

Análise de estabilidade de taludes considerando o impacto da heterogeneidade das camadas de solo na probabilidade de ruptura.

Carina Silvani

Professora, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil, carinasilvani@gmail.com

Milena Cristina Rocha de Souza

Estudante, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil, engmilencrsouza@gmail.com

Olavo Francisco dos Santos Júnior

Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Brasil, olavo.santos@ufrn.br

Ana Letícia Ramos Bezerra

Estudante, Universidade Federal do Pernambuco (UFPE), Recife, Brasil, annaleticiaramos0@gmail.com

Osires de Medeiros Melo Neto

Estudante, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil, osiresdemedeiros@gmail.com

RESUMO: A verificação quanto ao nível de segurança de um talude é uma preocupação recorrente na engenharia geotécnica, uma vez que tais estruturas podem causar danos significativos à infraestrutura e ameaçar vidas. Essa segurança é influenciada pela heterogeneidade geotécnica, que corresponde ao nível de variação das propriedades do solo. Compreender como essa variabilidade atua na Probabilidade de Ruptura (Pr) de um talude é fundamental para o desenvolvimento de estruturas geotécnicas seguras. Neste sentido, o propósito deste trabalho foi avaliar a relação que o nível de heterogeneidade das camadas de um talude possui sobre a Pr. Para alcance deste objetivo foi trabalhada uma situação hipotética que compreende um talude artificial contendo 6 camadas de materiais diferentes. Além das análises determinísticas realizadas com os métodos de Spencer e Morgenstern-Price, foram conduzidas análises probabilísticas adotando a simulação de Monte Carlo. Os resultados deste estudo indicaram que a Pr não varia devido a quantidade de materiais diferentes presentes na seção, mas sim pelos parâmetros de resistência que cada uma apresenta.

PALAVRAS-CHAVE: Variabilidade Geotécnica, Análise Probabilística, Probabilidade de Falha.

ABSTRACT: Checking the level of safety of a slope is a recurring concern in geotechnical engineering, since such structures can cause significant damage to infrastructure and threaten lives. This safety is influenced by geotechnical heterogeneity, which corresponds to the level of variation in soil properties. Understanding how this variability affects the Probability of Rupture (Pr) of a slope is fundamental to the development of safe geotechnical structures. With this in mind, the purpose of this study was to assess the relationship between the level of heterogeneity of the layers of a slope and Pr. In order to achieve this objective, a hypothetical situation was worked out, comprising an artificial slope containing 6 layers of different materials. In addition to the deterministic analyses carried out using the Spencer and Morgenstern-Price methods, probabilistic analyses were conducted using Monte Carlo simulation. The results of this study indicated that Pr does not vary due to the number of different materials present in the section, but rather due to the resistance parameters of each one.

KEYWORDS: Geotechnical Variability, Probabilistic Analysis, Probability of Failure.

1 INTRODUÇÃO

Os desastres relacionados a deslizamentos de taludes representam uma ameaça significativa à vida humana e à segurança, sendo destacada a importância de uma análise precisa dessas estruturas como requisito

essencial para prevenir eventuais rupturas (Yuan; Zhang, 2021). A heterogeneidade das propriedades dos solos tem um impacto substancial no comportamento geotécnico de grandes geoestruturas, como encostas e aterros. A presença dessas incertezas geotécnicas, emergem como fator significativo na análise da estabilidade de taludes (Dyson; Tolooiyan, 2019).

Ao abordar o estudo do deslizamento de taludes, uma série de métodos determinísticos são empregados. Embora amplamente difundidos e utilizados, esses métodos enfrentam limitações ao lidar com as incertezas associadas às variabilidades dos parâmetros de resistência dos materiais. Conforme Kalantari *et al.* (2023), esse tipo de análise não fornece explicações a respeito da variabilidade geotécnica, bem como sobre a variabilidade da margem de segurança. Para responder a essas limitações, diversos esforços vêm sendo dedicados à métodos que possam incorporar essas incertezas de forma sistemática, e que complemente os resultados determinísticos por meio de outros parâmetros (Jiang *et al.*, 2022).

