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/COBRAMSEG2026.4/34

Avaliação da Influência da Correlação entre Parâmetros de Resistência do Solo nas Análises Probabilísticas de Estabilidade de Taludes

Jônatas Martins Pereira
Mestrando em Geotecnia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGCA), Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Bauru, SP, Brasil, jonatas.martins@unesp.br

Higor Biondo de Assis
Doutorando em Geotecnia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGCA), Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Bauru, SP, Brasil, higor.assis@unesp.br

Caio Gorla Nogueira
Professor Assistente Doutor, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGCA), Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Bauru, SP, Brasil, caio.nogueira@unesp.br

RESUMO: Este trabalho apresenta uma investigação sobre a influência da correlação linear estatística (ρ) entre os parâmetros geotécnicos coesão (c') e Ângulo de atrito (φ') em análises probabilísticas de estabilidade de taludes. Por meio dos programas computacionais Slide2 e RASS, realizou-se o acoplamento direto o método de equilíbrio limite de Bishop Simplificado e os métodos de confiabilidade Simulação de Monte Carlo (MCS) e Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM). Um talude homogêneo foi analisado considerando diferentes valores do coeficiente de correlação linear entre c' e φ', bem como distintas funções de distribuição de probabilidades (normal e lognormal) para caracterizar as variáveis aleatórias, visando avaliar a sensibilidade das respostas probabilísticas a essas hipóteses. Os resultados indicaram que o FORM apresentou boa concordância com o MCS mesmo na presença de correlação, com exceção do caso em que se utilizou a distribuição lognormal, destacando-se por sua elevada eficiência computacional. Observou-se ainda que o aumento da correlação linear negativa entre c' e φ' conduziu à redução da probabilidade de falha para o talude estudado. Esse comportamento sugere que, havendo recursos para a adequada caracterização estatística dos parâmetros do solo, a consideração da correlação pode contribuir para avaliações mais realistas e economicamente racionais.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, Equilíbrio limite, Análise probabilística, Acoplamento direto, Correlação linear

ABSTRACT: This study presents an investigation into the influence of the linear statistical correlation (ρ) between the geotechnical parameters, cohesion (c') and friction angle (φ'), in probabilistic slope stability analyses. Using the computational programs Slide2 and RASS, a direct coupling was performed between the Simplified Bishop limit equilibrium method and the reliability methods Monte Carlo Simulation (MCS) and First-order Reliability Method (FORM). A homogeneous slope was analyzed considering different values of the linear correlation coefficient between c' and φ', as well as distinct probability distribution functions (normal and lognormal) to characterize the random variables, in order to evaluate the sensitivity of the probabilistic responses to these assumptions. The results indicated that FORM showed good agreement with MCS even in the presence of correlation, except in the case where lognormal distribution was adopted, while also demonstrating high computational efficiency. It was further observed that increasing negative linear correlation between c' and φ' led to a reduction in the probability of failure for the studied slope. This behavior suggests that, when sufficient resources are available for proper statistical characterization of the soil parameters, considering correlation may contribute to more realistic and economically rational assessments.

KEYWORDS: Slope stability, Limit Equilibrium, Reliability Analysis, Direct coupling, Linear correlation

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes constitui um dos temas centrais da Engenharia Geotécnica, estando diretamente associada à segurança de obras de infraestrutura, tais como rodovias, ferrovias, barragens, escavações e taludes naturais. Falhas decorrentes da instabilidade de taludes podem resultar em perdas humanas, prejuízos econômicos significativos e impactos ambientais relevantes, o que torna sua análise um aspecto fundamental no projeto, na execução e na avaliação de obras geotécnicas (Aleotti; Chowdhury, 1999; Dai et al., 2002; Froude; Petley, 2018; Lei et al., 2023; Li et al., 2025; Petley, 2012).

Tradicionalmente, a estabilidade de taludes tem sido avaliada por meio de métodos determinísticos, fundamentados na teoria do equilíbrio limite, descritos em detalhe por (Duncan; Wright; Brandon, 2014), nos quais os parâmetros de resistência do solo são tratados como valores constantes ao longo da massa de solo. Nessa abordagem, a segurança é expressa por meio do fator de segurança (*FS*), sendo essa metodologia amplamente adotada na prática da engenharia geotécnica brasileira, conforme estabelecido pela (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009). Embora amplamente difundidos, tais métodos não são capazes de representar explicitamente as incertezas inerentes aos parâmetros geotécnicos, decorrentes da variabilidade natural dos solos, das limitações dos ensaios de campo e laboratório e das simplificações associadas à modelagem do problema (Chakraborty; Dey, 2022; Duncan, 2000; Phoon, 2020; Whitman, 2000).

