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/COBRAMSEG2026.4/6

Análise Comparativa de Métodos de Confiabilidade na Estabilidade de Taludes: Avaliação Crítica do FOSM

Pedro Henrique Lopes Dal-Cól
Professor, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, eng.pedro.dalcol@uel.br

Raquel Souza Teixeira
Professora, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, raquel@uel.br

Adrian Torrico Siacara
Professor, Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, adrian.torrico@usp.br

RESUMO: Métodos de análise de confiabilidade têm sido empregados na avaliação de estabilidade de taludes por permitirem quantificação de incertezas nos parâmetros geotécnicos. O Método de Primeira Ordem e Segundo Momento (FOSM - *First Order Second Moment*) destaca-se pela simplicidade, sendo utilizado em contextos práticos. Sua precisão tem sido questionada devido à linearização no ponto médio das distribuições, que pode não capturar adequadamente a geometria da superfície de falha. Este trabalho avalia três métodos – FOSM, Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM - *First Order Reliability Method*) e Monte Carlo com Amostragem por Importância (ISMC - *Importance Sampling Monte Carlo*) – aplicados a quatro cenários geotécnicos representativos de solos tropicais brasileiros, combinando dois tipos de solo (arenoso e argiloso) e duas condições de saturação (saturado e não saturado). Em termos probabilísticos, o FOSM apresentou desvios elevados e não regulares, com erros no índice de confiabilidade (β) variando de 3 % a 255 %, em relação ao ISMC. Nos casos saturados, a magnitude do erro está relacionada à não-linearidade acentuada da equação de desempenho na região crítica. Conclui-se que o FOSM não é recomendado para análise de confiabilidade de taludes de terra próximos à ruptura, devido à magnitude e inconsistência dos erros.

PALAVRAS-CHAVE: Confiabilidade Estrutural; Taludes de terra; Equilíbrio Limite; Monte Carlo.

ABSTRACT: Reliability analysis methods have been used in slope stability assessment because they allow the quantification of uncertainties in geotechnical parameters. The First Order Second Moment (FOSM) method stands out for its simplicity and is used in practical contexts. Its accuracy has been questioned due to the linearization at the midpoint of the distributions, which may not adequately capture the geometry of the failure surface. This study evaluates three methods – FOSM, First Order Reliability Method (FORM) and Importance Sampling Monte Carlo (ISMC) – applied to four geotechnical scenarios representative of Brazilian tropical soils, combining two soil types (sandy and clayey) and two saturation conditions (saturated and unsaturated). In probabilistic terms, FOSM presented high and irregular deviations, with errors in the reliability index (β) ranging from 3 % to 255 % relative to ISMC. In the saturated cases, the magnitude of the error is related to the marked nonlinearity of the performance equation in the critical region. It is concluded that FOSM is not recommended for the reliability analysis of earth slopes close to failure, due to the magnitude and inconsistency of the errors.

KEYWORDS**:** Structural Reliability; Earth Slopes; Limit Equilibrium; Monte Carlo.

1 INTRODUÇÃO

A análise de estabilidade de taludes tradicionalmente emprega o Fator de Segurança (FS) determinístico como indicador de segurança. Apesar de amplamente consolidado na prática de engenharia, este critério não considera explicitamente as incertezas inerentes aos parâmetros geotécnicos, tornando difícil a quantificação objetiva do risco de ruptura. Métodos probabilísticos de confiabilidade têm sido crescentemente adotados por permitirem avaliar a Probabilidade de Falha (P_f) e o Índice de Confiabilidade (β), fornecendo medidas mais robustas de segurança (Phoon, 2017; Phoon, 2023).

O Método de Primeira Ordem e Segundo Momento (FOSM) destaca-se pela simplicidade conceitual e baixo custo computacional. Este método lineariza a função de desempenho no ponto médio das variáveis aleatórias utilizando apenas informações de primeira ordem (derivadas) e segundo momento (variâncias). Por sua praticidade, o FOSM tem sido amplamente utilizado em estudos preliminares de confiabilidade (Huang et al., 2017). No entanto, a linearização no ponto médio (não otimizado) pode não capturar adequadamente a geometria da superfície de falha, especialmente em problemas com não-linearidades significativas ou distribuições fortemente não-gaussianas. Alguns resultados tem demonstrado desvios substanciais entre β e P_f obtidos por FOSM e outros métodos mais robustos.

O Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) surgiu como evolução do FOSM, mantendo a linearização de primeira ordem, mas otimizando o ponto de linearização. O método busca iterativamente o *design point* ($\boldsymbol{X}^*$), definido como o ponto mais provável de ocorrer entre todos os pontos que levam à falha ($g(\boldsymbol{X}) = 0$), ou equivalentemente, o ponto de menor distância à origem no espaço normal padrão. Esta otimização, realizada no espaço normal padrão através do algoritmo HLRF (ou iHLRF), tende a fornecer resultados mais precisos que o FOSM (Ji et al., 2018).

Métodos de simulação Monte Carlo estimam a P_f através de integração numérica direta do espaço de falha no domínio probabilístico, gerando amostras aleatórias das variáveis e contabilizando a proporção que resulta em falha, sendo considerados referência para análises de confiabilidade por não requererem aproximações sobre a linearidade ou geometria da superfície de falha. O Monte Carlo com Amostragem por Importância (ISMC) concentra as amostras das simulações na região crítica (ao redor do *design point*), reduzindo significativamente o número de simulações necessárias comparado ao Monte Carlo bruto (Song e Kawai, 2023).

No contexto de taludes não saturados, a inclusão da sucção matricial como variável adicional aumenta a dimensionalidade e a complexidade do problema de confiabilidade. A sucção contribui para a resistência ao cisalhamento, sendo comumente quantificada através do ângulo φ^b pelo modelo de Fredlund et al. (1978), afetando significativamente a estabilidade. A avaliação de métodos de confiabilidade neste contexto torna-se particularmente relevante (Khosravi-Hajivand e Johari, 2024).

Este trabalho visa avaliar comparativamente a acurácia, consistência e eficiência dos métodos FOSM, FORM e ISMC aplicados à estabilidade de taludes não saturados, utilizando análises numéricas em *software* geotécnico e ambiente de programação baseado em Matlab e Python.

2 MÉTODO

2.1 Casos de Estudo

Foram analisados quatro cenários combinando dois tipos de solo tropical (arenoso e argiloso) e duas condições de saturação (saturado e não saturado). A geometria consiste em talude homogêneo de 10 m de altura com inclinação 2V:1H (63,4°), analisado pelo método de Morgenstern-Price considerando superfície de ruptura circular. Os solos arenoso e argiloso apresentam parâmetros geotécnicos representativos de solos lateríticos brasileiros, conforme apresentado na Tabela 1, sendo utilizados os valores médios para a análise determinística. Nos casos saturados, considerou-se saturação completa do maciço. Nos casos não saturados, adotou-se perfil de sucção variável com a profundidade, atingindo valores até 18 kPa na superfície, conforme dados de Dal-Cól (2022). A distribuição da sucção pode ser vista na Figura 1.

A consideração de condições não saturadas é particularmente relevante em regiões tropicais, onde a variação sazonal do nível freático e a presença de sucção matricial influenciam significativamente a estabilidade (Camapum de Carvalho e Gitirana Jr., 2021). Em todos os casos o nível d'água situa-se a 4 m de profundidade em relação ao pé do talude.

Os parâmetros estatísticos foram definidos com base em valores típicos reportados na literatura geotécnica (Cherubini, 2000; Phoon e Kulhawy, 1999; Duncan, 2000). A Tabela 1 apresenta os parâmetros estatísticos de média (μ) e Coeficiente de Variação (CoV) para cada material e parâmetro geotécnico. Adotaram-se distribuições lognormais (LN) para todos os parâmetros geotécnicos. A coesão (c') apresenta maior variabilidade comparada ao ângulo de atrito (φ'), refletindo maior incerteza na sua determinação

experimental e ocorrência em campo. O peso específico (γ) apresenta baixa variabilidade devido à sua natureza mais previsível. A correlação negativa entre c' e φ' é definida por $\rho_{c'-\varphi'} = -0{,}5$.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos e variabilidade.

Parâmetros	Arenoso		Argiloso	
dos Materiais	μ	CoV (%)	μ	CoV (%)
γ (kN/m³)	16	5	18	7
c' (kPa)	9	40	15	30
φ' (°)	35	15	28	10
φ^b (°)	35	20	28	20

2.2 Métodos de Confiabilidade

O método FOSM aplicado lineariza a função de desempenho $g(\boldsymbol{X})$ no ponto médio μ das variáveis aleatórias através de expansão em série de Taylor de primeira ordem. O índice de confiabilidade foi calculado como $\beta = \mu_g/\sigma_g$, onde μ_g e σ_g são a média e desvio padrão de $g(\boldsymbol{X})$, obtidos por propagação de incertezas. As derivadas parciais $\partial g/\partial \boldsymbol{X_i}$ foram calculadas numericamente por diferenças finitas centrais com perturbação de 1 % do valor médio.