Como alternativa, as análises probabilísticas emergem como uma solução para essa problemática, permitindo a quantificação das incertezas inerentes às propriedades do solo por meio da inclusão de conceitos estatísticos. Conforme menciona Bardhan e Samui (2022) nas análises probabilísticas, a confiabilidade de um talude é quantificada em termos do Índice de Confiabilidade (β), que indica quão confiável foi o FS gerado, e da Probabilidade de Ruptura (Pr), que irá quantificar as chances de um incidente acontecer ($FS < 1$). A determinação de tais parâmetros podem ser realizados por meio de métodos probabilísticos como Método de Monte Carlo, Método FOSM e Método *Rosenblueth* ou Estimativas Pontuais (Sousa, 2021).

Apesar dos diversos esforços direcionados a inclusão de abordagens probabilísticas na resolução de projetos geotécnicos, ainda se encontram na literatura divergências quanto aos valores de Pr aceitáveis. Para a adequação dos resultados deste estudo será tomado como valores de referências os definidos pela *U.S Army Corps Engineers* (1997), apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Índice de confiabilidade alvo para análises de estabilidade.

Nível de desempenho Esperado	Índice de confiabilidade (β)	Pr
Alto	5,0	$3,0 \times 10^{-7}$
Bom	4,0	$3,0 \times 10^{-5}$
Acima da média	3,0	$1,0 \times 10^{-3}$
Abaixo da média	2,5	$6,0 \times 10^{-3}$
Pobre	2,0	$2,3 \times 10^{-2}$
Insatisfatório	1,5	0,07
Perigoso	1,0	0,16

Fonte: Adaptado de USACE (1997).

Partindo deste cenários, definiu-se como o objetivo deste estudo avaliar, usando uma abordagem integrativa entre os métodos determinísticos e probabilísticos, como o número de camadas heterogêneas influenciam na probabilidade de ruptura em um talude hipotético.

3 METODOLOGIA

3.1 Estudo de caso

A seção escolhida para a realização desta pesquisa é proveniente de um exemplo trabalhado em Duncan, Wright e Brandon (2014), onde eles observaram a variação do fator de segurança com a profundidade para um aterro sobre uma fundação de solo estratificado. O aterro em questão possui declive de 2,5(H):1(V) e altura de 15 metros, conforme ilustrado na Figura 1. Na Tabela 2, são apresentados os parâmetros de resistência de cada material, adotados em ambas as análises realizadas.

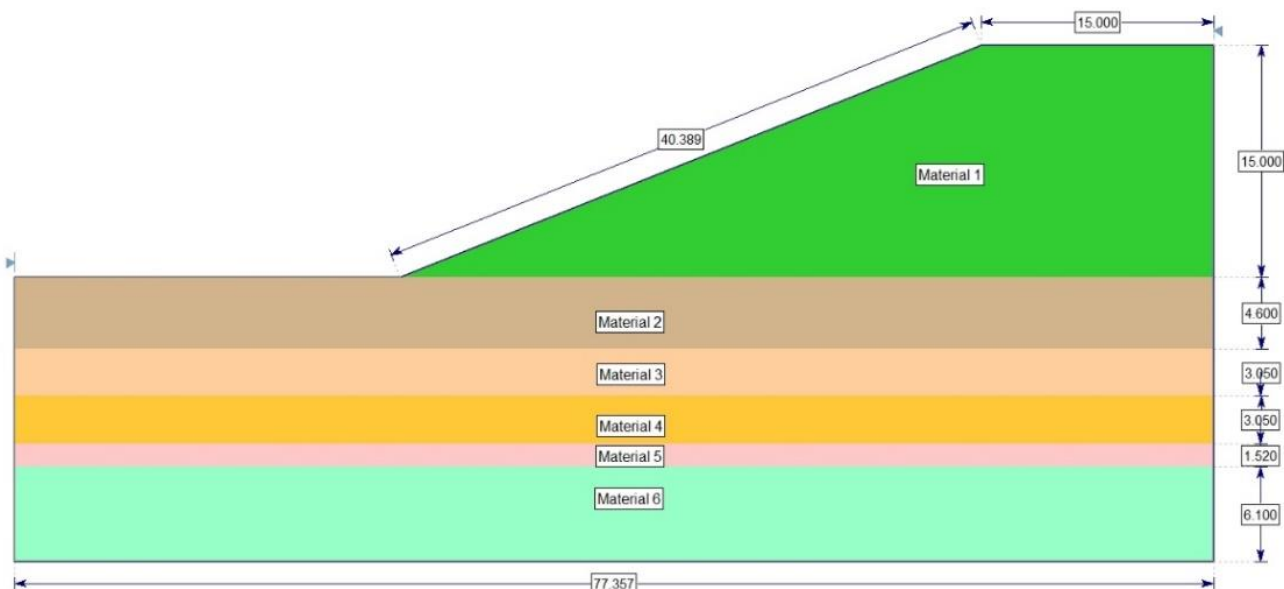


Figura 1 - Seção típica do talude.