Com o avanço das ferramentas computacionais, as análises probabilísticas de estabilidade de taludes, fundamentadas na Teoria da Confiabilidade, têm sido cada vez mais empregadas como complemento às abordagens determinísticas (Jiang et al., 2022). Nessas análises, os parâmetros relevantes do problema são tratados como variáveis aleatórias, caracterizadas por parâmetros estatísticos, como média e desvio padrão, e por funções de distribuição de probabilidade, permitindo a estimativa da probabilidade de falha e do índice de confiabilidade, fundamentais para o processo de quantificação do risco associado à instabilidade do talude.

A coesão (c') e o ângulo de atrito do solo (φ') são parâmetros fundamentais na estabilidade de taludes, estudos importantes foram desenvolvidos por Phoon e Kulhawy (1999a, 1999b) para a caracterização desses parâmetros geotécnicos como variáveis aleatórias.

Além da variabilidade desses parâmetros, diversos estudos reportam a existência de dependência estatística entre c' e o ângulo de atrito φ', frequentemente manifestada como uma correlação linear negativa (Griffiths et al., 2011; Javankhoshdel; Bathurst, 2016; Wang; Akeju, 2016). A consideração dessa dependência estatística pode influenciar de forma significativa os resultados das análises probabilísticas, afetando diretamente as estimativas do fator de segurança, da probabilidade de falha e do índice de confiabilidade (Liu et al., 2018).

A quantificação da correlação entre os parâmetros de resistência ainda representa um desafio na prática da engenharia geotécnica, uma vez que sua determinação experimental requer um número elevado de ensaios laboratoriais, nem sempre disponíveis em estudos de engenharia. Em razão disso, a hipótese de independência estatística entre a coesão e o ângulo de atrito é frequentemente adotada, uma medida conservadora em função da falta de informação.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo principal investigar de forma sistemática a influência do coeficiente de correlação linear (ρ) entre c' e φ' nas análises probabilísticas de estabilidade de taludes, avaliando sua influência sobre a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade. Busca-se ainda analisar o efeito da adoção das funções de distribuição de probabilidades normal e lognormal para as variáveis aleatórias, bem como o impacto da utilização de diferentes métodos de confiabilidade, como o método de Simulação de Monte Carlo (MCS) e o método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM), de modo a avaliar a sensibilidade das respostas probabilistas devido aos coeficientes de correlação e distribuições de probabilidades adotados. Para tanto, são realizadas análises probabilísticas por meio do acoplamento direto do método de equilíbrio limite de Bishop simplificado aos métodos de confiabilidade de Simulação de Monte Carlo e Confiabilidade de Primeira Ordem.

2 MÉTODOS

Para o presente estudo, adotou-se o acoplamento direto o método de equilíbrio limite de Bishop Simplificado (Bishop, 1955) e os métodos de confiabilidade MCS e FORM. O método de Bishop, fundamentado na teoria do equilíbrio limite, baseia-se na discretização do maciço em lamelas verticais, considerando o equilíbrio de momentos e de forças verticais, com desprezo das interações horizontais entre lamelas. A estabilidade é expressa pelo *FS*, definido como a razão entre a tensão de cisalhamento resistente e a mobilizada ao longo da superfície de ruptura, sendo caracterizada a ruptura quando a tensão mobilizada supera a resistente.

2.1 Análises probabilísticas

Para a consideração das incertezas inerentes ao problema de estabilidade de taludes, emprega-se a teoria da confiabilidade, amplamente discutida na literatura (Ang; Tang, 1984; Christian et al., 1994; Ditlevsen; Madsen, 1996; Melchers; Beck, 2018; Rackwitz, 2001). Nessa abordagem, c' e φ' são modelados como variáveis aleatórias, enquanto o peso específico de solo (γ) foi considerado como determinístico neste estudo.