O método FORM busca iterativamente o design point $\boldsymbol{X}^*$ (ponto mais provável de falha) através do algoritmo iHLRF (*improved* Hasofer-Lind-Rackwitz-Fiessler) no espaço normal padrão $\boldsymbol{U}$. O ponto $\boldsymbol{X}^*$ minimiza a distância de Hasofer-Lind à origem no espaço U, sujeito à restrição $g(\boldsymbol{X}) = 0$. O índice de confiabilidade é $\beta = \|\boldsymbol{U}^*\|$. Foi utilizado critério de convergência: $\left\|\boldsymbol{U^{k+1}} - \boldsymbol{U^k}\right\| < 10^{-6}$.

O método ISMC emprega amostragem por importância centrada no *design point* obtido pelo FORM, utilizando distribuição auxiliar gaussiana multivariada com média em $\boldsymbol{X}^*$ e matriz de covariância igual à matriz de correlação original. Foi aplicado critério de parada com $CoV\left(P_f\right) < 8$ %, em lotes de 50 amostras.

2.3 Implementação Computacional

A implementação foi realizada em MATLAB integrado com UQLab para realização das análises de confiabilidade. Os módulos SLOPE/W e SEEP/W do GeoStudio foram acoplados ao MATLAB através de *script* Python intermediário, permitindo automatização do cálculo do FS a cada avaliação da função de desempenho. Abordagem nesse sentido pode ser vista em Siacara et al. (2022, 2024a, 2024b). A função de desempenho definida foi $g(\boldsymbol{X}) = FS(c', \varphi', \gamma, \varphi^b) - 1$, onde FS é calculado para cada realização das variáveis aleatórias. Esta arquitetura possibilitou a execução automatizada das análises probabilísticas. Foram desenvolvidos *scripts* para execução das análises de confiabilidade, validação e processamento dos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Determinística

A Figura 1 mostra o resultado das análises de estabilidade determinísticas, apresentando a geometria dos taludes, FS obtido, superfícies críticas de ruptura e isolinhas de poropressão (sucção) para os quatro cenários analisados: (a) Arenoso saturado; (b) Arenoso não saturado; (c) Argiloso saturado, (d) Argiloso não saturado.

A análise determinística indica que os taludes saturados apresentam valores de FS no limite da estabilidade ($FS \approx 1{,}0$ a 1,1), configurando iminência de ruptura, situação crítica pelo critério determinístico tradicional ($FS \geq 1{,}5$). A inclusão da sucção matricial aumenta substancialmente a estabilidade (FS = 1,4), porém ainda abaixo do critério usual de segurança.

