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/COBRAMSEG2026.4/84

Impacto da Variabilidade Espacial nas Análises Probabilísticas de Estabilidade de Taludes de Solos

Filipe Guarnieri Xavier
Doutorando, Engenharia de Estruturas e Geotécnica (PEF), Universidade de São Paulo (USP) e Engenheiro Geotécnico, Knight Piésold, Belo Horizonte, Brasil, fxavier@knightpiesold.com

Ana Luiza Mendes Halabi
Doutorando, PEF, USP, São Paulo, Brasil e PIMENTA DE ÁVILA, Belo Horizonte, Brasil, halabi.analu@gmail.com

Natan Dalrio Gomes
Mestrando, PEF, USP, São Paulo, Brasil, natan.dalrio@usp.br

Bernardo Jiménez
Doutorando, PEF, USP, São Paulo, Brasil, b.jimenez.geotech@gmail.com

Adrian Torrico Siacara
Professor, PEF, USP, São Paulo, Brasil, adrian.torrico@usp.br

RESUMO: A avaliação da estabilidade de taludes constitui uma etapa essencial nos estudos geotécnicos. Historicamente, essa análise tem sido conduzida por meio de métodos determinísticos, que se baseiam em um valor único do Fator de Segurança (FS). Tal abordagem nem sempre é capaz de representar de forma realista as incertezas associadas à variabilidade e à anisotropia dos materiais envolvidos. Assim, surgem as análises probabilísticas tradicionais associadas ao coeficiente de variação e ao tipo de função de distribuição acumulada dos materiais, denominadas na literatura como análises de Variável Aleatória (Random Variable – RV). Não obstante, além de haver uma variação intrínseca, é fundamental considerar os processos geológicos, ambientais e físico-químicos que influenciam o comportamento dos solos. Dessa forma, as propriedades geotécnicas apresentam variações ao longo do espaço, mesmo dentro de uma mesma unidade geológica. O método que incorpora esses fenômenos é conhecido como Campo Aleatório (Random Field – RF). Neste trabalho, apresentamos uma comparação entre as análises baseadas em RV e em RF, empregando métodos clássicos de confiabilidade fundamentados na Simulação de Monte Carlo (MCS). Para a abordagem RV, utilizamos o método de importância de Monte Carlo (iMCS), enquanto para a abordagem RF adotamos a função de covariância Markoviana. Modelamos o campo aleatório por meio da Subdivisão de Média Local (LAS). Implementamos os métodos e procedimentos descritos no software determinístico Slide 2 (Rocscience) utilizando códigos de programação em linguagem Python. Essa metodologia nos possibilita a comparação dos resultados probabilísticos em bases equivalentes e, de forma complementar, nos permite avaliar a estabilidade do talude considerando abordagens determinísticas e probabilísticas da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Campo Aleatório, Variável Aleatória, Análise Probabilística, Estabilidade de Taludes, Estabilidade.

ABSTRACT Slope stability assessment is a critical component of geotechnical studies. Historically, this analysis has been conducted using deterministic methods relying on a single Factor of Safety (FS). However, this approach often fails to realistically represent the uncertainties associated with material variability and anisotropy. Consequently, traditional probabilistic analyses—referred to as Random Variable (RV) approaches—have emerged, incorporating coefficients of variation and probability density functions. Nevertheless, beyond intrinsic parameter variation, it is crucial to consider the geological, environmental, and physico-chemical processes that structure the soil. Geotechnical properties exhibit spatial variability, showing correlation between neighboring points even within a single geological unit. The method capable of modeling

these phenomena is known as Random Field (RF). In this paper, we present a comparative study between RV and RF analyses using reliability methods based on Monte Carlo Simulation (MCS). For the RV approach, we employed Importance Sampling (iMCS), whereas for the RF approach, we adopted a Markovian covariance function, and we modeled the field via Local Average Subdivision (LAS). We integrated the procedures into the deterministic software Slide 2 (Rocscience) using Python scripts. This methodology enables us to conduct a rigorous comparison of probabilistic results on equivalent bases and to assess slope stability considering both deterministic and probabilistic structural approaches.

