

Comparação de Métodos de Estabilidade Aplicados em Modelagens Bidimensionais e Tridimensionais de Taludes

Luis Henrique Rambo

Doutorando, FECFAU/UNICAMP, Campinas/SP, Brasil, l202359@dac.unicamp.br

Paulo José Rocha de Albuquerque

Professor Titular, FECFAU/UNICAMP, Campinas/SP, Brasil, pjra@unicamp.br

Eliza Alejandra Rios Villareal

Eng Civil, Universidad Nacional Autónoma de México, México, eliza.rios@rocscience.com

Fernando Feitosa Monteiro

Professor Doutor, FECFAU/UNICAMP, Campinas/SP, Brasil, feitosam@unicamp.br

José Guilherme Sacilotto

Mestrando, FECFAU/UNICAMP, Campinas/SP, Brasil, josesaciloto@outlook.com

RESUMO: Este estudo analisa criticamente as diferenças entre métodos clássicos de equilíbrio limite aplicados em modelagens bidimensionais (Slide 2) e tridimensionais (Slide 3) na avaliação da estabilidade de taludes em barragens. Com base em um cenário real adaptado de uma PCH situada na região Norte do Brasil, a geometria do maciço e os parâmetros de solo foram modelados em condição de fluxo permanente, visando comparar os métodos de Bishop, Spencer e Morgenstern-Price. A modelagem 3D permitiu capturar efeitos não lineares e laterais, destacando-se pelo deslocamento tridimensional da superfície de ruptura e redistribuição das poropressões no maciço. Os fatores de segurança foram, em média, superiores nas análises tridimensionais, com variações de até 15% em relação aos modelos 2D. Além disso, os modos de ruptura observados no Slide 3 revelaram comportamento mais realista e contínuo, com volumes instáveis mais profundos e ampla lateralidade, sugerindo caminhos potenciais de instabilização não evidentes em seções planas. A análise comparativa reforça a necessidade de abordagem tridimensional em projetos com geometrias complexas, sobretudo em obras hidráulicas, onde a distribuição espacial do fluxo e das tensões possui papel decisivo no desempenho estrutural. Os resultados obtidos destacam a importância da integração entre modelos numéricos e julgamento técnico na definição do modelo representativo do comportamento do solo.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade, taludes, métodos de análise, modelagem numérica

ABSTRACT: This study critically examines the differences between classical limit equilibrium methods applied in two-dimensional (Slide 2) and three-dimensional (Slide 3) modeling for slope stability analysis in embankments. Based on a real-world scenario adapted from a small hydropower plant located in northern Brazil, the embankment geometry and soil parameters were modeled under steady-state seepage conditions to compare the performance of Bishop, Spencer, and Morgenstern-Price methods. The 3D modeling enabled the capture of nonlinear and lateral effects, particularly the spatial displacement of the critical slip surface and redistribution of pore water pressures throughout the slope mass. Safety factors were generally higher in the 3D simulations, with differences reaching up to 15% compared to 2D results. Moreover, the failure modes obtained in Slide 3 exhibited more realistic and continuous behavior, with deeper failure volumes and significant lateral extent, revealing potential instability paths not apparent in planar analyses. The comparative results reinforce the need for three-dimensional modeling in projects with complex geometries, especially in hydraulic works, where spatial fluid pressure distribution and stress fields are crucial for design safety. These findings emphasize the importance of integrating numerical tools with engineering judgment to define representative models for soil behavior and slope performance evaluation.

KEYWORDS: stability, slopes, analysis methods, numerical modeling



1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes é um dos temas mais relevantes e recorrentes na engenharia geotécnica, especialmente em contextos de infraestrutura e obras em regiões tropicais, onde a heterogeneidade dos solos e as condições climáticas intensas desafiam a segurança das estruturas. Tradicionalmente, os métodos de equilíbrio limite (MEL) são amplamente empregados para a análise de estabilidade, com destaque para os métodos de Bishop Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Essas técnicas permitem a estimativa do fator de segurança (FS) com base em diferentes hipóteses sobre o equilíbrio estático dos elementos do solo e são implementadas em diversos softwares comerciais e acadêmicos.