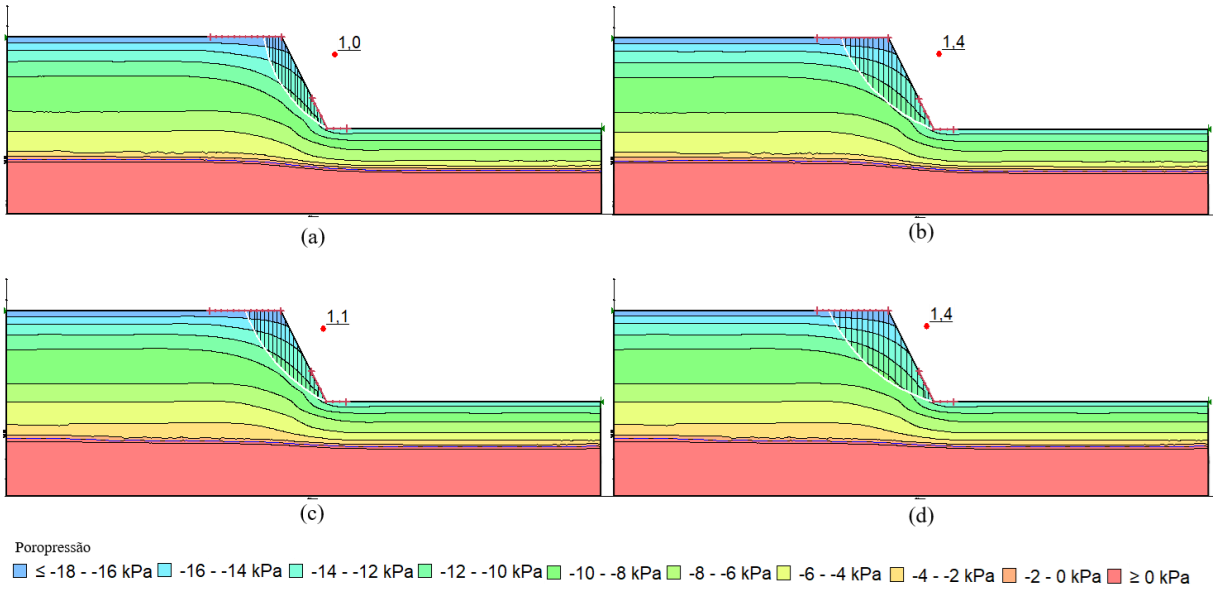


Figura 1. Resultados Determinísticos dos 4 Modelos.

3.2 Análises de Confiabilidade

A Tabela 2 apresenta os resultados das análises de confiabilidade.

Tabela 2. Métodos de Confiabilidade.

Modelo	Método	β	P_f	nº avaliação	Tempo (s)
Arenoso SAT	FOSM	0,327	$3{,}72\times10^{-1}$	7	96
	FORM	0,083	$4{,}67\times10^{-1}$	30	422
	ISMC	0,092	$4{,}63\times10^{-1}$	200	3653
Arenoso UNSAT	FOSM	2,952	$1{,}58\times10^{-3}$	9	155
	FORM	3,114	$9{,}23\times10^{-4}$	182	3318
	ISMC	3,196	$6{,}98\times10^{-4}$	950	15634
Argiloso SAT	FOSM	0,814	$2{,}08\times10^{-1}$	7	112
	FORM	0,544	$2{,}93\times10^{-1}$	20	313
	ISMC	0,560	$2{,}88\times10^{-1}$	200	2665
Argiloso UNSAT	FOSM	2,818	$2{,}42\times10^{-3}$	9	159
	FORM	2,760	$2{,}89\times10^{-3}$	175	3466
	ISMC	2,737	$3{,}10\times10^{-3}$	900	14160

Os taludes saturados apresentam índices de confiabilidade muito baixos (β < 0,6), indicando probabilidades de falha superiores a 27 %. Isto é consistente com os baixos fatores de segurança determinísticos ($FS \approx 1{,}0$ a 1,1). A consideração da sucção resulta em incremento significativo do índice de confiabilidade para $\beta \approx 2{,}7$ a 3,2 (P_f < 0,3 %), corroborando sua influência determinante na estabilidade do talude. A Tabela 3 apresenta um comparativo dos desvios entre os resultados dos métodos aplicados.

Os desvios do FOSM em relação ao ISMC revelam três aspectos críticos. Primeiro, a magnitude dos erros varia de 3 % a 255 %, com dois dos quatro casos, ambos saturados, apresentando erros iguais ou superiores a 45 %. No caso Arenoso SAT, o FOSM superestima β em 255 %, indicando P_f 20 % menor que o valor obtido por simulação. Segundo, o método não apresenta comportamento consistente – em três casos é não conservador (superestima segurança), mas em um caso é conservador (Arenoso UNSAT, erro de - 8 %),

sem critério a priori para prever o comportamento. Terceiro, nos taludes saturados com FS próximos a 1,0-1,1, o FOSM sistematicamente superestima a segurança com erros de + 45 % a + 255 %, constituindo imprecisão inaceitável para fins de projeto. A Figura 2 ilustra os desvios, evidenciando a ausência de padrão previsível.

Tabela 3. Desvios entre os Métodos.

Modelo	$\Delta\beta$ FOSM-ISMC	$\Delta\beta$ FORM-ISMC	ΔP_f FOSM-ISMC	ΔP_f FORM-ISMC
Arenoso SAT	+0,235 (+255%)	-0,009 (-10%)	-19,7%	+0,9%
Arenoso UNSAT	-0,244 (-8%)	-0,082 (-3%)	+126,4%	+32,2%
Argiloso SAT	+0,254 (+45%)	-0,016 (-3%)	-27,8%	+1,7%
Argiloso UNSAT	+0,081 (+3%)	+0,023 (+1%)	-21,9%	-6,8%

Nota**:** Para $\Delta\beta$, calculada como diferença simples (β_método1 - β_método2). Para os percentuais, calculados como [(variável_método1 - variável_método2)/variável_método2] × 100%. Valores positivos indicam superestimativa e negativos indicam subestimativa.

