

Estabilidade de Taludes em Área de Disposição de Rejeito: Análise Comparativa entre Modelagem 2D e 3D

Faruk Lima Santos Abder Rahman Yasin Mohd Yasin
Engenheiro Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, farukyasin22@gmail.com

Jessica Pereira Duarte
Engenheira Civil, Pimenta de Ávila, Belo Horizonte, Brasil, jessicaduarte22@gmail.com

André Luis Brasil Cavalcante
Professor Associado, Doutor, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, albrasilc@gmail.com

RESUMO: A construção de barragens é vital para o desenvolvimento socioeconômico, mas exige análises de estabilidade de taludes devido ao alto risco associado à sua falha, exemplificado por desastres como os de Mariana e Brumadinho. O objetivo geral deste estudo é avaliar o emprego de métodos de análise de estabilidade de taludes em duas e três dimensões (2D e 3D) para investigar os fatores de segurança em uma área de disposição de rejeitos de mineração. Utilizando os softwares SLIDE2 e SLIDE3, simulações computacionais consideraram diferentes métodos de equilíbrio limite, como o de Bishop, Morgenstern-Price e Janbu para o método 2D e seus métodos de extrusão, como Hugn e Chen, para o 3D. Os cenários incluíam composições variadas de materiais de taludes e fundação. Os resultados forneceram uma compreensão da estabilidade dos taludes, destacando que os fatores de segurança calculados em 3D tendiam a ser maiores devido ao acréscimo de forças e momentos. Deste modo, diante da ausência de uma referência específica que estabeleça valores diferentes para análises 2D e 3D é necessário entender e julgar muito além de apenas o valor encontrado pelo fator de segurança, a fim de garantir o bem estar das comunidades próximas e meio ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Fator de segurança, Modelagem 2D, Modelagem 3D, Análise de Risco.

ABSTRACT: The construction of dams is crucial for socio-economic development but necessitates slope stability analyses due to the high risks associated with their failure, as exemplified by the disasters in Mariana and Brumadinho. The primary objective of this study is to assess the use of slope stability analysis methods in two and three dimensions (2D and 3D) for investigating safety factors in a mining waste disposal area. Using SLIDE2 and SLIDE3 software, the computational simulations employed various limit equilibrium methods, including Bishop, Morgenstern-Price, and Janbu for 2D, as well as their extensions, such as Hungr and Chen, for 3D. Scenarios included various compositions of slope and foundation materials. The results enhanced the understanding of slope stability, indicating that safety factors calculated in 3D tend to be higher due to the consideration of additional forces and moments. Therefore, in the absence of specific references establishing different values for 2D and 3D analyses, it is essential to thoroughly understand and evaluate beyond the calculated safety factor to ensure the well-being of nearby communities and the environment.

KEYWORDS: Slope stability, Safety factor, 2D Analysis, 3D Analysis, Risk Analysis

1 Introdução

A construção de barragens está intrinsecamente associada à necessidade e ao desenvolvimento dos setores socioeconômicos de uma região, sendo impulsionada por atividades mineradoras, energéticas, agropecuárias e outras. Nesse contexto, a análise de estabilidade de taludes desempenha um papel crucial no campo da geotecnia, devido aos significativos riscos socioeconômicos e ambientais decorrentes da falha dessas estruturas. Essa problemática ganhou ainda mais relevância no Brasil após os desastres ocorridos nas barragens

de Fundão, em Mariana, no ano de 2015, e Córrego do Feijão, em Brumadinho, no ano de 2019, despertando uma atenção especial para a segurança desses empreendimentos.

A segurança dessas estruturas está diretamente relacionada ao fator de segurança adotado, o qual é definido previamente. Portanto, para a concepção e implantação de um projeto, é essencial avaliar a estabilidade dos taludes, geralmente expressa por meio de um coeficiente mínimo de segurança estabelecido (Gerscovich, 2016). No Brasil, as normas NBR 13.029 e NBR 13.028 estabelecem valores mínimos de fatores de segurança que devem orientar os projetos de dimensionamento e avaliação das condições atuais e futuras das estruturas geotécnicas. Essas condições críticas da estrutura em campo podem ser previstas por meio do uso de modelos apropriados.

