XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/17

Análise determinística e probabilística da estabilidade de um talude localizado em Fortaleza, Ceará

Bruna Letícia da Silva Lemos
Doutoranda, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil, engbrunaleticia21@gmail.com

Silvrano Adonias Dantas Neto
Professor, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Brasil, silvrano@ufc.br

RESUMO: Este estudo avalia a estabilidade de um talude formado em decorrência das escavações realizadas para a implantação de fundações superficiais. Para esse fim, foram empregadas abordagens determinística e probabilística. Na primeira, aplicou-se o método de Morgenstern & Price (1965), o qual permitiu calcular o fator de segurança (FS) e identificar a superfície crítica de ruptura. Em complemento, empregou-se o método analítico FOSM (*First Order Second Moment*), permitindo estimar o índice de confiabilidade (β), a probabilidade de falha (Pf) e a influência dos parâmetros geotécnicos na estabilidade do talude. Os resultados demonstraram que, embora o FS obtido pela metodologia determinística seja amplamente utilizado como critério de projeto, ele não representa de forma integral o comportamento real do talude, pois, mesmo em condições aparentemente seguras, pode haver uma probabilidade de falha. Nesse contexto, a abordagem probabilística mostrou-se mais consistente, ao quantificar os riscos e identificar os parâmetros geotécnicos mais influentes na estabilidade. Conclui-se que a integração entre essas metodologias aprimora a avaliação da estabilidade, fornece subsídios mais consistentes para a tomada de decisões em projetos geotécnicos e contribui para a redução dos riscos técnicos, econômicos e ambientais associados a eventuais rupturas.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, Análise Determinística, Análise probabilística.

ABSTRACT: This study evaluates the stability of a cut slope formed as a result of excavations performed for the construction of shallow foundations. To this end, both deterministic and probabilistic approaches were adopted. The deterministic assessment was carried out using the Morgenstern and Price (1965) limit equilibrium method, which enabled the determination of the factor of safety (FS) and the identification of the critical slip surface. In addition, a probabilistic assessment was conducted using the First-Order Second-Moment (FOSM) method to estimate the reliability index (β), the probability of failure (Pf), and the sensitivity of geotechnical parameters affecting slope stability. The results indicate that, although the factor of safety obtained from the deterministic analysis is widely used as a design criterion, it does not explicitly account for the inherent uncertainties associated with soil properties. Consequently, a non-negligible probability of failure may exist even when the calculated factor of safety satisfies conventional design requirements. In this regard, the probabilistic approach provided a more comprehensive evaluation by quantifying the likelihood of failure and identifying the parameters with the greatest influence on system reliability. It is concluded that the combined application of deterministic and probabilistic methodologies enhances the assessment of slope stability, supports more reliable decision-making in geotechnical engineering practice, and contributes to mitigating the technical, economic, and environmental risks associated with potential slope failures.

KEYWORDS: Slope Stability, Deterministic Analysis, Probabilistic Analysis.

1 INTRODUÇÃO

A segurança de taludes é uma questão recorrente na Geotecnia e constitui fator determinante em diversos tipos de obras. A avaliação da estabilidade é geralmente expressa por meio de um fator de segurança mínimo (FS_{min}), adotado como critério de dimensionamento (GERSCOVICH, 2016).
Segundo Georio (2000), essa análise pode ser realizada por duas abordagens principais: determinística e probabilística. Nos métodos determinísticos, mais utilizados, os parâmetros do solo são considerados como

valores fixos. Já na abordagem probabilística, a segurança é expressa em termos da probabilidade de falha (P_f), levando em conta a variabilidade desses parâmetros.

De acordo com Abreu e Dantas Neto (2022), a literatura apresenta métodos consagrados para a análise da estabilidade de taludes, como os de Fellenius (1936), Janbu Simplificado (1954), Bishop Simplificado (1955), Morgenstern & Price (1965) e Spencer (1967). Esses procedimentos pertencem ao grupo dos Métodos de Equilíbrio Limite (MEL), nos quais a estabilidade é avaliada a partir da condição de equilíbrio entre as forças atuantes e resistentes ao longo de uma superfície potencial de ruptura.