No entanto, avanços computacionais recentes têm possibilitado a modelagem tridimensional (3D) como alternativa às abordagens bidimensionais (2D), oferecendo uma representação mais realista de geometrias complexas e efeitos espaciais.

Segundo (Cheng e Yip, (2007) a extensão dos MELs para aplicações 3D amplia significativamente a compreensão dos mecanismos de ruptura em taludes com geometrias irregulares. Kumar *et al.*, (2022) observaram que as diferenças nos fatores de segurança entre as análises 2D e 3D podem ser substanciais, especialmente em regiões com intervenções assimétricas ou variações topográficas pronunciadas.

Dentre os softwares que oferecem suporte a essas análises, os programas Slide 2 e Slide 3, da Rocscience, destacam-se por permitir modelagens 2D e 3D com base nos mesmos conjuntos de dados e parâmetros geotécnicos, facilitando a comparação direta entre os resultados.

Essa capacidade é fundamental, pois, conforme Fredlund e Krahn, (1977), a seleção do método de análise e o tipo de modelagem adotados impactam diretamente na avaliação da segurança e na tomada de decisão em projetos geotécnicos.

No âmbito nacional, estudos como o de Ribeiro, (2018) e Carneiro, (2022) demonstram a aplicação de modelagens numéricas com diferentes métodos clássicos de equilíbrio limite em projetos de estabilização de encostas e obras de contenção.

Tais trabalhos reforçam a importância da consideração de múltiplos métodos e abordagens para aumentar a confiabilidade dos resultados e validar intervenções em campo. Essa evolução metodológica é especialmente relevante para obras em solo tropical, como é o caso do presente estudo, desenvolvido com base em dados reais de uma obra de infraestrutura localizada na região Norte do Brasil.

Dessa forma, este artigo tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre os principais métodos clássicos de estabilidade de taludes, aplicados em modelagens bidimensionais e tridimensionais, com foco na interpretação crítica das diferenças entre os fatores de segurança obtidos e na discussão sobre a aplicabilidade de cada abordagem conforme as particularidades do problema geotécnico. A pesquisa visa contribuir para a seleção mais consciente de métodos de análise e para o aprimoramento dos critérios de projeto e segurança em encostas e obras de contenção.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada com base em modelagens numéricas realizadas nos softwares Slide 2 e Slide 3, da Rocscience, amplamente reconhecidos na engenharia geotécnica por suas capacidades de simulação em duas e três dimensões. As modelagens foram realizadas considerando dados reais de uma obra de infraestrutura localizada na região Norte do Brasil, cuja caracterização geotécnica está documentada em relatórios técnicos da fase de projeto executivo.

Foram selecionadas três metodologias clássicas de equilíbrio limite: Bishop Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price. Esses métodos foram aplicados tanto em seções transversais (2D) quanto em geometrias tridimensionais (3D), respeitando a configuração do talude natural da área de estudo. A geometria modelada inclui camadas alternadas de solo residual e rocha alterada, além da presença de bermas de inspeção e variações topográficas ao longo do eixo da estrutura.

As propriedades geotécnicas dos materiais foram determinadas com base em investigações de campo e ensaios de laboratório, e complementadas por meio de dados presentes na bibliografia (Carsel; Parrish (1988); Ferdos *et al.* (2015); SCDOT (2022); USSD (2011)); considerando parâmetros típicos de solos tropicais como coesão efetiva (c'), ângulo de atrito (ϕ), peso específico (γ) e permeabilidade (k). Os solos do talude e das camadas superficiais foram modelados pelo critério de resistência de Mohr – Coulomb, enquanto a fundação rochosa foi representada pelo critério generalizado de Hoek – Brown.