A seleção do método de análise de estabilidade pelo profissional deve permitir a identificação das condições de segurança existentes, visando propor soluções tecnicamente viáveis e economicamente sustentáveis (Oliveira, 2023). As análises de estabilidade podem ser conduzidas por métodos bidimensionais ou tridimensionais, conforme a demanda específica do projeto, o desenvolvimento tecnológico e o grau de complexidade associado (Albatineh, 2006).

Diante da problemática mencionada, o objetivo deste estudo é analisar uma área destinada à disposição de rejeitos minerais, empregando métodos de análise de estabilidade de taludes em duas e três dimensões. A simulação do comportamento dessas estruturas por meio de diferentes métodos visa avaliar como elas podem se comportar, dependendo das premissas adotadas. Essa pesquisa contribui significativamente para a mitigação dos riscos ambientais e a proteção das comunidades adjacentes, representando uma valiosa adição ao campo da gestão de segurança na indústria de mineração.

2 Metodologia

A metodologia proposta para este projeto final baseia-se na análise de um talude hipotético, em vários cenários, utilizando métodos em duas e três dimensões e a comparação entre os fatores de segurança obtidos.

Para o estudo da estabilidade de taludes em duas dimensões, será empregado o software Slide 2, da Rocscience. Ele permite a realização de análises determinísticas drenadas ou não drenadas utilizando superfícies de falha circulares ou não circulares

Para a análise de taludes em 3D, será utilizado o Slide3. A escolha do Slide3 como ferramenta de análise é baseada em sua capacidade de localizar superfícies críticas de falha e calcular fatores de segurança (FS) precisos, utilizando uma combinação de métodos globais de busca.

Os objetos de estudo deste trabalho envolvem taludes em uma área fictícia de mineração, nos quais foram conduzidas análises de estabilidade usando diferentes métodos de equilíbrio limite. Todos os cenários de estudo adotaram a mesma geometria de talude, com altura do talude de 15 metros, largura de crista de 15 metros e comprimento total de 75 metros, conforme ilustrado na Figura 1.

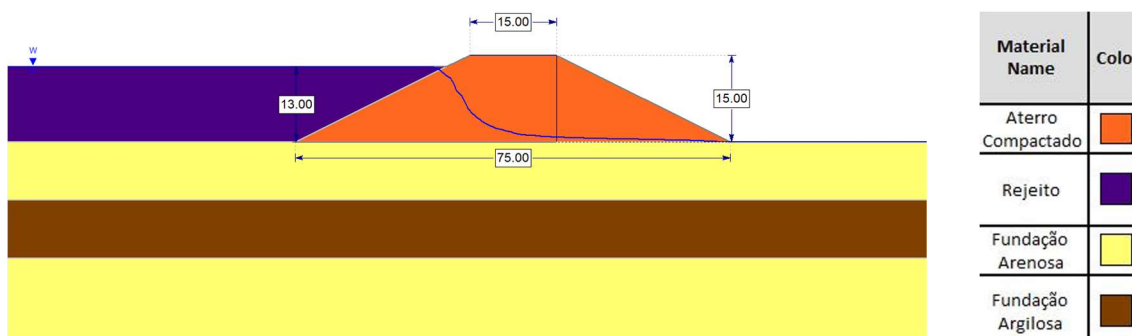


Figura 1. Seção fictícia e cores dos materiais utilizados

O primeiro objeto de estudo é exemplificado na Figura 2, onde o talude é constituído unicamente por um maciço de aterro compactado e uma fundação arenosa. Os resultados obtidos neste estudo serão utilizados como uma linha de base para comparação com as análises subsequentes.