Nos MEL, a massa de solo é dividida em fatias verticais, às quais são aplicadas as equações da estática, considerando o equilíbrio de forças verticais, horizontais e de momentos. Entretanto, essas três equações não são suficientes para tornar o sistema determinado, devido ao elevado número de incógnitas envolvidas, especialmente as forças interfatias normais (E_R e E_L) e cisalhantes (X_R e X_L) que atuam entre as fatias.

Consoante Fredlund e Krahn (1977), essa indeterminação pode ser resolvida por meio da incorporação de princípios adicionais da física ou pela adoção de hipóteses simplificadoras. Os métodos citados utilizam essa segunda abordagem, diferenciando-se principalmente pelas equações de equilíbrio consideradas e pelas hipóteses adotadas para o cálculo das forças interfatias. Contudo, tais simplificações podem não representar com precisão o estado real de tensões no solo, podendo resultar em FS menos representativos da condição real de estabilidade.

Nesse contexto, a análise probabilística tem se consolidado como uma abordagem complementar à determinística, principalmente por sua capacidade de lidar com a incerteza associada aos parâmetros do solo. Devido à elevada variabilidade e à dificuldade de caracterização desse material, sua representação em modelos geotécnicos apresenta desafios. Nesse contexto, o uso de ferramentas estatísticas permite incorporar essas incertezas, proporcionando resultados mais confiáveis e tecnicamente embasados, além de reduzir o conservadorismo adotado na ausência de dados suficiente (VECCI, 2018).

Entre os métodos, destacam-se FOSM e o método de Rosenblueth por Pontos de Estimativa (PEM) e Monte Carlo (MMC). Nessas abordagens, também se modifica a forma de interpretar o FS. Em vez de ser representado por um único valor, como nas análises determinísticas, o FS passa a ser descrito por uma função de distribuição de probabilidade. A principal métrica derivada dessa metodologia é a P_f, definida como a área da distribuição do FS correspondente a valores inferiores a 1 ou, de forma prática, como a razão entre o número de simulações em que FS < 1 e o total de simulações realizadas (MACHADO, 2019).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo principal avaliar a estabilidade de talude utilizando métodos determinísticos e probabilísticos, considerando a variabilidade dos parâmetros geotécnicos. Como objetivos específicos, busca-se: (i) aplicar o método de Morgenstern & Price (1965); (ii) utilizar o método FOSM para estimar o β e a Pf; e (iii) identificar os parâmetros com maior influência no FS.

2 METODOLOGIA

Para viabilizar a implantação de sapatas isoladas, foi necessária a melhoria das condições geotécnicas do terreno de fundação por meio da execução de uma camada composta por blocos de rocha e concreto ciclópico compactados. A implantação dessa solução requer a remoção prévia de uma camada de argila mole com espessura aproximada de 1,0 m, implicando a realização de escavações e a formação de taludes na área da obra, cuja estabilidade deve ser verificada. Conforme a metodologia executiva adotada, a escavação será realizada até a cota de 2,11 m, resultando na formação de um talude com altura aproximada de 3,24 m.

A caracterização geotécnica do terreno foi feita a partir de três sondagens do *tipo Standard Penetration Test* (SPT), executadas em outubro de 2023, conforme os procedimentos estabelecidos na NBR 6484 (ABNT, 2020). Inicialmente, foram identificadas as unidades geológico-geotécnicas predominantes e calculados os valores médios de NSPT para cada camada. O peso específico natural (γ) foi estimado por meio da correlação proposta por Godoy (1972), enquanto os parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão efetiva (c') e ângulo de atrito efetivo (φ'), foram obtidos a partir do modelo de rede neural desenvolvido por Mota (2019), calibrado com dados geotécnicos de solos brasileiros. Na ausência de ensaios laboratoriais específicos para a área de estudo, os parâmetros geotécnicos foram estimados por metodologias indiretas amplamente empregadas na prática geotécnica, sendo os valores obtidos considerados compatíveis com as características dos materiais identificados. Os parâmetros adotados nas análises são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos estimados para as camadas de materiais.

Material	Peso específico (kN/m³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (º)
Argila silto-arenosa rija	19	18	28
Argila silto-arenosa dura	21	25	23
Arenito conglomerático	22	40	23

A geometria considerada na análise, ainda sem a execução da camada de blocos de rocha prevista no projeto, está ilustrada na Figura 1. Nas verificações feitas, considerou-se a possível atuação de equipamentos pesados sobre a crista do talude durante as etapas de escavação, adotando-se, para condições críticas, uma sobrecarga de 30 kPa.

