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/COBRAMSEG2026.2/1

Análise de Confiabilidade de Taludes Afetados pelo Clima com Solos Espacialmente Variáveis Usando Modelos Substitutos com Aprendizado Ativo

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

Xiangfeng Guo
Escola de Ciências e Engenharia Marinha, Universidade de Tecnologia do Sul da China, China, xfguo18@scut.edu.cn

André Teófilo Beck
Professor, Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, adrian.torrico@usp.br

RESUMO: Fatores climáticos, como precipitação, umidade relativa, evapotranspiração e temperatura, influenciam diretamente a estabilidade de taludes de terra, podendo representar riscos à infraestrutura e à segurança pública. Este estudo propõe um arcabouço probabilístico para avaliar a estabilidade de taludes sob a influência de variáveis climáticas. A metodologia é estruturada em cinco etapas: definição do problema, desenvolvimento do modelo numérico, análise determinística e duas etapas de análise probabilística considerando variáveis aleatórias (RVs) e campos aleatórios (RFs). As análises determinísticas utilizam o Método dos Elementos Finitos (FEM) e o Método do Equilíbrio Limite (LEM), enquanto as análises probabilísticas são realizadas por meio do Método de confiabilidade de primeira ordem (FORM) e do modelo Caos Polinomial-Kriging Adaptativo (A-PCK). O método é aplicado a um talude em Belo Horizonte, Brasil, com base em 33 anos de dados climáticos, com foco no período crítico de 150 dias caracterizado por intensas variações climáticas e do nível freático. A partir das abordagens determinística, RV e RF, propõe-se uma tabela de critérios de níveis de estabilidade para apoiar o monitoramento e a modelagem de taludes em condições climáticas dinâmicas.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de confiabilidade; talude de solo; clima; modelo substituto; aprendizagem ativa.

ABSTRACT: Climate-related factors such as rainfall, relative humidity, evapotranspiration, and temperature directly influence the stability of earth slopes, potentially posing risks to infrastructure and public safety. This study proposes a probabilistic framework to evaluate slope stability under climatic influences. The methodology is structured in five steps: problem definition, numerical model development, deterministic analysis, and two probabilistic stages considering random variables (RVs) and random fields (RFs). Deterministic analyses are performed using the Finite Element Method (FEM) and the Limit Equilibrium Method (LEM), while probabilistic assessments apply reliability techniques such as the First-Order Reliability Method (FORM) and the Adaptive Polynomial Chaos-Kriging (A-PCK) model. The framework is applied to an earth slope in Belo Horizonte, Brazil, using 33 years of climate data, focusing on a critical 150-day period characterized by strong climatic and groundwater fluctuations. Based on deterministic, RV, and RF approaches, a stability level criteria table is proposed to support slope monitoring and modeling under dynamic climate conditions.

KEYWORDS: Reliability analysis; earth slope; climate; surrogate model; active learning.

1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento populacional em regiões tropicais tem impulsionado a expansão urbana desordenada para áreas montanhosas e de maior risco geotécnico (Li et al., 2018; Yan et al., 2015). Esse processo aumenta a impermeabilização do solo, reduz a capacidade de drenagem natural e eleva a probabilidade de instabilidade de taludes, gerando riscos significativos para a infraestrutura e para a segurança pública. Eventos climáticos extremos, como chuvas intensas e períodos prolongados de seca, têm se tornado mais frequentes e imprevisíveis devido às mudanças climáticas, intensificando ainda mais esses desafios (Nunes et al., 2022). Em países tropicais e subtropicais, incluindo Brasil, China e Singapura, deslizamentos de terra induzidos por precipitação representam uma ameaça recorrente, afetando áreas urbanas e rurais (Albino et al., 2020; A. T. Siacara, Napa-García, et al., 2024).

Embora a precipitação seja tradicionalmente considerada nas análises de estabilidade, outras variáveis climáticas, como umidade relativa, evapotranspiração e temperatura, também podem impactar significativamente o comportamento hidrogeotécnico dos taludes. Essas variáveis afetam o nível do lençol freático e a pressão intersticial da água no solo, aumentando o risco de falha mesmo em taludes projetados de acordo com normas vigentes. Entretanto, análises convencionais geralmente desconsideram essas influências, resultando em avaliações incompletas ou conservadoras da segurança do talude.