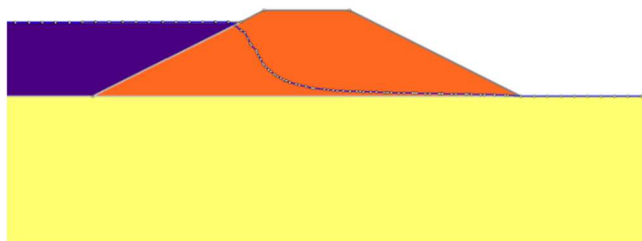


Figura 2. Seção fictícia utilizada no primeiro cenário

Por fim, o segundo objeto de estudo, ilustrado na Figura 3, é constituído pelos mesmos dois materiais na fundação. No entanto, destaca-se que uma camada argilosa com espessura de 7 metros e está localizada a uma distância de 3 metros da cota de topo.

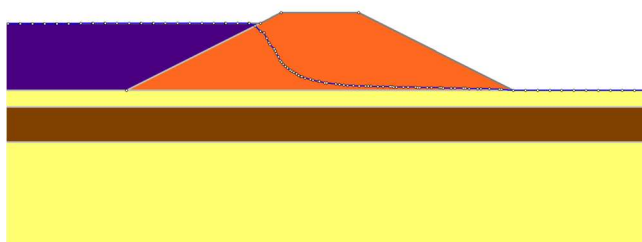


Figura 3. Seção fictícia utilizada no segundo cenário

Os parâmetros de resistência utilizados para o solo de aterro compactado, fundação arenosa e fundação argilosa foram derivados de valores médios relatados de Bowles (1997) se encontram na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros efetivos do solo utilizados.

Material	γ (kN/m ³)	ϕ	c (kPa)
Aterro Compactado	18,00	32	20
Fundação Areia	20,00	40	10
Rejeito	15,00	-	-
Fundação Argilosa	20,00	-	-

Para os materiais situados abaixo do nível freático e que não exibem comportamento drenante, optou-se pela aplicação da Razão de Resistência não drenada nas simulações. Os valores médios utilizados foram obtidos a partir do estudo conduzido por Pinto (2023) e se encontram na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de Resistência Não Drenada.

Material	Razão de Resistência Não Drenada (kPa)	Resistência Não Drenada Mínima (kPa)
Rejeito	0.10	5
Fundação Argilosa	0.28	10

Para conduzir simulações de estabilidade tridimensionais, é crucial enfatizar que a seção analisada é análoga àquela previamente estudada em duas dimensões. O modelo definido anteriormente no Slide 2 foi importado, conforme ilustrado na Figura 4, e atribuído a ele uma profundidade de 800 metros, a fim de se evitar efeitos de borda no modelo. Essencialmente, consideramos essa seção como homogênea. Portanto, ao realizarmos um corte em qualquer parte do objeto, obteremos a mesma seção.