Fonte: Adaptado de Duncan, Wright, Brandon (2014).

3.2 Critério das análises

Com a geometria e os parâmetros de resistência de cada material existentes na seção, foram estabelecidos alguns critérios para a realização das análises de estabilidade. No que se refere às análises determinísticas, estas foram realizadas empregando o Método de Equilíbrio Limite (MEL), mais precisamente o método das fatias. Como procedimento de cálculo foram adotados o método de Spencer e o de Morgenstern-Price, ambos rigorosos e considerando superfícies de rupturas não-circulares por se tratar de uma análise com seção heterogênea. No que tange ao *software*, foi utilizado para ambas as análises a versão 5.0 do *SLIDE2* pertencente a *Rocscience*.

As análises probabilísticas, por sua vez, foram conduzidas empregando o Método de Monte Carlo (MMC) com um número de 2000 iterações, conforme os resultados de convergência observados por Apaza e Barros (2014) e Yokozawa (2019). Para cada parâmetro elegeu-se a distribuição log-normal, visto que estes parâmetros têm a propensão de apresentar uma distribuição normal ou log-normal na natureza (Silva, 2015). Os dados de entrada estatísticos fundamentais para a realização da análise probabilística são a média, o desvio padrão e os valores máximos e mínimos relativos, associado a quantos desvios padrão são considerados em relação à média. Na Tabela 2, estão organizados os dados estatísticos empregados nas análises considerando o valor de COV de 40% para a coesão, 10% para o ângulo de atrito e 3% para o peso específico conforme se encontra em Assis *et. al* (2018). A variação adotada foi de dois desvios padrões para mais (máx. relativo) e pra menos (mín. relativo) para cada parâmetro.

Tabela 2 - Parâmetros usados nas análises probabilísticas.

Materiais	γ (kN/m ³)	Mín.	Máx.	c (kPa)	Mín.	Máx.	ϕ (°)	Mín.	Máx.	Su (kPa)	Mín.	Máx.
		Rel.	Rel.		Rel.	Rel.		Rel.	Rel.		Rel.	
M1	19,00	1,14	1,14	0,00	0,00	0,00	35,00	7,00	7,00	0,00	0,00	0,00
M2	17,00	1,02	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,65	26,79	26,79
M3	19,00	1,14	1,14	0,00	0,00	0,00	32,00	6,40	6,40	0,00	0,00	0,00
M4	15,00	0,90	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,00	14,40	14,40
M5	21,00	1,26	1,26	0,00	0,00	0,00	37,00	7,40	7,40	0,00	0,00	0,00
M6	16,00	0,96	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,00	16,80	16,80

M1 = Material 1; M2 = Material 2; M3 = Material 3; M4 = Material 4; M5 = Material 5; M6 = Material 6

Fonte: Adaptado de Duncan, Wright, Brandon (2014)

Com o propósito de examinar como a heterogeneidade das camadas de materiais influenciam na probabilidade de ruptura, definiu-se que em cada análise fosse incorporada uma camada de material diferente. Nesse contexto, as análises foram conduzidas conforme a sequência de materiais apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Metodologia adotada para as análises de estabilidade probabilísticas.

Análises	Materiais considerados
1°	M1+M2
2°	M1+M2+M3
3°	M1+M2+M3+M4
4°	M1+M2+M3+M4+M5
5°	M1+M2+M3+M4+M5+M6

M1 = Material 1; M2 = Material 2; M3 = Material 3; M4 = Material 4; M5 = Material 5; M6 = Material 6
 Fonte: Autores (2024)

4 RESULTADOS

Inicialmente foram conduzidas as análises determinísticas com os parâmetros médios da Tabela 2. Os resultados dessa análise encontram-se organizados na Tabela 4.