Métodos determinísticos, baseados no cálculo do fator de segurança, são amplamente utilizados na engenharia geotécnica , mas apresentam limitações quando se trata de incertezas nos parâmetros do solo e na variabilidade climática (Duncan et al., 2014; Li et al., 2018). Nesse contexto, abordagens probabilísticas oferecem uma alternativa mais robusta, permitindo a modelagem de variabilidade por meio de variáveis aleatórias e campos aleatórios. Essas técnicas possibilitam estimar a probabilidade de falha e fornecer uma avaliação mais realista da confiabilidade do talude, apoiando decisões baseadas em risco e estratégias de monitoramento adaptativo (Guo et al., 2021; Lu et al., 2025; A. T. Siacara, Beck, et al., 2024).

Este estudo propõe um arcabouço probabilístico para a avaliação da estabilidade de taludes sob condições climáticas variáveis, combinando análises determinísticas e probabilísticas. A metodologia inclui a definição do problema, o desenvolvimento de modelos numéricos, análises determinísticas e avaliações probabilísticas considerando variáveis aleatórias e campos aleatórios. O framework é aplicado a um talude em Belo Horizonte, Brasil, considerando precipitação, umidade relativa, evapotranspiração, temperatura e incertezas geotécnicas relevantes. Os resultados permitem uma compreensão mais abrangente do comportamento do talude sob influências climáticas e fornecem subsídios para estratégias de monitoramento, planejamento e gestão de riscos (Adrian Torrico Siacara et al., 2026).

2 FUNDAMENTO TEORICO

2.1 Modelo Numérico

Para avaliar a influência climática na infiltração de solos não saturados, foram realizadas simulações usando o Seep/W (GeoStudio, 2024a), baseadas na equação de Richards (Richards, 1931) e nas equações de van Genuchten (Van Genuchten, 1980). A sucção do solo, que aumenta a resistência ao cisalhamento (Vanapalli et al., 1996), foi considerada no cálculo da estabilidade do talude utilizando o software Slope/W (GeoStudio, 2024b). A interação solo-atmosfera incluiu precipitação, escoamento e evaporação real, simulada pelo modelo de Wilson et al. (Wilson et al., 1997), limitada pela disponibilidade de água no solo. Esse modelo permite analisar de forma integrada os efeitos de variáveis climáticas sobre o fluxo de água e a estabilidade do solo (Albino et al., 2020; Nunes et al., 2022; Wilson et al., 1997).

2.2 Modelagem de Incerteza com Variáveis Aleatórias (RV) e Campos Aleatórios (RF)

Na engenharia geotécnica, incertezas das propriedades do solo podem ser tratadas por variáveis aleatórias (RV), assumindo homogeneidade espacial, ou por campos aleatórios (RF), que capturam a variabilidade espacial. RFs são discretizados em RVs independentes usando a Expansão de Karhunen–Loève (KLE) e podem ser transformados em distribuições lognormais. Essa abordagem permite avaliar de forma mais realista a confiabilidade de taludes em solos heterogêneos (A. T. Siacara et al., 2022; A. T. Siacara, Guo, et al., 2024).

2.3 Análise de Confiabilidade

A análise de confiabilidade estima a probabilidade de falha P_f de um sistema considerando incertezas, usando métodos como FORM e SS. O modelo Caos Polinomial-Kriging Adaptativo (A-PCK) combina PCK com aprendizado ativo, permitindo estimar P_f de forma eficiente. O modelo é iterativamente atualizado selecionando novos pontos próximos à superfície de falha e interrompendo quando P_f se estabiliza, oferecendo precisão e economia computacional em problemas geotécnicos. Para detalhes e formulações matemáticas é necessária a consulta em bibliografia especializada (Beck, 2019; Melchers & Beck, 2018).