A representação do mecanismo de falha do talude é realizada por meio da função de estado limite $g(\boldsymbol{X})$, a falha ocorre quando *FS* é inferior a 1,00, sendo essa condição expressa por $g(\boldsymbol{X}) = FS(\boldsymbol{X}) - 1{,}00$, em que $\boldsymbol{X}$ representa o conjunto de variáveis aleatórias do problema. Assim, $g \leq 0$ representa o domínio de falha, enquanto $g > 0$ representa o domínio de sobrevivência. A partir da disso, a função de estado limite é avaliada através de métodos de confiabilidade, como o MCS e o FORM. Para esse propósito, adotou-se a abordagem do acoplamento direto, conforme apresentada na literatura (Assis; Nogueira, 2024, 2023; Pereira et al., 2024; Siacara et al., 2020). As análises foram conduzidas utilizando o software Slide2 (Rocscience) para o MCS e o *Risk Assessment Applied to Slope Stability* (RASS) para o FORM.

2.1.1 Método de Simulação de Monte Carlo

O MCS pertence ao grupo dos métodos de simulação, que, em termos teóricos, são capazes de fornecer resultados exatos à medida que o número de simulações tende ao infinito. Na prática, entretanto, a aplicação do método é limitada pela capacidade computacional disponível e pelo tempo necessário para a realização das análises. O método é amplamente empregado em análises probabilísticas de estabilidade de taludes e, por esse motivo, seus resultados são comumente adotados como valores de referência em estudos de confiabilidade. O MCS baseia-se na geração de amostras pseudoaleatórias das variáveis aleatórias, de acordo com suas distribuições marginais e propriedades estatísticas.

Conforme apresentado em Nogueira (2010), para cada realização *k* da amostra, os conjuntos de valores das variáveis aleatórias X_k são utilizados no cálculo do fator de segurança $FS(X_k)$ por meio do método de equilíbrio limite adotado. Quando múltiplas superfícies potenciais de ruptura são avaliadas, considera-se, em cada iteração, o menor valor do fator de segurança obtido (Baecher; Christian, 2005). A ocorrência de falha é então verificada pela avaliação direta da equação de estado limite, utilizando-se a função indicadora, conforme a Equação 1.

$$I(X_k) = \begin{cases} 1 \rightarrow FS(X_k) - 1{,}00 < 0 \\ 0 \rightarrow FS(X_k) - 1{,}00 \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Em seguida, a probabilidade de falha pode ser calculada conforme a Equação 2.

$$P_f = \frac{\sum_{k=1}^{n_s} I(X_k)}{n_s} \quad (2)$$

onde n_s é o número total de simulações.

Após o cálculo da P_f, o índice de confiabilidade (β) é estimado a partir da P_f, conforme $\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$, onde $\Phi^{-1}(\cdot)$ é a inversa da distribuição normal padrão acumulada.

É fundamental assegurar que o número de simulações adotado na análise probabilística por meio do MCS seja suficiente para garantir a precisão dos resultados. Para isso, deve-se verificar a convergência da probabilidade de falha, de modo a evitar estimativas incoerentes decorrentes de um número insuficiente de simulações. Neste estudo, a qualidade da resposta é avaliada por meio do coeficiente de variação da P_f (δ_{Pf}) descrito na Equação 3.

$$\delta_{Pf} \approx \sqrt{\frac{1 - P_f}{n_S \cdot P_f}} \tag{3}$$

O critério de convergência definido como aceitável para o estudo foi $\delta_{Pf} \leq 0{,}10$.
Observa-se que a abordagem do acoplamento direto entre o método de equilíbrio limite de Bishop simplificado ao método de simulação de Monte Carlo empregado neste trabalho considera a probabilidade de falha global do talude, obtida a partir da avaliação conjunta de múltiplas superfícies potenciais de ruptura. Embora o método também possa ser aplicado à análise de superfícies de ruptura individualizadas, visando à estimativa de suas respectivas probabilidades de falha, essa abordagem não é a mais usual e por isso não será considerada no presente estudo.

2.1.2 Método de Confiabilidade de Primeira Ordem

O FORM pertence a categoria dos métodos de transformação, que podem ser uma alternativa aos métodos de simulação. O método baseia-se na linearização da equação de estado limite no ponto mais provável de falha, permitindo a estimativa do índice de confiabilidade e a partir deste, da probabilidade de falha. O FORM foi originalmente desenvolvido para fornecer resultados exatos, quando comparados aos métodos de simulação, sob um conjunto de premissas ideais. Essas premissas incluem: (i) variáveis aleatórias descritas por distribuições de probabilidades do tipo normal, (ii) independência estatística entre as variáveis aleatórias, isto é, ausência de correlação, e (iii) linearidade da equação de estado limite. No contexto da estabilidade de taludes, embora as equações de estado limite sejam, em geral, não lineares, o grau de não linearidade tende a ser baixo, o que frequentemente viabiliza a aplicação do FORM com resultados satisfatórios.

