.
- Springer, F. O. 2006. “Ensaio de arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss.” PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- Teixeira, A.H.; Godoy, N. S. 1996. *Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. Fundação: Teoria e Prática*. (Hachich et al. (editores), ed.). São Paulo: Ed. Pini.