KEYWORDS: Random Fields, Random Variables, Probabilistic Analysis, Slope Stability, Stability.

1 INTRODUÇÃO

A realização de análises de estabilidade de taludes constitui uma etapa fundamental na engenharia geotécnica, imprescindível tanto para garantir a segurança operacional quanto para assegurar a viabilidade econômica de projetos de infraestrutura e mineração. Tradicionalmente, a prática de engenharia adota métodos determinísticos baseados na Mecânica dos Solos clássica, utilizando um único indicador de desempenho — o Fator de Segurança (FS) — para atestar a estabilidade, conforme preconizado nas normas e legislações vigentes.

O FS é calculado assumindo valores fixos e constantes para a resistência ao cisalhamento do maciço. Entretanto, essa abordagem determinística simplifica excessivamente a realidade, pois trata o solo como um material homogêneo. Na natureza, as características dos solos e rochas, incluindo parâmetros de resistência e comportamento mecânico, apresentam variabilidade natural e anisotropia significativas. Tais incertezas tornam o FS determinístico, por vezes, uma medida insuficiente de segurança, incapaz de quantificar o risco real de ruptura.

Essa variabilidade é uma característica intrínseca aos geomateriais, decorrente da complexidade de sua gênese geológica. A heterogeneidade dos parâmetros em um maciço é atribuída ao transporte de sedimentos por distintos agentes, bem como aos históricos de tensão, pressão e temperatura aos quais a rocha matriz e o regolito foram submetidos (Xavier, 2025). Esses processos resultam em flutuações espaciais nos parâmetros de deformabilidade, permeabilidade e resistência, influenciando diretamente o desempenho da estrutura sob variadas condições de carregamento e intemperismo.

Reconhecendo que as incertezas são inevitáveis, a literatura geotécnica evoluiu para incorporar análises probabilísticas. Inicialmente, consolidou-se a abordagem de Variáveis Aleatórias (Random Variables – RV) (Phoon, 2008; Siacara et al., 2022). Neste método, os parâmetros do solo são tratados como funções de distribuição de probabilidade (PDF), permitindo calcular a Probabilidade de Falha (Pf) e o Índice de Confiabilidade (β).

Não obstante, a abordagem RV possui uma limitação geoestatistica, ela desconsidera a localização espacial da incerteza. Ao utilizar RV, assume-se implicitamente que a variabilidade é perfeitamente correlacionada (o solo muda de resistência uniformemente em todo o talude) ou que não há correlação alguma espacial. Assim, a avaliação via Campos Aleatórios (Random Fields – RF). Diferentemente da RV, o RF modela a variabilidade espacial considerando a estrutura de correlação do solo (autocorrelação). O presente traz um comparativo dos indicadores de desempenho quanto adiciona diferentes metodologias probabilísticas dos materiais.

2 METODOLOGIA

A crescente interoperabilidade entre softwares de engenharia geotécnica e linguagens de programação tem impulsionado o desenvolvimento de novas metodologias de análise (Crisp and Davies, 2022). Esse acoplamento expande os recursos nativos das ferramentas comerciais, permitindo otimizações de projeto e aceleração de cálculos que seriam inviáveis manualmente. Embora alguns programas ofereçam uma Interface de Programação de Aplicativos (API) para comunicação direta, essa funcionalidade não é universal. Contudo, a maioria dos softwares armazena a definição dos modelos em arquivos de texto (ASCII/XML). Neste trabalho, explorou-se essa característica desenvolvendo códigos em Python capazes de ler, modificar e reescrever os arquivos de entrada do software Slide2. Essa automação permite variar sistematicamente a geometria, o posicionamento das camadas e as grandezas das solicitações, gerando milhares de cenários de forma eficiente.

Tal metodologia liberta o usuário das limitações de "caixa preta" dos códigos proprietários, oferecendo controle total sobre o processo de modelagem estocástica.