A análise de estabilidade foi realizada pelo método de Morgenstern & Price (1965), utilizando o *software* Slide. O comportamento do material foi representado pelo modelo constitutivo elástico perfeitamente plástico de Mohr–Coulomb. Para a avaliação das incertezas associadas aos parâmetros geotécnicos, empregou-se a abordagem probabilística FOSM. Ademais, a definição do nível d'água (N.A.) nessa interface baseou-se na interpretação integrada dos perfis de sondagem e das características geológico-geotécnicas da área de estudo. A adoção dessa condição possibilitou incorporar, de maneira simplificada, o comportamento hidrogeológico do maciço ao modelo numérico, mantendo coerência com as informações obtidas durante a investigação geotécnica.

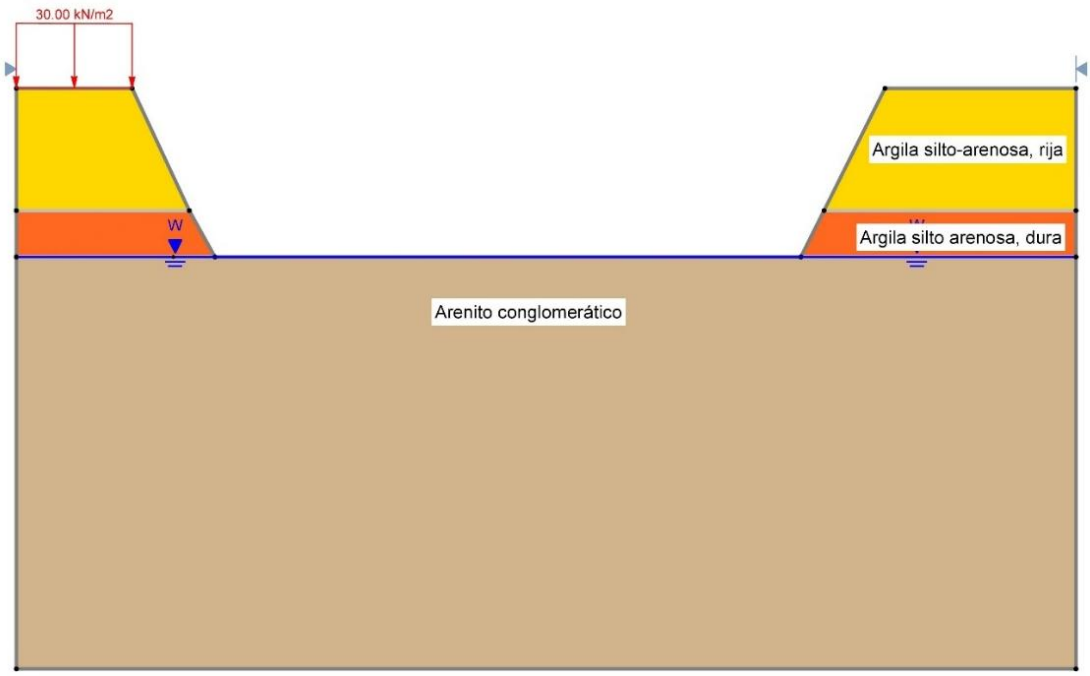


Figura 1. Talude da escavação total necessária.

O FOSM foi selecionado por apresentar simplicidade de implementação, baixo custo computacional e ampla aplicação em problemas geotécnicos envolvendo variabilidade de parâmetros. Diferentemente dos métodos baseados em simulações extensivas, como MCC, o FOSM permite estimar a variância do FS e o β a partir da propagação dos momentos estatísticos das variáveis de entrada. Dessa forma, o método mostra-se adequado para estudos preliminares e análises comparativas, fornecendo uma estimativa consistente do efeito das incertezas nos resultados de estabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise determinística resultou em um FS igual a 1,656, indicando condição estável para o cenário analisado, uma vez que, de acordo com Gerscovich (2016), a ruptura ocorre para FS ≤ 1,0. Considerando os critérios estabelecidos pela NBR 11682 (ABNT, 2009), o resultado sugere desempenho satisfatório do talude durante a fase de escavação, mesmo sob a atuação da sobrecarga de 30 kPa considerada na crista.
A análise probabilística permitiu determinar os desvios padrão, as derivadas parciais do FS em relação às variáveis de entrada e as respectivas contribuições para a variância total, apresentados na Tabela 2. A partir desses dados, obteve-se uma variância do fator de segurança V[FS] = 0,058668, correspondente a um desvio padrão σ[FS] = 0,242. Com base nesses resultados, foram estimados o β = 2,71 e uma Pf de aproximadamente 0,0034 (0,34%).