No Slide 2, o fluxo subterrâneo foi resolvido por análise de escoamento subterrâneo via método dos elementos finitos, empregando elementos triangulares de seis nós e uma malha com aproximadamente 4 000 elementos. O tipo de malha, as condições de contorno e os critérios de convergência foram definidos com base em recomendações internacionais e validações sugeridas por verificações-padrão da própria plataforma. Os valores de pressão neutra resultantes dessa análise foram automaticamente utilizados nos cálculos de estabilidade, que permaneceram fundamentados nos métodos clássicos de equilíbrio limite (LEM). Para a avaliação das condições potenciais de ruptura, inicialmente foram consideradas superfícies de deslizamento circulares definidas por meio de busca automática, em condição de regime permanente. Em seguida, foi estabelecido um grid de superfícies para refinamento, permitindo identificar com maior precisão as superfícies críticas.

O Slide 3 não possui módulo próprio para análise de escoamento subterrâneo por elementos finitos. Por isso, os valores de poropressão obtidos no Slide 2 foram exportados e posteriormente utilizados no Slide 3 para gerar o campo tridimensional de pressões neutras ao longo do comprimento do talude. Para isso, os dados foram extrudados ao longo do maciço por meio de interpolação híbrida, permitindo que o modelo tridimensional considerasse adequadamente as variações de pressão ao longo de todo o volume analisado. A superfície de ruptura foi obtida por meio de busca automática, sob a mesma condição de regime permanente adotada nas análises bidimensionais.

A modelagem 2D incorporou variações mais recentes conforme propostas de Griffiths e Lane, (1999), enquanto a abordagem tridimensional foi guiada pelas diretrizes dos manuais técnicos da própria desenvolvedora (RS2 – Slope Stability Verification Manual, 2023)

Para garantir comparabilidade, os mesmos parâmetros de entrada foram utilizados nas simulações 2D e 3D. A análise dos resultados foi centrada na variação dos fatores de segurança obtidos por cada método e suas implicações sobre o projeto, especialmente no que tange à escolha de medidas de estabilização e à interpretação do risco associado.

A diversidade metodológica incorporada neste estudo visa a fornecer um panorama robusto das diferenças práticas e conceituais entre os modelos analisados, contribuindo para uma abordagem mais crítica e fundamentada nas decisões de engenharia aplicadas à estabilidade de taludes.

Ressalta-se que este estudo utiliza informações geotécnicas e geométricas baseadas em dados de uma obra real localizada no município de Oiapoque/AP. No entanto, com o intuito de preservar a confidencialidade e a integridade dos projetos originais, os dados foram parcialmente adaptados, sem prejuízo à representatividade técnica.

A proposta do trabalho não visa à comparação direta com projetos executivos, mas sim à exploração de aspectos metodológicos e à obtenção de subsídios para aprimoramento de práticas em análises de estabilidade de taludes, mantendo o rigor técnico e os preceitos éticos que regem a pesquisa aplicada em engenharia.

Embora o procedimento adotado, que combina análise de escoamento subterrâneo por elementos finitos para determinação de poropressões e cálculo de estabilidade pelo equilíbrio limite, seja uma prática aceita em análises geotécnicas e recomendada em manuais do *software*, reconhece-se que ele não representa explicitamente redistribuições de tensões e deformações do maciço nem acoplamentos hidromecânicos completos. Ainda assim, atende de forma adequada aos objetivos deste estudo, oferecendo resultados consistentes para comparações metodológicas.

3 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso refere-se a um empreendimento de infraestrutura energética localizado na região Norte do Brasil, especificamente no município do Oiapoque/AP conforme figura 1. O projeto compreende estruturas associadas à implantação de uma pequena central hidrelétrica, incluindo barramentos, canais e sistemas de contenção de taludes e é denominado PCH Salto Cafesoca.

A seleção da área de estudo se deu pela disponibilidade de dados técnicos completos e pela representatividade geotécnica da região, marcada por solos residuais sobre rochas alteradas, com presença de lateritas e forte influência do regime pluviométrico amazônico.