Na abordagem de Variável Aleatória (RV), as propriedades geotécnicas são tratadas como grandezas globais incertas, desconsiderando a sua distribuição espacial. Matematicamente, essas propriedades são representadas por um vetor aleatório X= {X1, X2, …, Xn}, plenamente caracterizado por uma função de densidade de probabilidade conjunta (PDF), denotada como $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{x})$ (Siacara et al., 2020). Nesta concepção, assume-se implicitamente que o solo é homogêneo dentro de cada unidade litológica para uma dada realização estatística (Guo et al., 2021). Ou seja, em cada simulação de Monte Carlo, atribui-se um único valor de resistência (coesão e atrito) para toda a camada, implicando uma correlação espacial perfeita (infinita). Embora computacionalmente eficiente, o método RV falha em capturar a variabilidade local, não permitindo que a superfície de ruptura interaja com heterogeneidades específicas do maciço.

Assim, abordagem de Campo Aleatório (RF) é introduzida para modelar explicitamente a variabilidade espacial e a estrutura de correlação dos materiais geológicos. Diferentemente do modelo RV, no RF as propriedades do solo são funções estocásticas das coordenadas espaciais, $Z(s)$, onde a correlação entre dois pontos decai com a distância de separação, governada pela escala de flutuação (θ). Para operacionalizar essa abordagem, utilizou-se o método da Subdivisão de Média Local (LAS), que discretiza o campo contínuo em uma malha de elementos finitos ou fatias, preservando as estatísticas locais. O RF permiti que o algoritmo de equilíbrio limite indique pontos de fraqueza ao longo da estrutura. A Figura 1 elucida o fluxo de trabalho proposto para o RF e RV.

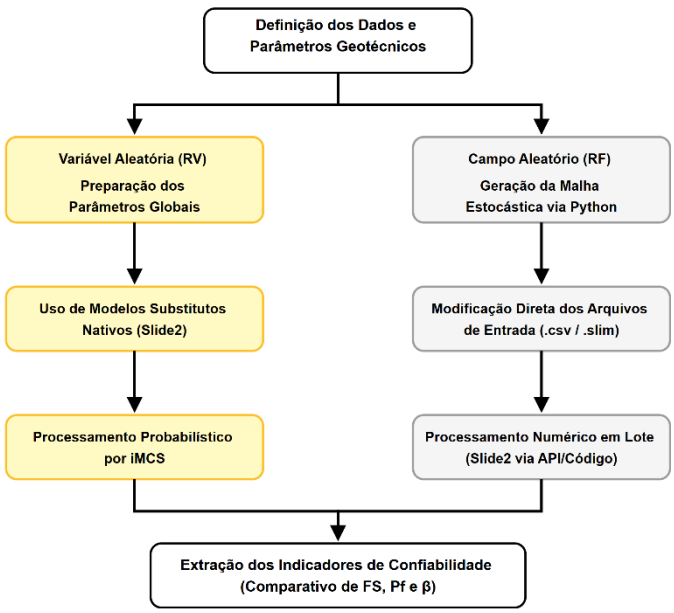


Figura 1: Detalhes do fluxo de trabalho proposto.

A formulação inicia com a definição de uma função de estado limite na qual frequentemente é determinada como função do estado limite, G(X), na qual delimita o domínio de segurança e o de falha no sistema. No método de equilíbrio limites A condição de falha do talude é definida pela situação em que o FS é menor ou igual a 1,0 (Madsen et al., 1986). O FS é obtido por meio de simulações numéricas no software. Portanto, a função de estado limite no espaço das variáveis físicas, X, é dada pela equação abaixo:

$$G(X) = FS(X) - 1 \tag{1}$$

Onde:

- $G(X) \leq 0$representa o estado de falha.
- $G(X) > 0$ representa o estado de segurança.
- $G(X) = 0$ define a superfície de estado limite.

O MCS simula o sistema por repetidas amostragens, ele gera muitas amostras do vetor aleatório u a partir de uma distribuição normal padrão, para cada amostra avalia sua função de estado limite integrando o software, conta-se o número de falhas ($G(X) \leq 0$) e a probabilidade de falha é estimada em porcentagem a partir da razão do quantitativo total de resultados frente aos que indicaram falhas.