3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

3.1 Geometria do Problema e Variáveis Consideradas

As análises consideraram dados climáticos de Belo Horizonte, Brasil, região subtropical úmida, abrangendo 33 anos (1990–2022) de precipitação diária, umidade relativa, evapotranspiração e temperatura (INMET, 2025). Foram destacados anos extremos, como 2019 (seco) e 2020 (extremamente úmido), e um período crítico de 150 dias na transição entre esses anos foi selecionado para capturar os efeitos de variações climáticas extremas. As condições climáticas são apresentadas na Figura 1 (b).

O talude investigado possui 20 m de altura, inclinação de 26,57° (2H:1V), dividido em dois segmentos de 10 m separados por um berma de 3 m e com distância horizontal de 17 m até a infraestrutura adjacente. O nível do lençol freático varia durante o período crítico, refletindo as mudanças climáticas, com condições de drenagem superficial mantidas na análise. O talude é ilustrado na Figura 1 (a).

Este estudo incorpora as incertezas de oito parâmetros de entrada relacionados ao talude em uma análise de confiabilidade. Esses parâmetros incluem cinco propriedades relacionadas ao escoamento de água e três parâmetros relacionados à estabilidade. Especificamente, eles são: dois parâmetros de ajuste de Van Genuchten da curva de retenção de água do solo (a, n), os conteúdos volumétricos de água saturado e residual (θ_s e θ_r), o parâmetro de condutividade hidráulica saturada (k_s), o peso específico do solo (γ), a coesão efetiva do solo (c') e o ângulo de atrito efetivo do solo (ϕ'). Todos são tratados como variáveis aleatórias (RVs) com distribuições lognormal ou uniforme, com média, coeficiente de variação e limites baseados na literatura. Uma correlação negativa de $\rho_{c'-\phi'} =$ -0.5 é adotada entre c' e o ϕ' (Javankhoshdel & Bathurst, 2015; Sivakumar Babu & Srivastava, 2007). As propriedades são apresentadas na Tabela 1.

Todos os oito parâmetros são tratados como variáveis aleatórias (RVs) e assumidos como seguindo uma distribuição lognormal (LN) ou uniforme (U). A escolha dessas distribuições ajuda a evitar valores fisicamente irreais para as propriedades geotécnicas. Os valores médios (μ), os coeficientes de variação (COV) e os valores mínimos e máximos dessas RVs estão apresentados na Tabela 1, sendo obtidos a partir da literatura relevante (Guo et al., 2019; A.T. Siacara, Napa-García, et al., 2020). Para o modelo de campos aleatórios (RF), apenas os parâmetros mais influentes identificados na análise de sensibilidade são tratados como RFs. A variabilidade espacial é representada por comprimentos de autocorrelação horizontal de 40 m e vertical de 2 m. As curvas resultantes de conteúdo volumétrico de água e condutividade hidráulica mostram a influência da variabilidade dos parâmetros do solo.

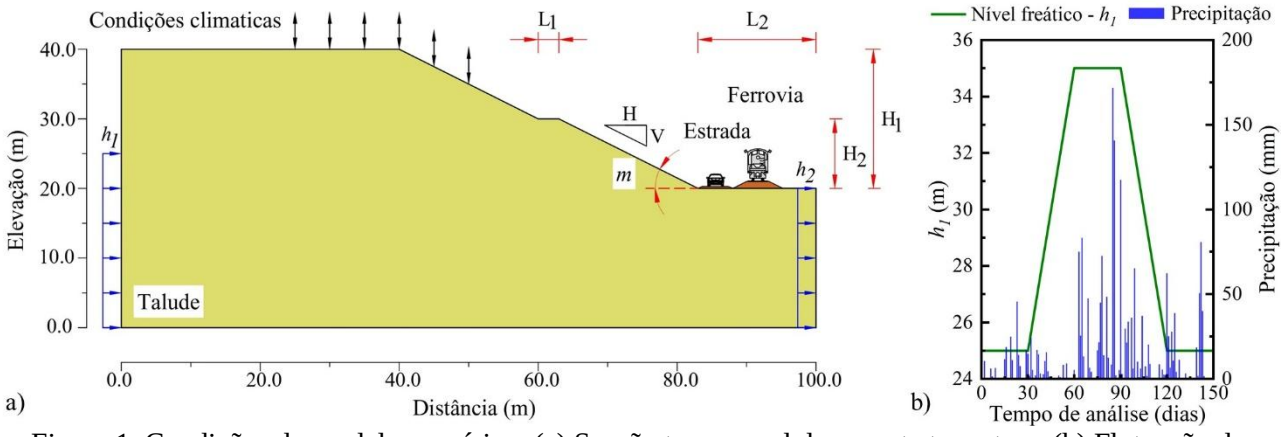


Figura 1. Condições do modelo numérico: (a) Secção transversal da encosta terrestre e (b) Flutuação da superfície da água subterrânea.