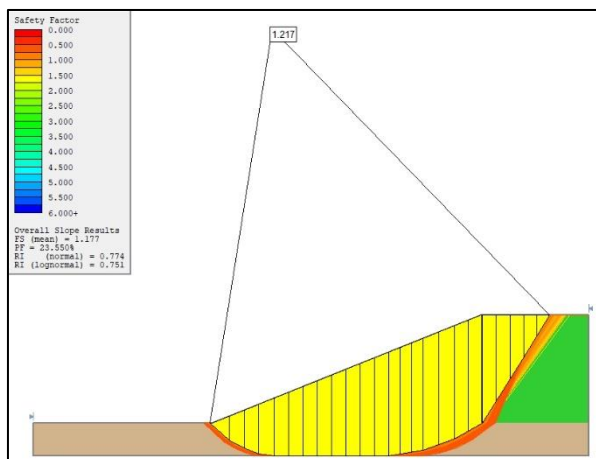
Tabela 4 - Resultados das análises de estabilidade de taludes probabilística.

Análise	FS mínimo	FS determinístico		FS probabilístico	Pr (%)	β (normal)	β (lognormal)
		Spencer	Morgenstern-Price				
1°	1,200	1,228	1,217	1,177	23,55	0,774	0,751
2°	1,200	1,240	1,239	1,177	23,55	0,775	0,751
3°	1,200	1,233	1,231	1,173	23,65	0,773	0,749
4°	1,200	1,235	1,233	1,173	23,55	0,775	0,752
5°	1,200	1,236	1,235	1,173	23,55	0,774	0,750

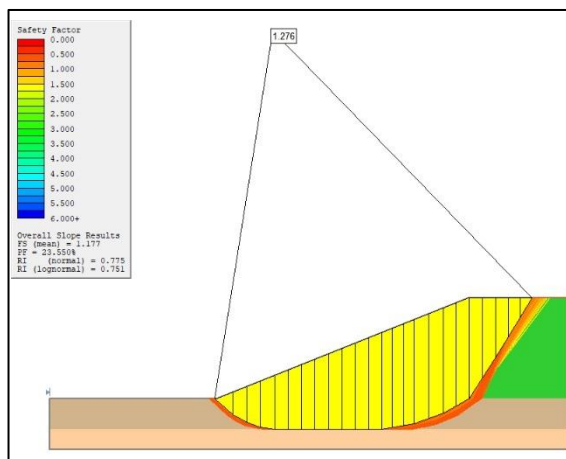
Fonte: Autores (2024).

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4, observa-se que os fatores de segurança encontrados foram menores do que o valor crítico de 1,5 estabelecido pelo cenário mais severo de danos conforme a NBR 11862/09. No entanto, eles foram superiores a 1,0, o que teoricamente é considerado estável, conforme mencionado por Bardhan e Samui (2022). Além disso, observa-se que ao passo em que foram inseridas as camadas de materiais na geometria, o fator de segurança apresentou um leve aumento a partir da segunda casa decimal, sendo a maior elevação observada entre a 1° e 5° análise igual a 1,48%.

Após realizar as análises determinísticas, prosseguiu-se com as análises probabilísticas, onde foi calculado os índices de confiabilidade e as probabilidades de ruptura usando o método de Monte Carlo. Os resultados dessas análises estão representados na Figura 2 e Figura 4.



(a)



(b)