Para modelar a variabilidade espacial inerente às propriedades de resistência do solo, foram gerados campos aleatórios para o ângulo de atrito efetivo ($\emptyset$) e a coesão efetiva (c). A automação desse processo foi realizada por meio de scripts desenvolvidos em Python.

A definição dos parâmetros estatísticos de entrada, média, desvio padrão, tipo de distribuição de probabilidade e comprimentos de correlação espacial θx e θy, sendo estruturada em um arquivo de dados .csv (Comma-Separated Values). Essa abordagem, editável via planilhas eletrônicas (e.g., Excel), garante a reprodutibilidade dos cenários e facilita a modificação sistemática das variáveis de projeto.

Para a discretização do campo estocástico contínuo, adotou-se o método da Subdivisão de Média Local (Local Average Subdivision - LAS), conforme proposto por Fenton e Vanmarcke (1990). Este algoritmo é particularmente eficiente para malhas regulares e preserva as estatísticas locais médias (momento de segunda ordem), sendo ideal para análises probabilísticas acopladas a métodos numéricos.

Assim, a avaliação da função g(u) é um processo computacional que envolve a comunicação entre os scripts Python e o executável do Slide2. Este procedimento, envolve a seguinte segmentação:

1. Geração de Parâmetros: O vetor u é transformado para o espaço físico x;

2. Modificação do Modelo: Uma cópia do arquivo de modelo base (“.slim”) é criada e os parâmetros geotécnicos são atualizados;

3. Execução da Simulação: O script chama o executável de linha de comando do Slide2 (“aslidew.exe”);

4. Extração do Resultado: O script extrai o menor FS global do arquivo de saída para avaliar a função de estado limite.

3 ESTUDO DE CASO

Foi analisada a estabilidade de taludes utilizando o método de Morgenstern-Price. Esse método foi desenvolvido para obter resultados mais precisos, buscando superfícies de escorregamento não circulares que respeitem as condições de equilíbrio e de fronteira. Ele é considerado rigoroso e foi aplicado em conjunto com o método de busca, que utiliza superfícies não circulares com refinamento automático gerado pelo software Slide (versão 9.023). Esse método busca superfícies circulares em superfícies lineares por partes, subdividindo os arcos circulares. Essa abordagem visa melhorar significativamente os resultados, encontrando superfícies de deslizamento com fatores de segurança mais conservadores (Xavier, 2024).

Para obtenção dos parâmetros iniciais do modelo foi necessário realizar procedimentos indiretos como as correlações das sondagens, com intuito de atribuir parâmetros ligados a resistência de cisalhamento, intercepto de coesão e compressibilidade dos solos. Os cálculos dos ensaios de campo foram baseados na metodologia proposta por Schnaid e Odebrecht (2012). De acordo com esses autores, a energia teórica de queda livre transmitida do martelo para a haste não corresponde à energia nominal transmitida na prática. Portanto, é necessário fazer uma correção, especialmente em equipamentos manuais, onde essa energia atinge em média de 70% a 80% da teórica. Para garantir uma abordagem conservadora, todas as estimativas neste estudo serão corrigidas utilizando o fator de 70% (Xavier, 2024).

O problema probabilístico considerou seis variáveis aleatórias da seção típica, assumindo uma distribuição lognormal. O desvio padrão e a covariância foram encontradas conforme os resultados obtidos das correlações com o Nspt. Já a covariância do peso específico foi adotada como 10% conforme referências bibliográficas ((Lacasse e Nadim (1997) e Duncan (2000)). A Tabela 1 traz um resumo dos valores encontrados e adotados para as variáveis.

Tabela 1: Variáveis adotada no estudo.