Vale observar que o erro absoluto em β é de magnitude semelhante em três dos quatro casos, independentemente da saturação; o que varia é o erro relativo, pois β varia de ≈ 0,09 a ≈ 3,2. Para β pequeno ($FS \approx 1$), esse erro traduz-se em grande desvio percentual de β e em viés não conservador. Já para β elevado (baixa probabilidade de falha), o mesmo erro absoluto produz grande desvio percentual de P_f (Arenoso UNSAT, + 126 %). A inadequação do FOSM concentra-se, portanto, nos cenários próximos à ruptura, onde o viés é simultaneamente grande e não conservador.

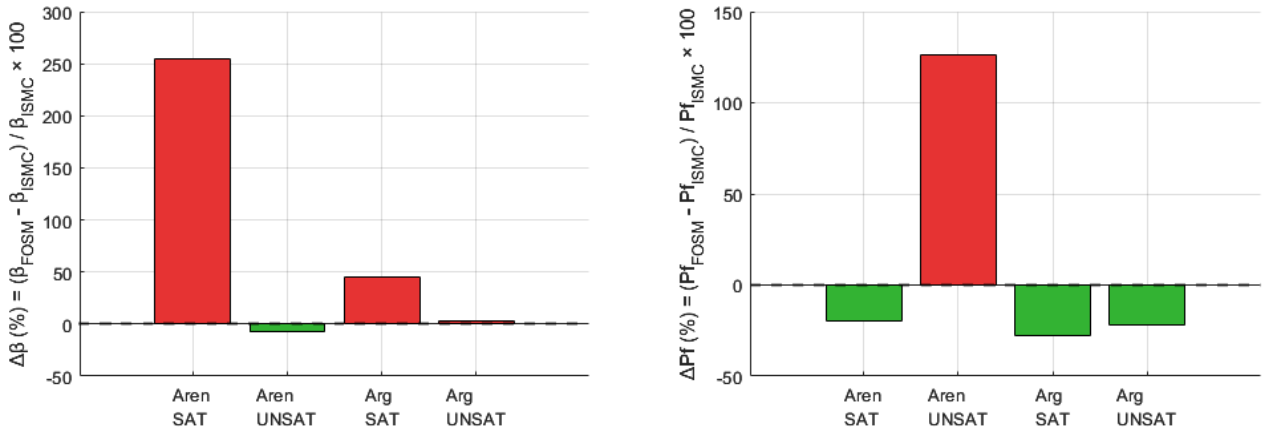


Figura 2. Desvios de β e erro de P_f do FOSM em relação ao ISMC.

O FORM apresentou desvios de - 10,2 %, - 2,6 %, - 2,8 % e + 0,9 % em relação ao ISMC para os quatro casos, com três apresentando erros inferiores a 3%. A correlação linear entre valores de β obtidos pelos dois métodos resultou em R^2 = 0,9989. O método foi predominantemente conservador, padrão desejável do ponto de vista de segurança. Esta concordância confirma que o FORM é adequado para este tipo de problema, capturando satisfatoriamente as não-linearidades moderadas da função de desempenho.

A fim de evidenciar a relação entre não-linearidade da superfície de falha e precisão dos métodos de primeira ordem, elaborou-se representação de $g(\boldsymbol{X}) = 0$ construída a partir das amostras do ISMC, incluindo os pontos de linearização FOSM (ponto médio μ) e FORM (*design point* $\boldsymbol{X}^*$). A superfície foi projetada no

espaço (c', φ') por concentrarem a maior influência no comportamento probabilístico, Figura 3.