Entretanto, à medida que o problema se afasta desse cenário ideal – por exemplo, quando as variáveis aleatórias passam a ser descritas por distribuições não normais e/ou quando há dependência estatística entre elas – a precisão do FORM pode ser comprometida. Nessas condições, o método pode apresentar dificuldades de convergência, uma vez que não há garantia de convergência da resposta do FORM, ou ainda fornecer estimativas imprecisas do índice de confiabilidade em relação ao MCS.

Para o FORM, o problema de confiabilidade formulado no espaço físico $\mathbb{X}$ das variáveis aleatórias é transformado para o espaço normal padrão não correlacionado $\mathbb{Y}$, levando-se em consideração as distribuições normais e a correlação estatística entre as variáveis aleatórias, por meio da transformação isoprobabilística $T(\cdot)$, de tal forma que $\boldsymbol{y} = T(\boldsymbol{x})$, sendo $\boldsymbol{y}$ os valores transformados de $\boldsymbol{x}$, conforme o modelo de Nataf (Nataf, 1962) e a eliminação da correlação mediante a fatoração de Cholesky da matriz de correlação, efetivamente mapeando o problema ponto a ponto do espaço $\mathbb{X}$ para o espaço $\mathbb{Y}$. Essa transformação permite representar o problema em um espaço normal padrão não correlacionado, no qual a análise de confiabilidade é realizada. Além disso, é importante ressaltar que o conteúdo de probabilidades é preservado em ambos os espaços, por isso se trata de uma transformação isoprobabilística.

No espaço normal padrão, o índice de confiabilidade β de Hasofer-Lind (Hasofer; Lind, 1974) é definido como a menor como a menor distância geométrica entre a origem do sistema de coordenadas e a superfície de estado limite. A determinação do ponto de projeto ($\boldsymbol{y}^*$), associado a essa distância mínima, é formulada como um problema de otimização com restrição, conforme a Equação 4, cuja solução pode ser obtida por meio do algoritmo HLRF (Hasofer; Lind, 1974; Rackwitz; Fiessler, 1978).

$$\beta = \min_{g(\boldsymbol{y})=0} \sqrt{\boldsymbol{y}^T \boldsymbol{y}} = \|\boldsymbol{y}^*\| \tag{4}$$

A partir do índice de confiabilidade, a probabilidade de falha é estimada, conforme $P_f = 1 - \Phi(\beta)$, onde $\Phi(\cdot)$ é a distribuição normal padrão acumulada.

Ressalta-se que, diferentemente do MCS, o FORM, conforme empregado neste trabalho, fornece estimativas de β e P_f associadas a cada superfície potencial de ruptura analisada. Dessa forma, é possível identificar a superfície crítica probabilística, definida como aquela que apresenta a maior P_f.

2.2 Influência da correlação entre a coesão e o ângulo de atrito

A coesão e o ângulo de atrito do solo são parâmetros de resistência frequentemente obtidos a partir de ensaios laboratoriais, nos quais se observa a existência de dependência estatística entre esses parâmetros. Essa dependência está associada, principalmente, ao processo de interpretação dos resultados experimentais e ao ajuste do critério de resistência ao cisalhamento, sendo comum a ocorrência de correlação negativa entre a coesão e o ângulo de atrito em diferentes tipos de solo.

No presente estudo, a influência da correlação entre a coesão e o ângulo de atrito nas análises probabilísticas de estabilidade de taludes é avaliada por meio da realização de múltiplas análises de confiabilidade. A correlação entre as variáveis aleatórias é representada por meio do coeficiente de correlação linear (ρ).

Para cada valor do coeficiente de correlação adotado, as análises probabilísticas foram realizadas mantendo-se constantes as estatísticas marginais das variáveis aleatórias, variando-se apenas a função de distribuição de probabilidade atribuída à coesão e ao ângulo de atrito, sendo consideradas as distribuições normal e lognormal. Essa estratégia permite isolar e avaliar de forma sistemática os efeitos tanto da dependência estatística quanto da escolha da distribuição de probabilidade sobre os resultados, possibilitando a análise de sua influência sobre o fator de segurança, a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade, bem como a comparação dos resultados obtidos pelos métodos MCS e FORM.

