DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/5

Análise comparativa da flutuação do nível d'água e métodos de equilíbrio limite de talude utilizando *software* GeoStudio

Hiani Bernardini
Engenheira Civil, UNESC, Criciúma, Brasil, hiani.bernardini@unesc.net

Aziz Tebechrani Neto
Professor, UNESC, Criciúma, Brasil, aziztneto@gmail.com

RESUMO: Movimentos de massa estão associados a fenômenos geológicos decorrentes da instabilidade de maciços terrosos ou rochosos. A falta de estabilidade em taludes pode resultar em deslizamentos, com vítimas e elevados custos de reparo. Para avaliar esse problema, utilizam-se *softwares* baseados em métodos de equilíbrio limite, capazes de estimar fatores de segurança (FS) e identificar superfícies de ruptura sob diferentes condições. Assim, este trabalho comparou os resultados do fator de segurança obtidos pelos métodos de Bishop, Fellenius e Morgenstern-Price, considerando três condições de flutuação do nível d'água, não saturada, mediamente saturada e saturada, por meio do software GeoStudio. Os resultados indicaram que, em todas as condições analisadas, nenhum método apresentou fator de segurança mínimo de 1,5, conforme a NBR 11.682. Observou-se ainda que os métodos apresentaram resultados semelhantes nas condições não saturada e mediamente saturada. Contudo, na condição totalmente saturada, o método de Fellenius apresentou diferença significativa em relação aos demais. Conclui-se que o corte e a inclinação adotados não proporcionam estabilidade suficiente para que o talude seja considerado seguro.

PALAVRAS-CHAVE: Solo; Estabilidade de Taludes; Movimento de Massa; Desastres; Métodos de Equilíbrio Limite.

ABSTRACT: Mass movements are associated with geological phenomena resulting from the instability of soil or rock masses. Slope instability may lead to landslides, causing casualties and significant repair costs. To assess this issue, software based on limit equilibrium methods is widely used to estimate safety factors (SF) and identify potential failure surfaces under different conditions. Therefore, this study compared safety factor results obtained using the Bishop, Fellenius, and Morgenstern–Price methods, considering three groundwater level conditions—unsaturated, partially saturated, and fully saturated—using the GeoStudio software. The results showed that, under all analyzed conditions, none of the methods achieved the minimum safety factor of 1.5 required by NBR 11,682 (2009). Additionally, similar results were observed among the methods under unsaturated and partially saturated conditions. However, under fully saturated conditions, a significant difference was identified in the Fellenius method. It is concluded that the adopted slope cut and inclination do not provide sufficient stability for the slope to be considered safe.

KEYWORDS: Soil; Slope Stability; Mass Movement; Disasters; Limit Equilibrium Methods.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os movimentos de massa são os processos geológicos que mais causam vítimas fatais, entre eles podem ocorrer deslizamentos, desabamentos, escorregamentos tombamentos, soterramentos e outros. De 1988 a 2022, 4146 pessoas foram vitimadas em 16 estados, 269 municípios e em 959 eventos (MACEDO; SANDRE, 2022).

Contudo, existem fatores que interferem no aumento da ocorrência desses desastres, como a modificação na geologia natural do terreno, o desflorestamento, além do aumento da urbanização e as mudanças climáticas. Portanto, os estudos na área de Geotecnia como estabilização de taludes e formas de contenção de solo, tornam-se cada vez mais necessários, garantindo maior segurança e impedindo tais eventos desastrosos.

Nos estudos da Geotecnia existem inúmeros trabalhos relacionados a estabilização de taludes, como o trabalho de Kalume (2017), em que se realizou a análise da estabilidade de taludes de uma barragem

homogênea com a comparação dos fatores de segurança dos *softwares* Geostudio e GEO5, sendo o método de equilíbrio limite utilizado o Método de Morgenstern & Price. Outro exemplo seria o de Cruz (2019), em que se realizou o estudo comparativo da estabilização de taludes com resíduos mediante a utilização do *software* GEO5, utilizando três métodos de equilíbrio diferentes, o Método de Fellenius, Método de Bishop e Método de Spencer.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da flutuação do nível d'água na estabilidade de um talude apresentado por Santos (1997), considerando três variações da superfície piezométrica e três métodos de equilíbrio limite. A análise foi realizada no *software* GeoStudio, por meio do módulo Slope/W, utilizando um perfil e parâmetros geotécnicos previamente definidos na literatura para a região de Florianópolis, permitindo a avaliação das superfícies críticas de ruptura e dos fatores de segurança associados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base em pesquisas bibliográficas na área da engenharia geotécnica, foi possível identificar o trabalho de tese de doutorado de Santos (1997), "Integração de informações pedológicas, geológicas e geotécnicas aplicadas ao uso do solo urbano em obras de engenharia". Trata-se de um trabalho multidisciplinar, com aplicação ao planejamento urbano na cidade de Florianópolis, SC.