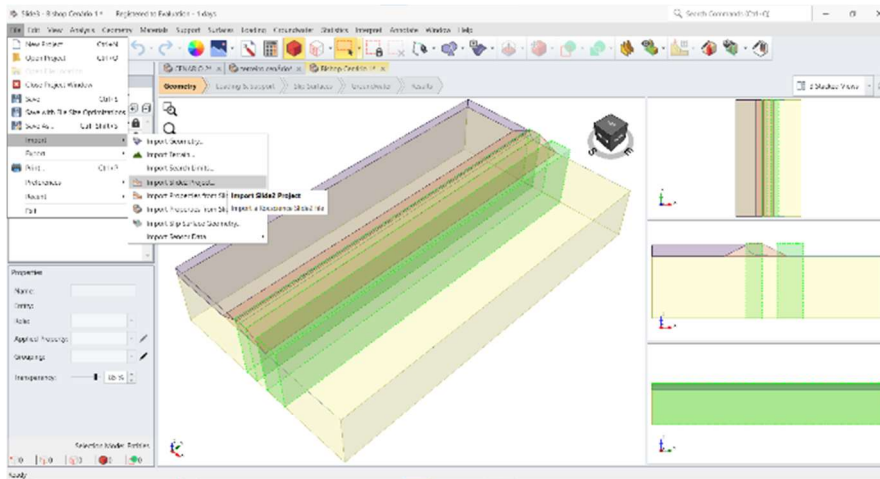


Figura 4. Importação da seção entre os Softwares

Primeiramente, foi realizada a análise dos resultados obtidos por meio dos métodos de Bishop (1955), Janbu (1973) e Morgenstern-Price (1965) no Slide2. Posteriormente, direcionaremos nossa atenção para os resultados provenientes dos métodos tridimensionais propostos por Chen e Chameau (1983) e Hungr (2014) no Slide3, que são extensões dos métodos em duas dimensões.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise De Estabilidade Pelos Métodos 2D - Primeiro Cenário

Na Figura 5, Figura 6 e Figura 7 são apresentados os resultados da análise de estabilidade global pelo método de Bishop, Janbu e Morgenstern-Price para o primeiro cenário para modelagem em duas dimensões.

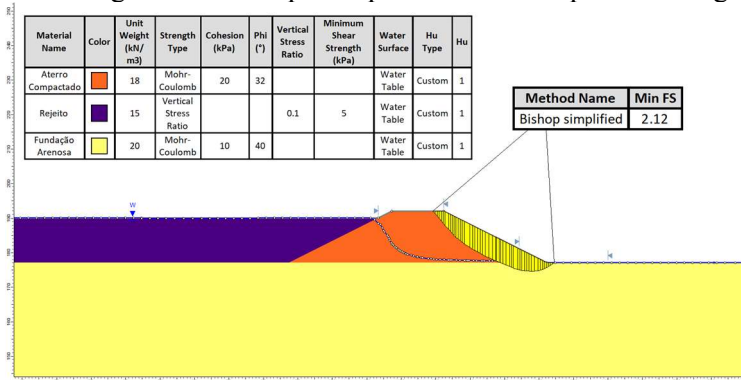


Figura 5. Fator de Segurança por Bishop – F.S. = 2,12

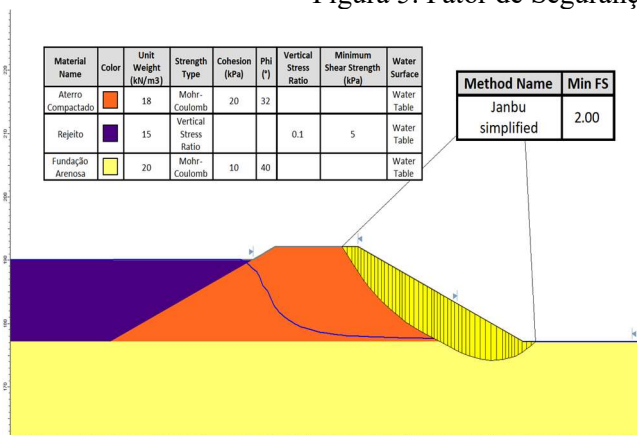


Figura 6. Fator de Segurança por Janbu – F.S. = 2,01

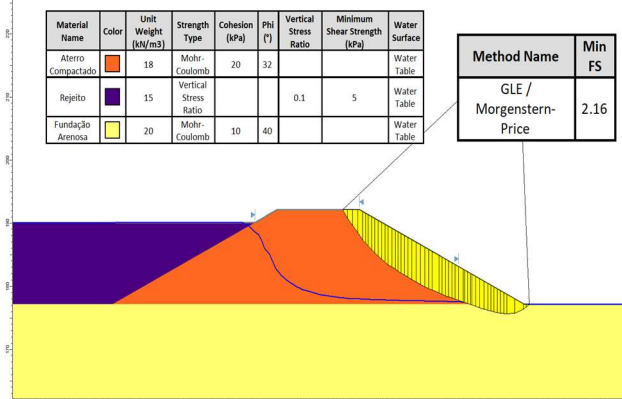


Figura 7. Fator de Segurança por M.P. – F.S. = 2,16

Para as análises no cenário 1, se observou que o maior fator de segurança foi atribuído ao método de Morgenstern-Price, com valor de 2,16, e o menor fator de segurança foi atribuído ao método de Janbu, com valor de 2,01. A Tabela 3 contempla os valores encontrados de FS para cada método de estabilidade de taludes abordado.