Estratigrafia	Variável	Distribuição	Média (μ)	Desvio Padrão (σ)

Solo Residual	c (kPa)	Normal	14,9	6,4
	ϕ(º)	Normal	31,7	3,2
	γ (kN/m^3)	Normal	17	1,7
Saprólito	c (kPa)	Normal	21,15	5,92
	ϕ(º)	Normal	38,15	3,05
	γ (kN/m^3)	Normal	18	1,8

Para a confecção da estratigrafia das seções, foram utilizadas informações obtidas de sondagens mistas realizadas no topo e na base do talude. A partir das informações obtidas com as sondagens e por meio da descrição dos testemunhos confeccionou-se um modelo geológico estratigráfico implícito utilizando ferramentas como funções de base radial e distâncias assinaladas para geração das superfícies através do software Leapfrog. A partir desse modelo gerou-se uma condição de contorno na qual foi exportada como cenário único e adotada para as análises determinísticas e probabilísticas tanto no software comercial quando acoplada com a linguagem de programação.

4 RESULTADO

Na abordagem de Campo Aleatório, a estrutura de variabilidade espacial foi definida por uma função de covariância Markoviana (exponencial), capaz de representar a perda de correlação entre propriedades do solo com o aumento da distância de separação.

Para garantir a estabilidade estatística e a convergência da Probabilidade de Falha (Pf) estimada, o número de realizações na Simulação foi fixado em 10.000 iterações. Seguindo as seguintes flutuações apresentadas na conforme referências apresentada pelo próprio software.

Tabela 2: Escalas de flutuação para matriz siltosa conforme a literatura.

Parâmetro	**Símbolo**	**Valor Adotado**	**Unidade**	**Referência**
Escala de Flutuação Horizontal	θx	33,2	m	Camini (2020)
Escala de Flutuação Vertical	θy	2,08	m	Camini (2020)

A Figura 2 mostra a malha de um parâmetro conforme a metodologia supracitada. Nota-se que a malha se mostrou com uma alta variabilidade conforme as escalas de flutuações propostas.

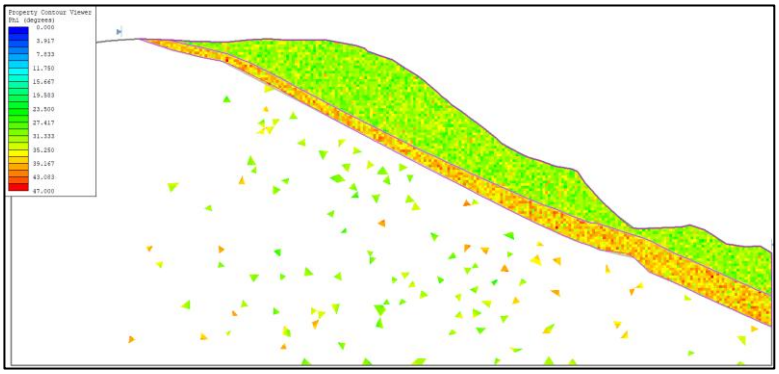


Figura 2: Malha dos parâmetros inserida na seção típica.

A Figura 3 e Figura 4 mostram os resultados obtidos após a análise.

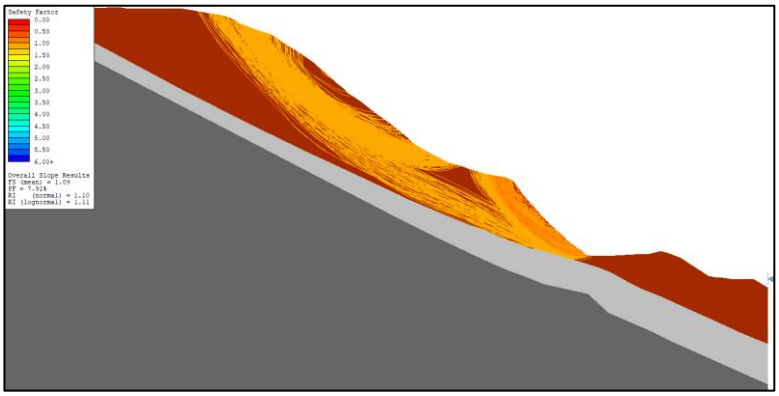


Figura 3: Resultado da análise sendo realizada pelo RV.