Assim, para o desenvolvimento com êxito das verificações propostas nessa pesquisa, a tese de doutorado de Santos (1997), serviu como base de dados e de informações importantes relacionadas a estabilidade de taludes. Em resumo, este trabalho pode ser dividido nas seguintes etapas para sua elaboração, de acordo com o Fluxograma 1.



Figura 1. Etapas do trabalho

Bem como, foi necessário adquirir os parâmetros e índices físicos do solo, além do perfil do solo escolhido, que estão presentes na tese de doutorado de Santos (1997). Os parâmetros de resistência do solo e os índices físicos são informações importantes para a funcionalidade do software Geostudio, dentre eles podem ser destacados a coesão (c), ângulo de atrito (ϕ), e o peso específico (γ). Nas tabelas 1 e 2 são apresentados os parâmetros e índices físicos do solo a ser estudado.

Tabela 1. Parâmetros de resistência: coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) (Fonte: Santos, 1997)

Amostras Horizontes	Profundidade (m)	Coesão Natural (c) (kN/m^2)	Ângulo de Atrito Natural (φ) (graus)	Coesão Inundado (c) (kN/m^2)	Ângulo de Atrito Inundado (φ) (graus)
G1 B	0,65	92,30	27	16,00	32
G1 C	2,00	17,90	36	0,00	35

Tabela 2. Índices físicos das amostras (Fonte: Santos, 1997)

Amostras Horizontes	Peso Específico Natural (γ_n) (kN/m³)	Teor de Umidade (%)	Peso Específico Seco (γ_d) (kN/m³)	Índice de Vazios	Porosidade	Grau de Saturação (%)
G1 B	18,00	23,00	14,63	0,818	0,450	74,80
G1 C	16,40	17,90	13,91	0,804	0,446	55,90

Conforme a localização e os pontos de amostras, foi determinada a região onde ocorreu uma ruptura de uma cortina ancorada de concreto armado, além disso foi a unidade mais investigada devido a ocupação urbana causar os maiores problemas de estabilidade de encostas com maior ocorrência na ilha de Florianópolis (SANTOS, 1997). Obteve-se como referência a amostragem G1, com material de origem o Granito Ilha, localizada entre a Avenida Governador Ivo Silveira e a Rua Paul Percival Harris, como mostra as Figuras 2.

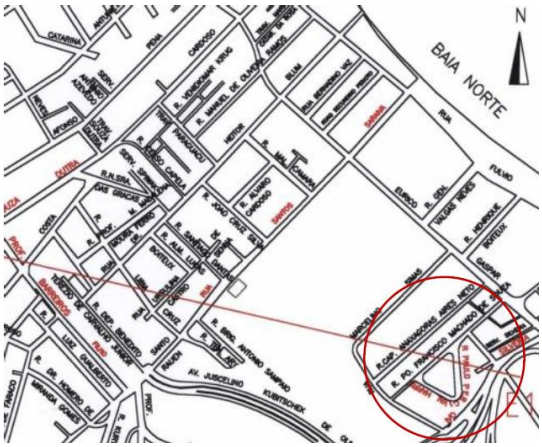


Figura 2: Localização da amostragem G1 (Fonte: Santos, 1997)

O material de origem analisado corresponde ao Granito Ilha, também denominado Granito Florianópolis, caracterizado por textura granular grosseira, coloração cinza claro a rosada e composição mineralógica predominantemente formada por microclínio, ortoclásio, quartzo, oligoclásio e biotita, com ocorrência rara de hornblenda (SHEIBE; TEIXEIRA, 1970 apud CRISTO, p. 109; SANTOS, 1997). Esses granitos variam de monzogranitos biotíticos a leucosienogranitos, originando solos de textura grosseira e comportamento granular (SANTOS, 1997, p. 61).