3 ANÁLISES E RESULTADOS

Para a avaliação da influência da correlação entre os parâmetros de resistência do solo – coesão e ângulo de atrito – em análises probabilísticas de estabilidade de taludes, foi adotado neste trabalho um talude de referência utilizado na literatura para estudos de confiabilidade em estabilidade de taludes (Li et al., 2016; Liu et al., 2020), conforme ilustrado na Figura 1. Com o objetivo de investigar o impacto da adoção de diferentes funções de distribuição de probabilidade em análises probabilísticas que consideram a dependência estatística entre variáveis aleatórias, foram definidas duas condições para o talude proposto: a condição (N), na qual a coesão e o ângulo de atrito são modelados por distribuições normais, e a condição (LN), na qual essas variáveis são modeladas por distribuições lognormais. As propriedades geotécnicas e estatísticas atribuídas ao Solo 1, para cada uma das condições analisadas, são apresentadas na Tabela 1.

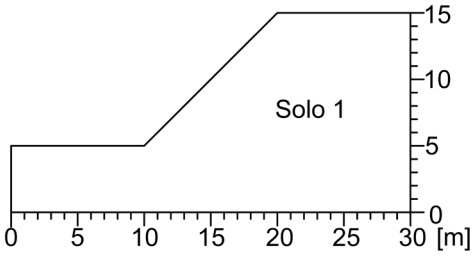


Figura 1. Talude proposto.

Tabela 1. Propriedades estatísticas dos parâmetros do Solo 1.

Propriedade	Média (μ)	COV	ρ	Distribuição (N)	Distribuição (LN)
c'(kPa)	10	0,30	-0,8 a 0,0	Normal	Lognormal
φ'(º)	30	0,20	-0,8 a 0,0	Normal	Lognormal
γ (kN/m³)	20	-	-	-	-

Após a definição do modelo geométrico e das propriedades geotécnicas, conforme descrito na literatura, foram realizadas análises probabilísticas de estabilidade de talude considerando diferentes valores do coeficiente de correlação entre a coesão e o ângulo de atrito. As análises foram conduzidas empregando-se tanto o MCS quanto o FORM, com o objetivo de avaliar o comportamento da probabilidade de falha calculada por cada abordagem e analisar a influência da correlação sobre a resposta global do talude, conforme apresentado na Figura 2.

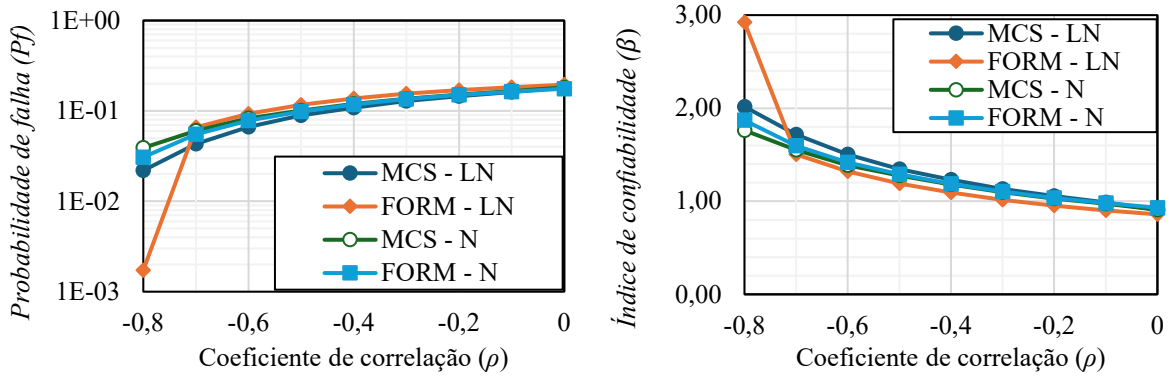


Figura 2. Probabilidades de falha e índices de confiabilidade para o talude proposto considerando diferentes valores de ρ para as condições (N) e (LN).

A análise dos resultados de P_f indica que, para o exemplo avaliado neste trabalho, o aumento da correlação estatística negativa entre c' e φ' está associado a uma tendência de redução da P_f. Esse comportamento foi observado tanto nos casos em que as variáveis aleatórias foram descritas por distribuições normais quanto por distribuições lognormais. Dessa forma, para o problema analisado, a desconsideração da correlação estatística entre os parâmetros de resistência ($\rho = 0$) conduz a resultados mais conservadores, associados a níveis inferiores de confiabilidade, sendo, portanto, favorável à segurança do talude.