Tabela 1. Propriedades de Entrada dos Materiais.

Material	Parâmetro	Média (μ)	COV (%)	Distribuição (PD)	Valor Mínimo	Valor Máximo
Fluxo	k_s (m/s)	$5{,}63 \times 10^{-5}$	100	*LN*	–	–
	θ_s (m³/m³)	0,54	–	*U*	0,45	0,63
	θ_r (m³/m³)	0,17	–	*U*	0,09	0,26
	a (kPa)	8,06	–	*U*	1,61	14,51
	n	1,76	–	*U*	1,32	2,20
Estabilidade	c' (kPa)	8,0	50	*LN*	–	–
	ϕ' (°)	28,0	30	*LN*	–	–
	γ (kN/m³)	18,0	11	*LN*	–	–

3.2 Desarrolho do Modelo Numérico

O modelo numérico foi desenvolvido utilizando o Método dos Elementos Finitos (FEM) no software SEEP/W para o fluxo de água e o Método do Equilíbrio Limite (LEM) no software SLOPE/W para a estabilidade do talude, considerando três abordagens: determinística, RV e RF. O domínio foi discretizado com malha triangular, refinada em regiões críticas, e a análise começou com um escoamento estacionário para determinar a pressão de poros inicial. Em seguida, realizou-se escoamento transitório ao longo de 150 dias, considerando variações climáticas diárias, e a estabilidade do talude foi avaliada a cada passo de tempo usando o método de Morgenstern e Price, determinando a superfície crítica e o fator de segurança (FoS).

4 RESULTADOS

4.1 Resultados Determinísticos

A estabilidade do talude foi avaliada considerando FoSs sob condições transientes, focando em variações climáticas. Valores determinísticos recomendados para este modo de falha foram adotados da literatura (ABNT-NBR 11682, 2016; Duncan et al., 2014; FHWA, 2006). Ao longo da simulação, o FoS variou entre 1,26 e 1,55, indicando condições estáveis, com o FoS crítico FoS_{cr} =1,26 em tempo critico $t_{cr} = 87$ dias. As superfícies de deslizamento crítica apresentam pequenas variações ao longo do tempo, corroborando estudos anteriores (A. T. Siacara, Napa-García, et al., 2024; A.T. Siacara, Beck, et al., 2020), que mostram que oscilações moderadas de poropressão (PWP) pouco alteram as superfícies, mas grandes oscilações, como em escoamentos rápidos, podem provocar mudanças significativas. A análise evidencia forte correlação entre FoS, PWP e precipitação, destacando a influência das condições climáticas no comportamento do talude, conforme ilustrado na Figura 2.

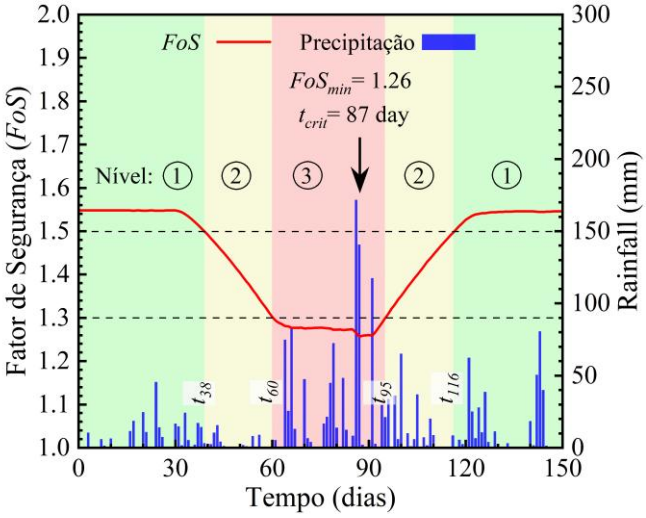


Figura 2. Resultados determinísticos.