Tabela 3. Fatores de Segurança 2D para o cenário 01.

Método de Análise	Fator de Segurança
Bishop	2,12
Janbu	2,01
Morgenstern-Price	2,16

3.2. Análise De Estabilidade Pelos Métodos 2D - Segundo Cenário

Na Figura 8, Figura 9 e Figura 10 são apresentados os resultados da análise de estabilidade global pelo método de Bishop, Janbu e Morgenstern-Price para o segundo cenário para modelagem em duas dimensões.

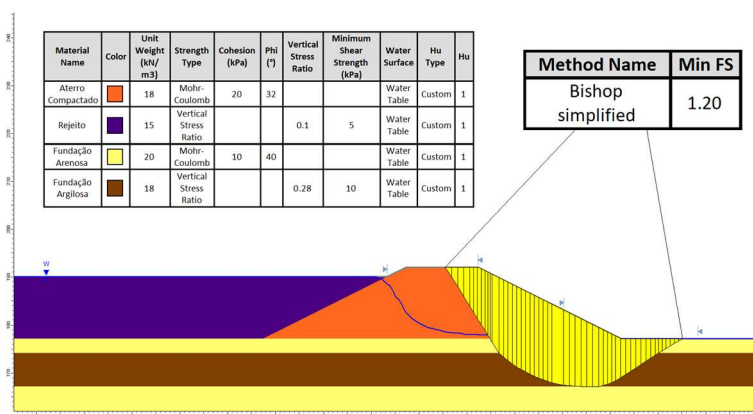


Figura 8. Fator de Segurança por Bishop – F.S. = 1,20

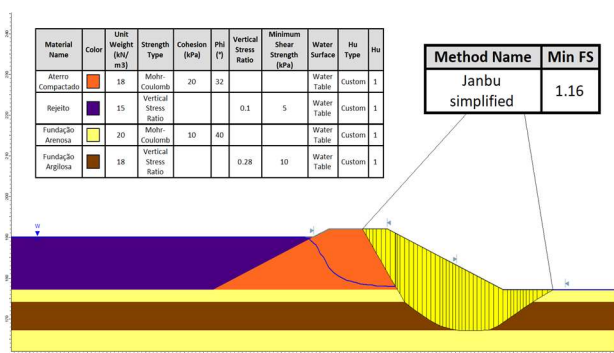


Figura 9. Fator de Segurança por Janbu – F.S. = 1,16

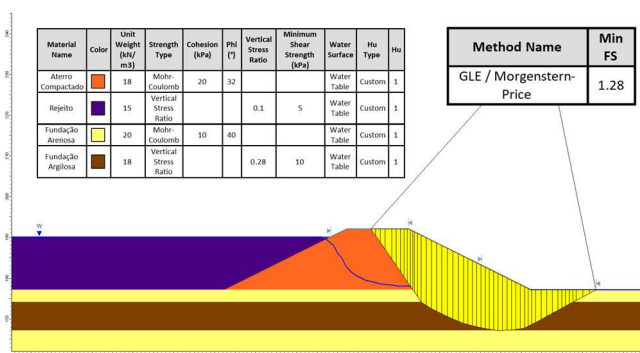


Figura 10. Fator de Segurança por M.P. – F.S. = 1,28

Para as análises no cenário 2, se observou que o maior fator de segurança foi atribuído, novamente, ao método de Morgenstern-Price, com valor de 1,28, e o menor fator de segurança foi atribuído ao método de Janbu, com valor de 1,16. A Tabela 4 contempla os valores encontrados de FS para cada método de estabilidade de taludes abordado.

Tabela 4. Fatores de Segurança 2D para o cenário 02.