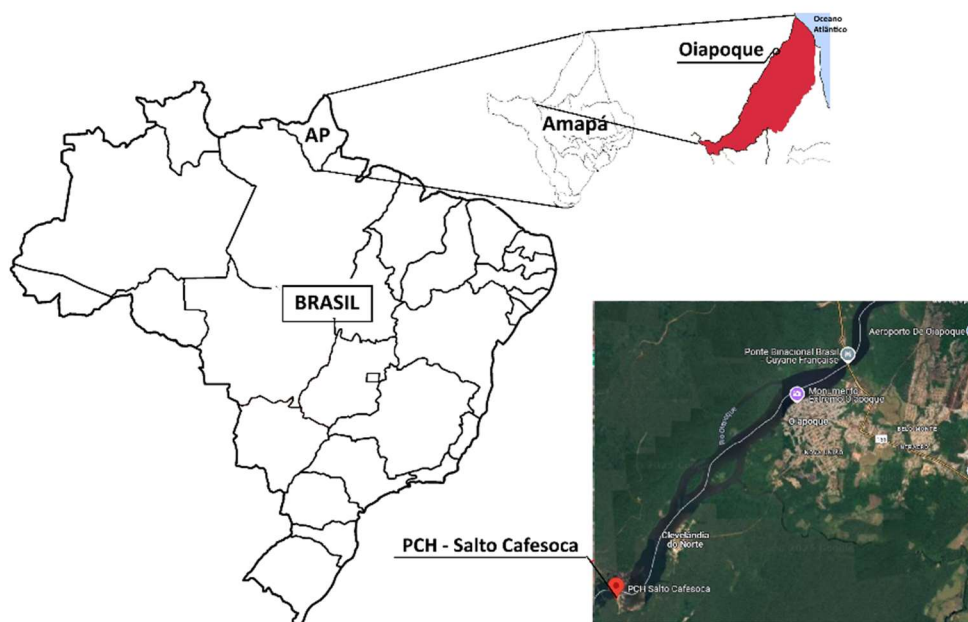


Figura 1. Localização do empreendimento. Fonte: autores 2025.

A geometria dos taludes naturais e das intervenções projetadas foi obtida a partir de modelos digitais de terreno e seções geológicas fornecidas nos documentos de projeto. As análises consideraram um talude com altura média de 18 metros e inclinação variável, com camadas alternadas de solo e rocha.

A definição dos parâmetros geotécnicos partiu dos resultados dos ensaios de campo e laboratório descritos nos relatórios da fase de projeto executivo, incluindo SPT, ensaios de permeabilidade, granulometria e limites de consistência.

Para fins de modelagem, foram utilizados os softwares Slide 2 e Slide 3, permitindo a simulação em 2D e 3D, respectivamente. A presença de lençol freático superficial e os efeitos de variação sazonal foram considerados na modelagem de fluxo permanente.

As simulações buscaram reproduzir as condições mais críticas de estabilidade, avaliando o comportamento do talude frente a diferentes métodos de equilíbrio limite. As análises também incorporaram diferentes cenários de carregamento, incluindo a presença de cargas concentradas oriundas de estruturas adjacentes e variações nos níveis d'água, com o intuito de investigar a sensibilidade do FS frente às principais variáveis de projeto. A geometria adotada para modelagem no Slide 2 seguiu fielmente os perfis extraídos do projeto executivo, conforme a figura 2, incluindo as espessuras das camadas e as dimensões da crista e do pé do talude.