As análises de estabilidade de taludes foram realizadas por meio do *software* GeoStudio, utilizando o módulo Slope/W, desenvolvido para problemas geotécnicos envolvendo taludes de solo e rocha, escavações, barragens, diques e estruturas similares (SEEQUENT, 2023). Foram empregados três métodos de equilíbrio limite: Bishop e Fellenius, classificados como métodos simplificados, e Morgenstern-Price, considerado um método rigoroso, permitindo a comparação entre abordagens distintas.

Os métodos de equilíbrio limite baseiam-se na hipótese de que a massa de solo se encontra em condição de iminente ruptura, sendo tratada como um corpo rígido-plástico (MASSAD, 2010 apud KALUME, 2017). O método de Morgenstern-Price pertence ao grupo dos métodos rigorosos, cumprindo todas as condições de equilíbrio, podendo ser aplicado a qualquer superfície de ruptura, em que a massa de solo instável é dividida em lamelas infinitesimais. Permitindo que as condições de estabilidade sejam ao mesmo tempo equilíbrio de forças e momentos (SILVA, 2011; FABRÍCIO, 2006 apud KALUME, 2017). O método de Bishop satisfaz apenas o equilíbrio de momentos e desconsidera as forças de cisalhamento entre lamelas, enquanto o método de Fellenius estabelece uma formulação linear simplificada, dispensando processos iterativos (SILVA, 2011; CRUZ, 2019). Pode-se determinar que a maior diferença entre o método de Fellenius e o método de Bishop, seria que o método de Bishop analisa não somente o equilíbrio de momentos resistentes e atuantes, mas também, o equilíbrio dos esforços que agem em cada lamela (CRUZ, 2019).

O comportamento dos solos foi modelado segundo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, no qual a resistência ao cisalhamento (τ) depende da tensão normal efetiva (σ'), sendo definida pelos parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ), conforme mostrado na Eq. 1.

$$\tau = c + \sigma' \tan(\phi) \quad (1)$$

O perfil geológico geotécnico do solo é mostrado na tese de doutorado de Santos (1997), conforme a Figura 3. Devido às diferenças entre as escalas horizontal e vertical desta figura, foram feitos ajustes destas para se adequar à escala real no software AutoCAD e somente assim, migrar o perfil do solo para o software GeoStudio, e realizar as possíveis verificações. As alterações foram realizadas com a escala presente no próprio desenho do perfil, sendo assim a cota vertical foi ajustada com a cota do AutoCAD para ter os exatos 50,00 m, e seguindo o mesmo princípio para a cota horizontal, que foi elevada para ter os 200,00 m.

Ker et al. (2012), afirmam que a Pedologia, como ramo da Ciência do Solo, trata de estudos relacionados com a identificação, a formação, a classificação e o mapeamento dos solos. De acordo com a Figura 3, o perfil do solo se divide em diferentes composições granulométricas, sendo que a unidade geotécnica a ser analisada é a PVg, e a mesma, abrange a amostragem G1 B, classificada como uma Argila Arenosa Avermelhada, enquanto no caso da amostragem G1 C é classificada como um Silte Arenoso Amarelado.

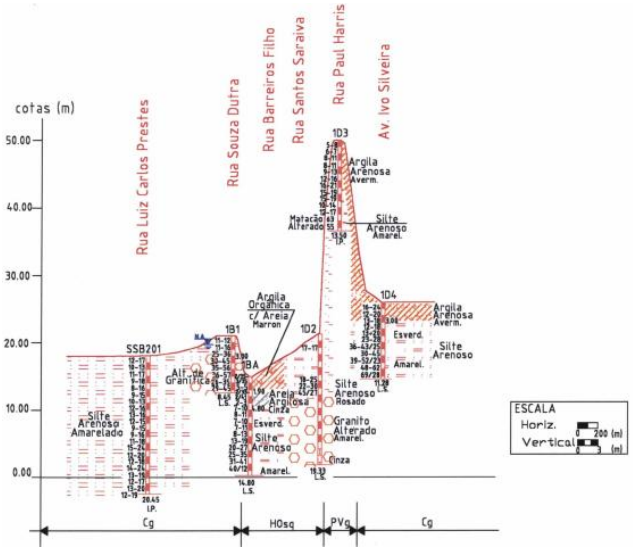


Figura 3. Perfil de solo (Fonte: Santos, 1997)

A flutuação do nível d'água está relacionada principalmente com a incidência das chuvas, em que parte dessa água infiltra no solo e aumenta o nível do lençol freático ou propriamente denominado no software GeoStudio, a superfície piezométrica. Isso implica totalmente no resultado do fator de segurança e conjuntamente na superfície de deslizamento de um talude.