Método de Análise	Fator de Segurança
Bishop	1,21
Janbu	1,16
Morgenstern-Price	1,28

3.3. Análise De Estabilidade Pelos Métodos 3D - Primeiro Cenário

Na Figura 11, Figura 12 e Figura 13, são apresentados os resultados da análise de estabilidade global pelo método de Bishop estendido, Janbu estendido e Morgenstern-Price estendido para o primeiro cenário modelado em três dimensões.

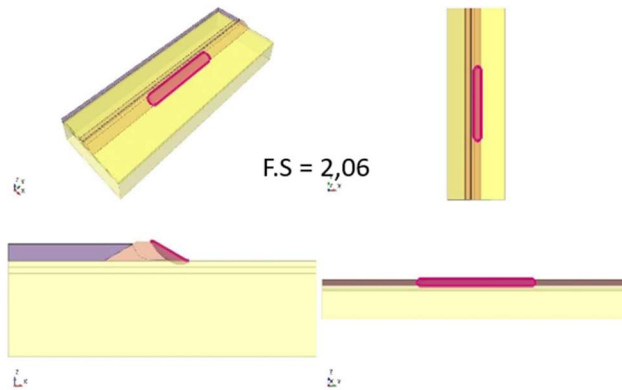


Figura 11. Fator de Segurança por Bishop – F.S. = 2,06

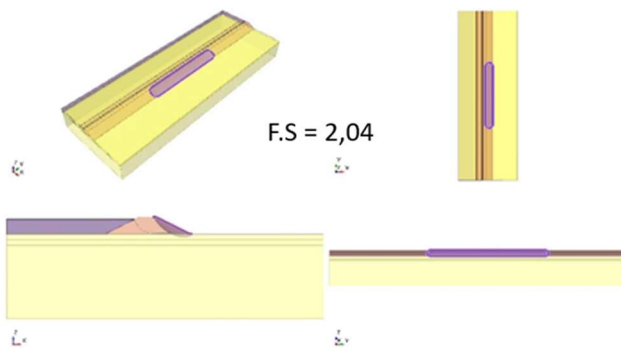


Figura 12. Fator de Segurança por Janbu – F.S. = 2,04

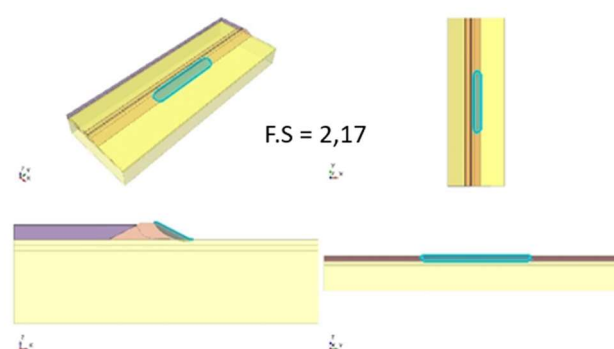


Figura 13. Fator de Segurança por M.P. – F.S. = 2,17

Para as análises no cenário 1, foi percebido que o maior fator de segurança foi atribuído ao método de Morgenstern-Price, com valor de 2.17, e o menor fator de segurança foi atribuído ao método de Janbu, com valor de 2.04. A Tabela 5 contempla os valores encontrados de FS para cada método de estabilidade de taludes abordado.

Tabela 5. Fatores de Segurança 3D para o cenário 01.

Método de Análise	Fator de Segurança
Bishop estendido	2,06
Janbu estendido	2,04
Morgenstern-Price estendido	2,17

3.4. Análise De Estabilidade Pelos Métodos 3D - Segundo Cenário

Na Figura 14, Figura 15 e Figura 16, são apresentados os resultados da análise de estabilidade global pelo método de Bishop estendido, Janbu estendido e Morgenstern-Price estendido para o segundo cenário modelado em três dimensões.