Conforme apresentado na Tabela 2 e na Figura 2, observa-se que o FORM apresentou desempenho satisfatório em todos os casos em que as variáveis aleatórias foram modeladas por distribuições normais, evidenciando boa concordância com os resultados obtidos pelo MCS. Esse comportamento indica que a equação de estado limite associada ao problema apresenta baixo grau de não linearidade, o que favorece a aplicação do FORM. Além disso, a adoção de distribuições normais aproxima o problema das condições ideais de aplicação do método.

Entretanto, verifica-se que, para $\rho = -0{,}8$, o erro relativo em relação ao MCS se torna mais pronunciado, evidenciando que o aumento da dependência estatística entre as variáveis aleatórias pode acarretar perda de precisão, mesmo quando estas seguem distribuição normal.

Para a condição em que as variáveis aleatórias foram descritas por distribuições lognormais, os erros relativos mostraram-se mais elevados desde os menores valores de correlação, ultrapassando 0,20 a partir de $\rho = -0{,}4$. Esse comportamento encontra respaldo teórico no fato de que a utilização de distribuições não normais, associada a elevado grau de dependência estatística, afasta o problema das premissas ideais do FORM, comprometendo sua precisão em relação ao MCS, o que é observado especialmente para $\rho = -0{,}8$.

Ainda assim, observa-se que, mesmo quando os erros relativos atingem valores expressivos para as distribuições lognormais, o FORM, com exceção do caso (LN) com $\rho = -0{,}8$, forneceu resultados da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos pelo MCS, possibilitando sua utilização como ferramenta para estimativas preliminares da probabilidade de falha do talude considerando dependência estatística entre as variáveis aleatórias.

Além disso, em situações nas quais a dependência estatística entre variáveis aleatórias é elevada, pode-se considerar a simplificação do problema por meio da redução do número de variáveis aleatórias independentes, expressando uma delas como função da outra. Essa abordagem é particularmente viável quando o coeficiente de correlação apresenta magnitude elevada, indicando forte associação estatística entre os parâmetros, de modo que a variabilidade de uma variável passa a ser, em grande parte, condicionada à outra.

Para o talude proposto, observa-se que as funções de distribuição de probabilidade atribuídas às variáveis aleatórias exerceram influência nos resultados apresentados na Figura 2. De modo geral, as ordens de grandeza das probabilidades de falha foram semelhantes entre as diferentes condições analisadas; contudo, nota-se que, para a condição (LN), tanto o FORM quanto o MCS resultaram em probabilidades de falha inferiores às obtidas na condição (N).

Tabela 2. Precisão das respostas do FORM em relação ao MCS.

ρ	Erro relativo (N)	Erro relativo (LN)
-0,8	0,21	0,92
-0,7	0,09	0,54
-0,6	0,06	0,40
-0,5	0,03	0,31
-0,4	0,01	0,26
-0,3	0,01	0,20
-0,2	0,01	0,17
-0,1	0,01	0,13
0	0,03	0,07

Uma informação relevante fornecida pelo FORM é a identificação da posição das superfícies críticas probabilísticas, isto é, das superfícies de ruptura associadas à maior probabilidade de falha, conforme ilustrado na Figura 3. Essa distinção é particularmente importante, pois a superfície crítica probabilística nem sempre coincide com a superfície crítica determinística. A consideração das incertezas e da dependência estatística entre os parâmetros de resistência pode alterar a posição da superfície mais desfavorável, evidenciando a relevância da análise probabilística para uma avaliação mais abrangente da estabilidade do talude.

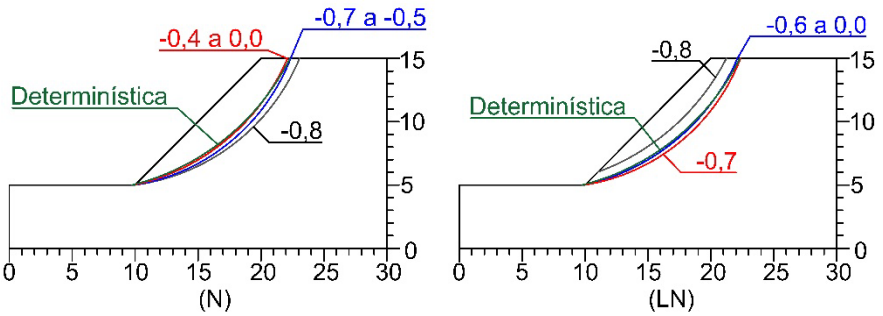


Figura 3. Superfícies críticas determinística e probabilísticas do talude analisado para diferentes coeficientes de correlação entre c' e φ'. (N) Variáveis aleatórias modeladas por distribuição normal. (LN) Variáveis aleatórias modeladas por distribuição lognormal.