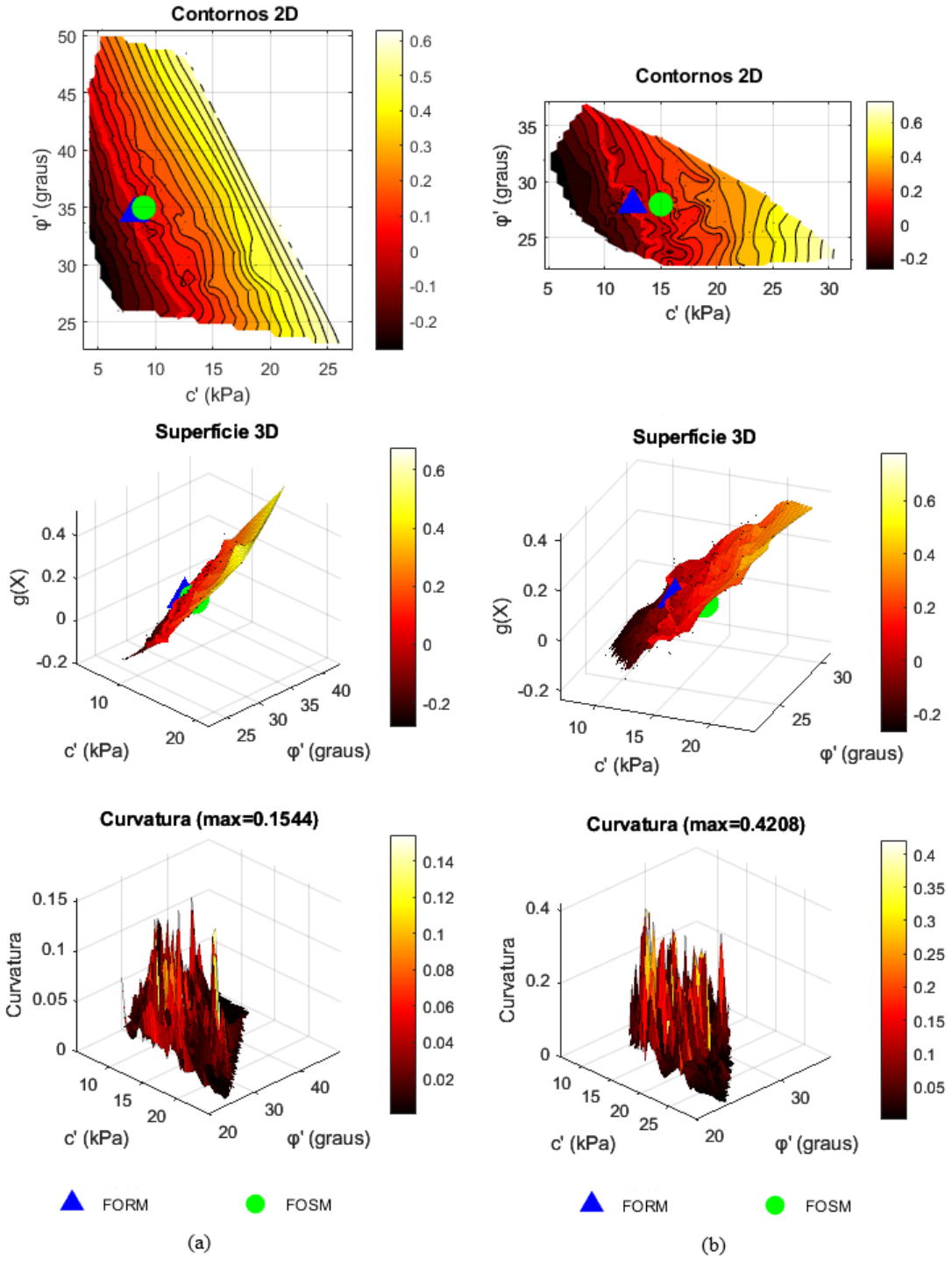


Figura 3. Representação da superfície de falha $g(\boldsymbol{X}) = 0$ no espaço $c' - \varphi'$: Contornos 2D, Superfícies 3D e Curvatura, com identificação do ponto de linearização FOSM e do *design point* FORM. (a) Arenoso SAT e (b) Argiloso SAT.

Essa representação foi apresentada exclusivamente para os casos saturados, pois a projeção bidimensional é representativa do problema completo: com apenas três variáveis aleatórias (γ, c', φ') e γ apresentando contribuição marginal (α < 0,07), o plano (c', φ') captura essencialmente toda a não-linearidade

relevante de $g(\boldsymbol{X})$. Nestes casos, observa-se curvatura acentuada da superfície na região crítica próxima a $g = 0$. A curvatura, calculada a partir das segundas derivadas de g em relação aos parâmetros, quantifica o desvio da superfície em relação a um plano, sendo um indicador direto da não-linearidade local. Apesar da proximidade geométrica entre os pontos FOSM e FORM ($\Delta c' < 1$ kPa, $\Delta\varphi' < 1°$), os erros resultantes são de 255 % (Arenoso SAT) e 45 % (Argiloso SAT), evidenciando que a não-linearidade da superfície compromete a linearização no ponto médio independentemente da distância ao design point.