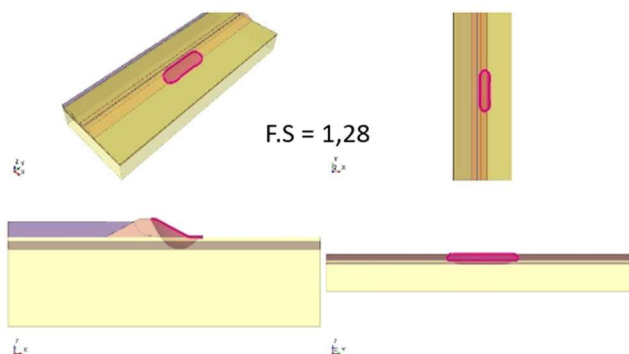


Figura 14. Fator de Segurança por Bishop – F.S. = 1,28

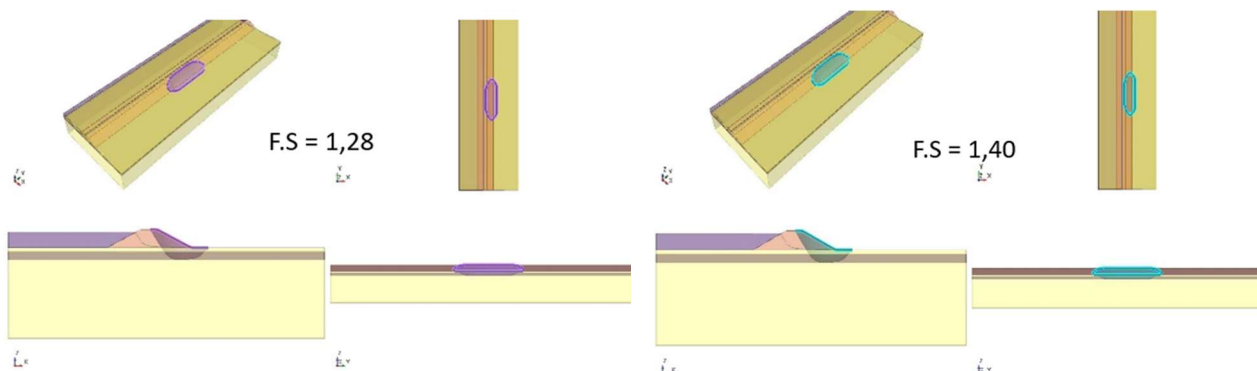


Figura 15. Fator de Segurança por Janbu – F.S. = 1,28

Figura 16. Fator de Segurança por M.P. – F.S. = 1,40

Para as análises no cenário 2, se observou que o maior fator de segurança foi atribuído ao método de Morgenstern-Price estendido, com valor de 1,40, e o menor fator de segurança foi atribuído aos métodos de Janbu e Bishop estendido, com valor de 1,28. A Tabela 6 contempla os valores encontrados de F.S. para cada método de estabilidade de taludes abordado.

Tabela 6. Fatores de Segurança 3D para o cenário 02.

Método de Análise	Fator de Segurança
Bishop estendido	1,28
Janbu estendido	1,28
Morgenstern-Price estendido	1,40

3.5. Comparação Entre As Análises 2D 3D

A análise de taludes, tanto em configurações 3D quanto 2D, tem sido objeto de discussão e estudo ao longo das últimas décadas, evidenciando a complexidade e importância do tema. As discrepâncias nos resultados obtidos podem ser atribuídas à escassez de estudos abrangentes e à variedade limitada de casos considerados em cada pesquisa (Albataineh, 2006).

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 11, observa-se que, em geral, os fatores de segurança médios nas análises 3D tendem a ser maiores do que nas análises 2D. Essa tendência corroborou com as descobertas anteriores de Albataineh (2006), que destacou a consistência na superioridade dos fatores de segurança em análises 3D em relação às 2D.