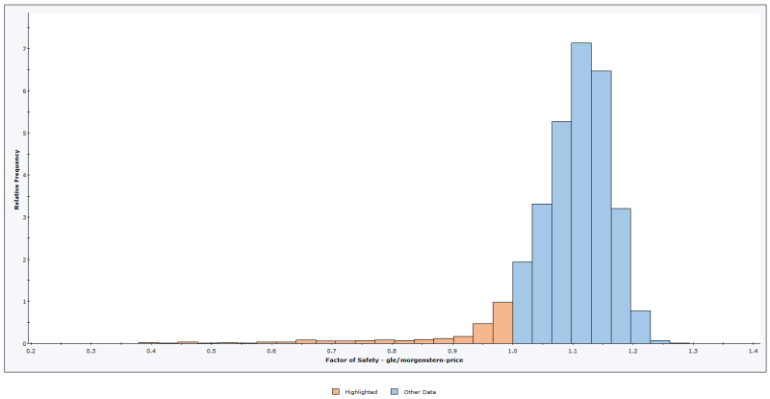


Figura 4: Histograma de frequências do FS.

Para a análise probabilística simplificada via Variável Aleatória, onde a variabilidade espacial é negligenciada (correlação perfeita), foram realizadas 2.000 iterações pelo método de Monte Carlo. O dimensionamento deste número de amostras fundamentou-se na premissa da "Regra dos 3-Sigma" ($\pm 3\sigma$), discutida por Dai e Wang (1992) e citada por Duncan (2014).

Segundo essa regra, para uma distribuição Normal, o intervalo compreendido entre a média menos três desvios padrões (-3σ) e a média mais três desvios padrões ($+3\sigma$) abrange aproximadamente 99,73% dos valores possíveis da variável. A Figura 5 mostra os resultados obtidos de RV por iMCS.

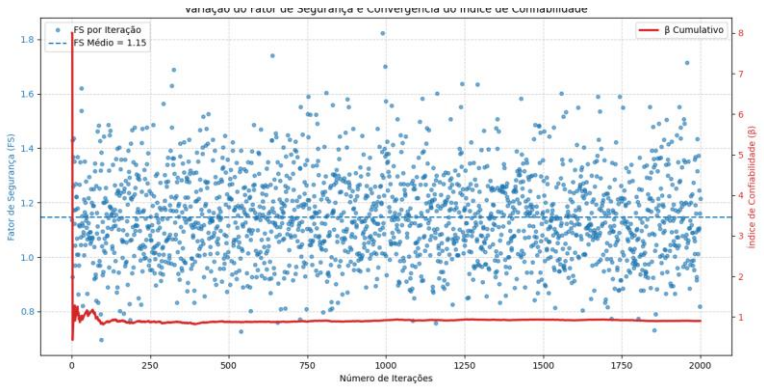


Figura 5: Variação do índice de confiabilidade por número de interações por iMCS.

A análise de MCS apresentou os seguintes resultados:

- FS – 1,15
- β – 0,8983
- Pf – 18,45%

A mostra os resultados obtidos comparando RF com RV.

Tabela 3: Comparação dos indicadores de confiabilidade RF e RV.

Indicador de Desempenho	RF	RV	Diferença %
Fator de Segurança Médio	1,09	1,15	5,2
Índice de Confiabilidade	1,1	0,89	23,6
Probabilidade de Falha	7,91	18,4	57
Número de Iterações	10.000	2.000	-

Os resultados evidenciam que a abordagem de Variável Aleatória (RV) produziu uma estimativa de Probabilidade de Falha consideravelmente mais severa (Pf = 18,4%) em comparação ao Campo Aleatório (Pf = 7,91%). Essa discrepância de aproximadamente 57% pode ser atribuída ao fenômeno da Redução de Variância por Média Espacial (Vanmarcke, 1983).

No modelo RV, assume-se implicitamente uma correlação espacial perfeita (infinita). Isso significa que, nas realizações onde os parâmetros de resistência são sorteados com valores baixos, todo o maciço terroso é considerado fraco simultaneamente, levando inevitavelmente à ruptura global. Essa premissa tende a ser excessivamente conservadora e física, pois ignora a variabilidade natural onde zonas de menor resistência são frequentemente suportadas por zonas adjacentes de maior resistência.