Para avaliar a flutuação do nível d'água, em outro termo, seria a variação do nível d'água, estipulou-se os modelos de análise em três profundidades distintas, podendo ser definida a superfície piezométrica de cada uma delas. As análises foram denominadas como Análise 1, para o não saturado, Análise 2 para mediamente saturado e Análise 3 para saturado, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Profundidades

Modelo de Análise	Profundidade (m)
Análise 1	$z \approx 33{,}0$
Análise 2	$z \approx 3{,}0$
Análise 3	$z \approx 0$

De acordo com a NBR 11.682 (2009), o fator de segurança (FS) expressa a relação entre a resistência ao cisalhamento do material do talude e a tensão de cisalhamento mobilizada ao longo da superfície potencial de ruptura, sendo que valores mais elevados indicam maior segurança contra a ruptura. Em análises determinísticas de estabilidade, os parâmetros do solo são considerados constantes, e a segurança é avaliada pela razão entre as tensões resistentes (τ_r) e solicitantes (τ_s). De modo geral, o FS pode ser interpretado segundo três condições: FS = 1,0 indica equilíbrio-limite; FS > 1,0 caracteriza talude estável; e FS < 1,0 indica condição de instabilidade (CRUZ, 2019).

3 RESULTADOS

Após a importação do perfil geológico-geotécnico para o software GeoStudio (Figura 4), foi definido um corte com aproximadamente 68,47 m na horizontal e 14,18 m na vertical, resultando em um talude com inclinação de 45°, correspondente a uma projeção 1:1. Essa geometria foi mantida em todas as análises, variando-se apenas as condições de flutuação do nível d'água, consideradas como: Análise 1 (não saturado), Análise 2 (mediamente saturado) e Análise 3 (saturado).

A definição da superfície de ruptura foi fundamental para a determinação do fator de segurança, permitindo a identificação da região crítica por meio da subdivisão em lamelas poligonais, com suas respectivas tensões atuantes. As análises consideraram intervalos de entrada e saída iguais, com verificação da superfície potencial de ruptura do pé à crista do talude.

Para a avaliação do cenário mais crítico, foram adotados os parâmetros de resistência dos solos Argila Arenosa Avermelhada (G1 B) e Silte Arenoso Amarelado (G1 C), incluindo coesão inundada (c) e ângulo de atrito inundado (ϕ), conforme a Tabela 1, além dos índices físicos, como o peso específico natural, apresentados na Tabela 2.

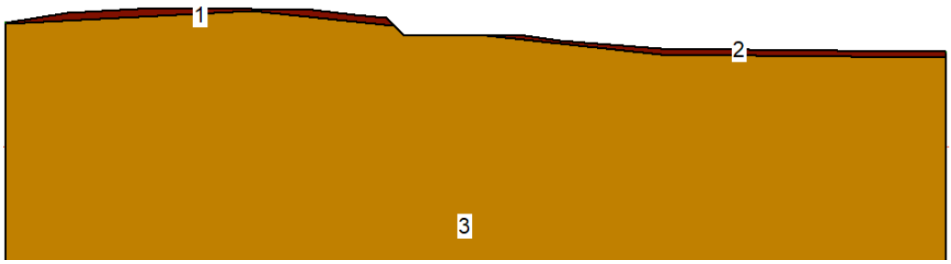


Figura 4. Perfil geológico geotécnico no GeoStudio

Primeiramente fez-se a Análise 1, com nível d'água não saturado no talude, com profundidade constante de z≅ 33,0 m, ou seja, afirmando que o nível d'água não influenciou significativamente no resultado do fator de segurança, ilustrado na Figura 5.