4.2 Resultados RV

O estudo considera o escorregamento do talude como o principal modo de falha, com a função de desempenho definida como $g(\boldsymbol{X}) = FoS - 1.0$. Nesse critério, o talude falha quando o FoS é menor que 1, permitindo quantificar probabilisticamente a confiabilidade do sistema sob condições incertas.

A análise de confiabilidade foi realizada usando FORM e A-PCK/SS, considerando as variáveis como RVs. No método A-PCK/SS, o modelo substituto PCK foi utilizado, o método SS para estimar a P_f, a função de aprendizado baseada no número de desvio U, e critério de parada baseado na estabilidade de P_f. A análise foi conduzida ao longo do período transitório de 150 dias com passo diário ($\Delta t = 1$ dia).

Os resultados mostram que o A-PCK/SS é mais eficiente, requerendo menos de 50 chamadas ao modelo numérico, com COV de P_f abaixo de 3%. O β segue a mesma tendência do FoS, permitindo definir níveis probabilísticos de estabilidade:

- Nível 1 – Aceitável ($\beta \geq 1{,}5$): condições seguras, monitoramento padrão;
- Nível 2 – Atenção ($1{,}0 < \beta < 1{,}5$): condição potencialmente instável, requer atenção;
- Nível 3 – Crítico ($\beta \leq 1{,}0$): situação crítica, recomenda-se abordagem com RF para capturar variabilidade espacial do solo.

Esses níveis foram aplicados ao talude estudado, evidenciando períodos críticos e períodos seguros ao longo do intervalo de análise, Figura 3.

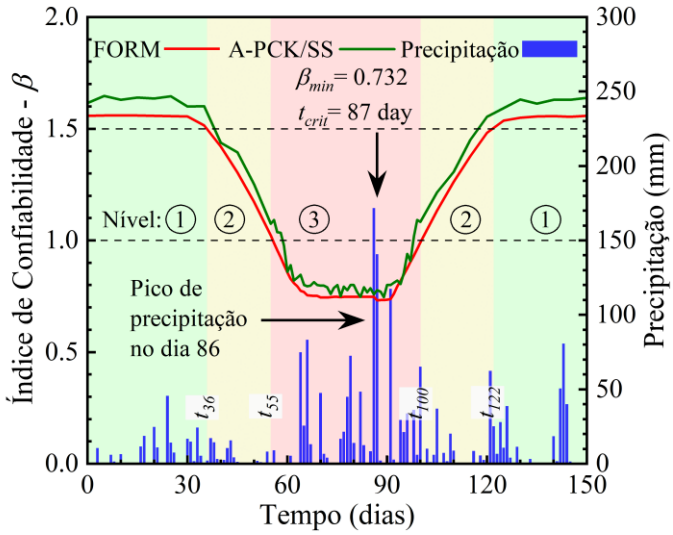


Figura 3. Resultados RV do método FORM e A-PCK/SS.

4.3 Resultados RF

Neste passo, a confiabilidade do talude foi avaliada incorporando a variabilidade espacial do solo por meio do método RF combinado com A-PCK/SS, enquanto os demais parâmetros foram tratados como RVs. Três variáveis críticas—c', ϕ' e k_s—foram modeladas como campos aleatórios, capturando a variação espacial ao longo do talude e ao longo do período crítico de 150 dias. Apesar do aumento no custo computacional e no número de avaliações da função de desempenho ($N_{call} < 190$), a análise apresentou COV do P_f inferior a 5%, mostrando robustez nos resultados. Comparado ao método RV, o RF forneceu índices de confiabilidade β mais altos (ou probabilidades de falha menores), sugerindo que considerar a variabilidade espacial reduz o conservadorismo típico dos modelos RV e permite avaliações mais realistas. As avaliações de segurança do talude em termos probabilísticos de RF são apresentadas na Figura 4. O processo de aprendizado ativo exigiu mais amostras de treinamento para atingir o critério de parada, refletindo a complexidade adicional do modelo RF, mas resultando em uma avaliação mais precisa da confiabilidade do talude sob efeitos climáticos.