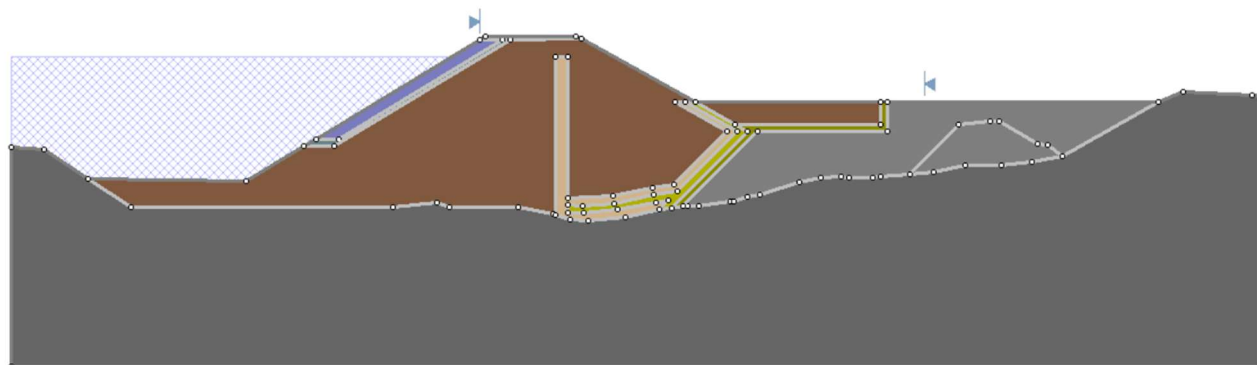


Figura 2. Malha de elementos finitos 2D (Slide 2). Fonte: autores 2025.

Os parâmetros geotécnicos utilizados foram obtidos a partir dos relatórios técnicos de campo e descritos conforme a tabela 1, na resistência de referências bibliográficas para materiais similares, conforme descrito na seção de metodologia.

Tabela 1 – Parâmetros Geotécnicos 1.

	Descrição	c' (kPa)	$\Phi(^{\circ})$	$\gamma(g/cm^3)$	*	**	GSI
Rip-rap	-	5	42	2,40			
Enrocamento Compactado	-	5	42	2,40			
Transição Compactada	-	8	35	2,00			
Solo Compactado	Argila Siltosa	13	21	1,92			
Transição Grossa	-	8	35	2,00			
Transição Fina	Brita 1	0	35	2,00			
Areia	-	0	27	1,70			
Fundação	Gnaisse	500	40	-	125	37500	85
*Resistência Uniaxial de Compressão (MPa)							
**Módulo de Deformabilidade (MPa)							

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises numéricas realizadas com os softwares Slide 2 (2D) e (Slide 3 (3D) permitiram avaliar a sensibilidade dos métodos de equilíbrio limite frente à geometria do talude e à presença de fluxo.

A Tabela 2 resume os fatores de segurança obtidos por método e por tipo de modelagem.

Tabela 2 – Fatores de segurança obtidos nos modelos 2D e 3D por método.

Método	FS (2D)	FS (3D)
Bishop modificado	2,02	1,91
Spencer	2,02	2,13
Morgenstern-Price	2,02	2,09

Os resultados mostraram que a modelagem 3D resultou em fatores de segurança levemente superiores à modelagem 2D para todos os métodos, com uma diferença média em torno de 15%, especialmente nos métodos Spencer e Morgenstern-Price.

Essa elevação está associada à capacidade do modelo 3D de capturar efeitos de confinamento lateral, que não são representados em análises planas.

A Figura 3 mostra a malha gerada no modelo 2D, evidenciando as regiões de refinamento junto à base do talude.

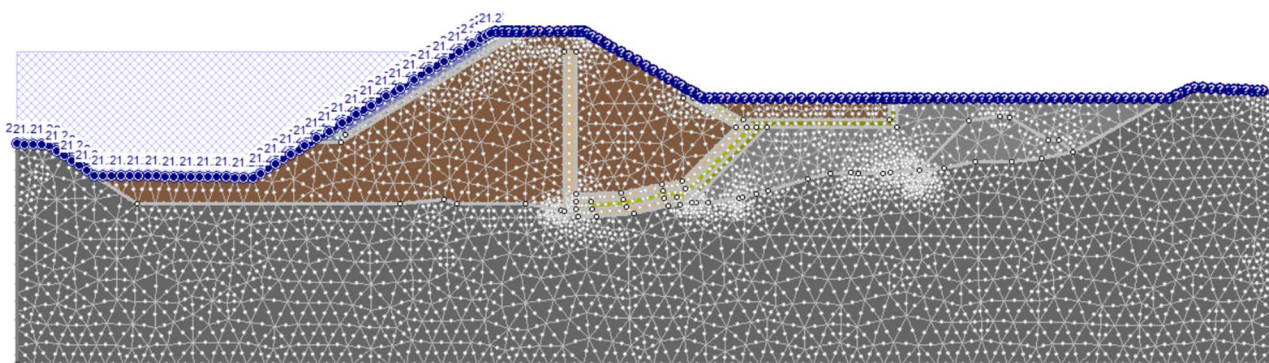


Figura 3. Seção da Barragem. Fonte: autores 2025.