Os casos não saturados não são apresentados graficamente pois envolvem quatro variáveis aleatórias ($\gamma, c', \varphi', \varphi^b$), sendo que o parâmetro φ^b apresenta contribuição significativa ao problema (α = 0,236 para Arenoso UNSAT, α = 0,141 para Argiloso UNSAT). Essa limitação da projeção bidimensional impede a visualização adequada da geometria da superfície de falha nos casos não saturados.

Nesses casos não saturados, o FOSM apresenta erros substancialmente menores (- 8 % e + 3 %). A análise das importâncias relativas revela um comportamento desarmônico entre os métodos. Cada método fornece uma medida própria de importância — os fatores de sensibilidade no FORM, a contribuição de cada variável à variância da função de desempenho no FOSM, e o coeficiente de correlação entre variável e desempenho no ISMC —, de modo que a comparação se baseia na ordenação das variáveis, não em seus valores absolutos. No Argiloso SAT, os três métodos concordam que a coesão (c′) é a variável dominante. No Argiloso UNSAT há discordância: o FORM aponta o ângulo de atrito (φ′) como mais importante, enquanto FOSM e ISMC mantêm a coesão como dominante. Esta discordância entre métodos evidencia a complexidade adicional introduzida pela sucção, representada pela dimensão φ^b no problema de confiabilidade, restringindo a aplicabilidade do FOSM.

A Figura 4 ilustra a convergência da P_f e o intervalo de confiança (IC) das análises ISMC para (a) Arenoso SAT e (b) Arenoso UNSAT, em função do número de amostras, em escala logarítmica. O IC de 95 %, representado pela faixa azul clara ao redor da curva, indica a região dentro da qual o verdadeiro valor da probabilidade de falha tem 95% de chance de se encontrar a cada estimativa. À medida que o número de amostras aumenta, a curva tende a se estabilizar e o IC de 95 % se estreita progressivamente, indicando maior precisão e confiabilidade na estimativa de P_f com o aumento do tamanho amostral. O $CoV(P_f)$ atingido na análise Arenoso SAT foi de 7,77 % e Arenoso UNSAT 7,79 %. Esse padrão se repete para todos os cenários.

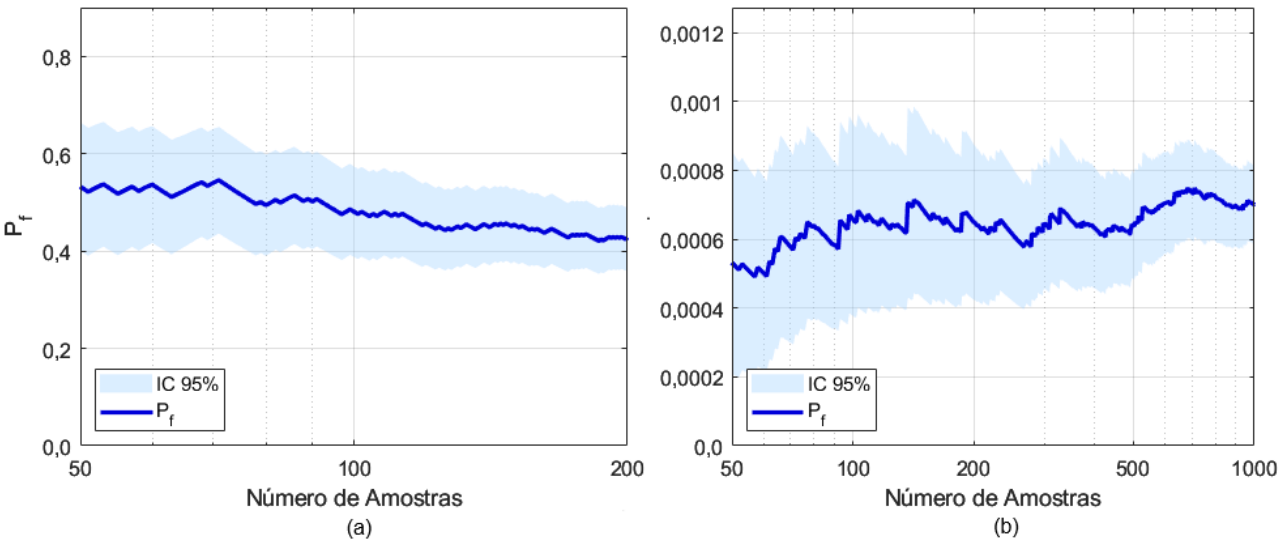


Figura 4. Convergência da P_f e IC de ISMC – (a) Arenoso SAT e (b) Arenoso UNSAT.