Tabela 2. Método FOSM.

Parâmetro		δXi	δFSii	δFSii/ ∂Xi	V[Xi]	(δFSii/∂Xi)2* V[Xi]
Argila silto-arenosa rija	28°	2,8	-0,054	-0,0284	3,61	0,002916
	18 kPa	1,8	0,064	0,02286	7,84	0,004096
	19 kN/m3	1,9	0,112	0,06222	3,24	0,0125
Argila silto-arenosa dura	28º	2,8	-0,054	-0,02571	4,41	0,00292
	25 kPa	2,5	0,064	-0,02783	5,29	0,00410
	21 kN/m3	2,1	0,112	0,04480	6,25	0,0012544
Arenito conglomerático	23°	2,3	-0,054	-0,02455	4,84	0,00292
	40 kPa	4,0	0,064	0,02783	5,29	0,00292
	22 kN/m3	2,2	0,112	0,02800	16	0,00410
					V[FS]	0,058668

A contribuição relativa de cada parâmetro geotécnico para a variabilidade do fator de segurança (FS) é apresentada na Figura 2. Observa-se que a coesão efetiva (c') foi responsável por aproximadamente 64,1% da variabilidade do FS, seguida pelo ângulo de atrito efetivo (φ') e pelo peso específico (γ), com contribuições de 20,9% e 14,9%, respectivamente. Conforme destacado por Sandroni e Sayão (1992), esse tipo de análise é importante para identificar as variáveis que mais afetam o desempenho geotécnico da estrutura e fundamentar tecnicamente as decisões do engenheiro.

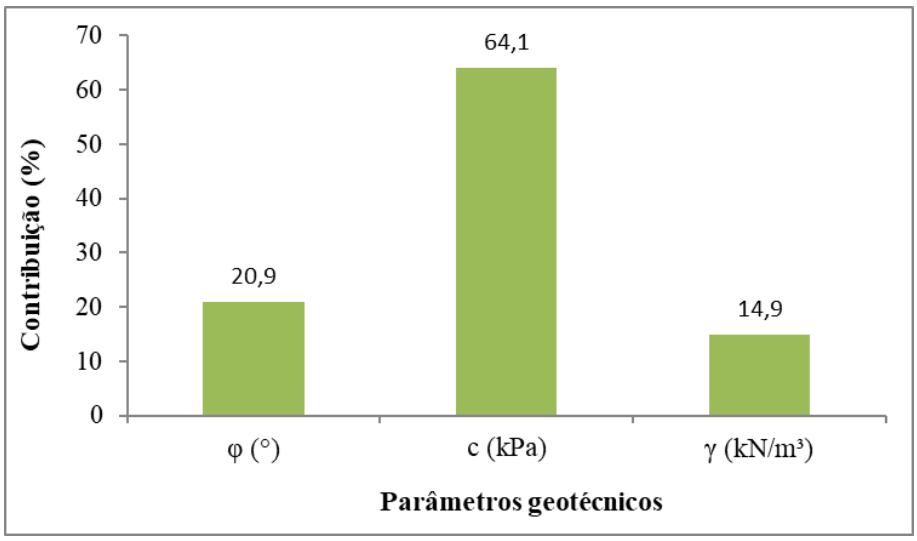


Figura 2. Contribuição de cada parâmetro geotécnico no FS.

Os valores obtidos indicam que c' constitui a variável de maior sensibilidade do modelo apresentado, de modo que pequenas alterações em seus valores podem resultar em variações significativas do FS. O parâmetro φ' apresentou influência secundária, enquanto γ exerceu participação menos significativa. A predominância de c'

evidencia que as incertezas associadas aos parâmetros de resistência ao cisalhamento exercem maior influência sobre a estabilidade dos taludes do que aquelas relacionadas às características ponderais dos materiais. Nesse contexto, a determinação representativa desses parâmetros torna-se fundamental para a redução das incertezas inerentes ao modelo geotécnico e para o aumento da confiabilidade das avaliações de estabilidade. Ademais, a abordagem probabilística permitiu hierarquizar a importância das variáveis de entrada, fornecendo subsídios técnicos para o direcionamento de futuras campanhas de investigação e para o refinamento dos parâmetros adotados em projeto.