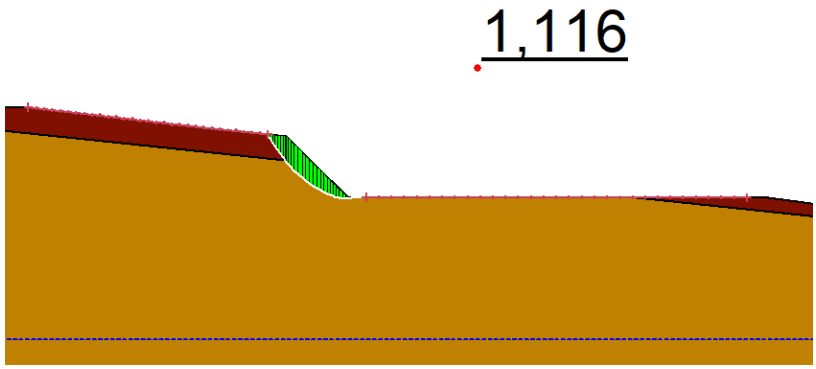


Figura 5. Análise 1 pelo método de Morgenstern-Price

Entretanto, foi notório observar um resultado abaixo do que o esperado tratando-se do fator de segurança, de pelo menos 1,5. Como já citado anteriormente, para que um talude seja classificado como estável precisa apresentar resultado superior a 1,0, portanto, para a Análise 1 pôde-se denominar estável para todos os métodos de equilíbrio limite analisados. A linha branca representa a possível superfície de deslizamento, sendo assim, naquele ponto ocorreria a ruptura do talude, de acordo com a Figura 5.

Na Tabela 4, estão representados os resultados do fator de segurança não saturado para cada método proposto.

Dentre os resultados dos métodos de equilíbrio limite o fator de segurança do método Morgenstern-Price apresentou um valor levemente superior, enquanto o método de Fellenius apresentou um valor levemente inferior, já o resultado de Bishop mostrou um valor intermediário. Apesar disso, percebeu-se grande semelhança nestes resultados quando não há influência do nível d'água.

Tabela 4. Resultados de fator de segurança não saturado

Método de Equilíbrio Limite	Fator de Segurança (FS)
Bishop	1,102
Fellenius	1,091
Morgenstern-Price	1,116

Em sequência, executou-se o modelo de Análise 2 com o nível d'água mediamente saturado, com profundidade de z≅ 3,0 m, em que se observou a influência da elevação do nível d'água, em relação ao resultado do fator de segurança, ilustrado na Figura 6.

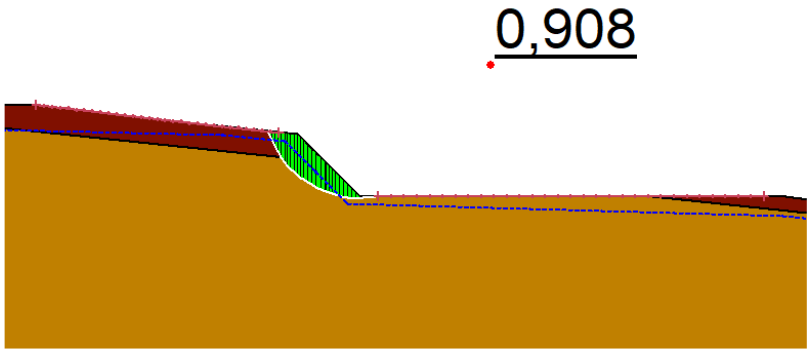


Figura 6. Análise 2 pelo método de Morgenstern-Price

Na Análise 2, os resultados dos fatores de segurança apresentaram valores inferiores a 1,0, concluindo-se então, que todos se enquadraram na condição de um talude instável. Em outras palavras, ao se elevar o nível d'água, nesta situação, pode ocorrer a ruptura da massa de solo, na superfície de deslizamento demonstrada acima da linha em branco, como mostra a Figura 6.

Na Tabela 5, estão representados os resultados do fator de segurança mediamente saturado para cada método proposto.

Examinando os resultados dos métodos de equilíbrio limite, observou-se valores semelhantes, novamente, onde o fator de segurança do método Morgenstern-Price apresentou um valor superior e, desta vez, o método de Bishop passou a ter um valor inferior dentre os três métodos, enquanto o método de Fellenius resultou em um valor intermediário.

Tabela 5. Resultados de fator de segurança mediamente saturado

Método de Equilíbrio Limite	Fator de Segurança (FS)
Bishop	0,885
Fellenius	0,895
Morgenstern-Price	0,908

Por fim, realizou-se o modelo de Análise 3, com o nível d'água saturado, com profundidade de z≅ 0 m, em que se observou uma influência bem expressiva da elevação do nível d'água, em relação ao resultado do fator de segurança, ilustrado na Figura 7. Podendo considerar o talude totalmente saturado, ou melhor, a superfície piezométrica contorna a superfície limite do talude.