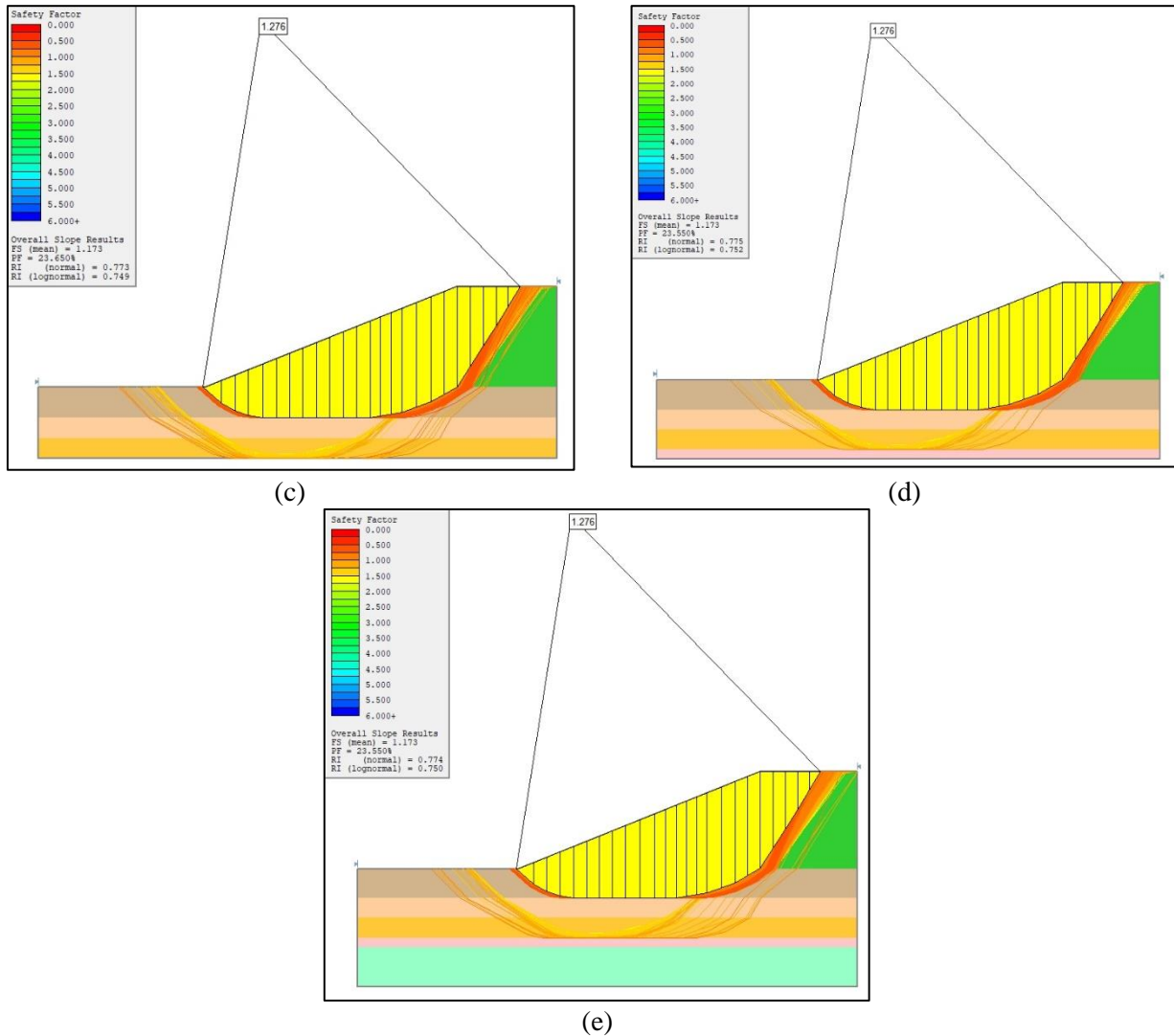


Figura 2 – Resultados das análises probabilística (a) 2 camadas (b) 3 camadas (c) 4 camadas (d) 5 camadas (e) 6 camadas.

Fonte: Autores (2024).

Inicialmente, observou-se que a posição da Superfície Potencial de Ruptura (SPR) permaneceu constante à medida que diferentes materiais foram incorporados à seção. Ao examinar os resultados da análise 5, mostrada na Figura 2-(e), fica evidente que, mesmo com a busca pelo menor fator de segurança em toda a geometria modelada, a SPR tendia a se localizar nas duas primeiras camadas de materiais. Isso indica que as propriedades dos materiais 1 e 2 são os principais fatores que influenciam a estabilidade do talude analisado. Considerando esse aspecto, foi realizada uma análise adicional de sensibilidade, cujo resultado está apresentado na Figura 3.