Conforme apresentado na Figura 3, as superfícies críticas probabilísticas mostraram-se próximas à superfície crítica determinística obtida pelo método de Bishop simplificado para a maioria dos casos analisados, além de apresentarem pequena variação entre si. Esse comportamento indica que, para as condições avaliadas, a consideração das incertezas e da dependência estatística entre os parâmetros de resistência não resultou em alterações significativas na posição da superfície mais desfavorável.

A exceção ocorre na condição (LN) com $\rho = -0{,}8$, na qual foi identificada uma superfície crítica probabilística mais rasa, associada à menor probabilidade de falha entre os casos analisados. Esse resultado reforça a influência combinada da forma da distribuição de probabilidade e do elevado grau de correlação negativa sobre a resposta probabilística do problema.

Por fim, destaca-se que os tempos de processamento do FORM foram significativamente inferiores aos observados para o MCS. O tempo médio de processamento para cada análise realizada por meio do MCS foi de aproximadamente 960 segundos (16 minutos), enquanto as análises conduzidas com o FORM demandaram, em média, cerca de 11 segundos.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que a consideração da correlação estatística entre a c' e φ' pode exercer influência significativa nas análises probabilísticas de estabilidade de taludes. Para o talude analisado, verificou-se que o aumento da dependência estatística negativa entre os parâmetros de resistência esteve associado à redução da P_f e, consequentemente, ao aumento do β. Esse comportamento evidencia que a hipótese de independência estatística pode conduzir a estimativas mais conservadoras para o caso estudado.

Observou-se ainda que a forma da função de distribuição de probabilidade adotada para as variáveis aleatórias também impacta os resultados da análise probabilística. Para a condição em que as variáveis foram modeladas por distribuições lognormais, tanto o MCS quanto o FORM resultaram, de modo geral, em probabilidades de falha inferiores às obtidas quando se adotaram distribuições normais, demonstrando a sensibilidade da resposta probabilística à modelagem estatística das propriedades do solo.

No que se refere ao desempenho dos métodos de confiabilidade, o FORM apresentou resultados consistentes e precisos em relação ao MCS quando as variáveis aleatórias foram descritas por distribuições normais, condição que se aproxima das premissas ideais do método. Para as distribuições lognormais, embora os resultados tenham permanecido na mesma ordem de grandeza na maioria dos casos, foi observada imprecisão significativa para elevado grau de correlação negativa ($\rho = -0{,}8$), em razão do distanciamento das condições ideais de aplicação do FORM. Ainda assim, o FORM demonstrou ser uma ferramenta computacionalmente eficiente e relevante para complementar o processo de tomada de decisão, fornecendo estimativas rápidas da probabilidade de falha e informações adicionais, como a identificação das superfícies críticas probabilísticas.

Por fim, conclui-se que, quando há disponibilidade de recursos para a caracterização estatística detalhada dos parâmetros de resistência do solo, a consideração da correlação entre c' e φ' pode conduzir a projetos mais racionais, permitindo uma avaliação mais realista da confiabilidade e evitando custos desnecessários. Entretanto, na ausência de dados suficientes para a determinação confiável do coeficiente de correlação, não se recomenda a adoção direta de valores reportados na literatura, pois tal prática pode resultar em estimativas inadequadas do nível de confiabilidade da estrutura geotécnica. Nessas situações, recomenda-se tratar a coesão e o ângulo de atrito como estatisticamente independentes ($\rho = 0$), hipótese que se mostrou metodologicamente mais consistente e conservadora para o problema analisado.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aleotti, P.; Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 58, n. 1, p. 21–44.

Ang, A. H. S.; Tang, W. H. (1984). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design: Decision, risk and reliability*. Vol. 2, John Wiley & Sons, New York.

Assis, H. B.; Nogueira, C. G. (2024). *Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes: Confiabilidade de Sistema em Série com FORM como Alternativa às Simulações de Monte Carlo*. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica - COBRAMSEG, Balneário Camboriú.

Assis, H. B.; Nogueira, C. G. (2023). Comparative study of deterministic and probabilistic critical slip surfaces applied to slope stability using limit equilibrium methods and the First-Order Reliability Method. *Soils and Rocks*, v. 46, p. e2023013522.

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

Baecher, G. B.; Christian, J. T. (2005). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Wiley & Sons.

Bishop, A. W. (1955). The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Géotechnique*, v. 5, n. 1, p. 7–17.