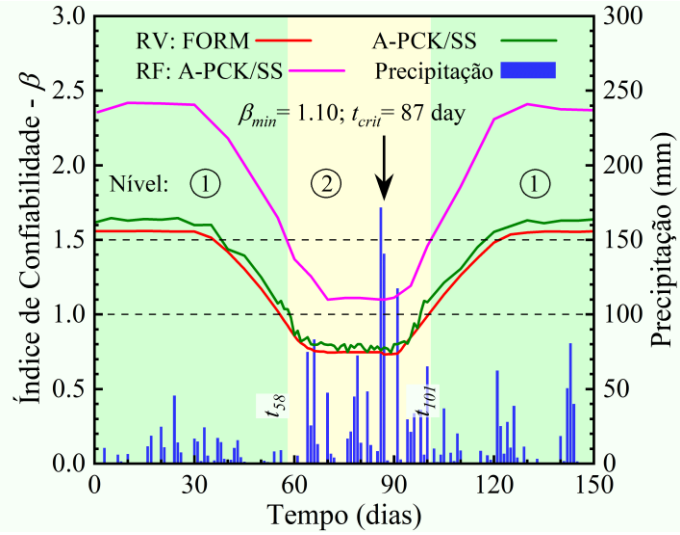


Figura 4. Resultados RF do método A-PCK/SS.

4 CONCLUSÕES

O estudo propõe uma metodologia probabilística integrada para avaliar a estabilidade de taludes sob diferentes condições climáticas (chuva, umidade, temperatura e evapotranspiração), combinando análises determinísticas e probabilísticas com variáveis e campos aleatórios, além dos métodos de confiabilidade de primeira ordem (FORM) e modelo Caos Polinomial-Kriging Adaptativo (A-PCK) combinado com a Simulação de Subconjunto (SS). A abordagem é estruturada em cinco etapas, incluindo modelagem numérica e análise de confiabilidade.

A aplicação foi realizada em um talude em Belo Horizonte, com base em 33 anos de dados climáticos e foco em um período crítico de 150 dias. Os resultados determinísticos indicaram estabilidade geral, com fator de segurança (FoS) entre 1,26 e 1,55, sendo o dia 87 o mais crítico devido a chuvas intensas e variações do nível do lençol freático. A primeira avaliação é realizada e são observados os tempos críticos.

Na análise probabilística em termos de Variáveis Aleatórias (RV), os principais parâmetros de influência foram o ângulo de atrito efetivo do solo (ϕ'), a coesão efetiva do solo (c') e a condutividade hidráulica saturada (k_s). Nesta etapa novamente é avaliado o talude e é determinado os tempos críticos. Na etapa das análises probabilísticas por Campos Aleatórios (RF), a modelagem do solo é mais realista e os resultados são menos conservadores. Nesta etapa é atualizada a avaliação da estrutura deixando-a sem estados críticos e no estado aceitável e de atenção. Em conjunto, todos os métodos confirmaram o mesmo período crítico, demonstrando a eficácia da abordagem integrada para avaliação de risco em taludes sob condições climáticas variáveis.

AGRADECIMENTOS

O segundo autor agradece o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP; Processo nº 2023/06123-9).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT-NBR 11682. (2016). *Slope stability (in Portuguese)*. Brazilian Association of Technical Standards (ABNT).

Albino, U. R., Portelinha, F. H. M., & Futai, M. M. (2020). Numerical simulation of a geotextile soil wall considering soil-atmosphere interaction. *Geosynthetics International*, 27(4), 394–413. https://doi.org/10.1680/jgein.20.00003

Beck, A. T. (2019). *Reliability and safety of structures (in portuguese)*. Elsevier Editora Ltda.

Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability* (2nd Editio). John Wiley & Sons Ltd.

FHWA. (2006). Soils and Foundations. Reference Manual – Volume I. National Highway Institute. *Washington DC, USA*.