O método de Bishop, apesar de amplamente utilizado, apresentou maior variação entre as abordagens 2D e 3D, indicando sua sensibilidade a mudanças na geometria espacial, principalmente por desconsiderar o equilíbrio de momentos.

Já os métodos de Spencer e Morgenstern-Price se mostraram mais estáveis e consistentes, reforçando seu uso em contextos tridimensionais com geometrias irregulares.

As Figuras 5 a 7, que ilustram os modos de ruptura e zonas críticas de tensão para cada método, mostram que no modelo tridimensional houve migração da superfície crítica para áreas lateralmente confinadas, o que evidencia a importância da consideração do volume total do maciço.

Na Figura 5, observa-se que o método de Bishop no Slide 3 apresenta uma superfície de ruptura com padrão mais vertical e concentrado, o que pode ser explicado pela simplificação do equilíbrio de momentos.

A geometria circular predominante reflete a natureza do método, com trajetória restrita e simétrica.

A limitação da análise ao equilíbrio de forças, sem consideração dos momentos, resulta em menor variação lateral da ruptura, o que reduz a fidelidade do modelo frente a geometrias complexas.

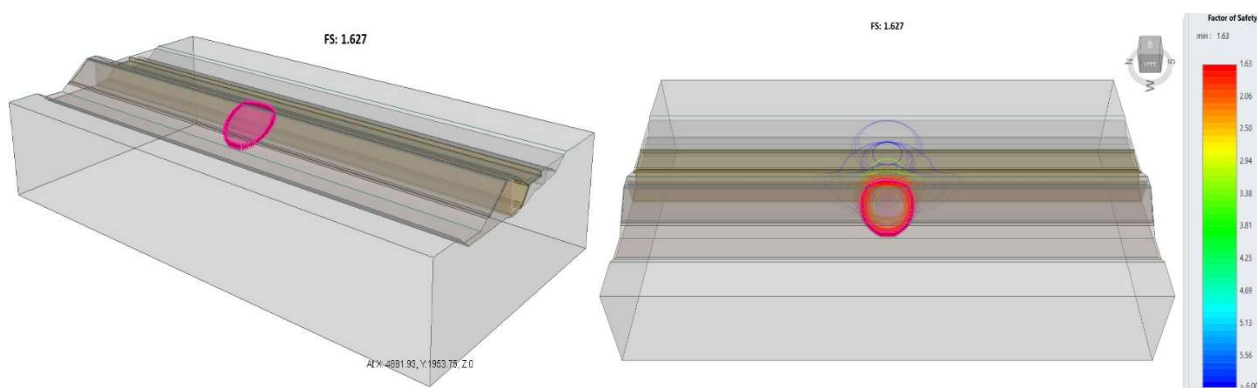


Figura 5. Visualização 3D da superfície de ruptura obtida pelo Método de Bishop. Fonte: autores 2025.

Já na Figura 6, com o método de Morgenstern-Price, nota-se uma superfície mais ampla, com zonas de cisalhamento lateralmente distribuídas, indicando sensibilidade aos limites geométricos do maciço.

A análise tridimensional associada ao equilíbrio de forças e momentos fornece uma visão mais abrangente da instabilidade potencial, sendo particularmente eficaz na avaliação de massas irregulares ou taludes com geometrias não convencionais.