Chakraborty, R.; Dey, A. (2022). Probabilistic slope stability analysis: state-of-the-art review and future prospects. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 7, n. 2, p. 177.

Christian, J. T.; Ladd, C. C.; Baecher, G. B. (1994). Reliability Applied to Slope Stability Analysis. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 120, n. 12, p. 2180–2207.

Dai, F. C.; Lee, C. F.; Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, v. 64, n. 1, p. 65–87.

Ditlevsen, O.; Madsen, H. O. (1996). *Structural Reliability Methods*. John Wiley & Sons.

Duncan, J. M.; Wright, S. G.; Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons.

Duncan, J. M. (2000). Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 126, n. 4, p. 307–316.

Froude, M. J.; Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 18, n. 8, p. 2161–2181.

Griffiths, D. V.; Huang, J.; Fenton, G. A. (2011). Probabilistic infinite slope analysis. *Computers and Geotechnics*, v. 38, n. 4, p. 577–584.

Hasofer, A. M.; Lind, N. C. (1974). Exact and Invariant Second-Moment Code Format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, v. 100, n. 1, p. 111–121.

Javankhoshdel, S.; Bathurst, R. J. (2016). Influence of cross correlation between soil parameters on probability of failure of simple cohesive and c-ϕ slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 53, n. 5, p. 839–853.

Jiang, S. -H.; Huang, J.; Griffiths, D. V.; Deng, Z. -P. (2022). Advances in reliability and risk analyses of slopes in spatially variable soils: A state-of-the-art review. *Computers and Geotechnics*, v. 141, p. 104498.

Lei, Y. *et al.* (2023). Time capsule for landslide risk assessment. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, v. 17, n. 4, p. 613–634.

Li, D.-Q. *et al.* (2016). Response surface methods for slope reliability analysis: Review and comparison. *Special Issue on Probabilistic and Soft Computing Methods for Engineering Geology*, v. 203, p. 3–14.

Li, J.-P. *et al.* (2025). Probabilistic evaluation of landslide influence zones considering stratigraphic dips and nonstationarity of soil properties. *Computers and Geotechnics*, v. 177, p. 106815.

Liu, L.-L. *et al.* (2018). Simplified framework for system reliability analysis of slopes in spatially variable soils. *Engineering Geology*, v. 239, p. 330–343.

Liu, X. *et al.* (2020). Adaptive Monte Carlo simulation method for system reliability analysis of slope stability based on limit equilibrium methods. *Engineering Geology*, v. 264, p. 105384.

Melchers, R. E.; Beck, A. T. (2018). *Structural reliability analysis and prediction*. John Wiley & Sons.

Nataf, A. (1962). *Étude graphique de détermination de distributions de probabilités planes dont les marges sont données*. Em: Annales de l-ISUP.

Nogueira, C. G. (2010). *Desenvolvimento de modelos mecânicos, de confiabilidade e de otimização para aplicação em estruturas de concreto armado*. Tese de Doutorado. Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 353 p.

Pereira, J. M.; Assis, H. B.; Nogueira, C. G. (2024). *Avaliação do desempenho do método de equilíbrio limite de Correia em análises probabilísticas de estabilidade de taludes via FORM*. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica - COBRAMSEG, Balneário Camboriú.

Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, v. 40, n. 10, p. 927–930.

Phoon, K. K. (2020). The story of statistics in geotechnical engineering. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, v. 14, n. 1, p. 3–25.

Phoon, K. K.; Kulhawy, F. H. (1999a). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 36, n. 4, p. 612–624.

Phoon, K. K.; Kulhawy, F. H. (1999b). Evaluation of geotechnical property variability. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 36, n. 4, p. 625–639.

Rackwitz, R. (2001). Reliability analysis—a review and some perspectives. *Structural Safety*, v. 23, n. 4, p. 365–395.

Rackwitz, R.; Fiessler, B. (1978). Structural reliability under combined random load sequences. *Computers & Structures*, v. 9, n. 5, p. 489–494.

Siacara, A. T.; Napa-García, G. F.; Beck, A. T.; Futai, M. M. (2020). Reliability analysis of earth dams using direct coupling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, v. 12, n. 2, p. 366–380.

Wang, Y.; Akeju, O. V. (2016). Quantifying the cross-correlation between effective cohesion and friction angle of soil from limited site-specific data. *Soils and Foundations*, v. 56, n. 6, p. 1055–1070.

Whitman, R. V. (2000). Organizing and Evaluating Uncertainty in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 126, n. 7, p. 583–593.