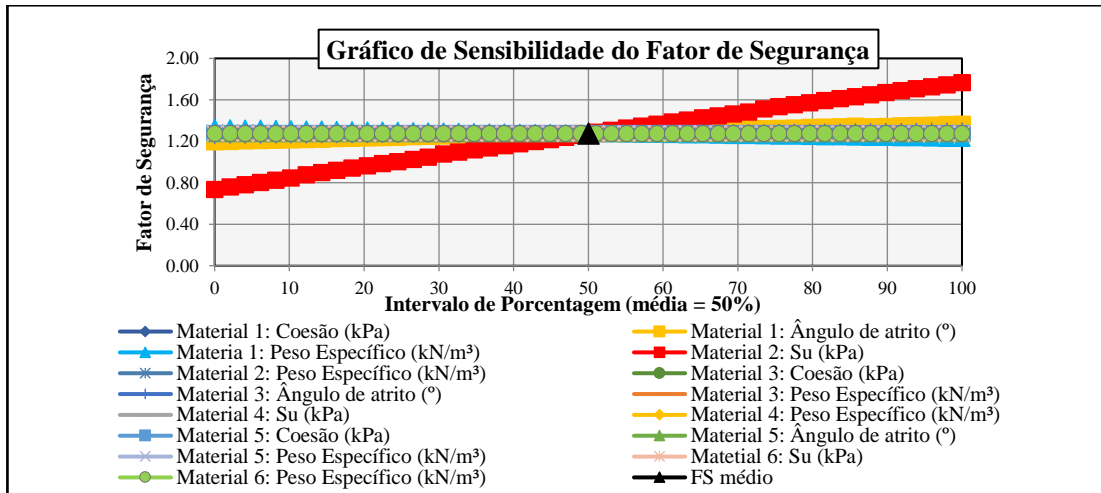


Figura 3 - Resultado da análise de sensibilidade.
 Fonte: Autores (2024)

A análise do gráfico de sensibilidade na Figura 3 revela que a resistência não-drenada da camada de material 2 é o principal fator de variação do fator de segurança. Isso sugere que a segunda camada de material é crucial na seção, seguida pela primeira camada, o que explica por que a SPR está localizada nessas camadas em todos os cenários analisados.

Com relação aos fatores de segurança apresentados na Figura 4, destaca-se uma redução do fator de segurança probabilístico, em relação ao seu valor determinístico. Conforme destaca Netto e Farias (2022), o FS probabilístico tende a ser superior ao determinístico, devido às múltiplas combinações geradas pelo método de Monte Carlo, o que tende elevar a magnitude desse parâmetro. Contudo, os resultados obtidos contradizem essa expectativa, revelando um comportamento oposto, onde a realização de uma análise probabilística, promoveu a redução de até 8,07% no FS probabilístico. Analisando ainda os resultados da Figura 4, nota-se que os índices de confiabilidade, tanto normal quanto lognormal, tenderam a ser inferiores ao valor admissível estabelecido pela USACE (1997) de 3, indicando um nível de desempenho insatisfatório do talude. No que concerne as Pr, os valores encontrados tenderam a ser igual a 23,55% para todas as análises, com exceção da análise 3, onde esse valor aumentou para 23,65%.

Sobre o comportamento da Pr, em relação ao nível de heterogeneidade do talude, percebeu-se que a introdução de materiais com propriedades diferentes na seção, não resultou em variações significativas em sua magnitude. Isto sugere que o talude em questão pode ter sido insuficiente para avaliar a influência da heterogeneidade das camadas sobre a Pr. Neste sentido, sugere-se a aplicação da mesma metodologia em taludes com diversas arranjos, a fim de verificar se de fato a heterogeneidade das camadas impactam na Pr.

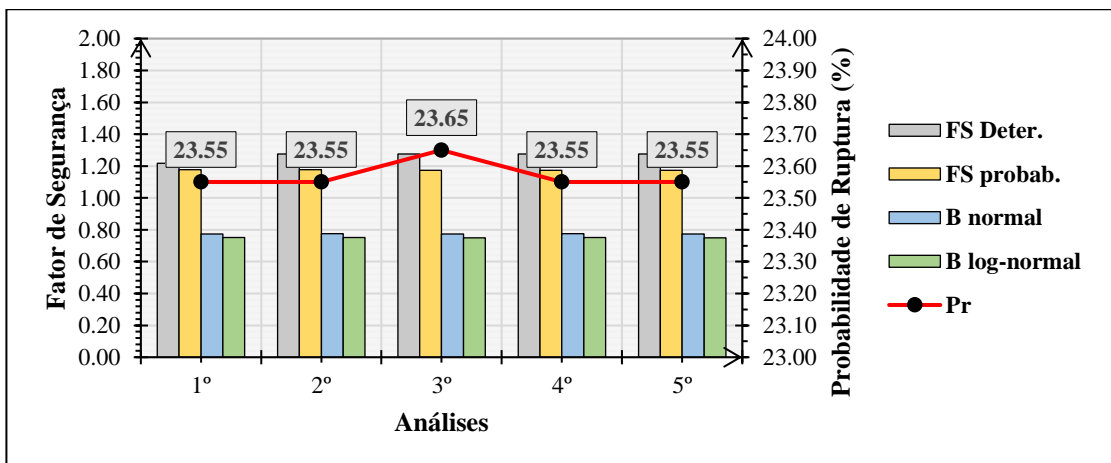


Figura 4 – Resultados das análises probabilística.
 Fonte: Autores (2024)