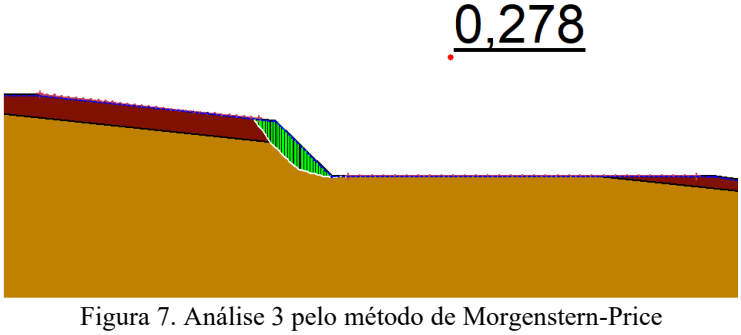


Figura 7. Análise 3 pelo método de Morgenstern-Price

Na Análise 3, estão contidos todos os resultados dos métodos de equilíbrio limite inferiores a 1,0, inclusive aproximando-se ao zero. Desta forma isso evidenciou que o talude em questão não apresentou a condição de segurança necessária para que fique estabilizado, com o solo totalmente saturado, sendo necessário medidas de contenção e drenagem para impedir o aumento do nível d'água. Assim, sua superfície de deslizamento encontrou-se na demarcação da linha branca, conforme Figura 7.

Na Tabela 6, estão representados os resultados do fator de segurança saturado para cada método proposto. Analisando os últimos resultados dos métodos de equilíbrio limite, notou-se que os métodos de Bishop e Morgenstern-Price apresentaram resultados semelhantes, porém, o fator de segurança do método de Fellenius mostrou um valor consideravelmente superior.

Tabela 6. Resultados de fator de segurança saturado

Método de Equilíbrio Limite	Fator de Segurança (FS)
Bishop	0,274
Fellenius	0,536
Morgenstern-Price	0,278

Para justificar essa alteração drástica dos valores do fator de segurança entre os métodos de equilíbrio limite, pode-se dizer que isso ocorra, provavelmente, por conta da simplicidade do método de Fellenius, que não considerou o efeito das reações laterais com as demais lamelas.

Ao desconsiderar os efeitos das forças de interação entre as lamelas, o método de Fellenius simplifica a distribuição dos esforços atuantes no maciço. Nesse método, o peso de cada lamela é decomposto em uma componente normal e uma componente tangencial à superfície de ruptura, sem considerar as forças de reação com as lamelas adjacentes. Já nos demais métodos, essas interações são incorporadas ao equilíbrio, proporcionando uma melhor representação da distribuição dos esforços no talude.

Por conta disso, houve mudanças nas superfícies críticas geradas nesta análise, como mostrado na Figura 8. Notou-se nesta imagem que a superfície de ruptura pelo método de Fellenius (Figura 8b) foi consideravelmente maior, se comparado aos outros dois, principalmente próximo à base. Tendo uma superfície maior, houve consequentemente um maior volume de solo a se cisalhar, necessitando de um maior momento resistente, como mostrado na Tabela 7, com dados entregues pelo software. Dessa forma, é natural que nestas condições o fator de segurança seja maior.

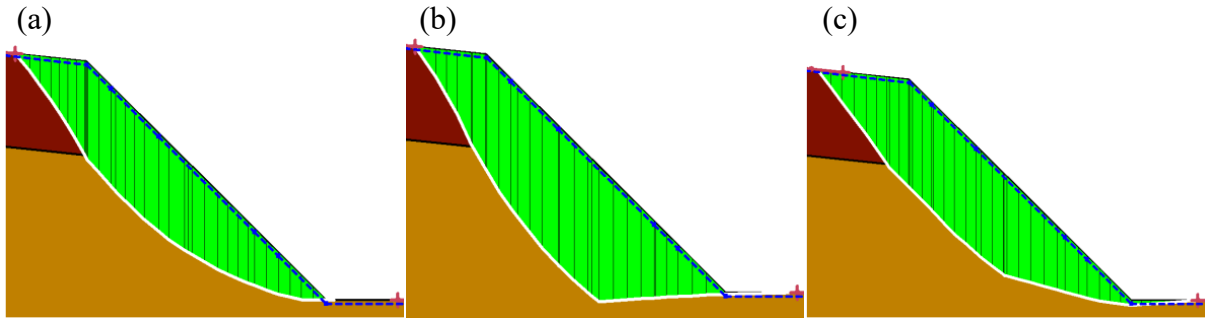


Figura 8. Análise 3 pelo método de (a) Bishop, (b) Fellenius e (c) Morgenstern-Price