Além disso, estudos demonstraram uma relação constante entre os fatores de segurança em 3D e 2D, com uma média de razão de 4%. Esses valores estão dentro da faixa sugerida por Azzouz et al. (1981), que indicou que a razão entre os fatores de segurança deve estar entre 1,07 e 1,3. Observa-se que, à medida que a modelagem dos dados se torna mais complexa, as diferenças entre os métodos de análise aumentam. Por exemplo, a razão entre os fatores de segurança de acordo com o método de Morgenstern-Price (MP) no primeiro cenário foi de 1,00, mas aumentou à medida que o modelo se tornou mais complexo, incorporando

camadas adicionais de materiais e variando sua espessura e profundidade. Além disso, a localização e a profundidade da superfície de ruptura são afetadas pelo tipo de análise (2D ou 3D), como evidenciado pela mudança na forma da superfície de ruptura entre os métodos e dependendo da distância para um material menos resistente.

Em suma, as diferentes abordagens de análise resultam em configurações variadas de superfícies de escorregamento, o que, por sua vez, influencia os fatores de segurança mínimos na estabilidade de taludes.

4 Conclusão

Devido à falta de uma referência universalmente aceita para a escolha entre programas de análise 2D e 3D, engenheiros muitas vezes dependem de sua própria avaliação, o que pode comprometer a precisão dos resultados. Essa pesquisa constatou que os fatores de segurança obtidos por análises em 2D utilizando o Método do Equilíbrio Limite mostraram uma proximidade entre os métodos menos rigorosos, Bishop e Janbu, mas uma diferença em relação ao método mais rigoroso, o Método de Morgenstern-Price, devido à falta de abrangência desses métodos sobre todas as premissas do Método do Equilíbrio Limite.

Os resultados das análises em 3D também revelaram uma aproximação entre os métodos menos rigorosos, Bishop e Janbu, e uma diferença em relação ao Método de Morgenstern-Price. Os valores de fator de segurança obtidos pelo método mais rigoroso foram consistentemente superiores aos dos métodos menos rigorosos.

Ao comparar os métodos de análise em 2D e 3D, notamos que os fatores de segurança calculados pelos métodos 3D foram geralmente maiores do que os fatores calculados em 2D. Essas conclusões enfatizam a importância de considerar a dimensionalidade da análise ao avaliar a estabilidade de taludes, uma vez que os resultados podem variar significativamente entre os métodos.

Assim, é fundamental escolher adequadamente o método, os parâmetros e a geometria da seção analisada para garantir a segurança do talude. Essas considerações são cruciais para o desenvolvimento de estratégias eficazes de estabilização de taludes em áreas de disposição de rejeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albatineh, N. (2006). SLOPE STABILITY ANALYSIS USING 2D AND 3D METHODS [Master's thesis, University of Akron]. OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center
- Azzouz, A. S., M. M. Baligh, and C. C. Ladd. "Three-dimensional stability analyses of four embankment failures." Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Volume 3, Stockholm. 1981.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 13029: Mineração Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro, 2017.
- Bishop, A. W. The use of slip circles in stability analysis of slopes. *Geotechnique*, Vol. 5, No. 1, 1955, pp. 7-17.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*, 5^a ed., Singapore, McGraw-Hill, 1168 p.
- Chen, R. H. and Chameau, J. L. (1983): "Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes," *Geotechnique*, Vol. 32, No. 1, pp. 31-40.
- Fiori, A.P. (2016). *Estabilidade de Taludes: Exercícios Práticos*. São Paulo: Oficina De Textos. 160 p
- Gerscovich, Denise M. S.. *Estabilidade de taludes / Denise M. S.. Gerscovich. -- 2. ed. -- São Paulo : Oficina de Textos, 2016*
- Hungr, O.; Leroueil, S.; Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, v.11, n.2, p.167-194.
- Janbu, N. (1973). *Slope Stability Computation*. Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume, ed. R.C. Hirschfeld and S.J. Poulos, John Wiley and Sons, N.Y. pp.49-86.
- Oliveira, Antônio Manoel dos Santos; Brito, Sérgio Nertan Alves de. *Geologia de engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.
- Pinto, Guilherme Henrique da Silva. *Proposta de modelos de predição da resistência não drenada de rejeitos de bauxita*. 2023. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.