5 CONCLUSÃO

Tradicionalmente as análises de estabilidade de taludes são executadas empregando o método determinístico, o qual apresenta algumas lacunas a serem preenchidas. Neste sentido, métodos probabilísticos foram desenvolvidos com o objetivo de complementar o Fator de Segurança determinístico, por meio de parâmetros como o Índice de Confiabilidade e a Probabilidade de Ruptura. Sobre este último parâmetro, foi desenvolvido uma análise para verificar se a quantidade de camadas existentes na geometria de um talude trazia impactos significativos na sua magnitude.

Para alcance dessas respostas, foi trabalhado como objeto de estudo um talude hipotético. Este talude, em seu escopo original, era composto por 6 camadas de materiais com comportamentos distintos. Para atingir os objetivos, o talude foi analisado em cinco etapas utilizando uma abordagem probabilística, com a inclusão de camadas de materiais distintos a cada análise. Como resultados, observou-se variações mínimas da probabilidade de ruptura diante do acréscimo de camadas. Além disso, foi verificado também, poucas alterações quanto a localização da superfície potencial de ruptura, sendo esta localizada entre a primeira e a segunda camada de material, indicando serem as mais suscetíveis a instabilidade. Como resultado, o modelo em questão não permitiu a avaliação da heterogeneidade sobre as probabilidades de rupturas. Portanto, sugere-se a aplicação dessa metodologia em outras geometrias de taludes.

Por fim, no que concerne a estabilidade da estrutura analisada, observou-se, que tanto os resultados da abordagem determinística, quanto pela probabilística, não atenderam os limites mínimos para o pior cenário estabelecidos pela NBR 11682/09 e USACE (1997), tornando o comportamento do talude inadequado para aplicação prática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APAZA, M. F.; BARROS, J. M. C. *Análise probabilística de estabilidade de taludes pelo Método de Monte Carlo*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia, 2014.
- ASSIS, A. P. *et al* (2018). *Métodos estatísticos e probabilísticos aplicados à geotecnia*. Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / FT – Geotecnia, Brasília, 278 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro: Moderna, 2009. 33 p.
- BARDHAN, A.; SAMUI, P. Probabilistic slope stability analysis of Heavy-haul freight corridor using a hybrid machine learning paradigm. *Transportation Geotechnics*, [S.L.], v. 37, p. 100815, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100815>.
- DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. *Soil strength and slope stability*. New Jersey: Wiley, 2014.
- DYSONA, J. S.; TOLOOIYAN, A. (2019). Influence of soil property variability on stability analysis of residual soil slopes. *Computers and Geotechnics*, 108, 131-142.
- JIANG, Shui-Hua *et al*. Advances in reliability and risk analyses of slopes in spatially variable soils: a state-of-the-art review. *Computers And Geotechnics*, [S.L.], v. 141, p. 104498, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104498>.
- KALANTARI, A. R. *et al*. Effect of spatial variability of soil properties and geostatistical conditional simulation on reliability characteristics and critical slip surfaces of soil slopes. *Transportation Geotechnics*, [S.L.], v. 39, p. 100933, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100933>.

- NETTO, S. A.; FARIAS, M. M. Abordagem probabilística na análise de estabilidade de uma barragem de terra. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. *Anais eletrônicos*. Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/abordagem-probabilistica-na-analise-de-estabilidade-de-uma-barragem-de-terra?lang=pt-br>> Acesso em: 03 fev. 2024.
- SILVA, C. C. *Análise de estabilidade de um talude da cava de alegria utilizando abordagem probabilística*. 2015. 104 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal do Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- SOUSA, T. F. P. *Abordagem Monte Carlo para a análise probabilística da estabilidade de taludes durante rebaixamento rápido de reservatório*. 2021. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.
- U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1997). *Engineering and design introduction to probability and reability methods for use in geotechnical engineering*. Engineering Technical Letter N 1110-2-547, Department of the Army, U. S., Washington, DC.
- YOKOZAWA, S. Y. *Avaliação dos métodos probabilísticos aplicados na análise de risco devido à instabilidade de barragens*. 2019. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- YUAN, Xukai; ZHANG, Xin. Research on slope stability of quarry based on geostudio and madis/Gts. *World Scientific Research Journal*, v. 7, n. 12, p. 96-105, 2021.