Ressalta-se que o custo computacional médio foi de 130 s para FOSM (8 avaliações), 1880 s para FORM (102 avaliações) e 9030 s para ISMC (560 avaliações). O FOSM é o mais rápido, porém inaceitavelmente impreciso. O FORM apresenta custo 14,4 × superior (~31 minutos), justificado pela precisão demonstrada. O ISMC requer ~69 × mais tempo (~2,5 horas), justificado como método de referência, mas desnecessariamente dispendioso para análises de rotina onde o FORM oferece precisão comparável com custo ~5 × inferior.

4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou comparativamente três métodos de análise de confiabilidade – FOSM, FORM e ISMC – aplicados à estabilidade de taludes, utilizando quatro cenários geotécnicos representativos de solos tropicais brasileiros. O FOSM apresentou desvios de 3 % a 255 % sem padrão previsível, sendo ora conservador, ora não conservador. Nos casos críticos (taludes saturados com $FS \approx 1{,}0$ a 1,1), o método superestimou a segurança, constituindo limitação importante no contexto prático. A visualização tridimensional da superfície de falha nos casos saturados evidencia que a não-linearidade acentuada de $g(\boldsymbol{X})$ na região crítica compromete a linearização no ponto médio, resultando em grandes desvios mesmo quando os pontos FOSM e FORM apresentam proximidade geométrica. O FORM apresentou desvios inferiores a 3 % em três dos quatro casos, com equilíbrio adequado entre precisão e custo computacional (~31 minutos versus ~2,5 horas do ISMC). Recomenda-se, portanto, evitar o FOSM em taludes próximos à ruptura (FS ≈ 1), regime em que superestima a segurança de forma imprevisível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Camapum De Carvalho, J., Gitirana Jr. G.F.N. (2021) Unsaturated soils in the context of tropical soils. *Soils and Rocks*, 44 (3) p. 1-25.

Cherubini, C. (2000) Reliability evaluation of shallow foundation bearing capacity on c′, φ′ soils. *Can. Geotech. J.* 37: 264–269.

Dal-Cól, P.H.L. (2022) *Efeito da Infiltração de Precipitação Pluvial na Análise de Estabilidade de Taludes de um Solo Argiloso e um Solo Arenoso Não Saturados da Região Norte do Estado do Paraná*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina, 202 p.

Duncan, J.M. (2000) Factor of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. ASCE, *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 4, 307-316.

Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., Widger, R.A. (1978) The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), p. 313–321.

Huang, C., Hami, A.E., Radi, B. (2017) Overview of Structural Reliability Analysis Methods — Part I: Local Reliability Methods**,** *Incertitudes et fiabilité des systèmes multiphysiques*, 17(1).

Ji, J., Zhang, C., Gao, Y., Kodikara, J. (2018) Effect of 2D spatial variability on slope reliability: A simplified FORM analysis. *Geoscience Frontiers*, 9, 1631-1638.

Khosravi-Hajivand, A., Johari, A. (2024) Unsaturated soil nailing wall system reliability analysis using random finite element. *Computers and Geotechnics*, 173, 106554.

Phoon, K., Kulhawy, F.H. (1999) Characterization of Geotechnical Variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36 (4), p. 612–624.

Phoon, K. (2017) Role of reliability calculations in geotechnical design. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 11(1), p. 4-21.

Phoon, K. (2023) What Geotechnical Engineers Want to Know about Reliability. *J. Risk Uncertainty Eng. Syst. Part A: Civ. Eng.*, 9(2): 0312300.

Siacara, A.T., Guo, X., Beck, A.T. (2024a) Probabilistic analysis of shallow foundation on earth slope using an active learning surrogate-centered procedure. *Computers and Geotechnics*, 175, 106659.

Siacara, A.T., Napa-García, G.F., Beck, A.T., Futai, M.M. (2022) Reliability analysis of an earth dam in operating conditions using direct coupling. *SN Applied Sciences*, 4(99).

Siacara, A.T., Napa-García, G.F., Beck, A.T., Futai, M.M. (2024b) Reliability Analysis of an Earth Dam Under Rainfall Effects. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10(59).

Song, S., Kawai, R. (2023) Monte Carlo and variance reduction methods for structural reliability analysis: A comprehensive review. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 73, 103479.