GeoStudio. (2024a). Heat and Mass Transfer Modeling with GeoStudio (GEO-SLOPE). *GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, AB, Canada T2P*. http://downloads.geo-slope.com/geostudioresources/books/10/0/Heat and Mass Transfer Modeling.pdf

GeoStudio. (2024b). Stability Modeling with GeoStudio (GEO-SLOPE). *GEO-SLOPE International Ltd, Calgary, AB, Canada T2P 0T8*. https://downloads.geo-slope.com/geostudioresources/8/0/6/books/slope modeling.pdf?v=8.0.7.6129

Guo, X., Dias, D., Carvajal, C., Peyras, L., & Breul, P. (2019). A comparative study of different reliability methods for high dimensional stochastic problems related to earth dam stability analyses. *Engineering Structures*, 188(March), 591–602. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.056

Guo, X., Dias, D., Carvajal, C., Peyras, L., & Breul, P. (2021). Modelling and comparison of different types of random fields: case of a real earth dam. *Engineering with Computers*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s00366-021-01495-4

INMET. (2025). *Climatic Measurements in Brazil (in portuguese)*. National Institute of Meteorology (INMET), Ministry of Agriculture, Livestock and Supply. Retrieved in March 24, 2025 from www.inmet.gov.br

Javankhoshdel, S., & Bathurst, R. (2015). Influence of cross-correlation between soil parameters on probability of failure of simple cohesive and c- φ slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 6000(November), 1–44. https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0109

Li, Z., Ye, W., Marence, M., & Bricker, J. (2018). Unsteady Seepage Behavior of an Earthfill Dam During Drought-Flood Cycles. *Geosciences*, 9(1), 17. https://doi.org/10.3390/geosciences9010017

Lu, M., Tao, Y., Ma, X., Sharma, A., & Zhang, J. (2025). Probabilistic framework for resilience assessment of soil slopes against rainfall infiltration. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(7), 349. https://doi.org/10.1007/s10064-025-04367-z

Melchers, E. M., & Beck, A. T. (2018). *Structural Reliability Analysis and Prediction* (R. E. Melchers & A. T. Beck (eds.); 3er Editio). John Wiley & Sons Ltd. https://doi.org/10.1002/9781119266105

Nunes, G. B., Portelinha, F. H. M., Futai, M. M., & Yoo, C. (2022). Numerical study of the impact of climate conditions on stability of geocomposite and geogrid reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(4), 807–824. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.04.004

Richards, L. a. (1931). Capillary conduction of Liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318–333. https://doi.org/10.1063/1.1745010

Siacara, A. T., Beck, A. T., & Ji, J. (2024). Impact of Random Field Simulations on FEM-Based Earth Slope Reliability. *Geotechnical and Geological Engineering*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s10706-024-02956-5

Siacara, A. T., Guo, X., & Beck, A. T. (2024). Probabilistic analysis of shallow foundation on earth slope using an active learning surrogate-centered procedure. *Computers and Geotechnics*, 175(May), 106659. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106659

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(4). https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42452-022-04980-7

Siacara, A. T., Napa-García, G. F., Beck, A. T., & Futai, M. M. (2024). Reliability Analysis of an Earth Dam Under Rainfall Effects. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10(3), 59.

https://doi.org/10.1007/s40891-024-00571-1

Siacara, A.T., Beck, A. T., & Futai, M. M. (2020). Reliability analysis of rapid drawdown of an earth dam using direct coupling. *Computers and Geotechnics*, 118(September 2019), 103336. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103336

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*, 12(2), 366–380. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.012

Siacara, Adrian Torrico, Guo, X., & Beck, A. T. (2026). Climate-impacted reliability analysis of earth slopes with spatially variable soils using active learning surrogate modeling. *Computers and Geotechnics*, 195(December 2025), 108074. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2026.108074

Sivakumar Babu, G. L., & Srivastava, A. (2007). Reliability analysis of allowable pressure on shallow foundation using response surface method. *Computers and Geotechnics*, 34(3), 187–194. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.11.002

Van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., & Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(3), 379–392. https://doi.org/10.1139/t96-060

Wilson, G. W., Fredlund, D. G., & Barbour, S. L. (1997). The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(1), 145–155. https://doi.org/10.1139/t96-078

Yan, D., Werners, S. E., Ludwig, F., & Huang, H. Q. (2015). Hydrological response to climate change: The Pearl River, China under different RCP scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4(PB), 228–245. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.006