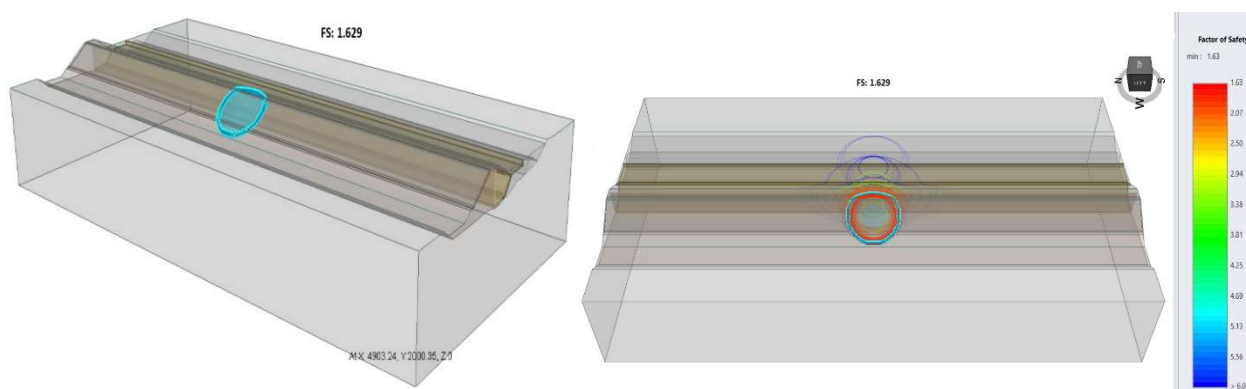


Figura 6. Visualização 3D da superfície de ruptura - Método de Morgenstern-Price. Fonte: autores 2025.

Por fim, a Figura 7, com o método de Spencer, revela um volume de ruptura mais contínuo e profundo, sugerindo maior confiabilidade para estruturas com carregamentos assimétricos.

A ruptura apresenta forma contínua e assimétrica, com deslocamento progressivo ao longo do maciço.

A modelagem tridimensional evidencia a importância de se considerar o comportamento espacial completo do talude para uma avaliação realista da estabilidade global.

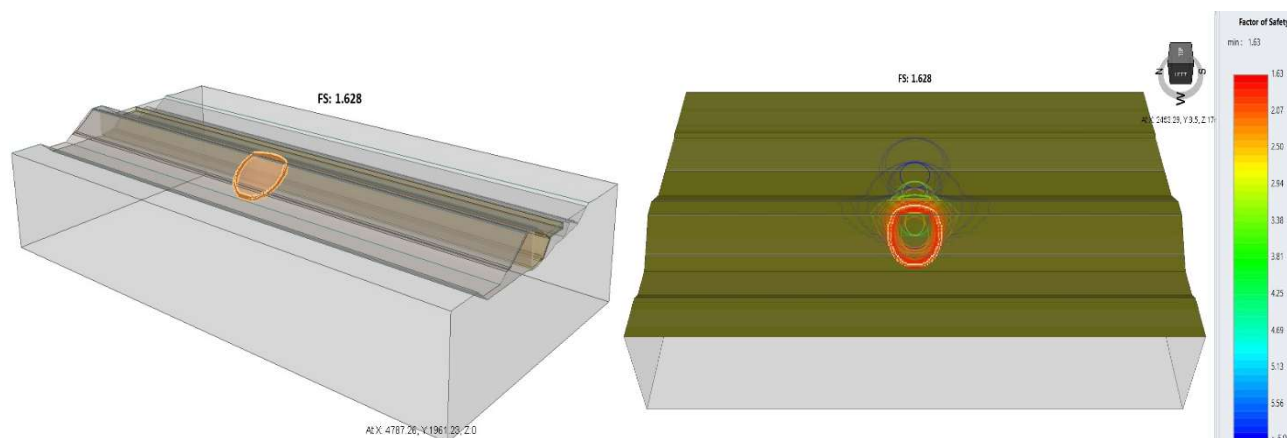


Figura 7. Visualização 3D da superfície de ruptura - Método de Spencer. Fonte: autores 2025.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu avaliar criticamente as diferenças entre modelagens bidimensionais (Slide 2) e tridimensionais (Slide 3) na análise de estabilidade de taludes em barragens com geometria realista e influência de fluxo permanente. A partir dos resultados obtidos, é possível destacar as seguintes conclusões:

- A modelagem tridimensional apresentou fatores de segurança superiores aos obtidos na modelagem 2D para todos os métodos analisados, com diferenças médias em torno de 10% a 15%, evidenciando o efeito de confinamento lateral capturado apenas em 3D.
- A trajetória da superfície de ruptura apresentou deslocamentos laterais significativos no modelo tridimensional, demonstrando que o plano de ruptura não é necessariamente ortogonal ao corte analisado em 2D. Isso reforça a limitação das análises planas em casos com geometria complexa ou extensão lateral relevante.
- O comportamento hidráulico modelado em regime permanente mostrou maior realismo no modelo 3D, especialmente na atuação dos drenos e na distribuição espacial da poropressão, sendo fundamental para compreender a resposta do maciço em fases de operação e rebaixamento.
- Os métodos de Spencer e Morgenstern-Price mostraram-se mais consistentes entre as modelagens, sendo recomendados para uso em modelos tridimensionais pela sua robustez na consideração simultânea do equilíbrio de forças e momentos.
- A utilização conjunta de análises 2D e 3D se mostrou uma estratégia eficiente para avaliação de estabilidade, sendo recomendável que a modelagem tridimensional seja adotada nos casos em que a geometria, o carregamento ou as condições de contorno apresentem variações significativas no espaço.

Dessa forma, reforça-se que a escolha da abordagem (2D ou 3D) não deve ser apenas uma questão de conveniência, mas sim uma decisão técnica fundamentada na complexidade do problema geotécnico em estudo.

A adoção da modelagem 3D se mostra cada vez mais necessária para uma avaliação mais realista, segura e economicamente eficaz em obras de infraestrutura crítica.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 (Autor 5)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carsel, R. F.; Parrish, R. S. (1988). *Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics*. Water Resources Research, v. 24, n. 5, p. 755–769.



- Carneiro, A. H. A. (2022). *Avaliação dos Níveis Piezométricos Críticos de uma Barragem de Terra : um Estudo de Caso da Barragem Jaburu I*. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará - UFC Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, UFC/CE, 76 p.
- Cheng, Y. M.; Yip, C. J. (2007). *Three Dimensional Asymmetrical Slope Stability Analysis: Extension of Bishop's, Janbu's and Morgenstern-Price's Techniques*. In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. American Society of Civil Engineers (ASCE), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:12\(1544\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:12(1544)). V. 133, n. 12. p. 1544–1555
- Ferdos, F.; Wörman, A.; Ekström, I. (2015). *Hydraulic Conductivity of Coarse Rockfill used in Hydraulic Structures*. Transport in Porous Media, [s. l.], v. 108, n. 2, p. 367–391.
- Fredlund, D. G.; Krahn, J. (1977). *Comparison of slope stability methods of analysis*. Canadian Geotechnical Journal, <https://doi.org/10.1139/t77-045>. [s. l.], v. 14, n. 3, p. 429–439.
- Griffiths, D. V.; Lane, P. A. (1999). *Slope Stability Analysis by Finite Elements*. In: Colorado School of Mines Article. Colorado: [s. n.].
- Kumar, S.; Rao, B.; Choudhary, S. S.; Burman, A.; Roy, L. B. (2022). *Comparison of 2D and 3D Slope Stability Analysis Using Limit Equilibrium Method*. Proceedings of the Indian Geotechnical Conference (IGC Kochi, Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, <https://doi.org/10.1007/s41939-023-00278-2>. [s. l.], v. 2, n.p. 1169–1184.
- Ribeiro, M. de C. A. (2018). *Aplicação de Modelos Numéricos para Estudos em Áreas de Barragens*. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Master Engenharia em Geotecnia – Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro - PUC/MG, 13 f.
- Rs2 – *Slope Stability Verification Manual*. (2023). [S. l.]: Rocscience, Toronto. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/rs2/verification-theory/verification-manuals>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- SCDOTO - South Carolina Department of Transportation. (2022). *Geotechnical Design Manual:Chapter7– Geomechanics*. Columbia, SC. Disponível em: <<https://www.scdot.org/content/dam/scdot-legacy/business/pdf/geotech/2022-by-chapter/Chapter07-Geomechanics-12132021.pdf>> Acesso em: 20 set. 2025.
- USSD, United States Society on Dams. (2011). *Materials for Embankment Dams*. Denver, CO. Disponível em: <https://mde.maryland.gov/programs/water/DamSafety/documents/2011_ussd-materials_for_embankment_dams.pdf> Acesso em: 20 set. 2025.