4 CONCLUSÕES

Constata-se que as incertezas associadas aos parâmetros geotécnicos do solo influenciam diretamente o FS e, consequentemente, as decisões relacionadas à estabilidade de taludes. Nesse contexto, a variabilidade dos dados e a presença de erros sistemáticos constituem as principais fontes de incerteza nas análises.
A abordagem probabilística, utilizando o FOSM, complementa a avaliação determinística ao possibilitar uma estimativa mais realista da probabilidade de falha. Neste estudo, a Pf foi estimada em menos de 1%. Ainda assim, o risco pode ser significativo em contextos urbanos ou em áreas com infraestruturas críticas. Diante disso, os resultados reforçam a necessidade de estratégias complementares de monitoramento, sobretudo durante fases construtivas ou em situações extremas.
Para aprofundar os resultados obtidos e validar a metodologia empregada, recomenda-se a aplicação de simulações de MMC no mesmo cenário de talude. O MMC, ao simular milhares de combinações possíveis de parâmetros com base em suas distribuições de probabilidade, sem as simplificações inerentes ao modelo FOSM. Outra abordagem recomendada é a aplicação do método do PEM, que, apesar de simplificado, possibilita tratar sistemas com mais de duas variáveis aleatórias e pode ser implementado com menos custo computacional. A comparação entre essas metodologias probabilísticas pode revelar convergências ou divergências importantes, ajudando a definir diretrizes para sua escolha em projetos de engenharia geotécnica.
Por fim, sugere-se também a realização de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto em amostras indeformadas da área de estudo. Tais ensaios proporcionariam dados experimentais diretos para calibrar os modelos usados e reduzir as incertezas relacionadas aos parâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. *Solo: sondagem de simples reconhecimento com SPT: método de ensaio*. Rio de Janeiro.

Abreu, A. A., Dantas Neto, S. A. (2022) Comparação entre as forças interfaciais de um talude obtidas por métodos de equilíbrio limite e por análises tensão x deformação. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, 20., Campinas. *Anais...* Campinas: ABMS.

Bishop, A. W. (1955) The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique*, 5 (1), p. 7–17.

Culmann, K. (1866) *Die Graphische Statik*. Zurich: Von Meyer & Zeller.

Fellenius, W. (1936) Calculation of the stability of earth dams. In: *Transactions of the 2nd Congress on Large Dams*, Washington, v. 4, p. 455.

Fredlund, D. G., Krahn, J. (1977) Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 14, p. 429–439.

Gerscovich, D. M. S. (2016) *Estabilidade de taludes*. 2. ed., São Paulo: Oficina de Textos.

GEORIO (2000) *Manual técnico de encostas: análise e investigação*. 2. ed., Rio de Janeiro.

Godoy N. S., 1972. *Notas de aula da Disciplina de Fundações*, Curso de Graduação, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Paulo.

Guedes, M. C. S. (1997) Considerações sobre análise probabilística da estabilidade de taludes. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 146 p.

Janbu, N. (1954) Stability analysis of slopes with dimensionless parameters. Tese de Doutorado, Engenharia Civil, Harvard University, Faculty of Arts and Sciences, Cambridge.

Machado, J. L. D. M. (2019) Análise probabilística de estabilidade do talude de jusante de uma barragem de rejeitos. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Morgenstern, N. R., Price, V. E. (1965) The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15, p. 79–93.

Mota, D. G. A. (2019) Prediction of soil shear strength parameters using artificial neural network. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 129 p.

Sandroni, S. S., Sayão, A. S. F. J. (1992) Avaliação estatística do coeficiente de segurança de taludes. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, 1., São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABMS, v. 2, p. 523–536.

Spencer, E. (1967) A method of the analysis of the stability of embankments assuming parallel interslide forces. *Géotechnique*, 17 (1), p. 11–26.

Vecci, A. N. (2018) Análise probabilística da estabilidade de um talude de mineração. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.