Por outro lado, o modelo RF, ao incorporar escalas de flutuação finitas e realistas, captura a heterogeneidade do solo. Embora o algoritmo de busca tenha encontrado superfícies críticas com FS pontuais menores (buscando o caminho de menor resistência através de pontos de fragilidade), o efeito global da média espacial prevaleceu. A superfície de ruptura precisa atravessar tanto zonas fracas quanto fortes, o que resulta em uma distribuição de Fatores de Segurança com menor dispersão (desvio padrão reduzido) e, consequentemente, uma menor área sob a cauda da distribuição de falha (FS < 1), elevando o Índice de Confiabilidade para $\beta = 1,1$.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou a estabilidade de um talude sob a ótica da confiabilidade geotécnica, comparando metodologias que tratam a incerteza do solo de formas distintas: a Variável Aleatória (RV) e o Campo Aleatório (RF). A análise simplificada via RV demonstrou ser significativamente mais conservadora, estimando uma probabilidade de falha de 18,4%. Esse resultado decorre da suposição de homogeneidade perfeita do maciço em cada realização, o que maximiza a variância global do sistema e superestima o risco de ruptura.

A aplicação de Campos Aleatórios, modelados via Subdivisão de Média Local (LAS) e covariância Markoviana, resultou em uma probabilidade de falha de 7,91%. A redução de mais de 50% no risco calculado demonstra que a consideração da variabilidade espacial e do efeito de média atua como um fator atenuante na probabilidade de colapso, fornecendo um cenário mais aderente à realidade física dos depósitos de solo.

Assim, a transição de análises determinísticas ou probabilísticas simplificadas para modelos de variabilidade espacial (RF) representa um avanço crucial para a geotecnia moderna, permitindo conciliar segurança e economia através de uma compreensão mais profunda da incerteza geológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Camini, R. (2020). Análise probabilística de estabilidade de taludes considerando a variabilidade espacial do solo. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF.

Crisp, M. P., & Davies, T. G. (2022). Automation of slope stability analysis using Python and commercial software APIs. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 16(1), 1-15.

Dai, S. H., & Wang, M. O. (1992). Reliability Analysis in Engineering Applications. Van Nostrand Reinhold, New York.

Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2014). Soil Strength and Slope Stability (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Fenton, G. A., & Vanmarcke, E. H. (1990). Simulation of random fields via local average subdivision. Journal of Engineering Mechanics, 116(8), 1733-1749.

Guo, Z., Dias, D., Pan, Q., & Zhang, L. (2021). Probabilistic stability analysis of an embankment on soft soil improving by deep mixed columns considering spatial variability. Engineering Geology, 293, 106322.

Lacasse, S., & Nadim, F. (1997). Uncertainties in characterizing soil properties. In: Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice. ASCE Geotechnical Special Publication No. 58, 49-75.

Madsen, H. O., Krenk, S., & Lind, N. C. (1986). Methods of Structural Safety. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Phoon, K. K. (2008). Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering: Computations and Applications. Taylor & Francis.

Schnaid, F., & Odebrecht, E. (2012). Ensaios de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.

Torrico Siacara, Adrian. Reliability-based design of an earth and concrete dam [tese]. São Paulo: , Escola Politécnica; 2021 [citado 2026-03-27]. doi:10.11606/T.3.2021.tde-22102021-094317.

Vanmarcke, E. H. (1983). Random Fields: Analysis and Synthesis. MIT Press, Cambridge, MA.

Xavier, F. G. (2024). Retroanálise probabilística bidimensional por equilíbrio limite de ruptura de talude no Morro da Forca em Ouro Preto/MG. In: XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG). Anais... Balneário Camboriú: ABMS

Xavier, F. G. (2025). Retroanálise de rompimento de talude com dados de sondagem: uma abordagem factível usando métodos probabilísticos e simulações computacionais. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.