Tabela 7. Resultados da Análise 3 para os três métodos utilizados

Método	Bishop	Fellenius	Morgenstern-Price
Fator de Segurança:	0,274	0,536	0,278
Volume (m^3):	35,63	48,49	45,76
Peso (kN):	607,07	819,66	780,25
Momento Resistente (kN/m):	1375,29	3556,46	1763,17
Momento Atuante (kN/m):	5022,50	6635,60	6328,68

4 CONCLUSÕES

Este estudo investigou a influência da flutuação do nível d'água na estabilidade de um talude, bem como a variação dos resultados obtidos por diferentes métodos de equilíbrio limite, evidenciando a importância da adequada previsão do comportamento do talude sob distintas condições hidráulicas para o desenvolvimento de projetos geotécnicos coerentes. Os resultados demonstraram que o corte realizado, associado à inclinação de 45°, não proporcionou estabilidade suficiente para atingir um fator de segurança igual ou superior a 1,5, conforme recomendado pela NBR 11.682 (2009).

A análise dos métodos de Bishop, Fellenius e Morgenstern-Price indicou comportamentos consistentes entre si em relação às condições de flutuação do nível d'água. Na Análise 1, os fatores de segurança foram superiores a 1,0, caracterizando um talude estável, porém não seguro. Na Análise 2, todos os métodos apresentaram fatores de segurança inferiores a 1,0, indicando instabilidade e risco iminente de ruptura. Já na Análise 3, os fatores de segurança também foram inferiores a 1,0, caracterizando talude instável, com ocorrência de ruptura.

Observou-se ainda que, em condições saturadas, o método de Fellenius apresentou fatores de segurança superiores aos demais, possivelmente em função de sua formulação simplificada, o que reforça a necessidade de cautela na escolha do método de análise. Por fim, destaca-se que a estabilidade do talude pode ser aumentada por soluções como cortina atirantada, solo grampeado e sistemas de drenagem, sendo recomendadas para estudos futuros a avaliação dessas técnicas, bem como a definição da inclinação ideal do talude para atendimento aos critérios da NBR 11.682 (2009).

4 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11.682: Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro-RJ: ABNT, 2009.

CRISTO, Sandro Sidnei Vargas de et al. *Análise de susceptibilidade a riscos naturais relacionados às enchentes e deslizamentos do setor leste da bacia hidrográfica do rio Itacorubi*. Florianópolis, SC, 2002.

CRUZ, Luan Raffael Rodrigues da. *Estudo comparativo da estabilização de taludes com resíduos mediante a utilização DO Software GEO5*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2019.

KALUME, *Cecília Lira de Carvalho. Análise de estabilidade dos taludes de uma barragem homogênea utilizando os softwares Geostudio e Geo5*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2017.

KER, João Carlos et al. *Pedologia: Fundamentos, Sociedade Brasileira da Ciência do solo*. SBCS, 2012. 343 p.

MACEDO, Eduardo Soares de; SANDRE, Lucas Henrique. *Mortes por deslizamentos no Brasil*: 1988 a 2022. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v.12, n.1, p.110-117, 2022.

SANTOS, Glaci Inez Trevisan. *Integração de informações pedológicas, geológicas e geotécnicas aplicadas ao uso do solo urbano em obras de engenharia*. Porto Alegre, RS. Tese (doutorado) em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.

SEEQUENT, *The Bentley Subsurface Company. Software GeoStudio/Módulo Slope W*. Versão 23.1.2.11 [S. l.], 31 mar. 2023. Disponível em: https://www.seequent.com/products-solutions/geostudio/slope/. Acesso em: 7 out. 2023.

SILVA, João Paulo Moreira da. *Os métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Talude*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade do Porto, Portugal, 2011.